

**PERBAIKAN KESTABILAN DENGAN METODE
PENJADWALAN PEMBANGKIT TERINTEGRASI PLTB
BERDASARKAN MOMEN INERSIA**

Disusun dan diajukan oleh

FITRIANI

D032182007



TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK/SEKOLAH PASCASARJANA

UNIVERSITAS HASANUDDIN MAKASSAR

2022

**PERBAIKAN KESTABILAN DENGAN METODE PENJADWALAN
PEMBANGKIT TERINTEGRASI PLTB BERDASARKAN MOMEN
INERSIA**

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi
Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

FITRIANI
D032182007

Kepada

**TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK/SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

PERBAIKAN KESTABILAN DENGAN METODE PENJADWALAN
PEMBANGKIT TERINTEGRASI PLTB BERDASARKAN MOMEN
INERSIA

Disusun dan diajukan oleh

FITRIANI

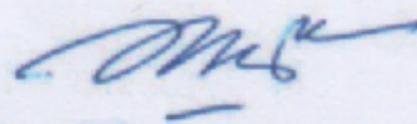
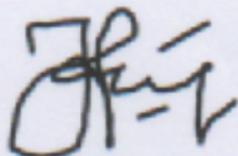
D032182007

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam
rangka Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik
Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 02 Februari
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T.
Nip. 19731118 199803 2 001

Prof. Dr. Ir. H. Ansar Suyuti, M.T., IPU
Nip. 19671231 199202 1 001

Ketua Program Studi,

Dekan Fakultas Teknik,



Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng. IPU
Nip. 19740530 199903 1 003



Prof. Dr. Ir. Muh. Arsyad Thaha, M.T.
Nip. 19601231 198609 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Fitriani
NIM : D032182007
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 04 Februari 2022

Yang menyatakan,



Fitriani

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas hikmat, berkah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tesis dengan judul “Perbaikan Kestabilan dengan Metode Penjadwalan Pembangkit Terintegrasi PLTB Berdasarkan Momen Inersia” sebagai salah satu syarat dalam menyelesaikan jenjang pendidikan Pascasarjana pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini dapat diselesaikan bukan tanpa hambatan. Ada banyak hambatan serta masalah yang dilalui oleh penulis dalam proses penyelesaiannya. Namun berkat bantuan serta dukungan dari berbagai pihak, akhirnya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Untuk itu, dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Kedua Orang Tua penulis, Ayahanda Sultan dan Ibunda Nurmiati sebagai sumber kekuatan utama dalam perjuangan penulis menyelesaikan tesis ini.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro.
3. Bapak Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T. dan Prof. Dr. Ir. H. Ansar Suyuti, M.T. selaku pembimbing yang senantiasa memberikan saran,

nasehat, dan solusi terhadap masalah-masalah yang dihadapi selama penelitian.

4. Seluruh dosen pengajar Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin yang telah meberikan ilmunya kepada penulis.
5. Seluruh staff tata usaha Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin atas bantuannya selama penulis menjalankan studi hingga menyelesaikan tesis ini.
6. Rekan-rekan S-2 Teknik Elektro angkatan 2018 yang selalu kompak
7. Teman-Teman Lab Riset Relay dan Pengukuran atas segala dukungannya yang sama-sama berjuang untuk menyelesaikan studi.

Semoga Tuhan melimpahkan rahmat dan berkat serta membalas kebaikan kepada semua pihak yang telah membantu dimana penulis tidak dapat menyebutkannya satu per satu. Semoga tesis yang masih jauh dari sempurna ini dapat bermanfaat dan dapat menambah pengetahuan bagi semua pihak yang membutuhkan.

Makassar, 18 Februari 2022

Fitriani

ABSTRAK

FITRIANI. Perbaikan Kestabilan dengan Metode Penjadwalan Pembangkit Terintegrasi PLTB Berdasarkan Momen Inersia. (Dibimbing oleh Indar Chaerah Gunadin dan Ansar Suyuti).

Analisis mengenai kestabilan transien sistem tenaga listrik memegang peranan yang sangat penting dalam menjamin keamanan dan keberlangsungan operasional suatu sistem tenaga listrik. Stabilitas suatu sistem merupakan kemampuannya untuk kembali ke operasi normal atau stabil setelah mengalami beberapa bentuk gangguan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan kestabilan suatu sistem agar sistem lebih tahan terhadap gangguan dengan melihat nilai *critical clearing time* (CCT). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Metode penjadwalan ulang berdasarkan momen inersia dengan menggunakan software MATLAB Tools PSAT 2.1.10. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai CCT tercepat adalah pada simulasi gangguan Tallasa-Jeneponto dengan nilai CCT sebelum penjadwalan ulang adalah 0.4045 detik dan setelah penjadwalan ulang nilai CCTnya meningkat menjadi 0.4046 detik. Sedangkan CCT terpanjang adalah pada simulasi gangguan Tanjung Bunga-Bontoala dengan nilai CCT sebelum penjadwalan ulang adalah 0.27 detik dan setelah penjadwalan ulang nilai CCTnya adalah 0.288 detik. Ini menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode penjadwalan berdasarkan nilai indeks H didapatkan nilai *critical clearing time* (CCT) menjadi lebih stabil, sehingga sistem lebih tahan terhadap gangguan. Ini berarti bahwa metode yang diusulkan dapat meningkatkan stabilitas transien sistem.

Kata Kunci: Kestabilan transien, penjadwalan generator, *critical clearing time*, momen inersia

ABSTRACT

FITRIANI. Stability Improvement with PLTB Integrated Power Generation Scheduling Method Based on Moment of Inertia. (Guided by Indar Chaerah Gunadin and Ansar Suyuti).

Analysis of the transient stability of the electric power system plays a very important role in ensuring the safety and operational sustainability of an electric power system. The stability of a system is its ability to return to normal or stable operation after experiencing some form of disturbance. The purpose of this study is to increase the stability of a system so that the system is more resistant to disturbances by looking at the critical clearing time (CCT). The method used in this research is the rescheduling method based on the moment of inertia using MATLAB Tools PSAT 2.1.10 software. The simulation results show that the fastest CCT value is in the Tallasa-Jenepono fault simulation with the CCT value before rescheduling is 0.4045 seconds and after rescheduling the CCT value increases to 0.4046 seconds. While the longest CCT is in the simulation of the Tanjung Bunga-Bontoala disturbance with the CCT value before rescheduling is 0.27 seconds and after rescheduling the CCT value is 0.288 seconds. This shows that by using the scheduling method based on the H index value, the critical clearing time (CCT) value becomes more stable, so the system is more resistant to disturbances. This means that the proposed method can improve the transient stability of the system.

Key words: Transient stability, generator scheduling, critical clearing time, a moment of inertia

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	5
C. Tujuan Penelitian	5
D. Manfaat Penelitian.....	5
E. Batasan Masalah	6
F. Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
A. Sistem Tenaga Listrik.....	8
B. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	11
C. Penjadwalan Sistem (<i>System Rescheduling</i>).....	19
D. Persamaan Ayunan (<i>Swing Equation</i>).....	20
E. <i>Critical Clearing Time</i> (CCT)	25
F. Studi Aliran Daya	26
G. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)	28
H. <i>State Of The Art</i>	29

