

**PERFORMANSI STABILITAS SISTEM PENETRASI
ENERGI TERBARUKAN SKALA BESAR BERBASIS
KECERDASAN BUATAN**

**PERFORMANCE MODEL OF LARGE-SCALE RENEWABLE
ENERGY PENETRATION STABILITY BASED
ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

**AGUS SISWANTO
P.1600.316.004**



**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**

PRA-PROMOSI DISERTASI

**MODEL PERFORMANSI STABILITAS SISTEM PENETRASI
ENERGI TERBARUKAN SKALA BESAR BERBASIS
KECERDASAN BUATAN**

PERFORMANCE MODEL OF LARGE-SCALE RENEWABLE
ENERGY PENETRATION STABILITY BASED
ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

AGUS SISWANTO
P.1600.316.004



**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**

**MODEL PERFORMANSI STABILITAS SISTEM PENETRASI
ENERGI TERBARUKAN SKALA BESAR BERBASIS
KECERDASAN BUATAN**

DISERTASI

Sebagai Salah Satu Syarat untuk mencapai Gelar Doktor

Disusun dan diajukan oleh

AGUS SISWANTO

P.1600.316.004

Kepada

**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**

UJIAN PRA-PROMOSI DISERTASI

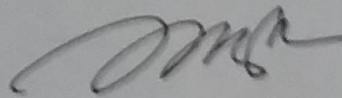
**MODEL PERFORMANSI STABILITAS SISTEM PENETRASI
ENERGI TERBARUKAN SKALA BESAR BERBASIS
KECERDASAN BUATAN**

Disusun dan diajukan oleh

AGUS SISWANTO
NOMOR POKOK. P1600.316.004

Menyetujui

Tim Promotor,



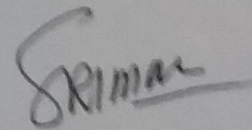
Prof. Dr. Ir. H. Ansar Suyuti, M.T., IPU,
Promotor

Tanggal: 9/3/2020



Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T.,
Co-promotor

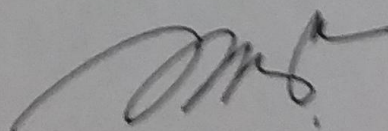
Tanggal : 2/3/2020



Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T.,
Co-promotor

Tanggal: 10/3/2020

Ketua Program Studi Doktoral (S3)
Jurusan Teknik Elektro
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Ir. H. Ansar Suyuti, M.T., IPU.

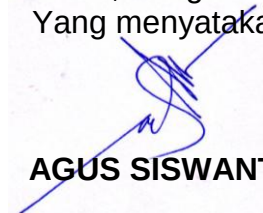
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Agus Siswanto
Nomor Pokok : P1600316004
Program Studi : S3 Teknik Elektro

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

Makassar, 5 Agustus 2020
Yang menyatakan,



AGUS SISWANTO

Abstrak

Agus Siswanto. Model performansi stabilitas sistem penetrasi energi terbarukan skala besar berbasis kecerdasan buatan (dibimbing oleh Ansar Suyuti, Indar Chaerah Gunadin, dan Sri Mawar Said)

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui performansi stabilitas kelistrikan sistem Sulawesi Selatan dari penetrasi Energi Baru Terbarukan (EBT) Turbin Angin yang terpasang di sidrap dan Jeneponto. Penelitian ini menganalisis pengaruh dari EBT yang masuk dalam sistem berbasis Kecerdasan buatan yaitu metode *Artificial Neural Network* (ANN) dan *Extreme Learning Machine* (ELM). Penggunaan AAN dan ELM dalam penelitian ini untuk menentukan nilai steady-state stability limit pengaruh dari penetrasi turbin angin. Penelitian ini menggunakan tiga model performansi, stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi dan stabilitas tegangan sebelum turbin angin masuk sistem, penetrasi 75MW turbin angin sidrap, 72 MW turbin angin Jeneponto dan penetrasi 147 MW. Dari hasil simulasi, pertama index stabilitas sistem sebelum injeksi wind turbin sebesar -11.6376 pada beban normal, pada keadaan beban naik 50% menjadi -10.8866, mengalami penurunan stabilitas sebesar -22.5242 kedua, index stabilitas saat turbin angin sidrap masuk sebesar -15.2648, pada keadaan beban naik 50% menjadi -14.7469, mengalami penurunan stabilitas sebesar -30.0117. ketiga, index stabilitas turbin angin Jeneponto masuk sebesar -15.6001 pada keadaan beban naik 50% menjadi -15.1205 mengalami penurunan stabilitas sebesar -30.7206. keempat index stabilitas saat turbin angin sidrap dan Jeneponto masuk sebesar -20.5625, pada keadaan beban naik 50% menjadi -20.4699, mengalami penurunan stabilitas sebesar -41.0324. Dari hasil parameter sistem sebelum masuk turbin angin dan setelah masuk turbin angin dimasukkan dalam model Rei-Dimo dan kecerdasan buatan seperti: P_{Gen} , Q_{Gen} , V_{bus} , P_{bus} , Q_{bus} , dalam ANN dan ELM. Penelitian ini memberi manfaat bagi penentuan SSSL dan batas stabilitas dan performansi stabilitas saat terjadi sebelum dan sesudah injeksi PLTB.

Kata Kunci: Performansi Stabilitas, Steady-State Stabilitas Limit, Energi Baru Terbarukan, Penetrasi, Kecerdasan Buatan, Turbin Angin, Rei-Dimo.

ABSTRACT

AGUS SISWANTO, Performance Model of Large-Scale Renewable Energy Penetration Stability Performance Based on Artificial Intelligence (supervised by Ansar Suyuti, Indar Chaerah Gunadin, And Sri Mawar Said).

This study aims to determine the electrical stability performance of the South Sulawesi system from the penetration of Renewable Energy (EBT) Wind Turbines installed in the Sidrap and Jeneponto. This study analyzes the effect of EBT included in the Artificial Intelligence-based system, namely the Artificial Neural Network (ANN) and Extreme Learning Machine (ELM) methods. The use of AAN and ELM in this study to determine the value of steady-state stability limit the influence of wind turbine penetration. This study uses three performance models, rotor angle stability, frequency stability, and voltage stability before the wind turbine enters the system, 75MW penetration of the Sidarap wind turbine, 72 MW Jeneponto wind turbine and 147 MW penetration. From the simulation results, first, the system stability index before wind turbine injection is -11.6376 at normal load, under load conditions increased by 50% to -10,8866, decreased stability by -22.5242 second, the stability index when Sidrap wind turbines enter is -15.2648, under conditions the load increased 50% to -14.7469, experiencing a decline in stability of -30.0117. third, the Jeneponto incoming wind turbine stability index of -15,6001 under load conditions increased 50% to -15.1205, decreased stability of -30.7206. The four satellites index when Sidrap and Jeneponto wind turbines entered was -20.5625, when load conditions increased 50% to -20.4699, decreased stability by -41.0324. From the results of the system parameters before entering the wind turbine and after entering the wind turbine included in the Rei-Dimo model and artificial intelligence such as P_{Gen} , Q_{Gen} , V_{bus} , P_{bus} , Q_{bus} , in ANN and ELM. This study provides benefits for the determination of SSSL and stability limits and stability performance when it occurs before and after the injection of PLTB.

Keywords: Stability Performance, Steady-State Stability Limit, Renewable Energy, Penetration, Artificial Intelligence, Wind Turbines, Rei-Dimo.

