

SKRIPSI

**STUDI DAMPAK GANGGUAN SALURAN TRANSMISI TERHADAP
KESTABILAN TEGANGAN MEMPERHATIKAN VARIASI
KELUARAN PLTB**

Disusun dan diajukan oleh

DEVIRA AYU DIA

D411 16 012



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**STUDI DAMPAK GANGGUAN SALURAN TRANSMISI TERHADAP
KESTABILAN TEGANGAN MEMPERHATIKAN VARIASI KELUARAN
PLTB**

Disusun dan diajukan oleh :

DEVIRA AYU DIA

D411 16 012

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas

Hasanuddin

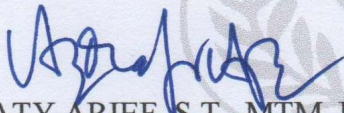
Pada tanggal 31 Januari 2022

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping



Ir. ARDIATY ARIEF, S.T., MTM., Ph.D. Ir. M BACHTIAR NAPU, ST.MT.M.Phil.Ph.D

19780424 200112 2 001

19760406 200312 1 002

Ketua Program Studi



Dr. Ing. Ir. DEWIANI, MT.

NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Devira Ayu Dia
NIM : D41116012
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Studi Dampak Gangguan Saluran Transmisi Terhadap Kestabilan Tegangan Memperhatikan Variasi Keluaran PLTB

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi/tesis/disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 31 Januari 2022

Yang Menyatakan



Devira Ayu Dia

ABSTRAK

Devira Ayu Dia, Studi dampak Gangguan Saluran Transmisi Terhadap Kestabilan Tegangan Memperhatikan Variasi Keluaran PLTB (dibimbing oleh Ardiaty Arief dan M. Bachtiar Nappu)

Kestabilan tegangan mencerminkan kemampuan suatu sistem untuk menjaga nilai tegangannya pada saat sistem itu bekerja normal ataupun setelah terjadi gangguan pada suatu sistem. Suatu sistem dapat dikatakan stabil apabila tegangan berada pada batas toleransi +5% dan -10% dari tegangan nominal yang telah ditetapkan oleh PLN. Selain disebabkan oleh gangguan, sistem dapat dikategorikan mengalami ketidakstabilan tegangan apabila terjadi peningkatan beban, pelepasan saluran transmisi, perubahan konfigurasi sistem ataupun pembangkit yang tiba-tiba lepas dari sistem yang mengakibatkan tegangan berada di luar batas kestabilan yang telah ditentukan dari sistem tenaga listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan energi terbarukan yang mengkonversi energi kinetik angin menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTB bervariasi bergantung dengan kecepatan angin. Konfigurasi PLTB pada sistem Sulbagsel akan mempengaruhi kondisi kestabilan tegangan. Tujuan dari penelitian ini adalah: (i) menganalisis kestabilan tegangan sistem Sulbagsel setelah interkoneksi PLTB pada sistem kelistrikan Sulbagsel(ii) menganalisis kestabilan tegangan sistem Sulbagsel setelah pelepasan saluran transmisi Malili-Lasusu saat daya output PLTB bervariasi (iii) mengetahui solusi untuk menjaga kestabilan tegangan sistem Sulbagsel ketika terjadi gangguan pada saluran transmisi Malili-Lasusu dan daya output PLTB bervariasi. Proses analisis kestabilan tegangan sistem disimulasikan dengan menggunakan *software* DlgSILENT *Power Factory* 15.1.7. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem dalam kondisi normal tegangan pada seluruh busbar sesuai dengan standar PLN. Saat terjadi gangguan pada saluran transmisi Malili-Lasusu pada sistem Sulbagsel baik saat daya output PLTB konstan maupun bervariasi terdapat 7 busbar yang mengalami ketidakstabilan tegangan untuk itu dilakukanlah solusi perbaikan tegangan dengan melakukan simulasi pemasangan kapasitor pada bus yang berada di ULTG Kendari untuk melihat pada penempatan dimana yang tepat dan melihat perbandingan tegangan sebelum dan setelah pemasangan kapasitor.

Kata Kunci: Kestabilan Tegangan, Saluran Transmisi, Variasi Daya Output PLTB, Sistem Sulbagsel, Standar Tegangan PLN, Kapasitor

ABSTRACT

Devira Ayu Dia, Frequency Stability Analysis in Sulbagsel System with Disconnection of Transmission Lines (supervised by Ardiaty Arief and M. Bachtiar Nappu)

Voltage stability reflects the ability of a system to maintain its voltage value when the system is working normally or after a disturbance occurs in a system. A system can be said to be stable if the voltage is within the tolerance limit of +5% and -10% of the nominal voltage set by PLN. Apart from being caused by disturbances, the system can be categorized as experiencing voltage instability if there is an increase in load, transmission line disconnection, changes in system configuration or a generator that suddenly escapes from the system which results in the voltage being outside the specified stability limit of the electric power system. Wind Power Plant (PLTB) is a power plant that utilizes renewable energy that converts wind kinetic energy into electrical energy. The electrical energy produced by PLTB varies depending on the wind speed. The configuration of the PLTB in the Sulbagsel system will affect the voltage stability condition. The aims of this study were: (i) to analyze the voltage stability of the South Sulawesi system after the interconnection of the PLTB to the South Sulawesi electrical system (ii) to analyze the voltage stability of the South Sulawesi system after the disconnection of the Malili-Lasusu transmission line when the PLTB output power varies (iii) to find a solution to maintain voltage stability on Sulbagsel system when there is a disturbance in the Malili-Lasusu transmission line and the PLTB output power varies. The system voltage stability analysis process is simulated using the *DIgSILENT 15.1.7 Power Factory* software. The simulation results show that the system under normal conditions is the voltage on all busbars according to PLN standards. When there is a disturbance in the Malili-Lasusu transmission line in the Sulbagsel system, both when the PLTB output power is constant or variable, there are 7 busbars that experience voltage instability, for that a voltage improvement solution is carried out by simulating the installation of capacitors on the bus at ULTG Kendari to see where the placement and see the comparison of the voltage before and after the installation of the capacitor.

Keywords: Voltage Stability, Transmission Lines, Variations in PLTB Output Power, Sulbagsel System, PLN Voltage Standards, Capacitors

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena berkat limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulisan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Tak lupa pula shalawat dan taslim selalu kita panjatkan kepada junjungan Nabi Besar Muhammad Shallallahu 'Alaihi Wassalam yang telah mengantarkan manusia dari kegelapan menjadi zaman yang terang benderang. Tugas akhir dengan judul "Studi Dampak Gangguan Saluran Transmisi Terhadap Kestabilan Tegangan Memperhatikan Variasi Keluaran PLTB" merupakan salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik untuk menyelesaikan studi pada Program Strata 1 Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.