I. Kerangka Pikir	33
BAB III METODE PENELITIAN	34
A. Waktu Dan Lokasi Penelitian	34
B. Teknik Pengumpulan Data	34
C. Perancangan Penelitian	34
D. Teknik Analisis Data.....	35
E. Flowchart Program	36
F. Teknik Validasi Data.....	37
G. Teknik Analisis Validasi Data	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
A. Sistem Interkoneksi.....	39
B. Hasil Simulasi Aliran Daya	52
C. Pengaruh Kestabilan Sudut Rotor pada Sistem Kelistrikan Sulselrabar Sebelum dan Setelah Injeksi PLTB	59
D. Pengaruh Penjadwalan Ulang Pembangkit Berdasarkan Momen Inersia pada Sistem Kelistrikan Sulselrabar	82
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	95
A. Kesimpulan	95
B. Saran.....	96
DAFTAR PUSTAKA.....	97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem tenaga listrik [8].....	8
Gambar 2.2 Klasifikasi kestabilan sistem tenaga [10].....	11
Gambar 2.3 Representasi suatu rotor mesin yang membandingkan arah putaran serta momen putar mekanis dan elektris untuk (a) generator dan (b) motor	22
Gambar 2.4 Karakteristik input-output pembangkit tenaga angin [17]	29
Gambar 2.5 Kerangka pikir penelitian.....	33
Gambar 3.1 Flowchart Program.....	36
Gambar 3.2 Sistem WSCC-9 Bus.....	37
Gambar 4.1 Single line diagram sistem kelistrikan Sulselrabar dalam kondisi normal.....	51
Gambar 4.2 Block parameter slack bus.....	53
Gambar 4.3 Block parameter PV	53
Gambar 4.4 Block parameter transformator	54
Gambar 4.5 Block parameter saluran.....	54
Gambar 4.6 Block parameter beban.....	55
Gambar 4.7 Blok parameter AVR.....	60
Gambar 4.8 Blok parameter fault.....	60
Gambar 4.9 Grafik Sudut Rotor Ketika PLTB Sidrap & Tolo Belum Terintegrasi.....	61
Gambar 4.10 Grafik sudut rotor ketika PLTB Sidrap telah terintegrasi	64
Gambar 4.11 Grafik Sudut Rotor Ketika PLTB Tolo Telah Terintegrasi...	66
Gambar 4.12 Grafik sudut rotor ketika PLTB Tolo dan Sidrap telah terintegrasi	68
Gambar 4.13 Single line diagram Sulselrabar ketika PLTB Sidrap terintegrasi	71
Gambar 4.14 Single line diagram Sulselrabar ketika PLTB Tolo terintegrasi	72

Gambar 4.15 Single Line Diagram Sulselrabar ketika ke Dua PLTB Terintegrasi.....	73
Gambar 4.16 Grafik sudut rotor ketika terjadi gangguan di saluran transmisi Sungguminasa-Maros.....	75
Gambar 4.17 Grafik sudut rotor ketika terjadi gangguan di saluran transmisi Sungguminasa-Maros (kondisi 1)	75
Gambar 4.18 Grafik sudut rotor ketika terjadi gangguan di saluran transmisi Tanjung Bunga-Bontoala	76
Gambar 4.19 Grafik sudut rotor ketika terjadi gangguan di saluran transmisi Tanjung Bunga-Bontoala (kondisi 3).....	77
Gambar 4.20 Grafik sudut rotor ketika terjadi gangguan di saluran transmisi Tallasa-Jeneponto	78
Gambar 4.21 Grafik sudut rotor ketika terjadi gangguan di saluran transmisi Tallasa-Jeneponto (kondisi 5).....	78
Gambar 4.22 Grafik sudut rotor ketika terjadi gangguan di saluran transmisi Sungguminasa-Maros setelah reschedule.....	83
Gambar 4.23 Grafik sudut rotor ketika terjadi gangguan di saluran transmisi Sungguminasa-Maros setelah reschedule (kondisi 2)	84
Gambar 4.24 Grafik sudut rotor ketika terjadi gangguan di saluran transmisi Tanjung Bunga-Bontoala setelah reschedule	85
Gambar 4.25 Grafik sudut rotor ketika terjadi gangguan di saluran transmisi Tanjung Bunga-Bontoala setelah reschedule (kondisi 4).....	85
Gambar 4.26 Grafik sudut rotor ketika terjadi gangguan di saluran transmisi Tallasa-Jeneponto setelah reschedule	86
Gambar 4.27 Grafik sudut rotor ketika terjadi gangguan di saluran transmisi Tallasa-Jeneponto setelah reschedule (Kondisi 6)	86
Gambar 4.28 Ketika terjadi gangguan pada saluran transmisi Sungguminasa-Maros.....	92
Gambar 4.29 Ketika terjadi gangguan pada saluran transmisi Tallasa-Jeneponto	93

Gambar 4.30 Ketika Terjadi Gangguan Pada Saluran Transmisi Tanjung
Bunga-Bontoala 94

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Standar waktu pemutusan	26
Tabel 2.2 State of the Art Penelitian	30
Tabel 3.1 Parameter sistem WSCC-9.....	37
Tabel 3.2 Hasil Simulasi Nilai CCT WSCC-9 Bus.....	38
Tabel 4.1 Data penomoran dan jenis bus sistem Sulselrabar.....	42
Tabel 4.2 Data pembangkitan sistem Sulselrabar.....	44
Tabel 4.3 Data beban trafo sistem Sulselrabar	45
Tabel 4.4 Data saluran transmisi sistem Sulselrabar	47
Tabel 4.5 Momen inersia pembangkit.....	49
Tabel 4.6 Profil Tegangan Bus Sistem Sulselrabar Sebelum dan Setelah Integrasi PLTB.....	56
Tabel 4.7 Total Losses Sistem Sulselrabar Sebelum dan Setelah Integrasi PLTB	59
Tabel 4.8 Nilai Sudut Rotor Ketika PLTB belum terintegrasi pada sistem	62
Tabel 4.9 Nilai sudut rotor ketika PLTB Sidrap terintegrasi.....	64
Tabel 4.10 Nilai Sudut Rotor Ketika PLTB Tolo Telah Terintegrasi	66
Tabel 4.11 Nilai sudut rotor ketika ke dua PLTB telah terintegrasi.....	68
Tabel 4.12 Nilai Sudut Rotor Ketika Terjadi Gangguan di Saluran Transmisi	79
Tabel 4.13 Nilai Sudut Rotor Setelah Penjadwalan Ulang Daya Berdasarkan Momen Inersia.....	87
Tabel 4.14 Aliran Daya Sistem Sulselrabar Sebelum dan Setelah Reschedule	87
Tabel 4.15 Hasil Penjadwalan Ulang Daya Berdasarkan Nilai Momen Inersia	90
Tabel 4.16 Perbandingan nilai Critical Clearing Time (CCT)	91

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Saat ini, untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik yang meningkat maka diperlukan infrastruktur pembangkit listrik yang memadai dan mengacu pada prinsip ekonomi. Dalam arti yang lain, pembangkit harus memenuhi daya yang dibutuhkan konsumen. Ketika sistem tenaga terinterkoneksi SULSELRABAR mengambil peranan untuk meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik maka fasilitas pendukung sistem tenaga listrik dituntut beroperasi dalam kondisi optimal, sebab hal tersebut berpengaruh pada kestabilan saat beroperasi [1].

Saat ini, sistem tenaga menjadi sangat tertekan karena meningkatnya pemuatan saluran transmisi. Masalah-masalah ini menyebabkan masalah kestabilan *steady state* dalam sistem. Ada banyak insiden dalam sistem tenaga yang didiagnosis sebagai masalah kestabilan *steady state* yang disebabkan oleh peningkatan pemuatan dan penurunan margin kestabilan. Margin kestabilan dapat didefinisikan sebagai jarak antara pemuatan sistem dan batas pemuatan maksimum sistem [2].

Kestabilan sistem tenaga listrik baru dikenali pada tahun 1920 didefinisikan sebagai sifat dari sistem tenaga listrik yang tetap berada di kondisi setimbang setelah mengalami gangguan [1]. Gangguan besar seperti putus saluran transmisi maupun lepasnya pembangkit dan beban

yang besar dapat menimbulkan gangguan kestabilan khususnya gangguan kestabilan transien.

Dalam sistem tenaga skala besar yang terdiri dari banyak pembangkit listrik dan beban yang saling berhubungan, pengaturan kestabilan sistem merupakan hal yang penting dan rumit. Untuk menjaga sistem daya agar tetap beroperasi terus menerus dan stabil, diperlukan pengaturan kestabilan yang baik. Salah satu parameter kestabilan sistem tenaga adalah kestabilan transien. Kestabilan *transien* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mencapai kondisi yang stabil dari operasi baru yang dapat diterima setelah gangguan besar [3] [4].