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PENGAJUAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYTAAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
ABSTRAK	v
ABSTRAC	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	5
C. Tujuan Penelitian	5
D. Batasan Masalah	6
E. Manfaat Penelitian	7
F. Ruang Lingkup Penelitian	7
G. Penelitian Terkait	8
H. Sistematika Penulisan	19
BAB II TINJUAN PUSTAKA	21
A. Energi Terbarukan	21
1. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu	23
2. PLTB di Indonesia	25
3. Kapasitas PLTB	30

4. Potensi PLTB Sulawesi Selatan Jeneponto	31
5. Potensi PLTB Sulawesi Selatan Sidrap	33
6. Konversi Energi Angin	35
B. Studi Aliran Daya	40
1. Persamaan Aliran Daya	40
2. Klasifikasi Bus	44
2.1. Slack Bus	44
2.2. Bus Generator	44
2.3. Bus Beban	44
3. Metode Newton Rapshon	45
4. Standar Performansi Jaringan Sistem	49
5. Sistem Per Unit	52
C. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	54
1. Analisis Stabilitas keadaan Stabil	55
2. Stabilitas Transient	57
3. Voltage Stability	58
4. Stabilitas Sudut Rotor	60
5. Index Stabilitas	62
6. Kurva P-V	62
7. Simplifide Voltage Stability Index	63
D. Kecerdasan Buatan	64
1. Persamaan Rei-Dimo	64
2. Neural Network	69

3. Extreme Learning Machine	71
E. Kerangka Berfikir	74
BAB III METODE DAN DESIAN PENELITIAN	75
A. Diskripsi Penelitian	75
1. Jenis Penelitian	76
2. Lokasi dan Waktu Penelitian	76
3. Teknik Pengumpulan, Pengolahan data dan	77
4. Parameter Ukur	79
5. Alat Penelitian	79
B. Pemodelan Sistem Tenaga Listrik	80
1. Sistem Interkoneksi Sulselbar	80
C. Prosedur Penelitian	86
1. Model Turbin Angin	87
2. Metode Rei-Dimo	90
3. Usulan Skenario	93
4. Alur Program SSSL menggunakan kombinasi Rei-Dimo dan ANN pada Sistem Sulselbar	93
5. Metode Extreme Learning Machine	96
BAB IV SIMULASI DAN PEMBAHASAN	100
A. Stabilitas Sistem Sulselbar	100
1. Aliran Beban sistem 44 bus	101
B. Pengaruh Wind Turbin pada sistem Sulselbar	104
1. Kondisi awal sistem Sulselbar	104

2. Penempatan Turbin Angin di Sidrap	108
3. Penempatan Turbin Angin di Jeneponto	113
4. Pengaruh Turbin Angin di Sulselbar	118
C. Uji Wind turbine pada sistem Sulselbar	122
1. Akibat Penetrasi Turbin Angin di Sidrap	123
2. Akibat Penetrasi Turbin Angin di Jeneponto	124
3. Pengaruh Penetrasi Turbin Angin di sistem Sulselbar	125
D. Performansi menggunakan Stabilitas Dinamik	131
1. Sudut Rotor	132
2. Stabilitas Frekuensi	135
3. Stabilitas Tegangan	136
E. Performansi menggunakan kecerdasan buatan	139
1. Performansi SSSL menggunakan Rei-Dimo	139
2. Analisis Stabilitas transient	146
3. Performansi SSSL menggunakan Rei-Dimo ANN	151
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	163
A. Kesimpulan	163
B. Saran	164
DAFTAR PUSTAKA	165
LAMPIRAN-LAMPIRAN	169

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Pemetaan Publikasi	18
Gambar 2. Blok Diagram Kelas Turbin Angin	22
Gambar 3. Diagram blok klasifikasi turbin angin	23
Gambar 4. Sketsa Kerangka Angin	24
Gambar 5. Potensi Angin di Wilayah Indonesia	26
Gambar 6. Perkiraan dan Realitas Kecepatan angin agustus 2019	29
Gambar 7. Potensi Kecepatan angin di wilayah Sulawesi Selatan	29
Gambar 8. Project Overview PLTB Tolo 1 Jeneponto	31
Gambar 9. Karakteristik Turbin PLTB Tolo 1 Jenponto	32
Gambar 10. Diagram Singline 150kV Tolo windform 1	32
Gambar 11. Export Enegy PLTB Tolo November 2018-Agustus 2019	33
Gambar 12. PLTB Sidrap	34
Gambar 13. Kontruksi PLTB Sidrap	34
Gambar 14. Diagram satu garis sistem 2 bus	41
Gambar 15. Gambar Impedansi sistem 2 bus	42
Gambar 16. Bus daya denngan transmisi model π untuk sistem 2 bus	42
Gambar 17. Aliran arus pada rangkian ekivalen	43
Gambar 18. Ilustrasi metode Newton Raphson	47
Gambar 19. Diagram alir metode Newton Raphson	48
Gambar 20. Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	55
Gambar 21. Diagram fasor Mesin Sinkron Rotor Silindris	

pada keadaan mantab	56
Gambar 22. Momen Putar Mekanis	61
Gambar 23. Momen Putar Mekanis	61
Gambar 24. Kurva PV	63
Gambar 25. Jaringan Tranmisi dengan admitansi konstan	66
Gambar 26. Bus Fiktif	66
Gambar 27. REI- Untuk Beban Aktual	67
Gambar 28. REI- Untuk Beban Fiktif	68
Gambar 29. Struktur dari Neural Network	70
Gambar 30. Jaringan umpan maju dengan satu lapis tersembunyi	71
Gambar 31. Rancangan Penelitian	75
Gambar 32. Sistem Sulawesi Selatan	77
Gambar 33. Sigle Line Diagram Sistem sulselbar	80
Gambar 34. Skema Penelitian awal	87
Gambar 35. Struktur Model Turbin Angin	88
Gambar 36. Struktur Control Model Turbin Angin	88
Gambar 37. Struktur Model Turbin Angin	89
Gambar 38. Karakteristik wind Turbine	90
Gambar 39. Alur Penelitian Steady-State Limit menggunakan ANN	95
Gambar 40. Alur Penelitian Steady-State Limit menggunakan ELM	96
Gambar 41. Arsitektur ELM	96
Gambar 42. Profile Tegangan pada sistem sulselbar	103
Gambar 43 Penetrasi Turbin Angin Sidrap	109

Gambar 44. Penetrasi Turbin Angin di bus Jeneponto	114
Gambar 45. Penetrasi Turbin Angin Sidrap dan Jeneponto	118
Gambar 46. Pengaruh daya aktif PLTB pada sistem Sulselbar	126
Gambar 47. Pengaruh daya Reaktif PLTB pada sistem Sulselbar	126
Gambar 48. Perbandingan kondisi satu hingga 4	127
Gambar 49. Perbandingan kondisi Swing sudut	128
Gambar 50. Prosentase CCA 4 keadaan	129
Gambar 51. Perbandingan Index Stabilitas	130
Gambar 52. Grafik Eigenvalue Sistem	131
Gambar 53. Grafik Eigenvalue Analysis	132
Gambar 54. Grafik sudut rotor $f(t)$ Sebelum penetrasi PLTB	133
Gambar 55. Grafik sudut rotor $f(t)$ Setelah penetrasi PLTB Jeneponto	133
Gambar 56. Grafik sudut rotor $f(t)$ Sebelum Injeksi PLTB Sidrap dan Jeneponto	134
Gambar 57. Grafik Frekuensi Sebelum penetrasi PLTB	135
Gambar 58. Grafik Frekuensi Setelah penetrasi PLTB Jeneponto	135
Gambar 59. Grafik Frekuensi Setelah penetrasi PLTB Jeneponto dan Sidrap	135
Gambar 60. Grafik tegangan sebelum penetrasi PLTB	137
Gambar 61. Grafik tegangan setelah penetrasi PLTB Jeneponto	137
Gambar 62. Grafik tegangan setelah penetrasi PLTB Jeneponto dan Sidrap	137
Gambar 62. Singel Load REI-Dimo sistem sulselbar	139
Gambar 64. Kurva P-V Sistem sulselbar sebelum penetrasi PLTB Sidrap	141

Gambar 65. Kurva P-V Sistem Sulselbar setelah penetrasi PLTB Sidrap	142
Gambar 66. Kurva P-V Sistem Sulselbar setelah penetrasi PLTB Jeneponto	142
Gambar 67. Kurva P-V Sistem Sulselbar setelah penetrasi PLTB Sidrap dan Jeneponto	143
Gambar 68. Kurva perubahan indeks stabilitas sebelum penetrasi PLTB Sidrap	143
Gambar 69. Kurva perubahan indeks stabilitas setelah injeksi PLTB Sidrap	144
Gambar 70. Kurva perubahan indeks stabilitas setelah injeksi PLTB Jeneponto	144
Gambar 71. Kurva perubahan indeks Stabilitas setelah injeksi PLTB Sidrap dan Jeneponto	145
Gambar 72. Tampilan sudut rotor semua pembangkit penetrasi PLTB Jeneponto	146
Gambar 73. Tampilan sudut rotor semua pembangkit injeksi PLTB Sidrap	146
Gambar 74. Tampilan sudut rotor semua pembangkit injeksi PLTB Sidrap dan Jeneponto	147
Gambar 75. Kurva equal area criterion pada beban normal	148
Gambar 76. Kurva equal area criterion pada kondisi beban 40%	148
Gambar 77. Kurva equal area criterion pada kondisi beban 80%	149
Gambar 78. Kurva equal area criterion pada kondisi beban 100%	149
Gambar 79. Kurva swing mesin sinkron	150
Gambar 80. Kurva CCT terhadap daya	150
Gambar 81. Algorithm of Simulation	151
Gambar 82. Skema penelitian	152