Adapun tujuan dari penulisan makalah ini adalah untuk memenuhi salah satu syarat guna menyelesaikan studi bagi mahasiswa program S-1 diprogram Studi Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang membantu penulis dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini. Sehubungan dengan hal tersebut, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Keluarga saya terus memberikan doa, memberikan motivasi, dan memberikan dukungan kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi saya ini.
2. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., Ketua Departemen Teknik Elektro

3. Ibu Ir. Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph.D dan Bapak Ir. M. Bachtiar Nappu, ST., MT., Ph.D selaku dosen pembimbing skripsi saya yang telah memberikan bimbingan dan kritik hingga dapat terselesaikannya skripsi ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Nadjamuddin Harun, M.Si dan Ibu Dr.Ir.Hj. Sri Mawar Said, M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi.
5. Seluruh dosen, staf pengajar serta pegawai Departemen Teknik Elektro atas bimbingan, didikan, kemudahan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh perkuliahan.
6. PT. PLN (Persero) UP2B Sulawesi Selatan, Sulawesi Barat dan Sulawesi Tenggara yang telah membantu penulis dalam memperoleh data yang terkait dengan penelitian ini.
7. Sahabatku Ayu Faradillah S.T., Muh. Nasaruddin Rachmat dan Noor Zahrah Ainun Syam yang selalu bersama penulis dalam suka dan duka selalu memberi semangat dan dukungan terkhusus dalam penelitian dan penyusunan tugas akhir ini.
8. Taehyung, Yeonjun, Leo terima kasih telah memberi warna baru dalam kehidupan penulis.
9. Kepada teman-teman V Global Union terima kasih untuk selalu bersama penulis dan saling memberikan support.
10. Kepada semua pihak yang terlibat dan tidak dapat saya sebut satu persatu, terima kasih yang tak terhingga atas semua dukungan dan bantuannya.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terdapat dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun bagi penulis sehingga penulisan skripsi ini dapat menjadi lebih baik. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun pembaca.

Makassar, Januari 2022

Penulis

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	ix
BAB I.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Metodologi Penelitian	5
1.6 Manfaat Penulisan	6
1.7 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II.....	8
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	8
2.2 Proses Penyampaian Tenaga Listrik ke Pelanggan	9
2.3 Transmisi Tenaga Listrik.....	10
2.4 Gangguan pada Saluran Transmisi.....	11
2.4.1 Sebab-sebab Gangguan pada Saluran Transmisi	12
2.4.2 Gangguan Karena Beban Lebih	12
2.4.3 Akibat-akibat Gangguan	13
2.4.4 Gangguan Karena Petir	14
2.4.5 Gangguan-gangguan yang Besar	15
2.4.6 Distorsi Tegangan Tinggi dan Arus	16
2.5 Proteksi Saluran Transmisi	17
2.6 Kestabilan Sistem Tenaga	17
2.7 Kestabilan Tegangan	22
2.8 Penyebab Ketidakstabilan Tegangan.....	23
2.9 Energi Terbarukan	24

2.10 Media Penyimpanan Energi.....	25
2.11 Angin Sebagai Sumber Daya Energi.....	26
2.11.1 Defenisi Angin.....	26
2.11.2 Potensi Energi Angin.....	27
2.11.3 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.....	27
2.12 DIgSILENT <i>PowerFactory</i>	27
BAB III.....	29
3.1 Judul Penelitian.....	29
3.2 Lokasi Penelitian.....	29
3.3 Waktu Penelitian.....	29
3.4 Teknik Pengambilan Data.....	29
3.5 Alur Penelitian	30
BAB IV	34
4.1 Perencanaan Simulasi.....	34
4.2 Data Penelitian	34
4.3 Perencanaan Simulasi.....	36
4.4 Hasil Simulasi.....	36
4.4.1 Simulasi Aliran Daya Sistem Sulbagsel setelah terintegrasi dengan PLTB Sidrap dan PLTB Jenepono.....	36
4.4.2 Simulasi Aliran Daya Sistem Sulbagsel Ketika Terjadi Pelepasan pada Saluran Transmisi Utama saat Output PLTB Konstan	39
4.4.3 Simulasi Aliran Daya Sistem Sulbagsel Ketika Terjadi Pelepasan pada Saluran Transmisi Utama saat Output PLTB Bervariasi	48
4.4.4 Solusi Perbaikan Tegangan pada Saat Pelepasan Saluran Transmisi	53
4.4.4.1 Pemasangan Kapasitor saat Sistem Sulbagsel Mengalami Gangguan pada Saluran Transmisi Malili-Lasusu.....	54
BAB V	78
5.1 Kesimpulan.....	78
5.2 Saran	79
DAFTAR PUSTAKA.....	80
LAMPIRAN.....	Error! Bookmark not defined.

**LOAD FLOW SISTEM SULBAGSEL OUTPUT PLTB VARIASI 1 Error!
Bookmark not defined.**

**NILAI TEGANGAN PADA TAP BUS DI SISTEM SULBAGSEL SAAT
OUTPUT PLTB VARIASI 1.....Error! Bookmark not defined.**

**LOAD FLOW SISTEM SULBAGSEL OUTPUT PLTB VARIASI 2..... Error!
Bookmark not defined.**

**NILAI TEGANGAN PADA TAP BUS DI SISTEM SULBAGSEL SAAT
OUTPUT PLTB VARIASI 2.....Error! Bookmark not defined.**

**LOAD FLOW SISTEM SULBAGSEL OUTPUT PLTB VARIASI 3..... Error!
Bookmark not defined.**

**NILAI TEGANGAN PADA TAP BUS DI SISTEM SULBAGSEL SAAT
OUTPUT PLTB VARIASI 3.....Error! Bookmark not defined.**

**LOAD FLOW SISTEM SULBAGSEL OUTPUT PLTB VARIASI 4..... Error!
Bookmark not defined.**

**NILAI TEGANGAN PADA TAP BUS DI SISTEM SULBAGSEL SAAT
OUTPUT PLTB VARIASI 4.....Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik[3]	18
Gambar 2.2 Komponen Sistem Kendali[3]	24
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian	31
Gambar 4. 1 Single Line Diagram Sulbagsel	35
Gambar 4. 2 Simulasi sistem Sulbagsel saat kondisi normal pada beban puncak malam.....	38
Gambar 4. 3 Skenario Pelepasan pada Saluran Transmisi Malili-Lasusua	41
Gambar 4. 4 Grafik ULTG Kendari pada saat pelepasan di Saluran Transmisi Malili-Lasusua saat Output PLTB Konstan	43
Gambar 4. 5 Skenario Pelepasan pada Saluran Transmisi Kolaka-Lasusu	44
Gambar 4. 6 Skenario Pelepasan pada Saluran Transmisi Kolaka-Lasusu	46
Gambar 4. 7 Grafik ULTG Kendari pada saat pelepasan di Saluran Transmisi Malili-Lasusua saat Output PLTB Bervariasi	50
Gambar 4. 8 Profil Tegangan ULTG Kendari pada Saat Pelepasan di Saluran Transmisi Malili-Lasusua Saat Output PLTB 0 %	52
Gambar 4. 9 Profil Tegangan ULTG Kendari pada Saat Pelepasan di Saluran Transmisi Malili-Lasusua Saat Output PLTB 50%	52
Gambar 4. 10 Profil Tegangan ULTG Kendari pada Saat Pelepasan di Saluran Transmisi Malili-Lasusua Saat Output PLTB 25%	53