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang bersih dan cepat berkembang. Energi angin memiliki ketersediaan yang cukup besar untuk dimanfaatkan dan tidak menghabiskan banyak biaya. Akan tetapi, sifat tidak pasti dari energi angin menimbulkan tantangan dalam hal operasi dan kontrol saat diintegrasikan dengan jaringan yang terlebih dahulu tersedia. Penjadwalan pembangkit umumnya mengalokasikan beban dan dilakukan secara optimal pada pembangkit pembangkit thermal yang ada. Saat sekarang, penjadwalan ekonomis tidak hanya dilakukan terhadap pembangkit termal namun juga mengintegrasikan pembangkit pembangkit energi terbarukan, salah satunya adalah pembangkit listrik tenaga angin.

Kestabilan erat kaitan dengan margin kestabilan *steady state*. Jika telah melebihi batas maksimum transfer daya, menyebabkan osilasi saat beroperasi dan keruntuhan tegangan terjadi. Kebutuhan daya telah berubah setiap beban puncak terjadi pada sore hari. Keseimbangan antara permintaan daya pada generator harus dijaga dengan hati-hati [2].

Kelangsungan layanan harus selalu dijaga agar tidak pernah padam, kestabilan tegangan dan frekuensi harus baik, dan mendekati total harmonisa. Pemadaman listrik berskala besar yang terjadi akibat gangguan besar pada sistem tenaga listrik tidak diinginkan, baik di sisi perusahaan listrik maupun konsumen. Pemadaman listrik skala besar menghasilkan kerugian besar, baik material maupun immaterial. Untuk menghasilkan kualitas daya listrik yang baik, kontrol yang baik dan kestabilan sistem tenaga diperlukan [6].

Permasalahan utama yang terjadi di sistem tenaga adalah operasi sinkron antara tegangan, frekuensi, dan sudut fasa. Operasi ini menyatakan keserempakan kerja mesin–mesin sinkron di jaringan dalam rentang waktu tertentu. Dalam jaringan tenaga listrik sistem interkoneksi merupakan hal yang umum dijumpai karena pemanfaatan interkoneksi di jaringan meningkatkan keandalan dan dapat memperbesar suplai daya yang dihasilkan. Namun, permasalahan yang mungkin muncul pada sistem interkoneksi adalah tidak seimbangya tegangan, frekuensi, dan sudut fasa, sehingga sistem tenaga listrik tidak dapat berjalan serempak atau mengalami ketidakstabilan.

Perubahan kondisi sistem yang seketika, biasanya terjadi akibat adanya gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik, dan pelepasan atau penambahan beban yang benar secara tiba-tiba. Akibat adanya perubahan kondisi kerja dari sistem ini, maka keadaan sistem berubah dari keadaan lama ke keadaan baru. Periode singkat di antara kedua keadaan tersebut disebut periode peralihan atau *transient*. Oleh karena itu diperlukan suatu analisis sistem tenaga listrik untuk menentukan apakah sistem tersebut stabil atau tidak, jika terjadi gangguan. Kestabilan *transient* didasarkan pada kondisi kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dengan periode waktu penyelidikan pada detik pertama terjadi gangguan [7]. Salah satu teknik solusi untuk penjadwalan adalah menggunakan *Power System Analysis Toolbox* (PSAT). PSAT menyediakan berbagai jenis model komponen statis dan dinamik yang semua dapat dijalankan dengan grafik *interface* sehingga memudahkan dalam penggunaannya serta tersedia *simulink* yang memudahkan dalam mendesain jaringan.

Dalam penelitian ini menawarkan metode untuk meningkatkan kestabilan sementara dengan melakukan penjadwalan ulang menggunakan metode indeks H. Penelitian ini bertujuan untuk menguji hubungan antara pembangkit listrik untuk meningkatkan kestabilan sistem. Sistem Sulselrabar digunakan sebagai *test case* dalam penelitian ini.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh kestabilan sudut rotor pada sistem kelistrikan Sulselrabar sebelum dan setelah injeksi PLTB?
2. Bagaimana pengaruh penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan moment inersia pada sistem kelistrikan Sulselrabar?

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini:

1. Mengetahui pengaruh kestabilan sudut rotor pada sistem kelistrikan Sulselrabar sebelum dan setelah injeksi PLTB.
2. Mengetahui pengaruh penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan moment inersia pada sistem kelistrikan Sulselrabar.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian adalah:

1. Memberikan sumbangsih kepada akademis maupun praktisi mengenai kestabilan pembangkit yang terintegrasi dengan pembangkit tenaga angin menggunakan metode momen inersia terbaru yang diaplikasikan pada sistem kelistrikan Sulselrabar.
2. Menjadi literatur dalam hal meningkatkan kestabilan dan keandalan sistem tenaga listrik.
3. Menjadi referensi ilmiah bagi para mahasiswa yang ingin meneliti pada topik serupa.

E. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah penelitian ini :

1. Sistem kelistrikan yang dikaji adalah sistem 150 kV Sulselrabar.
2. Penjadwalan ulang pembangkit yang dilakukan pada simulasi gangguan setelah PLTB Tolo dan Sidrap terintegrasi
3. Pembangkit yang ditinjau adalah pembangkit yang dikelola oleh PT. PLN (Persero).
4. Analisis load flow Dilakukan dengan menggunakan metode Newton Raphson dan dengan bantuan *software* Matlab R.2016a dan *simulink Power system analysis toolbox 2.1.10* yang terintegrasi dengan program Matlab R.2016a.
5. Kestabilan yang dianalisis adalah kestabilan *transient*.

F. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penulisan proposal penelitian ini adalah:

Bab I Pendahuluan

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

Bab II Landasan Teori dan Kerangka Pemikiran

Bab II berisi penjelasan tentang tinjauan pustaka merupakan penjelasan tentang hasil-hasil penelitian lain berkaitan dengan penelitian

dilakukan tentang sumber acuan terbaru dari pustaka primer seperti buku, artikel, jurnal, dan tulisan asli lain untuk mengetahui penelitian relevan dengan usulan penulis terkait dengan judul kestabilan yang terintegrasi dengan tenaga angin menggunakan metode momen inersia. Dalam bab ini juga diuraikan kerangka pikir merupakan penjelasan tentang kerangka berpikir untuk memecahkan masalah sedang diteliti termasuk menguraikan objek penelitian.

Bab III Metodologi Penelitian

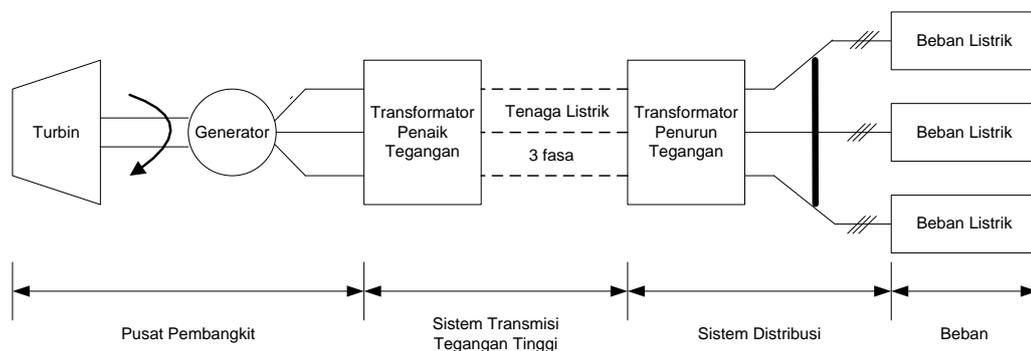
Bab ini berisi penjelasan tentang lokasi dan waktu penelitian, bagaimana metode pengerjaan tesis ini dilakukan serta langkah-langkah pengerjaan yang dilakukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga merupakan serangkaian instalasi listrik yang dioperasikan secara serentak dalam rangka membantu menyediakan tenaga listrik yang dibutuhkan oleh konsumen. Dalam sistem tenaga listrik terdapat unsur-unsur utama. Secara umum unsur-unsur tersebut adalah sistem pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi listrik, serta pemakaian tenaga listrik atau beban. Pada suatu sistem yang cukup besar, tegangan yang dihasilkan generator harus dinaikkan lebih dahulu dari tegangan menengah menjadi tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi. Penyaluran energi listrik melalui jarak yang jauh dilakukan dengan menaikkan tegangan guna memperkecil kerugian yang terjadi, berupa rugi-rugi daya [8]. Pada gambar 2.1. merupakan representasi dari sistem tenaga listrik.