Gambar 83. Arsitek yang digunakan dalam ANN	154
Gambar 84. Optimized ANN Model in MATLAB	155
Gambar 85. Performa pelatihan terbaik	158
Gambar 86. Gradien dan validasi	158
Gambar 87. Training Output	159
Gambar 88. Hasil Training Rei-Dimo tanpa Turbin Angin	159
Gambar 89. Hasil Training Rei-Dimo menggunakan Turbin Angin	160
Gambar 90. Hasil training Rei-Dimo tanpa turbin angin	160
Gambar 91. Hasil ELM	162

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	State of The Art	9
Tabel 2.	Tingkat Kecepatan Angin	27
Tabel 3.	Klasifikasi jenis bus dan besaran	45
Tabel 4.	Data Operasi Sistem sulselbar	81
Tabel 5.	Data Transmisi sulselbar	83
Tabel 6.	Prosentase injeksi PLTB	85
Tabel 7.	Usulan Skenario	93
Tabel 8.	Power Flow Jaringan Interkoneksi	101
Tabel 9.	Nama Generator	104
Tabel 10.	Profil tegangan sistem sulselbar 44 bus	105
Tabel 11.	Hasil simulasi penetrasi turbin angin sidrap	110
Tabel 12.	Total Losses dan aliran daya	112
Tabel 13.	Hasil run aliran daya Penetrasi PLTB Jeneponto	115
Tabel 14.	Total Losses dan Aliran Daya	117
Tabel 15.	Hasil run alran daya PLTB Sidarp dan Jeneponto	119
Tabel 16.	Total Losses dan aliran daya	121
Tabel 17.	Tabel Skenario Penambahan beban	122
Tabel 18.	Tabel Skenario Penambahan beban saat PLTB sidrap Masuk	123
Tabel 19.	Tabel Skenario Penambahan beban saat PLTB Jeneponto Masuk	124
Tabel 20.	Tabel Skenario Penambahan beban saat PLTB sidrap dan Jeneponto Masuk sistem sulselbar	125

Tabel 21. Hasil prosentase daya	127
Tabel 22. Perbandingan Maximum angle swing 4 kondisi	128
Tabel 23. Perbandingan Sudut CCA 4 kondisi	129
Tabel 24. Perbandingan Index Stabilitas 4 kondisi	130
Tabel 25. Indeks stabilitas saat injeksi PLTB	140
Tabel 26. Penetrasi dalam prosentase	141
Table 27. Hasil simulasi Rei-Dimo	153
Table 28. Nilai perbandingan actual ANN tanpa PLTB	156
Table 29. Nilai Perbandingan Actual ANN menggunakan PLTB	157
Table 30. Data testing from ELM	146

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

ANN	: Artificial Neural Network
CCA	: Critical Clearing Angel
DFIG	: doubly fed induction generator
EBT	: Energi Baru Terbarukan
ELM	: Extreme Learning Machine
FVSI	: Fast Voltage Stability Index
kV	: Kilo Volt
SSSL	: Steady-State Stability Limit
SVC	: Static Var Compensator
TASH	: Turbin Angin Sumbu Horisontal
TASV	: Turbin Angin Sumbu Vertikal
PLTB	: Pembangkit Listrik Tenaga Bayu
PV	: photo-voltaic
PMSG	: Permanent magnet synchronous generator
PSS	: Power System Stabilizer
PSAT	: Power System Analisis Toolbox
PLTU	: Pembangkit Listrik Tenaga Uap
PLTA	: Pembangkit Listrik Tenaga Air
PLTD	: Pembangkit Listrik Tenaga Diesel
PLTGU	: Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap
PLTB	: Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A.	Hasil running	168
-------------	---------------	-----

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Permasalahan stabilitas sistem tenaga listrik terkait dengan keadaan mesin sinkron yang mengalami gangguan atau adanya perubahan beban besar. Perubahan beban dalam sistem tenaga listrik menimbulkan osilasi pada poros rotor generator yang diakibatkan dari perilaku dinamik (Kundur, 1994). Saat ini sistem tenaga modern telah terhubung dengan banyak sumber pembangkit, terdapat jenis mesin-mesin sinkron dan beban yang terus menerus mempengaruhi internal dan eksternal sistem, mengakibatkan penurunan kinerja stabilitas dan performansi sistem (Du and Deng, 2012, Djemai and Bouktir, 2008).

Energi terbarukan mempengaruhi stabilitas sistem akibat dari penetrasi (Gautam et al., 2010). Pola operasi pada sistem tenaga modern sangat mempengaruhi stabilitas. Penilaian stabilitas tegangan terkait kerangka waktu mulai dari beberapa detik hingga beberapa menit saat terjadi osilasi. Dinamika komponen jaringan yang bertindak cepat, seperti pelepasan beban, hubung singkat, memerlukan studi jangka pendek. Sebaliknya, peralatan operasi yang lambat, misal tap-changers, gangguan stabilitas panjang, melibatkan studi jangka panjang (Kundur, 1994).

Penetrasi pembangkit baru dapat menyebabkan terjadi perubahan aliran daya pada sistem yang telah existing, dan mempengaruhi stabilitas sistem secara keseluruhan. Keberadaan penetrasi pembangkit baru tersebut, diperlukan evaluasi yang benar-benar mendekati keadaan riil untuk memperbaharui data sistem. Data baru ini sangat berguna dalam operasi sistem yang diimplementasikan atau sebagai data studi ekspansi diwaktu mendatang seiring dengan penambahan kenaikan beban.

Adanya variasi beban dan gangguan pada sistem dapat mempengaruhi stabilitas sistem respon dinamik dari pembangkit sebagai slack bus. Secara umum, sistem tenaga listrik dari awal dirancang untuk beroperasi dengan daya yang dikendalikan dari hasil pembangkit tergabung sistem interkoneksi dalam jaringan. Kondisi normal, merupakan adanya keseimbangan antara suplai dan beban, hal ini adalah variabel utama yang dipertimbangkan dalam operasi sistem tenaga. Peramalan atau permintaan beban berdasarkan pola historis untuk mengetahui kemampuan pembangkit dalam saat beroperasi. Penyediaan daya cadangan yang cukup untuk kontrol frekuensi dilakukan oleh generator konvensional, kebutuhan pelepasan beban (sebagai upaya terakhir), apabila fluktuasi keadaan menuntut untuk menstabilkan agar tidak terjadi black out.

Disisi lain, sistem kelistrikan sulselbar yang terhubung dengan turbin angin di daerah sidarp dan jeneponto, memiliki pola yang perlu diperhatikan, karena daya dihasilkan oleh terputus-putus (*uncertain*). Oleh karena itu, keadaan stabilitas sistem mengalami fluktuasi dinamik yang

lebih tinggi dibandingkan dengan kasus sebelum integrasi turbin angin pada sistem existing.

Upaya untuk memperbaiki sistem dengan peramalan pola angin jangka panjang dan jangka pendek dapat membantu untuk estimasi permintaan beban secara lebih baik. Namun fluktuasi dapat mengakibatkan berkurangnya kemampuan pembangkit konvensional dikarenakan pola operasi tidak menentu (Céspedes et al., 2010).

Beberapa metode telah diaplikasikan dalam sistem kelistrikan untuk menyelesaikan masalah stabilitas. Metode Continuation Power Flow (CPF) telah digunakan dalam bentuk sistem yang bertujuan untuk menentukan besar tegangan pada setiap bus. Kajian tentang studi stabilitas dilakukan (Gunadin et al., 2016) index stabilitas menggunakan REI-Dimo, namun tidak memper hitungkan penetrasi turbin angin yang masuk ke sistem. Jumlah penetrasi turbin angin yang masuk justru dapat menyebabkan tingkat stabilitas makin menurun akibat pola angin yang tidak menentu. Operasi sistem diatur pemerintah dalam ((RUPTL), tahun 2018-2027.) dengan batas penggunaan EBT maksimum 30% dari jumlah daya yang masuk EBT.