Gambar 4. 11 Grafik ULTG Kendari pada Saat Pelepasan Saluran Transmisi di Malili-Lasusua dan Sebelum Dipasangkan Kapasitor	55
Gambar 4. 12 Rangkaian Sistem Kelistrikan ULTG Kendari Sebelum Pemasangan Kapasior	56
Gambar 4. 13 Pengaturan Nilai Kapasitor 5 MVar pada Bus Malili.....	56
Gambar 4. 14 Profil Tegangan ULTG Kendari pada Saat Sebelum dan Sesudah Pemasangan Kapasitor 5 MVar.	58
Gambar 4. 15 Rangkaian Sistem Kelistrikan ULTG Kendari Setelah Pemasangan Kapasitor pada Bus Lasusu Sebesar 5 MVar.....	59
Gambar 4. 16 Grafik ULTG Kendari Setelah Pemasangan Kapasitor pada Bus Lasusu Saat Pelepasan Saluran Transmisi Malili-Lasusua	60
Gambar 4. 17 Profil Tegangan ULTG Kendari pada Saat Sebelum dan Sesudah Pemasangan Kapasitor pada Bus Lasusu	62
Gambar 4. 18 Rangkaian Sistem Kelistrikan ULTG Kendari pada Saat Pemasangan Kapasitor pada Bus Kolaka.....	63
Gambar 4. 19 Grafik ULTG Kendari pada saat pelepasan di Saluran Transmisi Malili-Lasusua Setelah Pemasangan Kapasitor pada Bus Kolaka.....	64
Gambar 4. 20 Profil Tegangan ULTG Kendari pada Saat sebelum dan Setelah Pemasangan Kapasitor pada Bus Kolaka.....	66
Gambar 4. 21 Gambar Pemasangan Kapasitor pada bus Unhha	67
Gambar 4. 22 Grafik ULTG Kendari Setelah Pemasangan Kapasitor pada Bus Unnha Saat Pelepasan Saluran Transmisi Malili-Lasusua.....	68

Gambar 4. 23 Profil Tegangan ULTG Kendari pada Saat Sebelum dan Sesudah Pemasangan Kapasitor pada Bus Unnha..... 70

Gambar 4. 24 Grafik ULTG Kendari pada Saat Gangguan di Saluran Transmisi Malili-Lasusu dengan Pemasangan Kapasitor pada bus Kendari 71

Gambar 4. 25 Grafik ULTG Kendari Setelah Pemasangan Kapasitor pada Bus 72

Gambar 4. 26 Profil Tegangan ULTG Kendari pada Saat Sebelum dan Sesudah Pemasangan Kapasitor pada Bus Kendari 74

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Data Transformator Sistem Sulbagsel..	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 2 Rating Tegangan, Arus, dan Panjang Saluran Transmisi Sistem Sulbagsel	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 3 Data Impedansi dan Reaktansi Saluran Transmisi Sulbagsel	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 4 Data Kapasitas Pembangkit Terpasang Sistem Sulbagsel.....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 5 Data Beban Sistem Sulbagsel.....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 6 Perbandingan Total Output Pembangkit dan Beban pada Sistem Kelistrikan Sulbagsel setelah Terintegrasi dengan PLTB Sidrap dan PLTB Jeneponto	39
Tabel 4. 7 Simulasi Aliran Daya Sistem Sulbagsel pada Output dari PLTB Konstan	40
Tabel 4. 8 Simulasi Aliran Daya Sistem Sulbagsel pada Output dari PLTB Konstan	40
Tabel 4. 9 Tabel Perbandingan Tegangan Sebelum dan Setelah terjadi Pelepasan di Saluran Transmisi Malili-Lasusua saat Output PLTB Konstan.....	42
Tabel 4. 10 Tabel Perbandingan Tegangan Sebelum dan Setelah terjadi Pelepasan di Saluran Transmisi Kolaka-Lasusua saat Output PLTB Konstan.....	45
Tabel 4. 11 Tabel Perbandingan Tegangan Sebelum dan Setelah terjadi Pelepasan di Saluran Transmisi Kendari-Unnha saat Output PLTB Konstan	47
Tabel 4. 12 Skenario Daya Output yang Dihasilkan PLTB pada Saat Beban Puncak Malam di Sistem Kelistrikan Sulbagsel	49

Tabel 4. 13 Tabel perbandingan kondisi tegangan saat kondisi normal dan gangguan dimana output PLTB bervariasi.....	51
Tabel 4. 14 Perbandingan Kondisi Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan Kapasitor 5 MVAR.....	57
Tabel 4. 15 Perbandingan Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan Kapasitor pada Bus Lasusu.....	61
Tabel 4. 16 Perbandingan Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan Kapasitor 5 MVAR pada Bus Kolaka.....	65
Tabel 4. 17 Perbandingan Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan Kapasitor 5 MVAR pada Bus Unnha.....	69
Tabel 4. 18 Perbandingan Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan Kapasitor 5 MVAR pada Bus Kendari	73
Tabel 4. 19 Perbandingan Tegangan Setelah Pemasangan Kapasitor 5 MVAR pada Bus Kendari saat Sistem Gangguan	75
Tabel 4. 20 Perbandingan Tegangan Setelah Pemasangan Kapasitor 5 MVAR pada Bus Kendari saat Sistem Stabil.....	76

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan peradaban manusia di bumi ini dapat dilihat dengan teknologi yang dihasilkan yang digunakan untuk kebutuhan manusia. Kebutuhan energi listrik saat ini bukan lagi menjadi milik masyarakat perkotaan, tetapi termasuk masyarakat yang tinggal di daerah terpencil. Secara umum sistem tenaga listrik terdiri dari empat komponen utama, yaitu pembangkit, transmisi, distribusi dan beban. Selanjutnya proses pengiriman daya listrik dilakukan secara bertahap dimulai dari sistem pembangkitan kemudian disalurkan ke jaringan transmisi, dan disalurkan ke beban-beban menggunakan saluran distribusi. Kebutuhan energi listrik bagi masyarakat terus meningkat seiring dengan meningkatnya gaya hidup dan peralatan yang dipakai. Kondisi ini mensyaratkan ketersediaan energi listrik yang efisien dan berkualitas. Efisien dalam pengertian energi yang diproduksi dapat digunakan secara maksimal oleh pelanggan atau tidak mengalami kehilangan energi pada jaringan maupun peralatan listrik seperti trafo. Kehilangan energi perlu diprediksi dan diantisipasi agar terjadi dalam batas normal dan wajar. Berkualitas berarti pengaturan energi listrik sesuai dengan peralatan yang digunakan.

Saat ini energi terbarukan telah mengalami perkembangan dan kemajuan yang sangat pesat. Semakin luas isu kerusakan lingkungan akibat dari penggunaan bahan bakar fosil yang menimbulkan polusi, sehingga pemanfaatan sumber energi baru dan terbarukan yang berwawasan lingkungan merupakan salah satu upaya untuk mengurangi polusi serta penghematan sumber daya minyak.

Pemerintah saat ini sedang gencar meningkatkan porsi energi baru terbarukan (EBT) dalam pembangkit listrik di Indonesia. Dalam RUPTL (Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik) PT. PLN (Persero) periode 2019-2028, memiliki target penambahan listrik dari energi terbarukan sebesar 16,7 GW [1].

Salah satu pembangkit listrik EBT yang dimaksud pemerintah adalah Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Tolo I Jeneponto, Kabupaten Jeneponto, Provinsi Sulawesi Selatan. Pada PLTB Jeneponto memiliki 20 turbin dengan tinggi 133 meter dan panjang baling-baling 63 meter. Masing-masing turbin mampu mengalirkan listrik sebesar 3,6 MW sehingga kapasitas totalnya mencapai 72 MW. PLTB Jeneponto akan terinterkoneksi melalui Gardu Induk Jeneponto. Persediaan daya yang dimiliki PLTB Jeneponto cukup untuk memenuhi kebutuhan daya yang ada disekitar [1].

Selain PLTB Jeneponto, terdapat pula Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap yang berada di Sulawesi Selatan dan merupakan salah satu PLTB yang terbesar di Asia Tenggara dan masuk dalam program 35.000 MW. Pembangkit ini terletak di Desa Mattirotasi, Kecamatan Watang Pulu, Kabupaten Sidrap. PLTB ini memiliki 30 turbin atau kincir angin dengan tinggi menara 80 meter dan panjang baling-baling 57 meter serta masing-masing menggerakkan turbin berkapasitas 2,5 MW sehingga PLTB Sidrap mampu menghasilkan 75 MW. Dengan terinterkoneksinya PLTB Jeneponto dan PLTB Sidrap tentu saja akan mempengaruhi kestabilan pada sistem Sulbagsel [2].