Gambar 2.1 Sistem tenaga listrik [8]

Sistem pembangkit tenaga merupakan sistem yang berfungsi membangkitkan listrik melalui berbagai macam energi alam seperti air, angin, batubara dan lain-lain yang diubah terlebih dahulu menjadi energi mekanik berupa kecepatan atau putaran yang diubah menjadi energi listrik oleh generator [9]. Generator-generator di sistem tenaga listrik Indonesia menggunakan frekuensi 50 *Herzt* (Hz), dengan kapasitas yang beragam dari beberapa ratus kilowatt (kW) sampai ratus MegaWatt (MW).

1. Pembangkitan

salah satu komponen yang utama dalam sistem tenaga listrik adalah generator tiga fasa atau biasa disebut generator sinkron. Generator sinkron memiliki dua medan putar yang berputar bersama-sama. Medan yang satu diproduksi oleh rotor yang berputar pada kecepatan sinkron dan dieksitasi oleh arus searah. Medan yang lain diproduksi oleh gulungan stator oleh karena arus tiga fasa yang mengalir pada jangkar. Sumber dari daya mekanik biasa disebut prime mover, bisa didapat dari turbin hidraulik di air terjun atau bendungan, energi turbin uap berasal dari pembakaran batu bara atau gas, atau turbin gas yang berasal dari mesin bakar. Sekelompok unit pembangkit bisa berbeda metode pembangkitan tergantung jenis bahan bakar yang dipakai. Hal ini menyebabkan harga pembangkitan bisa bervariasi.

2. Transmsisi dan Distribusi

Tujuan dari jaringan transmisi adalah menyalurkan daya listrik dari pembangkit yang terletak pada daerah tertentu menuju sistem distribusi yang menyalurkan langsung ke beban. Sebelum adanya sistem interkoneksi suatu daerah disuplai oleh pembangkit yang ada daerah itu juga. Namun sekarang suatu daerah yang tidak dapat menyediakan pembangkit sendiri maka untuk memenuhi kebutuhan beban maka suplai didapatkan dari pembangkit yang terletak dari daerah lain. Sistem penyaluran daya antar daerah ini disebut sistem interkoneksi. Jika sistem transmisi memiliki basis tegangan tinggi, maka sistem distribusi memiliki basis tegangan menengah dan rendah. Sistem distribusi sendiri berfungsi menghubungkan dari sistem transmisi langsung menuju ke beban. Sistem distribusi memiliki karakteristik jaringan radial dan penyulang tunggal yang berbeda dengan sistem transmisi yang berbentuk *loop* dan biasa memiliki lebih dari satu penyulang.

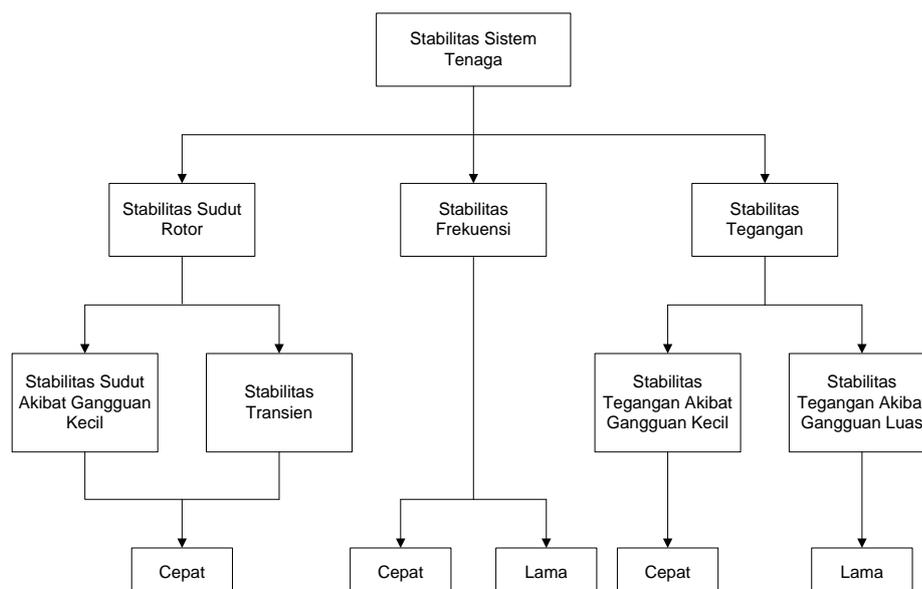
3. Beban

Beban pada sistem tenaga listrik terbagi menjadi beban industry, komersial, dan residensial. Beban industri yang besar dapat disuplai dari sistem transmisi. Sedangkan untuk beban-beban yang kecil dapat dilayani melalui jaringan distribusi. Beban industri berupa beban komposit paling banyak berupa motor. Sedangkan beban komersil dan residensial paling banyak berupa penerangan, pemanas, dan pendingin.

B. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga menunjukkan kemampuan sebuah sistem tenaga listrik, pada kondisi operasi awal yang diberikan, untuk mengembalikan kondisi operasi menjadi seimbang kembali setelah mendapatkan gangguan fisik pada hampir keseluruhan variabel sistem yang saling terikat sehingga integritas sistem dapat tidak terjaga.

Untuk menjaga kestabilan sebuah system, maka perlu diupayakan mesin-mesin sinkron berada pada kondisi sinkronnya. Sistem tenaga listrik eksitasi harus mendukung peningkatan pengendalian tegangan yang efektif bagi kestabilan sistem. Sistem harus mampu merespon dengan cepat terhadap suatu gangguan tingkat kestabilan sementara. Ketidakstabilan terjadi ketika gangguan menyebabkan ketidakseimbangan terus-menerus antara gaya berlawanan tersebut. Kestabilan sistem tenaga dikelompokkan menjadi beberapa jenis seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Klasifikasi kestabilan sistem tenaga [10]

Kestabilan sistem tenaga telah menjadi perhatian utama dalam sebuah sistem operasi. Perhatian itu muncul dari fakta bahwa pada kondisi keadaan mantap (*steady-state*), kecepatan rata-rata untuk semua generator harus sama. Kondisi tersebut dinamakan pada operasi sinkron dari sebuah sistem yang terinterkoneksi.

Gangguan dapat terjadi pada sistem tenaga listrik mengakibatkan terjadi perbedaan arus dan tegangan pada setiap bus, serta perbedaan sudut rotor pada generator yang ada. Pada kondisi normal, sistem tenaga listrik seimbang antara daya *input* mekanis dari *prime mover* dengan daya *output* listrik generator pada sistem. Generator berputar pada kecepatan sinkron, namun ketika gangguan terjadi, timbul perbedaan antara daya *output* listrik terhadap daya *input* mekanis. Jika daya *output* listrik melebihi daya *input* mekanis generator, terbentuk fenomena perlambatan kecepatan putaran rotor atau sebaliknya yang dapat mempengaruhi kerja dari governor. Perbedaan tegangan pada pembangkit dan saluran dalam jaringan sistem mempengaruhi regulator tegangan. Sedangkan perubahan frekuensi pada sistem mempengaruhi beban sesuai dengan karakteristik beban tersebut [1].

Masalah kestabilan yang sering terjadi disini adalah masalah beban lebih, berkurangnya pasokan daya reaktif yang pada akhirnya akan menempatkan sistem pada kondisi voltage collapse dan akan terjadi kemungkinan terburuk yaitu terjadinya blackout.