Selain itu dalam dalam RUPLT disebutkan bahwa EBT harus dua sumber seperti turbin angin dan PV. Disisi lain jumlah penterasi menambah kerumitan yang berdampak efisiensi biaya (Chaiamarit and Nuchprayoon, 2013, Khattara et al., 2013) dan (Almasabi et al., 2017) untuk itu dibutuhkan metode optimasi yang singkat untuk pengiriman daya

dari pembangkit ke beban. Berbagai teknik telah dilakukan salah satunya menggunakan metode reidimo, yaitu dengan membuat bus fiktif (menyatukan semua bus), dan generator.

Pada penelitian dilakukan (Gunadin et al., 2013, Gunadin et al., 2012) telah menggunakan ELM dan ANN yang diaplikasikan pada sistem 500 kV disistem Jawa Maduran dan Bali (jamali). Adapaun penelitian yang dilakukan tidak memperhitungkan penetrasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) telah dilakukan oleh (Gunadin et al., 2012), dalam penelitian ini tidak memperhitungkan penetrasi dari renewable energy sehingga belum diketahui effect yang diakibatkan penetrasi (PLTB) yang terinterkoneksi dengan sistem yang telah existing. Sehingga diperlukan kajian yang menghubungkan EBT dengan menggunakan metode ini.

Beberapa metode komputasi telah diterapkan pada sistem yang belum terpenetrasi oleh turbin angin. Penetrasi merupakan masalah yang harus diperhatikan dalam sistem tenaga yang terkoneksi dengan renewable energi. Penelitian terkait penetrasi telah dikembangkan oleh (Hossain et al., 2012), kemudian studi yang dilakukan (Du and Deng, 2012) Telah membahas penetrasi yang diakibatkan oleh PV (). Pada penelitian yang membahas stabilitas akibat penetrasi dari turbin angin adalah (Siswanto, 2019) hasil yang diperoleh stabilitas sistem akibat injeksi PLTB.

Untuk memfokuskan kajian tentang stabilitas sistem sebagai prioritas utama dalam memodelkan performansi stabilitas penelitian ini melakukan

analisis performansi kinerja sistem saat kondisi stabilitas dan analisis dinamik tegangan, frekuensi, sudut rotor dan indeks stabilitas akibat penetrasi PLTB pada sistem sebelum dan setelah injeksi daya tersebut. Sedangkan untuk memfokuskan pembahasan tentang kecerdasan buatan maka penelitian ini menggunakan Rei-Dimo dan ANN. Penelitian ini tutup dengan indeks stabilitas dari prosentasi injeksi PLTB.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang dijelaskan di atas, masalah utama dalam penelitian terkait dengan penetrasi energi terbarukan dalam sistem sulselbar dapat dibagi menjadi tiga (3) bagian, yaitu:

1. Bagaimana identifikasi performansi stabilitas sistem akibat penetrasi turbin angin di Sidrap dan Jeneponto?
2. Bagaimana cara menganalisis penetrasi PLTB Sidrap dan Jeneponto yang masuk ke sistem Sulselbar?
3. Bagaimana model kecerdasan buatan untuk mengetahui performansi sistem sulselbar karena penetrasi turbin angin?

C. Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan utama yaitu menyelidiki penetrasi turbin angin dan mengamati performansi dalam studi stabilitas sistem Sulselbar. Sejumlah tujuan sekunder telah dilakukan penelitian untuk memahami dan mencapai yaitu sebagai berikut:

1. Untuk menganalisis identifikasi performansi stabilitas sistem akibat penetrasi turbin angin di Sidrap dan Jeneponto.
2. Untuk mengetahui cara menganalisis penetrasi PLTB Sidrap dan Jeneponto yang masuk ke sistem Sulselbar
3. Untuk menerapkan model kecerdasan buatan dalam mengetahui performansi sistem Sulselbar akibat penetrasi Turbin Angin.

D. Batasan Masalah

1. Identifikasi sistem yang dimaksud adalah untuk mengamati kinerja tegangan, frekuensi, sudut rotor dan indeks stabilitas sebelum dan sesudah penetrasi PLTB di Jeneponto dan Sidrap.
2. Cara menentukan penetrasi pembangkit listrik tenaga nuklir yang memasuki sistem selselbar dengan persentase (%) dan daya yang masuk dari dua turbin angin.
3. Kecerdasan buatan Metode JST dalam mengetahui kinerja sistem selselbar akibat penetrasi PLTB oleh hasil hasil loadflow pada data kemudian data tersebut dipelajari dan diuji untuk menentukan stabilitas kinerja.
4. Untuk lokasi PLTB, kedua lokasi tersebut adalah Sidrap dan Jeneponto.

5. Dalam menjalankan simulasi, jenis beban yang digunakan tidak ditentukan secara spesifik dan dipengaruhi oleh gangguan.

E. Manfaat Penelitian

Berdasarkan pendahuluan, rumusan masalah dan tujuan penelitian, diharapkan penelitian ini dapat berkontribusi atau memberi manfaat, yang tercantum dalam poin di bawah ini:

1. Pelajari stabilitas dan karakteristik sistem kelistrikan Sulselbar setelah penetrasi turbin angin.
2. Pengembangan algoritma kecerdasan buatan pada sistem daya Rei-dimo dan ANN.
3. Memberikan batas stabilitas saat penetrasi turbin angin terhubung ke sistem.

F. Ruang Lingkup Penelitian

1. Jenis sistem Sulselbar menjadi objek penelitian berdasarkan kekuatan PT. PLTB PLN dan Sidrap dan Jeneponto.
2. Uji simulasi menggunakan sistem Sulselbar.
3. Data yang digunakan dari PLN dan hasil menjalankan MATLAB
4. Teknik analisis data menggunakan bantuan perangkat lunak MATLAB
5. Metode analitik yang digunakan adalah kecerdasan buatan dalam menentukan stabilitas sistem.

G. Penelitian terkait

Dalam penelitian ini, mengacu pada penelitian yang berkaitan dengan masalah penetrasi turbin angin yang telah dipublikasikan.

1. Indar et al, dalam jurnal Telkomnika, Vol. 9, No.3, Desember 2011 berjudul Steady-State Stability Assessment Menggunakan Neural Network Berdasarkan Equivalent Networks telah menggunakan kecerdasan buatan untuk menganalisis SSSL dalam sistem Jawa-Bali, dengan hasil yang menunjukkan bahwa REI -Dimo dan ANN memiliki kesalahan keseluruhan dalam nilai output kurang dari 0,5% yang dapat diterima dan itu berarti bahwa metode SSSANN memiliki potensi kuat untuk penilaian stabilitas kondisi tunak.
2. M. J. Hossain, jurnal iee systems, VOL. 6, no. 1, Maret 2012 berjudul Investigasi dampak penetrasi tenaga angin skala besar pada sudut dan tegangan stabilitas sistem tenaga listrik telah dihasilkan dari analisis, bahwa kompensasi yang tinggi dapat mengurangi batas keselamatan dalam kondisi operasi tertentu, dan mode yang terkait dengan operasi slip shaft dan kekakuan sangat penting karena dapat membatasi integrasi skala besar pembangkit listrik tenaga angin.
3. S. Harish Kiran, dalam jurnal Alexandria Engineering Journal (2016) yang berjudul Performa dari dua teknik optimasi yang dimodifikasi untuk masalah stabilitas tegangan sistem tenaga

telah menghasilkan indeks stabilitas tegangan cepat Fast Voltage Stability Index (FVSI) yang digunakan untuk mengidentifikasi lokasi perangkat yang akan dihubungkan. Metode yang diusulkan diimplementasikan dalam sistem IEEE 30 bus dan hasilnya ditabulasikan untuk setiap teknik.