Kestabilan tegangan mencerminkan kemampuan sistem menjaga nilai tegangan pada kondisi normal ataupun setelah terjadi suatu gangguan. Selain disebabkan oleh

gangguan, penambahan beban dan perubahan konfigurasi sistem juga dapat mempengaruhi stabilitas tegangan dari sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan tegangan terjadi ketika nilai tegangan pada sisi penerima akan turun dari batas normalnya, dan hal tersebut dapat menuntun pada kondisi yang dinamakan *voltage collapse*. Tegangan akan turun pada titik terendah, sehingga dapat menimbulkan terjadinya *black out* sistem secara keseluruhan ataupun secara parsial.

Analisa kestabilan tegangan diperlukan saat perencanaan ataupun operasi sistem tenaga listrik. Apabila terjadi perubahan konfigurasi sistem yang tidak disengaja seperti kontigensi, tentunya kemungkinan besar stabilitas tegangan sistem tidak akan sama dengan pada saat sistem dalam kondisi normal. Contohnya adalah ketika terjadi gangguan pada saluran transmisi dapat mengakibatkan turunnya kemampuan stabilitas tegangan suatu sistem.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kestabilan tegangan sistem Sulbagsel setelah interkoneksi PLTB Sidrap dan PLTB Jeneponto?
2. Bagaimana kestabilan tegangan sistem Sulbagsel setelah pelepasan pada saluran transmisi utama saat daya output PLTB bervariasi?
3. Bagaimana solusi untuk menjaga kestabilan tegangan sistem Sulbagsel ketika daya *output* yang dihasilkan PLTB bervariasi dan gangguan pada saluran transmisi utama?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Untuk menganalisis kestabilan tegangan sistem Sulbagsel setelah interkoneksi PLTB Sidrap dan PLTB Jenepono.
2. Untuk menganalisis kestabilan tegangan sistem Sulbagsel setelah pelepasan pada saluran transmisi utama saat daya output PLTB bervariasi.
3. Untuk mengetahui solusi untuk menjaga kestabilan tegangan sistem Sulbagsel ketika daya *output* yang dihasilkan PLTB bervariasi dan gangguan pada saluran transmisi utama.

1.4 Batasan Masalah

Masalah yang akan menjadi pembahasan difokuskan dan dibatasi sebagai berikut:

1. Sistem kelistrikan yang dianalisis adalah sistem kelistrikan Sulawesi bagian Selatan.
2. Kestabilan yang dibahas hanya pada kestabilan tegangan.
3. PLTB yang diteliti hanya pada daya *output* yang dihasilkan.
4. Gangguan transmisi hanya pada saluran transmisi Malili-Lasusu.
5. Terdapat tiga jenis bus yang digunakan pada penelitian ini yaitu bus beban, bus generator atau pengontrol tegangan dan bus Poso sebagai bus referensi

1.5 Metodologi Penelitian

Dalam melakukan penulisan untuk mendapatkan hasil yang tepat maka metode yang dilakukan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Kajian yang dilakukan oleh penulis atas referensi-referensi yang ada, baik berupa buku, artikel, jurnal maupun sumber lain yang berhubungan dengan penelitian.

2. Pengambilan data

Melakukan pengambilan data yang penting dan berhubungan dengan kestabilan sistem tenaga listrik 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 aliran daya yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik profil tegangan pada sistem kelistrikan.

5. Analisis Data

Dilakukan analisis data hasil dari simulasi aliran daya dan menganalisis kestabilan tegangan dengan berbagai kondisi *output* yang bervariasi dan hilangnya saluran transmisi.

6. Penarikan Kesimpulan

Membuat kesimpulan dari hasil analisa data yang telah dilakukan dengan melihat kolerasi antara hasil analisa dan permasalahan yang diteliti.

1.6 Manfaat Penulisan

Adapun manfaat yang diperoleh dalam penelitian ini adalah:

1. Sebagai referensi bagi pihak PLN dalam hal evaluasi perencanaan sistem kelistrikan di Sulawesi bagian selatan yang dapat digunakan dalam menyusun RUPTL PLN selanjutnya.
2. Sebagai referensi ilmiah bagi mahasiswa lainnya mengenai topik kestabilan tegangan sistem tenaga listrik akibat gangguan saluran transmisi.
3. Bagi penulis sendiri merupakan pengalaman dan pembelajaran khususnya mengenai kestabilan sistem tenaga listrik dan gangguan pada saluran transmisi.

1.7 Sistematika Penulisan

Tugas akhir ini disusun mengikuti sistematika penulisan yang diuraikan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini dari pendahuluan yang berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, metodologi penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori penunjang yang relevan untuk bahan penelitian yang diperoleh dari sumber referensi untuk menyusun kerangka teori dan konseptural.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini berisi tentang waktu dan tempat penelitian, metode yang digunakan, diagram alur yang digunakan, analisa data, dan prosedur penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan pembahasan yang ada pada rumusan masalah.

BAB V PENUTUP

Pada bab penutup ini berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan serta saran-saran yang membangun mengenai topik dari penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem tenaga listrik yang mempunyai fungsi untuk membangkitkan, mentransmisikan, dan mendistribusikan energi listrik dari pusat pembangkitan sampai dengan ke pelanggan [3].

Komponen utama dari sistem tenaga listrik yaitu sebagai berikut:

1. Pembangkit listrik

Pembangkit merupakan komponen yang berfungsi membangkitkan tenaga listrik, yaitu mengubah energi yang berasal dari sumber energi lain.

2. Transmisi tenaga listrik

Transmisi merupakan komponen yang berfungsi menyalurkan daya atau energi dari pusat pembangkitan ke pusat beban.

3. Distribusi tenaga listrik

Distribusi merupakan komponen yang berfungsi mendistribusikan energi listrik ke lokasi konsumen energi listrik.

4. Beban listrik

Beban adalah peralatan listrik di lokasi konsumen yang memanfaatkan energi listrik dari sistem tersebut.

2.2 Proses Penyampaian Tenaga Listrik ke Pelanggan

Karena berbagai persoalan teknis, tenaga listrik hanya dibangkitkan pada tempat-tempat tertentu. Sedangkan pemakai tenaga listrik atau pelanggan tenaga listrik tersebar di berbagai tempat, maka penyampaian tenaga listrik dari tempat dibangkitkan sampai ke tempat pelanggan memerlukan berbagai penanganan teknis.

Tenaga listrik dibangkitkan dalam pusat-pusat listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTP dan PLTD kemudian disalurkan melalui saluran transmisi setelah terlebih dahulu dinaikkan tegangannya oleh transformator penaik tegangan (*step up transformer*) yang ada di pusat listrik. Saluran transmisi tegangan tinggi di PLN kebanyakan mempunyai tegangan 66 kV, 150 kV, dan 500 kV. Khusus untuk tegangan 500 kV dalam praktek saat ini disebut sebagai tegangan ekstra tinggi. Masih ada beberapa saluran transmisi dengan tegangan 30 kV, namun tidak dikembangkan lagi oleh PLN [3].

Setelah tenaga listrik disalurkan melalui saluran transmisi maka sampailah tenaga listrik ke Gardu Induk (GI) untuk diturunkan tegangannya melalui transformator penurun tegangan (*step down transformer*) menjadi tegangan menengah atau yang juga disebut sebagai tegangan distribusi primer. Tegangan distribusi primer yang dipakai PLN adalah 20 kV, 12 kV, dan kV [3].