Gangguan kecil atau besar pada sistem tenaga berdampak pada operasi sinkron. Sebagai contoh, kenaikan atau ketrurunan tiba-tiba pada beban, atau akibat rugi pembangkitan menjadi salah satu jenis gangguan yang berpengaruh sangat signifikan terhadap sistem. Jenis lain dari gangguan adalah jaring transmisi yang terputus, beban lebih atau hubung singkat. Dengan demikian diharapkan kestabilan sistem menuju ke keadaan mantap dalam waktu singkat setelah gangguan menghilang. Kestabilan sangat penting pada sistem tenaga listrik karena untuk menjaga kondisi operasi yang seimbang dan kemampuan sistem tersebut untuk kembali ke kondisi operasi normal ketika terjadi gangguan. Perbaikan kestabilan dengan mengubah daya aktif dapat meningkatkan nilai critical clearing time pada sistem agar dapat lebih tahan terhadap gangguan.

Analisis kestabilan pada umum digolongkan kedalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan yaitu:

1. Kestabilan Keadaan Tetap (Steady State Stability)

Kestabilan keadaan tetap adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menerima gangguan kecil bersifat gradual, terjadi disekitar titik keseimbangan pada kondisi tetap.

Kestabilan ini tergantung pada karakteristik komponen yang terdapat pada sistem tenaga listrik antara lain: Pembangkit, Beban, Jaringan transmisi, dan Kontrol sistem itu sendiri. Model pembangkit yang digunakan adalah pembangkit yang sederhana (sumber tegangan

konstan) karena hanya menyangkut gangguan kecil disekitar titik keseimbangan.

2. Kestabilan Dinamis (*Dynamic Stability*)

Kestabilan dinamis adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke titik keseimbangan setelah timbul gangguan yang relatif kecil secara tiba-tiba dalam waktu yang lama. Analisa kestabilan dinamis lebih kompleks karena juga memasukkan komponen kontrol otomatis dalam perhitungan.

3. Kestabilan Transien (*Transient Stability*)

Kestabilan transien adalah Kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan/sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan kestabilan karena gangguan terjadi diatas kemampuan sistem.

Faktor yang mempengaruhi kestabilan transien [1]:

- a. Seberapa besar generator tersebut dibebani
- b. Output generator selama gangguan. Ini tergantung dari lokasi gangguan dan type gangguan.
- c. Waktu pemutusan gangguan.
- d. Reaktansi sistem transmisi setelah gangguan.
- e. Reaktansi generator. Reaktansi yang rendah meningkatkan daya puncak.

- f. Inersia generator. Inersia yang besar, menyebabkan perubahan sudut lambat. Ini menurunkan energi kinetik yang diperoleh saat gangguan.

Analisis kestabilan transien merupakan analisis yang utama untuk menelaah perilaku sistem daya misal gangguan yang berupa:

- a. Perubahan beban yang mendadak karena terputus unit pembangkit.
- b. Perubahan pada jaringan transmisi misal gangguan hubung singkat atau pemutusan saklar (*switching*).

Sistem daya listrik masa kini jauh lebih luas, ditambah interkoneksi antar sistem rumit dan melibatkan beratus-ratus mesin secara dinamis saling mempengaruhi melalui perantara jala-jala tegangan extra tinggi, mesin-mesin ini mempunyai sistem penguatan yang berhubungan. Kisaran masalah dianalisis banyak menyangkut gangguan besar dan tidak lagi memungkinkan menggunakan proses kelinearan. Masalah kestabilan transien dapat lebih lanjut dibagi kedalam “kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multi swing*)”. Kestabilan ayunan pertama didasarkan pada model generator yang cukup sederhana tanpa memasukkan sistem pengaturan, biasanya periode waktu yang diselidiki adalah detik pertama setelah timbul gangguan pada sistem. Bila pada sistem, mesin dijumpai tetap berada dalam keadaan serempak sebelum berakhir detik pertama, ini dikategorikan sistem masih stabil.

Berdasarkan Paper IEEE [10], kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga kategori yaitu:

1. Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor mengacu pada kemampuan mesin sinkron dari sistem daya yang saling berhubungan untuk tetap sinkron dalam kondisi operasi normal dan setelah mengalami gangguan. Itu tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan dan mengembalikan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanis dari setiap mesin sinkron dalam sistem. Kerangka waktu yang diinginkan umumnya antara 3 hingga 5 detik setelah gangguan [10].

Kestabilan dari sudut rotor dapat diakibatkan oleh gangguan kecil merupakan kemampuan dari sistem tenaga agar bisa mempertahankan kesinkronan sistem akibat gangguan yang terjadi. Ketidak stabilan sistem dapat diakibatkan oleh dua hal antara lain, kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi sampung. Sedangkan gangguan besar pada kestabilan sudut rotor atau yang biasa disebut dengan transien yaitu dimana sistem dapat mempertahankan kondisi sinkronisme suatu sistem disaat terjadi gangguan yang besar.

2. Kestabilan Frekuensi

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan dari sistem untuk mempertahankan kestabilan frekuensi akibat gangguan pada sistem yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban[10]. Kestabilan frekuensi terkait dengan kemampuan sistem tenaga untuk

mempertahankan frekuensi operasi mendekati nilai nominalnya (yaitu 50 atau 60 Hz tergantung pada wilayah) ketika situasi ketidakseimbangan terjadi [11] [12]. Penyimpangan dari nilai nominalnya harus diajaga tetap kecil, karena getaran yang merusak pada mesin sinkron dan pelepasan beban terjadi untuk penyimpangan yang lebih besar dapat mempengaruhi seluruh sistem tenaga [13]. Penanganan ketika terjadi keadaan dimana frekuensi < 50 Hz dapat dilakukan dengan cara:

- a. Menambahkan jumlah total energi yang di suplai ke sistem melalui cara menambah unit pembangkit yang beroperasi.
- b. Memanfaatkan fasilitas LFC (Load Frequency Control)/AGC yang mengendalikan putaran generator sesuai dengan fluktuasi beban. Ketika beban besar maka AGC akan memberikan bahan bakar lebih banyak agar unit pembangkit dapat membangkitkan energi sesuai yang dibutuhkan oleh beban.
- c. Apabila unit pembangkit sudah beroperasi maksimal, maka dengan terpaksa harus dilakukan pengurangan beban melalui manual load shedding (pembuangan beban) ataupun melalui relai UFR yang bekerja ketika frekuensi sistem berada dibawah nilai settingnya.

3. Kestabilan Tegangan

Menurut IEEE, kestabilan tegangan didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk dapat mempertahankan level tegangan semua cabang (node) dalam kondisi normal setelah sistem mengalami kondisi awal gangguan. Definisi ini memberikan gambaran

bahwa kekokohan sistem tenaga dapat diukur dari kemampuan untuk menjaga keseimbangan antara daya dibutuhkan dengan daya dihasilkan. Sistem dapat dalam kondisi tidak stabil apabila adanya gangguan, meningkat beban yang dibutuhkan serta perubahan topologi jaringan yang mengakibatkan penurunan tegangan secara tidak terkendali. Ketidakstabilan sistem dapat berasal dari kondisi disetiap komponen sistem tenaga [14], seperti:

- a. Generator sebagai pembangkit listrik memberikan pasokan daya aktif dan reaktif yang cukup untuk dapat menjaga level tegangan beroperasi pada standard yang normal. Namun generator dibatasi oleh kurva kapabilitas sehingga menyebabkan *output* daya reaktif menjadi berkurang yang disebabkan oleh terbatasnya belitan medan.
- b. Saluran Transmisi Saluran transmisi juga menjadi penyebab lain yang penting dalam permasalahan kestabilan tegangan saluran transmisi membatasi daya maksimum yang dikirim dan dapat diartikan sebagai batasan panas pada sistem transmisi.
- c. Beban merupakan komponen yang dapat menyebabkan kestabilan tegangan terganggu. Beban memiliki dua kategori yaitu beban statis dan beban dinamis, kedua jenis beban tersebut dapat mempengaruhi profil tegangan hingga melampaui batas.

C. Penjadwalan Sistem (*System Rescheduling*)

Keputusan Rescheduling (Penjadwalan Ulang) menunjukkan langkah terakhir dalam siklus produksi. Proses produksi dimulai dengan *capacity planning* (langkah 1), diikuti dengan *aggregate planning* (langkah 2), dan diakhiri dengan *operations scheduling* (langkah 3). Fungsi utama dari penjadwalan adalah untuk mengembangkan tugas kerja khusus dan untuk mengorganisir waktu. Master Schedule (Jadwal Induk) sering di gunakan sebagai *input* dasar untuk proses penjadwalan operasi. Tujuan dasar dari proses penjadwalan ulang (*Rescheduling System*) adalah merancang urutan kerja optimal (yaitu, rencana yang menunjukkan *trade off* (pertukaran) terbaik diantara konflik tujuan.