Tabel 1. State of The Art

No	Peneliti	Judul Penelitian	Pokok Permasalahan	Metode (Solusi Masalah)	Korelasi dengan Penelitian
1	Ehsan Reihani (2016)	Oscillatory stability analysis with high penetrations of large-scale photovoltaic generation	mempelajari dampak PV pada stabilitas osilasi sistem tenaga: 1. Model generator PV. 2. Efek PV berakibat pada generator Sinkron pada osilasi. 3. Peningkatan penetrasi PV memperlebar sudut.	Mengusuk an penkadwa lan ulang pada sistem yang terhubung PV.	Menganalisis stabilitas sistem skala besar akibat penetrasi yang tinggi dari PV.
2	Pan Zhao Ji angfeng Wang Yi ping Dai	Capacity allocation of a hybrid energy storage system for power system peak shaving at high wind power penetration level	mengalokasi kapasitas sistem penyimpanan energi hibrid dari sistem existing dengan EBT.	Metode analisis spektral untuk mengukur sistem dalam menyimpan energi	Penetrasi tinggi dari turbin angin
3	(Hossain et al., 2012)	Investigation of the Impacts of Large-Scale Wind Power Penetration on the Angle and Voltage Stability of Power Systems	Investigasi dampak penetrasi wind turbine untuk sistem skal besar	FACTS devices	Menganalisis penetrasi wind turbine dan sistem skala besar

4	(Schmall et al., 2015)	Voltage stability of large-scale wind plants integrated in weak networks: An ERCOT case study	Kajian stabilitas tegangan pada sistem skala besar terintegrasi dengan wind turbine	the static var compensator (SVC)	Menganalisis stabilitas pada sistem skala besar terhubung dengan wind turbine
5	(Kabir et al., 2014)	Dynamic voltage stability analysis of sub-transmission networks with large -scale photovoltaic systems	Kajian sistem skala besar terintegrasi dengan PV	-	Menganalisis Stabilitas Sistem skala besar akibat masuknya PV
6	(Wihartady et al., 2012)	Dynamic out-of-step simulation and detection in 150 kV (Kilo Volt) South Sulawesi system	Kajian pada Dynamic out-of-step dari sistem di Sulawesi Selatan	-	Menganalisis sistem Sulawesi selatan
7	(Djalal et al., 2015)	Optimal placement and tuning power system stabilizer using Participation Factor and Imperialist Competitive Algorithm in 150 kV South of Sulawesi system	Kajian pada Optimal placement PSS di Sulawesi Selatan	Imperialist Competitive Algorithm	Menganalisis Sistem Sulawesi Selatan
8	Hany E. Z. Farag ; Ehab F. El-Saadany (2014)	Optimum shunt capacitor placement in distribution networks with high penetration of renewable energy resources using genetic algorithms	Memasang kapasitor yang tepat untuk mengatasi masalah distribusi yang diakibatkan oleh energi terbarukan	Menggunakan Genetik Algorithm s yang diaplikasikan pada jaringan distribusi	Menganalisis penetrasi yang bersumber dari energi terbarukan
9	Mykhailo S. Sehedra ; Oleksandr	Issues of inertia response and rate of change of frequency in	Perubahan frekuensi dalam sistem akibat penetrasi dari turbin angin menggunakan	-	Penetrasi turbin angin yang

	a B. Dudurych (2016)	power systems with different penetration of variable speed wind turbines	variabel cepat		menggunakan variabel speed
10	Dong Han, Jin Ma, Ancheng Xue, Tao Lin, Guoqiang Zhang (2014)	The Uncertainty and Its Influence of Wind Generated Power on Power System Transient Stability under Different Penetration	Pengaruh ketidakpastian suplai turbin angin yang dapat mengakibatkan transient stability	-	Penetrasi turbin angin dan transient stability
11	Yigong Zhang ; Junchuan Jia ; Weiguo Li ; Dawei Wang ; Jin Liu	Steady state characteristic analysis and stability assessment of doubly fed induction generator based wind power generation System.	Pengukuran stabilitas dan steady-state yang terhubung dengan turbin angin	-	Karakteristik steady-state dan analisis stability pengaruh dari turbin angin
12	Indar Gunadin, Ad Soeprijanto, O. Penangsang	Steady state stability assessment using extreme learning machine based on modal analysis	Menentukan batas steady-state pada sistem	ELM dan Modal Analysis	Pengukuran steady-state
13	Partha Kayal, C.K. Chanda	Placement of wind and solar based DGs in distribution system for power loss minimization and voltage stability improvement	Penempatan turbin angin dan solar PV untuk meminimalisir rugi-rugi daya	-	Stabilitas tegangan dan turbin angin
14	Saurabh Ratra, Rajive Tiwari, K.R. Niazi	Voltage stability assessment in power systems using line voltage stability index	Penilaian stabilitas tegangan dan index stabilitas tegangan	-	Stabilitas tegangan dan index stabilitas tegangan
15	S.Harish Kiran Subhrans	Performance of two modified optimization	Kinerja dua teknik optimasi yang dimodifikasi	-	Stabilitas tegangan

	u Sekhar Dash C.Subram ani	techniques for power system voltage stability problems			
16	Kayt N.V.Matos, Rafael R.Londero, Carolina de M.Affonso, João Paulo A.Vieira	Secondary voltage control applied to DFIG- based wind park and its effect on long-term voltage stability	Control tegangan sekunder efek dari turbin angin dalam stabilitas tegangan jangka panjang	-	Turbin angin dan stabilitas tegangan jangka panjang
17	Rafael R.Londero, Carolina de M.Affonso , João Paulo A.Vieira	Effects of operational limits of DFIG wind turbines on long- term voltage stability studies	Mempelajari Batas operasi turbin angin dan stabilitas tegangan	-	Turbin angin dan stabilitas tegangan
18	Hamid Rezaie, Mohamm ad HosseinK azemi- Rahbar	Enhancing voltage stability and LVRT capability of a wind-integrated power system using a fuzzy- based SVC	Meningkatkan stabilitas tegangan berdasar kapabilitas sistem emnggunakan turbine angin	Fuzzy Logic	Stabilitas Tegangan dan turbine angin
19	IA mirreza Gholizadeh, Abbas Rabiee, Roohollah Fadaeinedj ad	A scenario-based voltage stability constrained planning model for integration of large-scale wind farms	Menentukan batas stabilitas tegangan dalam sistem skala besar terintegrasi turbine angin	-	Stabilitas tegangan dan turbine angin disistem skala besar
20	Luigi Dusonche tEnricoTel aretti	Effects of electrical and mechanical parameters on the transient voltage stability of a fixed speed wind turbine	Effek kelistrikan dan mekanik terhadap stabilitas tegangan transien yang terhubung dengan turbine angin	-	Stability tegangan transient terhubung dengan turbin angin
21	Y. Zhang, L. Wehenkel, P.Rousseau, M.Pavella	SIME: A hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection	Penentuan stabilitas transient secara cepat pada sistem terhubung kontingensi	-	transient stability

22	Ancheng Xue, Felix F. Wu, Yixin Ni, Shengwei Mei, Qiang Lu	Power system transient stability assessment based on quadratic approximation of stability region	Penentuan stbilitas transient dalam batas stabilitas sistem	Quadratic Approximation	transient stability
23	Indar Gunadin Muhammad Abdillah Adi Soeprijanto Ontoseno Penangsang	Determination of Steady State Stability Margin Using Extreme Learning Machine	Menentukan batas stabilitas steady-state pada sistem interkoneksi	Extreme Learning Machine	Steady-state Stability
24	Naimi Djemai, Tarek Bouktir	Impact of Wind Power on the Angular Stability of a Power System	Dampak penetrasi turbine angin terhadap sudut rotor generator	-	Turbin angin dan stabilitas sudut rotor generator
25	Marwan Rosyadi, Rion Takahashi, Junji Tamura, S. M. Muyeen	Dynamic Stability Improvement of Grid Connected Converter using Fuzzy Compensator Control	Memperbaiki stabilitas dinamik yang terhubung ke grid menggunakan kompensator fuzzy logic	Fuzzy Llogic	Stabilitas dinamik terhubung grid sistem
26	Indar Chaerah Gunadin, Adi Soeprijanto, Ontoseno Penangsang	Real Power Generation Scheduling to Improve Steady State Stability Limit in the Java-Bali 500kV Interconnection Power System	Pengaturan pembangkitan untuk memperbaiki Daya raktif pada sistem interkoneksi 500kV	REI DIMO method	Batas Stabilitas Steady-state terinterkoneksi sistem 500kV
27	ShaoKang Ma, Hua Geng, Lu Liu, Geng Yang, and Bikash C. Pal	Grid-Synchronization Stability Improvement of Large Scale Wind Farm During Severe Grid Fault	Memperbaiki stabilitas sistem sebelum terjadi gangguan yang parah	PMSG- and DFIG-based	Perbaikan stabilitas terhubung grid pada sistem skala besar turbine angin
28	LiLiu, YongLi, YijiaCao, FangLiu, WeiyuWang,	Transient Rotor Angle Stability Prediction Based on Deep Belief Network and Long Short-term	Prediksi Stabilitas Rotor Sudut pada kondisi transient	method based on deep belief network (DBN)	Prediksi stabilitas sudut rotor