Jaringan setelah keluar dari GI biasa disebut jaringan distribusi, sedangkan jaringan antara Pusat Listrik dengan GI biasa disebut jaringan transmisi. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer maka kemudian tenaga listrik diturunkan tegangannya dalam gardu-gardu distribusi menjadi tegangan

rendah dengan tegangan 380/220 Volt atau 220/127 Volt, kemudian disalurkan melalui Jaringan Tegangan Rendah untuk selanjutnya disalurkan ke rumah-rumah pelanggan (konsumen) PLN melalui Sambungan Rumah [3].

Setiap GI sesungguhnya merupakan Pusat Beban untuk suatu daerah pelanggan tertentu, bebannya berubah-ubah sepanjang waktu sehingga juga daya yang dibangkitkan dalam pusat-pusat listrik harus selalu berubah [3].

Perubahan beban dan perubahan pembangkitan daya ini selanjutnya menyebabkan aliran daya dalam saluran-saluran transmisi berubah-ubah sepanjang waktu. Apabila daya nyata yang dibangkitkan oleh pusat-pusat listrik lebih kecil daripada daya yang dibutuhkan oleh para pelanggan, maka frekuensi akan turun, sebaliknya apabila lebih besar, frekuensi akan naik. PLN berkewajiban menyediakan tenaga listrik yang frekuensinya tidak jauh menyimpang dari 50 Hertz [3].

2.3 Transmisi Tenaga Listrik

Transmisi merupakan komponen yang berfungsi menyalurkan daya atau energi dari pusat pembangkitan ke pusat beban. Pusat pembangkit pada umumnya jauh dari konsumen sehingga dibutuhkan jaringan transmisi. Pada saluran transmisi terdapat rugi-rugi daya dan *drop* tegangan yang besarnya sebanding dengan panjang saluran. Oleh karena itu pada saluran transmisi digunakan tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi untuk meminimalisir rugi-rugi saluran. Besar tegangan saluran transmisi yang digunakan di Indonesia yaitu 70 kV, 150 kV, dan 500 kV. Tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator sebelum memasuki saluran

transmisi harus melalui trafo *step up* untuk menaikkan tegangan sehingga sama dengan saluran transmisi [4].

Berdasarkan panjangnya saluran transmisi dapat dibagi menjadi tiga macam yaitu sebagai berikut ini:

1. Saluran Transmisi Pendek (*Short Line*)
2. Saluran Transmisi Menengah (*Medium Line*)
3. Saluran Transmisi Panjang (*Long Line*)

2.4 Gangguan pada Saluran Transmisi

Yang dimaksud dengan gangguan dalam operasi sistem tenaga listrik adalah kejadian yang menyebabkan bekerjanya relay dan menjatuhkan pemutus tenaga yang melalui (PMT) diluar kehendak operator sehingga menyebabkan putusnya aliran daya yang melalui PMT tersebut [5].

Jenis gangguan dibagi meenjadi dua kategori:

- a) Hubung Singkat
- b) Putusnya Kawat

Dalam kategori pertama termasuk hubung singkat satu fasa atau dua fasa dengan tanah, hubung singkat antara dua fasa, dan hubung singkat tiga fasa satu sama lain, atau hubung singkat tiga fasa dengan tanah. Kadang-kadang hubung singkat dan putusnya kawat terjadi bersamaan. Kadang kala terjadi juga hubung singkat di beberapa tempat sekaligus [6].

2.4.1 Sebab-sebab Gangguan pada Saluran Transmisi

Oleh karena letaknya yang tersebar di berbagai daerah, maka saluran transmisi mengalami gangguan-gangguan baik disebabkan oleh alam maupun oleh sebab-sebab yang lain [6].

Dalam sistem kelistrikan di Indonesia, sebab gangguan yang paling utama adalah petir. Pada instalasi yang paling sering terkena petir adalah saluran udara, baik Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT), Saluran Udara tegangan Menengah (SUTM) maupun Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR). Hal ini disebabkan karena memang jumlah petir di Indonesia tergolong banyak. Hal ini biasanya dinyatakan dengan *Isokeraunic Level* (IKL) yaitu angka yang menggambarkan jumlah hari guruh per tahun [3].

Sebab-sebab gangguan lainnya adalah tanaman, binatang dan juga kelalaian manusia sering merupakan sebab gangguan seperti membawa benda yang menjulang tinggi lalu menyentuh saluran transmisi udara. Pada SUTT 150 kV, 70 kV, dan 30 kV petir masih merupakan sumber gangguan yang terbesar. Tetapi pada SUTM dan SUTR gangguan karena tanaman juga merupakan sumber gangguan yang tidak kecil disebabkan karena SUTM dan SUTR tidak mempunyai jalur khusus yang bebas tanaman seperti pada SUTT [3].

2.4.2 Gangguan Karena Beban Lebih

Sering terjadi gangguan yang disebabkan adanya bagian dari sistem yang mengalami beban lebih. Hal semacam ini bisa terjadi karena sebelumnya sudah ada gangguan yang menyebabkan beban berpindah ke bagian sistem yang lain sehingga

timbul beban lebih. Gangguan semacam ini biasa disebut dengan gangguan kaskade.

Gangguan karena beban lebih bisa juga terjadi karena memang pertumbuhan beban tidak dengan penguatan instalasi misalnya penambahan transformator atau penambahan SUTT. Koordinasi yang kurang baik dalam pengoperasian sistem dapat juga menimbulkan gangguan beban lebih. Pencegahan gangguan semacam ini dapat dilakukan dengan mengatur alokasi pembangkitan agar tidak ada bagian dalam sistem transmisi yang akan mengalami beban lebih namun hal semacam ini tidaklah mungkin tergantung kepada keadaan sistem [3].

2.4.3 Akibat-akibat Gangguan

Gangguan sesungguhnya merupakan peristiwa hubung singkat baik antar fasa maupun antar fasa dengan tanah. Apabila peristiwa hubung singkat ini tidak segera dihilangkan maka hal ini bisa merusak peralatan seperti kawat penghantar putus, isolator pecah, transformator arus terbakar bahkan mungkin juga transformator tenaga atau generator dapat terbakar.

Yang bertugas menghentikan peristiwa hubung singkat ini adalah Relay dan PMT. PMT adalah alat yang bertugas langsung memutus arus hubung singkat maka PMT memerlukan pemeriksaan dan pemeliharaan rutin khususnya apabila sudah sering memutus arus hubung singkat yang besar agar PMT tidak mengalami kerusakan-kerusakan sebagai akibat gangguan.

Lightning Arrester juga sering meledak sebagai akibat adanya gangguan. Karena Lightning Arrester bertugas memutus arus hubung singkat fasa ke tanah

yang diakibatkan oleh petir. Sampai saat ini pemeriksaan rutin dilapangan terhadap Lightning Arrester hanya dapat dilakukan secara visual saja ditambah dengan pengukuran tahanan pentanahan saja, sehingga sulit diterka apakah Lightning Arrester masih normal atau tidak [3].

2.4.4 Gangguan Karena Petir

Gangguan pada SUTT di Indonesia yang disebabkan oleh petir jumlahnya relatif banyak. Petir yang menyambar SUTT menimbulkan gelombang berjalan yang dapat menimbulkan *flashover*. Petir merupakan surja listrik yang mengenai SUTT. Surja listrik dapat pula berasal dari pemasukan atau pengeluaran PMT (karena *switvhing*), surja semacam ini disebut sebagai surja hubung.