Urutan waktu pekerjaan sering di rumuskan menggunakan aturan keputusan prioritas. Secara spesifik, aturan keputusan prioritas digunakan untuk menentukan pekerjaan diproses ketika sejumlah pekerjaan sedang menunggu. Ke efektifan relatif dari tiap aturan dapat ditentukan dengan mengamati kinerja dari sistem [7].

Setiap pembangkit listrik menghasilkan daya sesuai dengan nilai momen inersianya. Persamaan untuk menjelaskan nilai daya masing-masing generator dapat dilihat pada persamaan:

$$P_{Generator} = \frac{H_{Generator}}{Total H_{Generator}} \times P_{Total}$$

D. Persamaan Ayunan (*Swing Equation*)

Pada saat kondisi normal, posisi relative dari sumbu rotor dan arah dari resultan magnet adalah tetap. Sudut diantara kedua disebut sudut daya atau sudut torsi. Ketika terjadi gangguan, rotor bergerak melambat atau cepat tergantung dari mmf celah udara dan permulaan gerak relative. Persamaan yang menyebutkan pergerakan relative ini disebut *swing equation*. Jika, periode osilasi rotor mengunci pada kecepatan sinkron. dan generator mempertahankan kestabilannya. Jika gangguan tidak melibatkan perubahan apapun terhadap daya, rotor kembali ke posisi mula. Namun jika perubahan melibatkan perubahan pada besar pembangkitan, beban, maupun kondisi jaringan, rotor beroperasi pada sudut daya relative yang baru untuk mensinkronkan medan putar.

Untuk mengetahui dampak dari perubahan sudut daya maka perlu memodelkan generator sinkron. Suatu generator sinkron membangkitkan torsi elektromekanis dinotasikan dengan T_e dan berputar pada kecepatan sinkron ω_{sm} , Jika T_m adalah torsi mekanik penggerak, maka dalam kondisi tunak dengan rugi – rugi diabaikan, maka didapatkan persamaan:

$$T_m = T_e \quad (2.1)$$

Berpindah dari keadaan tunak oleh karena gangguan menyebabkan rotor mengalami percepatan ($T_m > T_e$) maupun perlambatan ($T_m < T_e$) yang dinotasikan T_a . Sehingga T_a dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$J = T_a = T_m - T_e \quad (2.2)$$

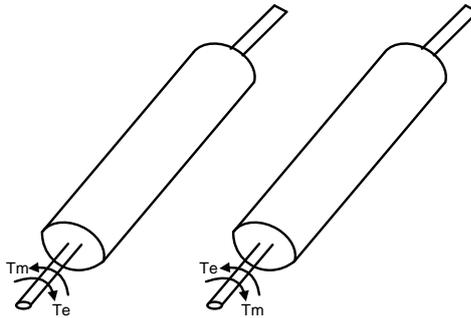
jika J adalah momen inersia dari *prime mover* dan generator, dengan mengabaikan gesekan dan torsi peredaman, dari hukum rotasi dapat dinyatakan:

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.3)$$

Dengan:

- J : Momen inersia dari massa rotor ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
- θ_m : Pergeseran sudut rotor terhadap sumbu yang stasioner (radian mekanis)
- t : Waktu (detik)
- 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 (N-m)
- T_e : Momen putar listrik (N-m)
- T_a : Momen putar percepatan bersih (N-m)

Momen putar mekanis T_m dan momen putar listrik T_e dianggap positif untuk generator serempak. Ini berarti bahwa θ_m adalah resultan momen putar poros yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah perputaran θ_m yang positif seperti ditunjukkan dalam gambar 2.3a. Dalam motor serempak arah aliran daya adalah berlawanan dengan arah pada generator. Karena itu, untuk suatu motor baik T_m maupun T_e terbalik tandanya seperti ditunjukkan dalam gambar 2.3b.



Gambar 2.3 Representasi suatu rotor mesin yang membandingkan arah putaran serta momen putar mekanis dan listrik untuk (a) generator dan (b) motor

Karena θ_m diukur terhadap suatu sumbu pedoman yang diam pada stator, maka θ_m adalah suatu ukuran *absolute* dari sudut rotor. Karena itu pula, θ_m terus bertambah dengan waktu, bahkan juga pada kecepatan serempak yang konstan.

$$\theta_m = \omega_s t + \delta_m$$

Dengan:

ω_s : kecepatan serempak Mesin dalam radian /detik

δ_m : pergeseran sudut rotor dalam radian mekanis

Jika besar perpindahan posisi sudut rotor diturunkan terhadap waktu maka didapat kecepatan sudut rotor yang dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_s + \frac{d\delta_m}{dt}$$

Jika diturunkan sekali lagi terhadap waktu dengan kecepatan sinkron adalah konstan, maka didapat percepatan sudut rotor yang dapat dinyatakan sebagai berikut:

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

Persamaan (4) disubstitusikan ke dalam Persamaan (3) menjadi:

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

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.6)$$

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

Dengan:

P_m : masukan daya poros ke mesin dikurangi dengan rugi-rugi perputaran

P_e : daya listrik pada celah udara

P_a : daya percepatan yang menjelaskan ketidakseimbangan antara daya P_m dan P_e .

Besaran $J \omega_m$ dapat disebut konstanta inersia (M) dan dinotasikan sebagai M. Jika dihubungkan dengan energi kinetik yang ada pada massa yang berputar maka dapat ditulis:

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m$$

Meskipun M disebut sebagai inersia konstanta, tidak akan selama tetap pada kondisi nyata ketika kecepatan rotor melenceng dari kecepatan sinkron. Namun karena ω_m tidak mengalami perubahan yang terlalu besar sebelum sistem mengalami ketidakstabilan, maka M dievaluasi pada saat kecepatan sinkron dan diasumsikan tetap konstan, dan dinyatakan sebagai berikut:

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.8)$$

Swing equation jika dibawa dihubungkan dengan konstanta inersia menjadi:

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.9)$$

Jika menulis *swing equation* dihubungkan dengan sudut daya elektrik δ dan p sebagai jumlah pole dari generator sinkron maka dapat dinyatakan:

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad (2.10)$$

Swing equation jika dibawa kedalam sudut daya elektrik menjadi:

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.11)$$

Analisa sistem tenaga menggunakan satuan per unit, sehingga *swing equation* juga harus dibawa ke dalam satuan per unit. Persamaan (11) dibagi dengan MVA base (S_B), dan mensubstitusikan M yang didapat dari (8) maka didapat persamaan:

$$\frac{2}{p} \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} \quad (2.12)$$

$$H = \frac{W_k}{S_B} \quad (2.13)$$

Dimana notasi H adalah konstanta inersia dalam satuan per unit, W_k adalah energi kinetik dalam satuan mega joule pada saat mesin berputar pada kecepatan nominal dan S_B adalah rating mesin dalam MVA. Substitusi H pada Persamaan (13) pada Persamaan (12) maka didapat persamaan:

$$\frac{2}{p} \frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.14)$$

Dimana $P_m (pu)$ dan $P_e (pu)$ adalah masing – masing daya mekanik dalam satuan per unit dan daya elektrik dalam satuan per unit. Jika persamaan di atas dinyatakan dalam bentuk kecepatan sudut elektrik (ω_s) maka menjadi:

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.15)$$

E. Critical Clearing Time (CCT)

Critical clearing time atau waktu pemutusan kritis merupakan waktu yang menentukan apakah sistem dapat kembali stabil atau tidak setelah mengalami gangguan. Pengisolasian area akibat gangguan yang besar mengakibatkan perubahan sktrukur pada jaringan sistem tenaga listrik. Pengisolasian ini dapat dilakukan dengan pemutusan saluran melalui pemutus atau *Circuit Breaker* (CB) saluran maupun pelepasan generator melalui pemutus atau *Circuit Breaker* (CB) generator. Pemutusan tersebut harus kurang dari waktu pemutus kritisnya dengan tujuan sistem kembali stabil. Namun, apabila waktu pemutusan CB berada diatas waktu pemutus kritisnya, maka hampir dapat dipastikan bahwa generator kehilangan sinkronisasinya (tidak stabil).

ketika adanya gangguan diharapkan pemutus saluran dapat bekerja dengan cepat pada sistem kelistrikan. Waktu yang dipakai untuk clearing time berdasarkan standar SPLN No 52-1 Tahun 1983. Pada sistem tegangan, sebagai berikut :

Tabel 2.1 Standar waktu pemutusan

Level Tegangan	Clearing Time
70 kV	≤ 150 ms
150 kV	≤ 120 ms
275 kV	≤ 100 ms
500 kV	≤ 90 ms

Pengaman cadangan terhadap gangguan yang digunakan untuk clearing time adalah 500 mili detik. Kecepatan kontak PMT membuka dan menutup harus disesuaikan dengan referensi/acuan dari masing-masing pabrikan PMT (dikarenakan nilai yang berbeda antar merk).