	JianZuo	Memory Network		and long short-term memory (LSTM)	
29	MohammadJadidbonab, M.J.Vahid-Pakdel, Heresh Seyedi, Behnam Mohammadivatloo	Stochastic assessment and enhancement of voltage stability in multi carrier energy systems considering wind power	Ketidakstabilan tegangan pada sistem multimesin terhubung turbine angin	A stochastic programming method	Stabilitas tegangan sistem terhubung turbin angin
30	Chun-Xia Dou, Jinzhao Yang, Xiaogang Li, Ting Gui, Yefei Bi	Decentralized coordinated control for large power transient stability assessment	Kontrol sistem skala besar berdasarkan penilaian stabilitas transient	-	Sistem skala besar dan stabilitas transient
31	Liang Du, Qi Deng	Impact of Wind Power and Photovoltaic Cell Power on Power System Stability Based on L Index			Stabilitas sistem terhubung Turbine angin dan PV
32	Agus Siswanto, Indar Chaerah Gunadin, Sri Mawar Said and Ansar Suyuti	Stability improvement of wind turbine penetrated using power system stabilizer (PSS) on South Sulawesi transmission system	Memperbaiki stabilitas sistem akibat penetrasi turbin angin dengan mengatur sistem digenerator	Menggunakan Power System Stabilizer (PSS)	Turbin angin dan sistem Sulawesi selatan
33	Indar Chaerah Gunadin, Zaenab Muslimin, Agus Siswanto	Transient Stability Improvement Using Allocation Power Generation Methods Based on Moment Inertia	Perbaikan stabilitas dengan mengatur alokasi generator berdasar pengaturan momen inersia		Stabilitas transient berbasis momen inersia
34	Bayu Adriyan Ashad, Indar Chaerah Gunadin, Agus Siswanto, Yusran	Early Warning Condition Transient Stability on South Sulawesi System using Extreme Learning Machine	Peringatan pada kondisi stabilitas transien di Sulawesi selatan sistem menggunakan ELM	Extreme Learning Machine	Stabilitas transient pada sistem Sulawesi selatan

35	Indar Chaerah Gunadin, Zaenab Muslimin and Agus Siswanto	Transient stability improvement based on moment Inertia index using Extreme Learning Machine	Perbaikan stabilitas sistem berdasar momen inersia menggunakan ELM Extreme Learning Machine	Extreme Learning Machine	Stabilitas transient pada sistem Sulawesi selatan
36	Agus Siswanto, Ansar Suyuti, Indar Chaerah Gunadin, Sri Mawar Said	Steady State Stability Limit Assessment when Wind Turbine Penetrated to the Systems using REI Approach	Penetrasi turbin angin disulawesi selatan	Rei-Dimo	Batas stabilitas Steady-state akibat pentrasi turbin angin
37	Agus Siswanto, Indar Chaerah Gunadin, Sri Mawar Said, Ansar Suyuti	Stability Improvement by Reducing Voltage Fluctuations using SVC in Penetration Wind Power System	Perbaikan stabilitas akibat penetarasi turbin angin	Static Var Compen sator	Penetrasi turbin angin
38	Yuli Asmi Rahman, Agus Siswanto, and Irwan Mahmudi	Stability issues in presence variable distributed generation into radial distribution network	Membahas stabilitas dengan melihat prosentasi variasi beban pada jaringan distribusi	distribut ed generati on	Stabilitas sistem pada jaringan distribusi
39	Ansar Suyuti, Agus Siswanto, Indar Chaerah Gunadin, and Sri Mawar Said	Voltage analysis using PSS and SVC on large scale system south sulawesi of effect penetrated wind turbine	Menganalisis dan menstabilkan tegangan menggunakan PSS dan SVC yang dipasang pada saluran	PSS dan SVC	Analisis tegangan
40	Agus Siswanto, Ansar Suyuti, Indar Chaerah Gunadin And Sri Mawar Said	Steady-State Stability Limit (SSSL) Assessment When Wind Turbine Penetration To South Sulawesi System Using ANN	Melakukan perhitungan pada batas stabilitas akaibat penetrasi turbin angin	ANN	Batas stabilitas dan injeksi turbin angin

PENELITIAN YANG	KEBARUAN YANG DITAWARKAN
DIAJUKAN:	1. Identifikasi sistem yang dimaksud
MODEL PERFORMANSI	adalah dengan mengamati kinerja
STABILITAS SISTEM	dari tegangan, frekuensi, sudut
PENETRASI ENERGI	rotor dan indeks stabilitas sebelum
TERBARUKAN SKALA	dan sesudah injeksi PLTB
BESAR BERBASIS	(Pembangkit Listrik Tenaga Bayu)
KECERDASAN BUATAN	di Jeneponto dan Sidrap.
	2. Penentuan penetrasi PLTB
	memasuki sistem Sulselbar
	dengan persentase (%) dari daya
	injeksi yang masuk dari dua turbin
	angin. Menerapkan kecerdasan
	buatan JST (Jaringan Syaraf
	Tiruan) dalam mengetahui kinerja
	sistem Sulselbar karena penetrasi
	PLTB melalui hasil dari loadflow
	untuk menghasilkan data
	kemudian data tersebut dipelajari
	dan diuji untuk mengetahui kinerja
	stabilitas.

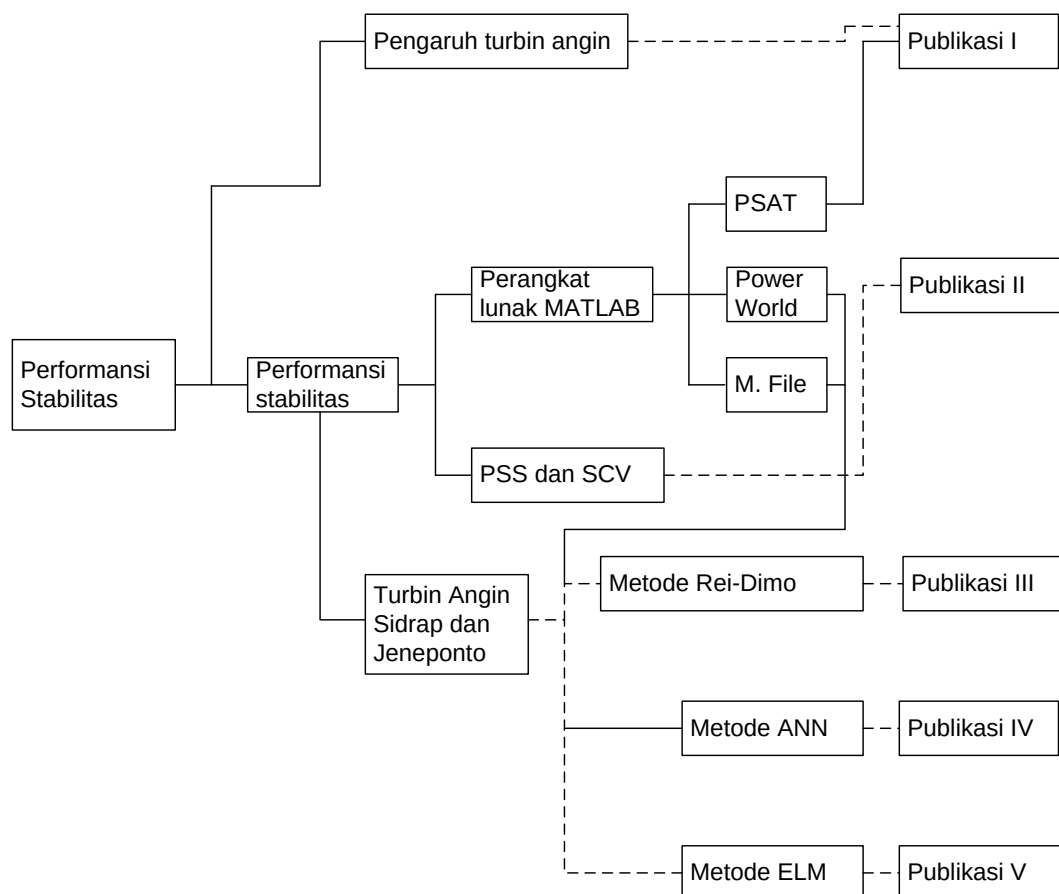
HASIL YANG DIPEROLEH

1. Penentuan SSSL (Steady-State Stability Limit) ketika penetrasi turbin angin menggunakan metode Rei-Dimo, solusi untuk CCA (Critical Clearing Angle) saat beban meningkat.
 2. Penentuan SSSL ketika penetrasi turbin angin dalam sistem Sulselbar menggunakan Rei-Dimo berdasarkan ANN (Artificial Neural Network).