Pada sistem tegangan ekstra tinggi yaitu sistem yang tegangannya diatas 300 kV, masalah surja hubung lebih menonjol daripada masalah surja petir. Hal ini disebabkan karena pada sistem tegangan ekstra tinggi arus kapasitif yang ditimbulkan oleh kapasitansi isolasi besar sehingga pada pembukaan dan pemasukan PMT menimbulkan surja yang besar. Dilain pihak tingkat isolasi dasar sistem menyebabkan masalah surja petir kurang berarti dibandingkan dengan surja hubung. Surja hubung dapat terjadi pada pembukaan dan pemasukan PMT dalam keadaan operasional dan juga terjadi dalam keadaan gangguan. Surja hubung merupakan gejala peralihan (*transient*) dalam sistem dan berlangsung lebih lama dibandingkan dengan surja petir pada umumnya [3].

2.4.5 Gangguan-gangguan yang Besar

Yang dimaksud dengan gangguan besar adalah gangguan yang meliputi sebagian besar dari sistem, termasuk pula gangguan total yaitu gangguan yang menyebabkan seluruh sistem padam.

Gangguan yang besar pada umumnya merupakan gangguan kaskade, yaitu gangguan yang menyebabkan tripnya sebuah atau dua buah PMT kemudian disusul dengan tripnya banyak PMT dalam sistem.

Gangguan yang besar pada umumnya disebabkan oleh:

1) Trip Unit Pembangkit yang Besar

Trip unit pembangkit yang besar menyebabkan beban yang sebelumnya diambil oleh unit yang trip beralih ke unit pembangkit yang lain sehingga menyebabkan unit pembangkit lain mengalami beban lebih dan ikut trip. Hal ini terutama terjadi apabila cadangan berputar dalam sistem lebih kecil dibandingkan dengan daya yang dibangkitkan oleh unit pembangkit yang mengalami gangguan. Proses pemindahan beban ini mungkin juga menyebabkan ada saluran transmisi mengalami beban lebih dan ikut trip tergantung situasi aliran daya dalam sistem.

2) Tripnya Saluran Transmisi yang Tinggi Bebannya

Tripnya saluran transmisi yang tinggi bebannya mempunyai dampak yang serupa seperti tripnya pembangkit yang besar, khususnya untuk bagian sistem yang menerima daya dari saluran tersebut.

Sehubungan dengan sebab gangguan yang besar, didalam sistem perlu dipasang *Under Frequency Relay* sebanyak mungkin. *Under Frequency Relay* sebaiknya dipasang sebanyak mungkin untuk melepas penyulang (*feeder*) distribusi terlebih

dahulu sehingga diharapkan tidak ada unit pembangkit yang ikut trip. Hal ini akan mempercepat proses menormalkan sistem setelah terjadinya gangguan.

Disamping memasang *Under Frequency Relay* juga perlu diusahakan agar cadangan berputar selalu cukup dan diusahakan agar aliran daya dalam sistem tidak menimbulkan trip kaskade apabila ada unit pembangkit atau saluran transmisi mengalami gangguan.

Gangguan kaskade menyusul tripnya PMT unit pembangkit atau tripnya PMT saluran transmisi dapat disebabkan karena terjadinya ayunan daya dalam sistem sebagai akibat kurang stabilnya sistem. Untuk mencegah tripnya PMT dalam kondisi ayunan daya dapat dilakukan dengan memasang *blocking relay* yang bekerja selama masa ayunan daya [3].

2.4.6 Distorsi Tegangan Tinggi dan Arus

Dalam bahasa Inggris ada peristiwa yang disebut *disturbance*, yang sesungguhnya adalah gangguan juga tetapi belum sampai menyebabkan putusnya pasokan daya. Namun pasokan daya yang masih tersedia ini tegangan atau arusnya atau keduanya mengalami distorsi sehingga bisa mengganggu operasi dari peralatan pemakai tenaga listrik, misalnya timbul pemanasan yang berlebihan.

Disturbance bisa dikatakan sebagai gangguan mutu pasokan daya listrik, bukan gangguan pasokan tenaga listrik dalam arti putusnya pasokan.

Gangguan terhadap mutu tenaga listrik disebabkan terutama oleh pemakaian alat-alat yang karakteristiknya tidak linear. Gangguan ini tidak bisa diatasi dalam

operasi *real time* (waktu yang berlangsung) melainkan memerlukan perencanaan dan pemasangan alat tertentu seperti *filter* dan *static VAR compensator* [3].

2.5 Proteksi Saluran Transmisi

Proteksi saluran (*line protection*) dapat dibagi menjadi tiga bagian besar yaitu:

1. Proteksi arus tanpa pilot
2. Proteksi jarak dengan dan tanpa pilot
3. Proteksi saluran dengan *differential relay*

Relay pengaman untuk saluran transmisi melindungi saluran dan peralatan terhadap kerusakan dengan cara menghilangkan gangguan yang kecil secara cepat dan tepat. Kecuali itu relay berusaha membatasi daerah yang terkena gangguan seminimum mungkin sehingga mutu dan keandalan penyaluran terjamin.

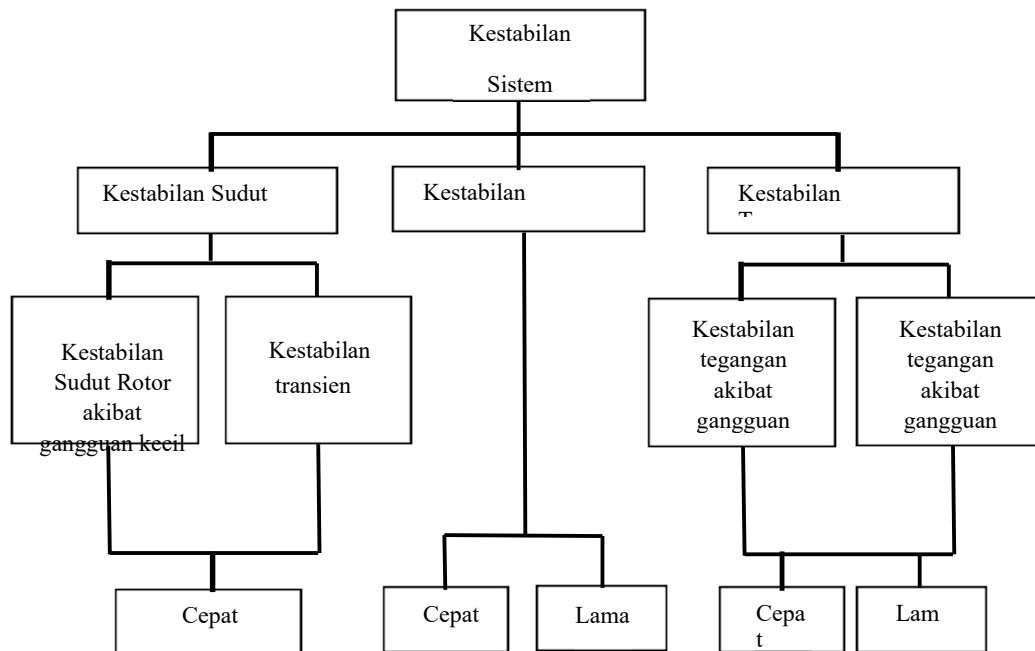
Banyak sekali macam sistem pengaman yang diketahui banyak juga derajat kemampuan pengamanannya. Untuk saluran transmisi yang penting sering dipakai jenis *pilot relay*, meskipun sistem relay arus lebih (*over current*) juga dapat dipakai. Oleh karena itu pemilihan jenis relay perlu dilakukan dengan seksama dengan memperhatikan frekuensi gangguan, pentingnya saluran yang hendak dilindungi, faktor-faktor tekno-ekonomisnya, kekurangan dan kelebihan jenis yang satu terhadap yang lainnya [6].