F. Studi Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan hal yang penting dalam sistem tenaga listrik. Studi aliran daya memberikan informasi tentang kinerja dan aliran daya baik daya nyata dan reaktif untuk keadaan tertentu ketika sistem bekerja dalam keadaan tunak (*steady state*). Studi aliran daya juga mengungkapkan informasi mengenai beban saluran transmisi di system, tegangan di setiap lokasi untuk evaluasi regulasi kinerja sistem tenaga dan bertujuan untuk menentukan besarnya daya nyata, daya reaktif di berbagai sistem daya yang dalam keadaan berlangsung atau diharapkan untuk beroperasi secara normal.

studi aliran daya sangat diperlukan dalam perencanaan serta pengembangan sistem di masa-masa mendatang karena seiring dengan bertambah tingginya kebutuhan tenaga listrik, maka selalu

terjadi perubahan beban, penambahan unit-unit pembangkit dan perubahan saluran transmisi.

Pada suatu sistem tenaga listrik, terdapat beberapa jenis bus yaitu:

1. Bus beban. Setiap bus yang tidak memiliki generator disebut sebagai bus beban. Pada bus ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui sehingga sering disebut sebagai bus PQ. Daya aktif dan reaktif yang dicatu ke dalam sistem tenaga bernilai positif sementara daya aktif dan reaktif yang dikonsumsi bernilai negatif. Besaran yang dapat dihitung pada bus ini adalah tegangan (V) dan sudut beban.
2. Bus generator. Bus generator juga disebut sebagai *voltage controlled bus* karena tegangan pada bus ini selalu dibuat konstan dan bus di mana terdapat generator. Pembangkitan daya aktif dapat dikendalikan dengan mengatur penggerak mula dan nilai tegangan dikendalikan dengan mengatur eksitasi generator. Sehingga bus ini juga biasa disebut sebagai bus PV. Besaran yang dapat dihitung pada bus ini adalah daya reaktif dan sudut beban.
3. *Slack bus*. *Slack bus* atau biasa disebut dengan *swing bus*. Besaran yang diketahui dari sini adalah tegangan dan sudut beban. Suatu sistem tenaga biasanya dirancang memiliki bus ini yang dijadikan sebagai referensi yaitu besaran sudut beban = 0° derajat. Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah daya aktif dan daya reaktif.

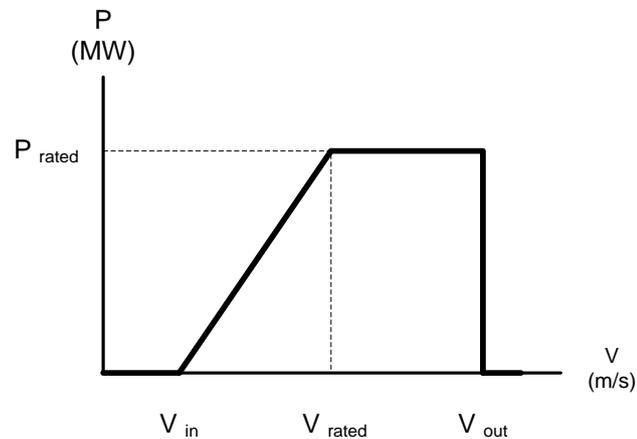
G. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Energi angin merupakan energi yang berasal dari alam. Angin ini disebabkan karena adanya perbedaan suhu antara udara panas dan udara dingin. Sekarang ini, energi angin hanya memenuhi sebagian kecil saja dari kebutuhan energi. Dengan adanya kemajuan teknologi, penggunaan energi angin makin meningkat dan biaya pemakaiannya semakin murah.

Dengan adanya turbin angin maka energi angin bisa dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga angin. Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat dengan menggunakan prinsip konversi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbarui yaitu angin. Turbin angin Masih lebih dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan diharapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam tak terbarui sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik. Dengan Adanya energi angin sebagai nonkonvensional, energi angin dapat menggantikan energi bahan bakar fosil sebagai sumber daya energi.

Daya output pembangkit tenaga angin tergantung pada kecepatan angin. Pembangkit tenaga angin tidak mengeluarkan daya saat kecepatan angin kurang dari v_{in} dan saat kecepatan angin lebih besar dari v_{out} . Pembangkit tenaga angin mulai membangkitkan daya secara linear saat kecepatan angin berada di range antara v_{in} dan . Saat kecepatan angin berada di range v_r dan v_{out} , maka daya output pembangkit tenaga angin

bersifat konstan dengan nilai sebesar kapasitasnya, yaitu w_r . Karakteristik ini dapat diplot secara umum dan dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Karakteristik input-output pembangkit tenaga angin [17]

Dengan mengabaikan ketidaklinearan yang nilainya relatif kecil pada bagian kontinyu, maka daya output pembangkit tenaga angin dapat dinyatakan dengan persamaan (2.20), (2.21), dan (2.22).

$$w = 0 \quad \text{untuk} \quad v < v_{in} \text{ dan } v > v_{out} \quad (2.20)$$

$$w = w_r \frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}} \quad \text{untuk} \quad v_{in} \leq v \leq v_r \quad (2.21)$$

$$w = w_r \quad \text{untuk} \quad v_r \leq v \leq v_{out} \quad (2.22)$$

H. State Of The Art

Penelitian-penelitian yang telah dilakukan yang berada pada tabel 2.1. *State of the art* penelitian menunjukkan bahwa penjadwalan pembangkit perlu dilakukan untuk meminimalkan biaya produksi pembangkit. Selain itu dengan adanya perkembangan pembangkit energi terbarukan, maka penjadwalan pembangkit perlu diintegrasikan

dengan pembangkit terbarukan tersebut, salah satunya adalah pembangkit tenaga angin.