Peningkatan stabilitas saat menembus turbin angin menggunakan Power System Stabilizer (PSS). Dalam sistem operasi PSS fungsinya adalah untuk menyediakan injeksi dan generator sehingga dapat memberikan daya aktif ketika mengalami peningkatan beban.
 3. Ketika penurunan tegangan terjadi karena peningkatan beban, maka
-

stabilitas fluktuasi tegangan ditingkatkan menggunakan SVC, sehingga tegangan terjadi bus meningkat secara cepat, akibat injeksi yang cepat.

Hasil penelitian mencakup unsur-unsur kebaruan dan bentuk publikasi yang dijelaskan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pemetaan Publikasi

H. SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan disertasi ini, disusun secara sistematis untuk penulisan laporan penelitian yang dilanjutkan dalam lima bab, adalah ringkasan yang mencakup teori-teori terkait, metode yang digunakan dan hasil penelitian serta kesimpulan. Di setiap bab jelaskan sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Dalam bab satu, ada latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batas masalah, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian dan penelitian terkait dan penulisan sistematis.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab dua, jelaskan teori dan konsep yang terkait dengan penelitian ini. Adapun yang terkait dengan teori tentang; energi terbarukan, studi aliran daya, stabilitas sistem daya, sistem dinamis skala besar dan kerangka kerja penelitian stabilitas sistem.

BAB III: METODE PENELITIAN

Dalam bab tiga, jelaskan metode dan desain penelitian, yang meliputi waktu, lokasi, dan tahap penelitian, teknik pengumpulan data, validasi data, pengolahan data. Kemudian data sistem daya termasuk sistem interkoneksi sulselbar, dan ieee 30 bus, dan prosedur penelitian menggunakan kecerdasan buatan termasuk Re-dimo, ELM dan ANN.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab empat, menjelaskan hasil simulasi menggunakan sistem interkoneksi Sulselbar, yang terhubung ke turbin angin. Dalam bab ini, skema pengujian yang dilakukan adalah mengubah beban sebagai persentase.

BAB V: KESIMPULAN

Dalam bab lima, ini berisi kesimpulan dan saran untuk penelitian lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

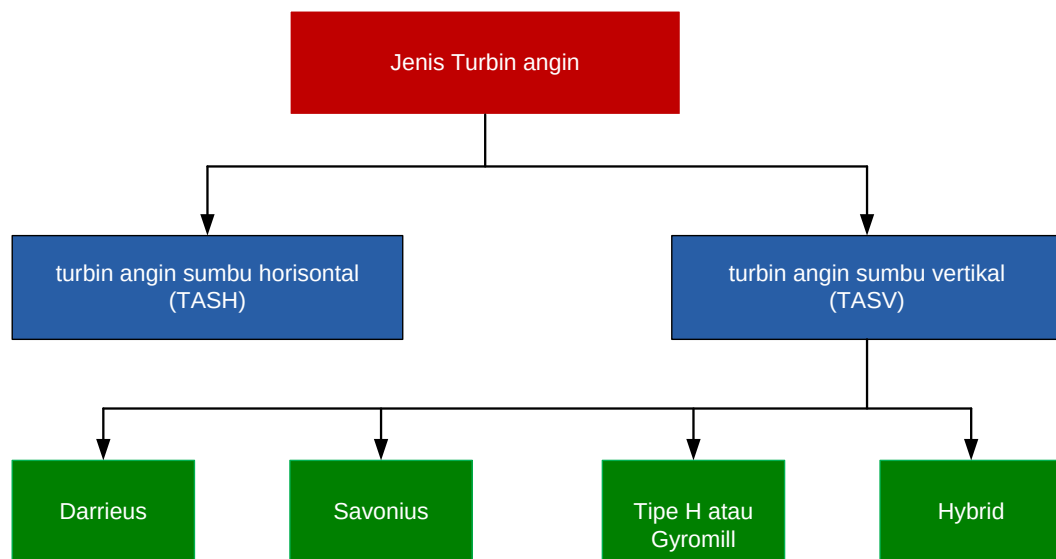
A. Energi Terbarukan

Pemerintah melalui RUPTL 2012-2022, 2016-2025, 2018-2027, telah merencanakan dan menggunakan sumber energi baru terbarukan untuk mengurangi energi fosil, seperti minyak bumi, batu bara, gas yang dapat merusak lingkungan dan pemanasan global. Penggunaan batubara dan minyak bumi dalam skala besar mempercepat dan menipis cadangan energi fosil (RUPTL, 2018-2027.).

Energi terbarukan adalah energi yang bersumber dari alam secara berkelanjutan tanpa harus diproduksi. Energi baru terbarukan adalah sumber energi terbersih untuk menghasilkan listrik. Sumber energi terbarukan meliputi panas matahari, angin, aliran sungai, dan gelombang laut. Dalam studi ini, EBT yang digunakan adalah PLTB dipasang di dua tempat, yaitu, Sidrap dengan kapasitas 75 MW dan Jeneponto dengan kapasitas 72 MW (Weekly, 2017).

Turbin angin terdiri dari dua jenis, yaitu Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) dan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV). Gambar 2. Untuk daerah dan tempat dengan kecepatan angin rendah di mana arah angin sering berubah, TASV lebih disukai. Bagian ini menjelaskan jenis dan ukuran turbin angin. Oleh karena itu, lift aerodinamis berdasarkan

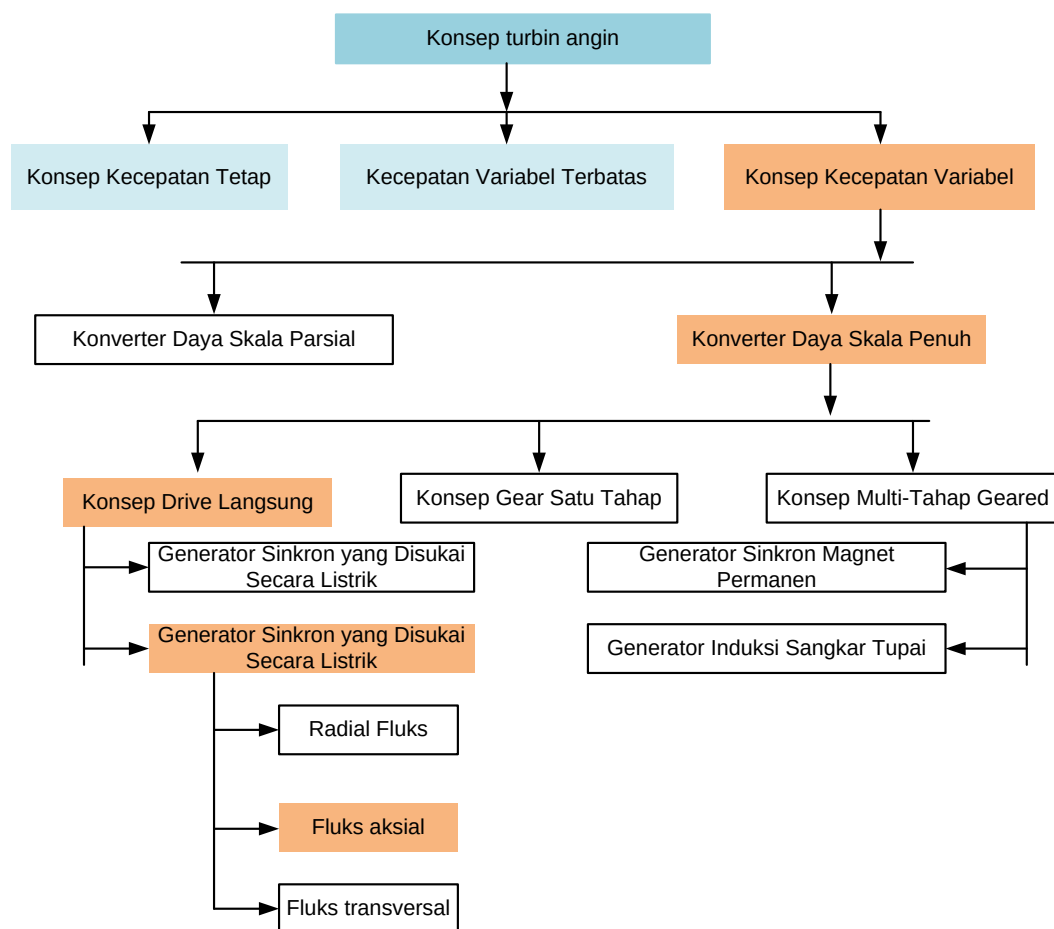
Turbin Angin Sumbu Vertikal bersama dengan tipe TASV lainnya tidak dijelaskan secara rinci.