2.6 Kestabilan Sistem Tenaga

Sistem tenaga merupakan sistem yang sangat kompleks dan terdiri dari banyak peralatan listrik yang memiliki karakteristik serta tanggapan masing-masing terhadap perubahan kondisi. Oleh karena itu, perlu pengklasifikasian kestabilan

sistem tenaga berdasarkan faktor kontribusi yang menyebabkan ketidakstabilan.

Klasifikasi tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.1 [7].



Gambar 2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik[3]

Kestabilan sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem untuk menjaga kondisi operasi yang seimbang dan kemampuan sistem tersebut untuk kembali ke kondisi operasi normal ketika terjadi gangguan fisik tidak terkontrol [8].

Sedangkan ketidakstabilan sistem dapat terjadi dalam berbagai bentuk, tergantung dari konfigurasi sistem dan model operasinya. Sistem akan masuk pada kondisi ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, peningkatan beban atau pada saat terjadi perubahan kondisi sistem yang disebabkan oleh *drop* tegangan yang tidak terkontrol [8].

Penyebab utama ketidakstabilan tegangan adalah ketidakmampuan sistem

tenaga untuk memenuhi perintah daya reaktif. Inti dari permasalahan ini biasanya berhubungan dengan susut tegangan yang terjadi pada saat daya aktif dan daya reaktif mengalir melalui reaktansi induktif pada jaringan transmisi [8].

Secara mendasar masalah kestabilan berarti menjaga sinkronisasi operasi sistem tenaga. Kestabilan pada sistem tenaga listrik merupakan masalah yang sangat penting dalam penyediaan daya kepada konsumen [8].

Permasalahan utama yang terjadi di sistem tenaga adalah operasi sinkron antara tegangan, frekuensi, dan sudut fasa. Operasi ini akan 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 akan meningkatkan keandalan dan dapat memperbesar suplai daya yang dihasilkan. Namun permasalahan yang mungkin muncul pada sistem interkoneksi adalah ketidaksamaan tegangan, frekuensi, dan sudut fasa, sehingga sistem tenaga listrik tidak dapat berjalan serempak atau mengalami ketidakstabilan [9].

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi beberapa syarat:

1. *Reliability* adalah kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus.
2. *Quality* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. *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 listrik 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. Untuk itu diperlukan satu penelahan kestabilan agar pembangkit yang terganggu tidak terlepas dari sistem.

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

1. Kestabilan Keadaan Tetap (*Steady State Stability*)
2. Kestabilan Dinamis (*Dynamic Stability*)
3. Kestabilan Peralihan (*Transient Stability*)

1). Kestabilan Keadaan Tetap

Kestabilan keadaan tetap adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menerima gangguan kecil yang bersifat gradual yang 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 jenis pembangkit yang sederhana (sumber tegangan konstan) karena hanya menyangkut gangguan kecil disekitar titik kesetimbangan.

2). Kestabilan Dinamis

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 perhitungannya.

3). Kestabilan Peralihan

Kestabilan Peralihan adalah kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan atau sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan stabilitas karena gangguan terjadi diatas kemampuan sistem.

Analisis kestabilan peralihan merupakan analisis yang utama untuk menelaah perilaku sistem daya misalnya gangguan yang berupa:

1. Perubahan beban yang mendadak karena terputusnya unit pembangkit.

2. Perubahan pada jaringan transmisi misalnya gangguan hubung singkat atau pemutusan saklar (*switching*).

Sistem daya listrik masa kini jauh lebih luas ditambah interkoneksi antar sistem yang rumit dan melibatkan beratus-ratus mesin yang secara dinamis saling mempengaruhi melalui perantara jala-jala tegangan ekstra tinggi mesin-mesin ini mempunyai sistem penguatan yang saling berhubungan [7].

Kisaran masalah yang dianalisis banyak menyangkut gangguan yang besar dan tidak lagi memungkinkan menggunakan proses kelinearan. Masalah kestabilan peralihan dapat lebih lanjut dibagi kedalam kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multiswing*) [6].

Kestabilan ayunan pertama didasarkan pada model generator yang cukup sederhana tanpa memasukkan sistem pengaturannya, biasanya periode waktu yang diselidiki adalah detik pertama setelah timbulnya gangguan pada sistem. Bila pada sistem mesin dijumpai tetap berada dalam keadaan serempak sebelum berakhirnya detik pertama maka ini dikategorikan sistem masih stabil [6].

2.7 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan menurut Taylor (1994) adalah:

1. Suatu sistem tenaga pada suatu tahap operasi tertentu mempunyai tegangan stabil apabila setelah adanya gangguan kecil (*small-disturbance*), nilai tegangan dekat beban adalah sama atau mendekati nilai tegangan sebelum terjadinya gangguan.
2. Kemampuan sistem untuk dapat menjaga tegangan pada semua bus tetap dalam batas operasi yang ditentukan setelah mengalami gangguan.

3. Suatu sistem tenaga pada suatu tahap operasi dan gangguan tertentu menuju jatuh tegangan apabila nilai tegangan setelah gangguan adalah dibawah standar batas yang ditentukan [9].

Ketidakstabilan tegangan suatu proses dinamis dan berdasarkan kerangka waktu lama terjadinya dapat dibagi atas tiga skenario:

1. Stabilitas tegangan transien (*transien voltage stability*) yang mempunyai kerangka waktu terjadinya dari nol sampai sepuluh detik.
2. Stabilitas tegangan waktu panjang (*long-term voltage stability*) yang mempunyai kerangka waktu beberapa menit, biasanya dua sampai tiga menit.
3. Ketidakstabilan tegangan waktu panjang (*long-term voltage instability*) yang mempunyai kerangka waktu lebih lama dari sepuluh menit.

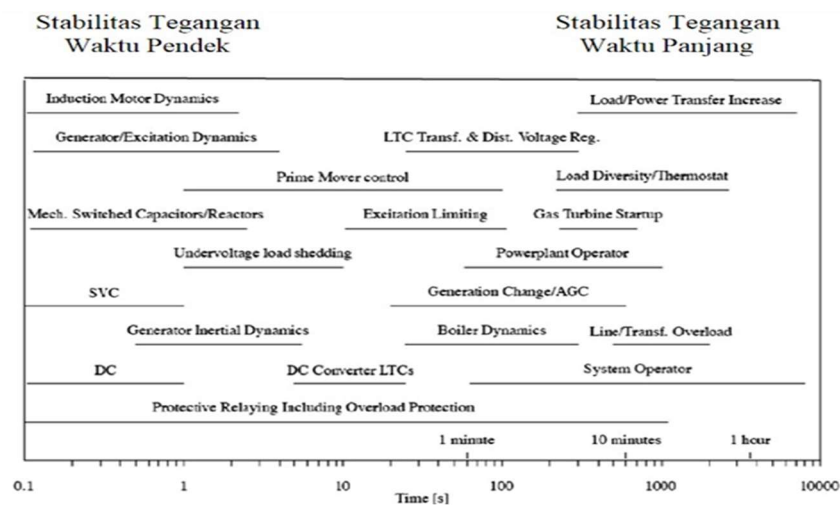
2.8 Penyebab Ketidakstabilan Tegangan

Sistem tenaga merupakan sistem yang dinamis dimana selalu terjadi perubahan di dalam sistem tersebut dalam selang waktu tertentu. Peristiwa gangguan-gangguan seperti gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, tiga fasa antar fasa, pelepasan beban, dan putus saluran dapat mempengaruhi kestabilan sistem. Kondisi ini dapat menimbulkan osilasi pada sistem sehingga mempengaruhi kestabilan tegangan sistem.