Tabel 2.2 *State of the Art* Penelitian

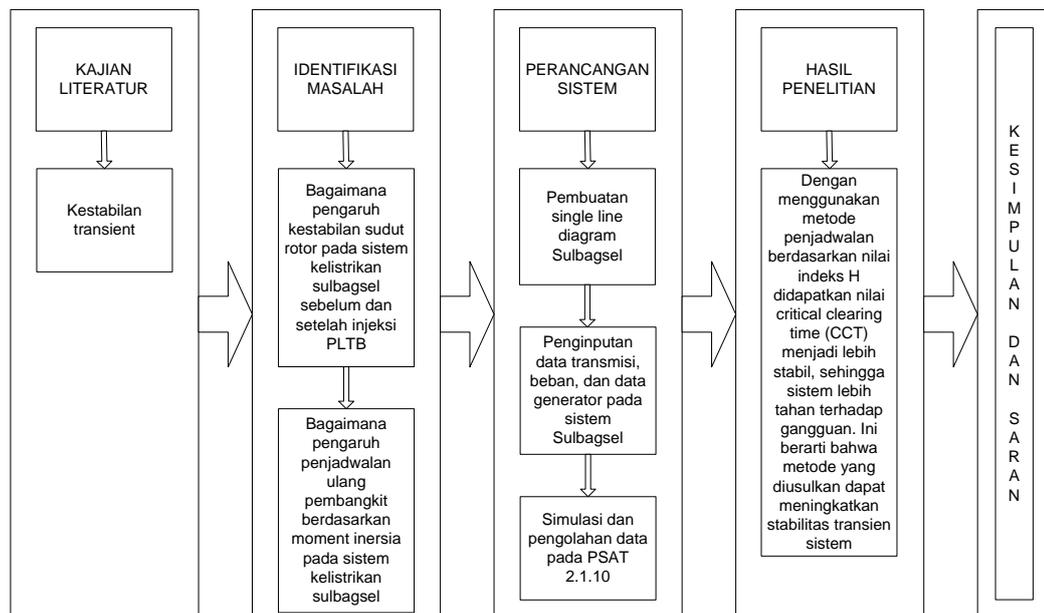
No	Judul	Penulis/Tahun	Penerbit	Metode	Hasil	Keterbaruan
1	Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time	Ana Fernald Guillamon, dkk / 2019	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Metode emulasi / kontrol virtual, dan HEV adalah konstanta inersia dari unit generasi emulasi / virtual.	Hasil penelitian diperoleh bahwa saat ini. Eropa menghadirkan penurunan inersia rata-rata sekitar 20% dalam dua dekade terakhir, terutama karena integrasi terbarukan dipisahkan dari grid dari 14% pada tahun 1996 menjadi 31% pada tahun 2016. Berkenaan dengan windturbines, mereka menghadirkan nilai inersia yang mirip dengan unit pembangkitan konvensional antara 2 dan 6s tergantung pada teknologi yang umumnya dianggap sebagai 'emulasi inersia tersembunyi'.	Dengan menggunakan metode penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan momen inersia untuk meningkatkan kestabilan pada pembangkit.
2	Transient Stability Improvement Using Allocation Power Generation Methods Based on Moment Inertia	Inder Chaerah Gunadin, dkk / 2017	International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICELECTICS)	Metode lagrange	Dengan menggunakan metode penjadwalan berdasarkan nilai indeks H, ditemukan bahwa nilai waktu kliring kritis (CCT) menjadi lebih stabil, sehingga sistem lebih kuat terhadap gangguan. Nilai indeks H dapat menjadi solusi untuk meningkatkan stabilitas sistem tenaga	Dengan mengintegrasikan pembangkit listrik tenaga bayu, dan melakukan <i>test case</i> pada sistem Sulselrabar
3	Power System Stabilization Using Virtual Synchronous Generator with Alternating Moment of Inertia	Jaber Alipoor, dkk / 2015	IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics	metode langsung Lyapunov untuk analisis stabilitas sementara	Redaman yang diberikan oleh Alternating Inersia jauh lebih efektif dan memiliki hasil yang identik dalam kondisi apapun. Selain itu, energi transien dapat dikurangi menjadi nol pada akhir siklus seperempat pertama dengan kontrol Inersia Bergantian	Dengan menggunakan metode penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan momen inersia untuk meningkatkan kestabilan pada pembangkit.
4	Neural Network Based Transient Stability Model to Analyze The Security of Java-Bali 500 kV Power System	Irrine Budi Sulistiawati, dkk / 2011	International Conference on Electrical Engineering and Informatics	metode equal area criterion (EAC) melalui metode Trapesium dan metode Runge-Kutta ke-4	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Model <i>Neural Network</i> yang digunakan untuk memperkirakan nilai cct memberikan hasil yang akurat dengan kesalahan maksimum 0.0008% dan kesalahan minimum 0%	Perbaikan stabilitas transien dilakukan berdasarkan momen inersia dan terintegrasi dengan PLTB.

5	Optimized virtual inertia of wind turbine for rotor angle stability in interconnected power systems	Xiangyu Zhang, dkk / 2020	Electric Power Systems Research	Metode kontrol inersia baru untuk mengurangi energi transien sistem.	Hasil penelitian ini menunjukkan perbedaan sudut rotor antara kelompok generator yang koheren dapat dikurangi dengan mengatur variabel inersia, secara signifikan meningkatkan keandalan dukungan inersia virtual turbin angin.	Dengan menggunakan metode penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan momen inersia untuk meningkatkan kestabilan pada pembangkit.
6	The study of dependency of power system stability on system inertia constant for various contingencies	Md Shafiu lah1, dkk / 2014	International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT)	Konstanta inersia (H) untuk menggambarkan karakteristik sistem dan disimulasikan menggunakan CYME PSAF	Stabilitas frekuensi sistem sangat tergantung pada konstanta H keseluruhan system, penambahan atau pemasangan mesin dengan konstanta inersia yang lebih tinggi membuat sistem lebih stabil jika terjadi gangguan fisik.	Meningkatkan kestabilan transien dan disimulasikan menggunakan <i>software</i> MATLAB 2016a dan <i>simulink Power System Analysis Toolbox</i> (PSAT) 2.1.10. yang terintegrasi dengan program MATLAB 2016a.
7	Multi-objective virtual inertia control for renewable power generator for transient stability improvement in interconnected power system	Xiangyu Zhang, dkk / 2020	Electrical Power and Energy Systems		Hasil menunjukkan bahwa selain fungsi dukungan frekuensi dasar, stabilitas ayunan sudut rotor juga ditingkatkan, sehingga sangat meningkatkan dukungan inersia virtual.	Dengan menggunakan metode penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan momen inersia untuk meningkatkan kestabilan pada pembangkit.
8	Comparison of Voltage Stability Index Before and After Wind Turbine Penetrated to Sulseltrabar Interconnection Power System Using Modal Analysis Method	Indar Chaer ah Gunadin, dkk / 2019	EPI International Conference on Science and Engineering (EICSE)	Metode Modal Analysis dengan mengamati nilai eigen dan faktor partisipasi bus (BPF).	Hasil menunjukkan bahwa masuknya turbin angin di kawasan Sulseltrabar sistem kelistrikan mempunyai efek meningkatkan kestabilan sistem keadaan tunak, hal ini dapat dilihat dari nilai eigen yang minimum.	Untuk meningkatkan kestabilan dengan melakukan penjadwalan ulang berdasarkan momen inersia, dan dapat dilihat dari nilai CCT
9	Stability Analysis and Fault Changes on Wind Turbine Effect in Multi Machine Power System	Agus Siswanto, dkk / 2018	Engineering International Conference (EIC)	Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah melalui perangkat lunak Analisis Sistem Tenaga Toolbox	Hasil analisis dan simulasi yang dilakukan bahwa penetrasi turbin angin berpengaruh terhadap stabilitas sistem.	Dengan menggunakan metode penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan momen inersia untuk meningkatkan kestabilan pada pembangkit.

				(PSAT) di bawah MATLAB.		
10	Perbaikan kestabilan dengan metode penjadwalan pembangkit terintegrasi pltb berdasarkan Momen inersia	Fitriani / 2020	-	Metode Equal area criterion (EAC) dan penjadwalan berdasarkan nilai momen inersia, disimulasikan menggunakan Matlab power system analyze toolbox (PSAT)	Dengan menggunakan metode penjadwalan berdasarkan nilai indeks H didapatkan nilai critical clearing time (CCT) menjadi lebih stabil, sehingga sistem lebih tahan terhadap gangguan. Ini berarti bahwa metode yang diusulkan dapat meningkatkan stabilitas transien sistem	Dengan menggunakan metode penjadwalan ulang pembangkit berdasarkan momen inersia untuk meningkatkan kestabilan pada pembangkit dengan melakukan penjadwalan ulang berdasarkan momen inersia yang terintegrasi dengan PLTB dan disimulasikan menggunakan software MATLAB 2016a dan <i>simulink Power System Analysis Toolbox (PSAT) 2.1.10.</i> yang terintegrasi dengan program MATLAB 2016a.

I. Kerangka Pikir

Berdasarkan permasalahan penelitian yang telah dijelaskan sebelumnya dan konsep-konsep dari peneliti terdahulu dalam beberapa kajian literatur maka disusunlah suatu kerangka pikir penelitian sebagaimana yang terlihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kerangka pikir penelitian