Dalam studi kestabilan tegangan akibat terjadinya gangguan kemampuan sistem untuk kembali stabil terbagi dua, yaitu stabilitas jangka pendek dan stabilitas jangka panjang. Stabilitas jangka pendek biasanya terjadi akibat adanya tanggapan cepat pengendali tegangan seperti *Automatic Voltage Regulator* (AVR) atau

Flexible AC Transmission System (FACTS). Sedangkan stabilitas waktu panjang melibatkan peralatan yang memiliki tanggapan lambat terhadap perubahan sistem, seperti *On-load Tap Charger (OLTP)* atau *Delayed Corrective Control Action* [10].

Komponen dan kendali sistem tenaga memperengaruhi kestabilan tegangan berdasarkan lamanya waktu memperoleh kesabilan kembali diperlihatkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Komponen Sistem Kendali[3]

2.9 Energi Terbarukan

Salah satu program dalam mengatasi ketahanan energi di Indonesia adalah dengan membangun sumber energi terbarukan untuk mengganti sumber energi yang tidak terbarukan seperti minyak bumi, batu bara, dan gas yang menimbulkan dampak yang dapat merusak bumi. Dengan semakin menipisnya cadangan sumber energi tidak terbarukan maka biaya penambangnya akan meningkat yang akan berdampak meningkatnya harga jual ke masyarakat. Pada saat yang bersamaan

energi yang tidak terbarukan akan melepas emisi karbon ke atmosfer yang menjadi penyumbang besar terhadap pemanasan global.

Energi terbarukan adalah sumber-sumber energi yang akan habis secara alamiah. Energi terbarukan berasal dari elemen alam yang tersedia di bumi dalam jumlah besar, seperti matahari, angin, air, tumbuhan, dan sebagainya. Energi terbarukan merupakan sumber energi paling bersih yang tersedia di planet ini [11].

2.10 Media Penyimpanan Energi

Salah satu kelemahan pembangkit yang menggunakan energi terbarukan semisal PLTB dan PLTS adalah tidak terjaminnya kontinuitas pelayanan akibat sifat *probabilistic* dari sumber energi terbarukan. Untuk itu diperlukan media penyimpanan energi listrik yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik ketika energi yang dihasilkan tidak semua diserap oleh beban. Energi yang tersimpan akan digunakan ketika suplai dari pembangkit tidak mencukupi kebutuhan beban. Media penyimpanan energi listrik yang umum digunakan pada sistem *hybrid* adalah batere.

Batere adalah salah satu unit sistem *hybrid* yang menentukan kinerja sistem *hybrid*. Sehingga dalam memilih jenis dan kapasitas batere harus mempertimbangkan beberapa factor diantaranya:

1. Tegangan yang disyaratkan

Tegangan akumulator harus stabil mengingat arus listrik yang mengalir ke beban bervariasi langsung dengan tegangan.

2. Arus yang disyaratkan

Dalam beberapa aplikasi pemakaian arus dapat dikatakan konstan. Dalam penerapan sistem lainnya, sistem diharapkan dapat memberikan arus yang besar untuk suatu periode waktu yang relatif singkat.

3. Kapasitas Ampere-jam dan Watt-jam (KHA)

Sebuah akumulator memiliki cukup kapasitas Ampere-jam untuk mengirim daya ke beban sampai ada sumber daya untuk mengisi kembali muatan listrik yang terpakai oleh beban. Kapasitas Ampere-jam sebuah akumulator biasanya dispesifikasikan bersama dengan suatu pedoman jam standar kapasitas dalam Watt-jam menyatakan jumlah energi yang dapat disimpan oleh akumulator dalam Ampere-jam, sehingga dalam menggunakan akumulator sebagai penyimpanan energi spesifikasi Ampere-jam ini perlu dikonversi ke dalam Watt-jam [11].

2.11 Angin Sebagai Sumber Daya Energi

2.11.1 Defenisi Angin

Angin merupakan energi yang terjadi dikarenakan adanya perbedaan suhu antara udara dingin dan panas yang mengalir. Angin adalah udara yang bergerak sehingga memiliki kecepatan, tenaga, dan arah. Penyebab dari pergerakan ini adalah pemanasan bumi oleh radiasi matahari. Pergerakan angin ini memiliki energi kinetik oleh karena itu energi angin dapat dikonversi menjadi energi lainnya seperti energi listrik dengan menggunakan kincir angin atau turbin angin [12].

Angin seperti fluida yang lain pada umumnya mempunyai profil geseran atau profil kecepatan ketika mengalir melewati benda padat misalnya permukaan bumi. Pada tepat di permukaan bumi, kecepatan relatif angin terhadap permukaan bumi

sama dengan nol. Kemudian kecepatan ini menjadi semakin tinggi sebanding ketinggian dari permukaan bumi. Ada dua jenis profil geseran angin yang biasa digunakan untuk menghitung energi: profil geseran angin eksponensial (*exponential wind shear profile*) dan profil geseran angin kekasaran permukaan (*surface roughness wind shear stress*).

2.11.2 Potensi Energi Angin

Indonesia merupakan negara yang memiliki potensi alam yang begitu besar, salah satunya adalah angin. Potensi angin dapat dimanfaatkan menjadi sumber energi yang mempunyai kecepatan diatas 5m/detik dan berada pada 120 lokasi yang tersebar di wilayah Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa.

Menurut Kepala Penelitian dan Pengembangan Daerah Jawa Barat Neni Sri Utami, Kecepatan angin di Indonesia kurang dari 5,9 meter per detik tapi bukan tidak bisa dimanfaatkan. Indramayu memiliki 40 kincir angin yang hanya 3 meter per detik dapat memompa air 2,7 meter kubik perjamnya dan hanya memerlukan biaya 500 ribu untuk biaya perawatan setiap tahunnya. Pemanfaatan potensi angin seperti ini diharapkan mampu membantu masyarakat untuk menekan biaya perawatan yang mulai sangat mahal di era globalisasi [13].

2.12 DIgSILENT *PowerFactory*

DIgSILENT *PowerFactory* adalah *software* rekayasa yang berguna untuk analisis industri, utilitas, dan analisis sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini telah dirancang sebagai paket perangkat lunak canggih yang terintegrasi dan interaktif

yang didedikasikan untuk sistem tenaga listrik dan analisis kontrol dalam rangka mencapai tujuan utama perencanaan dan optimasi operasi.

DIgSILENT nama singkatan dari "*DIGital SIMuLation and Electrical NeTwork calculation program*". DIgSILENT Versi 7 adalah perangkat lunak analisis sistem tenaga yang pertama di dunia yang terintegrasi dengan grafis antarmuka satu baris, diagram satu baris interaktif, juga termasuk fungsi menggambar, kemampuan mengedit dan semua relevan statis dan dinamis fitur perhitungan.

Dengan menggunakan hanya satu *database*, yang berisi semua data yang dibutuhkan untuk semua peralatan dalam sistem tenaga (misalnya data *busbar*, data generator, data proteksi, *harmonic* data, data *controller*), *PowerFactory* dapat dengan mudah mengeksekusi salah satu atau semua fungsi yang tersedia, semua dalam lingkup program yang sama. Beberapa fungsi yang tersedia dalam DIgSILENT *PowerFactory* adalah analisis aliran beban/*load flow analysis*, perhitungan arus pendek/*short-circuit calculation*, analisis harmonik/*harmonic analysis*, koordinasi proteksi/*protection coordination*, perhitungan stabilitas/*stability calculation* dan analisis modal/*modal analysis* [14].