Gambar 2. Blok Diagram Kelas Turbin Angin

Dalam penelitian (Ma et al., 2018, Yigong et al., 2010) menjelaskan perbedaan antara sistem ini dan sistem penggerak yang diarahkan adalah kecepatan rotor. Dalam hal ini, generator berputar perlahan karena terhubung langsung ke hub rotor turbin. Kecepatan tinggi, torsi tinggi. Untuk penggerak langsung, putaran rendah dan torsi tinggi ini membutuhkan banyak kutub yang membutuhkan diameter besar untuk menempatkan kutub tambahan. Namun, kesederhanaan drive train, keandalan dan efisiensi yang baik tanpa adanya gearbox adalah sisi baik dari sistem ini. Generator penggerak langsung yang digunakan di sini

dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu generator listrik sinkron dan generator sinkron magnet permanen.

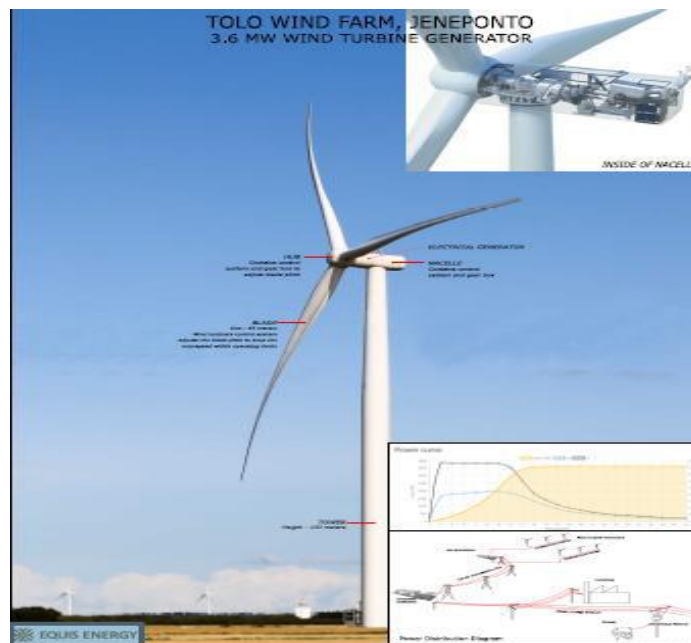


Gambar 3. Diagram blok klasifikasi turbin angin

1. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Alam memiliki sumber energi terbarukan yang sangat melimpah yang belum dimanfaatkan secara optimal untuk sumber listrik. Sumber ETB termasuk, panas matahari, gelombang laut, dan angin panas bumi. Energi

angin atau sering disebut angin dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan turbin angin atau kincir angin yang dibangun dan disimpan sesuai dengan pontesis mereka (Kayal dan Chanda, 2013). Tenaga angin adalah energi naik yang dapat memberi tekanan pada turbin sehingga turbin dapat memutar turbin yang terhubung ke generator yang dapat menghasilkan daya kontinu sehingga tidak bereaksi terhadap sistem (Londero et al., 2017).



Gambar 4. Sketsa kerangka angin

Kincir angin digunakan untuk memutar turbin angin untuk menghasilkan listrik. Prinsip kerja kincir angin yang memutar turbin angin di kopling dengan rotor pada generator di belakang turbin angin sehingga menghasilkan energi listrik yang selaras dengan daya yang ada (Ma et al., 2018). Dalam turbin angin ada dua cara untuk terhubung ke sistem

kelistrikan. Pertama energi listrik dari turbin angin disalurkan ke sistem. Kedua energi listrik yang dihasilkan oleh generator disimpan dalam baterai dan kemudian didistribusikan ke sistem. pada Gambar 4 adalah skema kincir angin.

2. PLTB di Indonesia

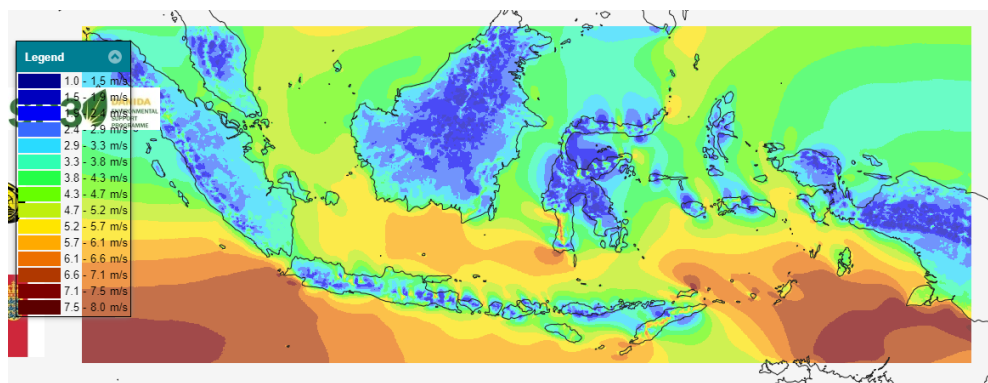
Indonesia adalah negara kepulauan yang memiliki luas $\frac{2}{3}$ yang merupakan lautan dan memiliki garis pantai 7 80.791,42 km. Sesuai dengan hasil pemetaan Badan Penerbangan dan Antariksa Nasional atau dikenal dengan Lapan (2007), terdapat 120 daerah dengan kecepatan angin di atas 5 m / detik, masing-masing Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa (Rohdian, 2016).

Adapun faktor angin seperti yang disebutkan di bawah ini:

A. Gradien Barometrik

Angka itu menunjukkan perbedaan tekanan udara kedua isobar yang berjarak 111 km. Semakin besar gradien barometrik, semakin cepat angin bertiup atau (barometrik adalah angka yang menunjukkan perbedaan tekanan udara melalui dua garis isobar yang dihitung untuk masing-masing 111 km = 1° di khatulistiwa). Pada Gambar 5 adalah potensi angin di wilayah Indonesia jumlah yang menunjukkan perbedaan tekanan udara

dari kedua isobar yang berjarak 111 km. Semakin besar gradien barometrik, semakin cepat angin bertiup.



Gambar 5. Potensi Angin di wilayah Indosenia

b. Lokasi Tempat

Kecepatan angin menurut sebuah penelitian yang dilakukan oleh Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Situasi angin lebih cepat daripada jarak dari titik potensial sehingga pada Gambar 7 kita dapat melihat potensi angin berwarna kecoklatan.

c. Tempat yang tinggi

Semakin tinggi tempat semakin kuat angin bertiup. Ini disebabkan oleh pengaruh gaya gesek yang menghambat laju udara. Di permukaan bumi, gunung, pohon, dan topografi tidak rata lainnya memberikan gaya gesekan yang hebat. Semakin tinggi tempat gaya gesek semakin kecil.

Ada faktor-faktor yang menjadi kondisi dan kategori yang ditetapkan oleh Lapan untuk membangun pembangkit listrik tenaga angin sesuai dengan peristiwa pola angin seperti yang disebutkan di bawah ini:

Tabel 2. Tingkat kecepatan angin (Rohdian, 2016)

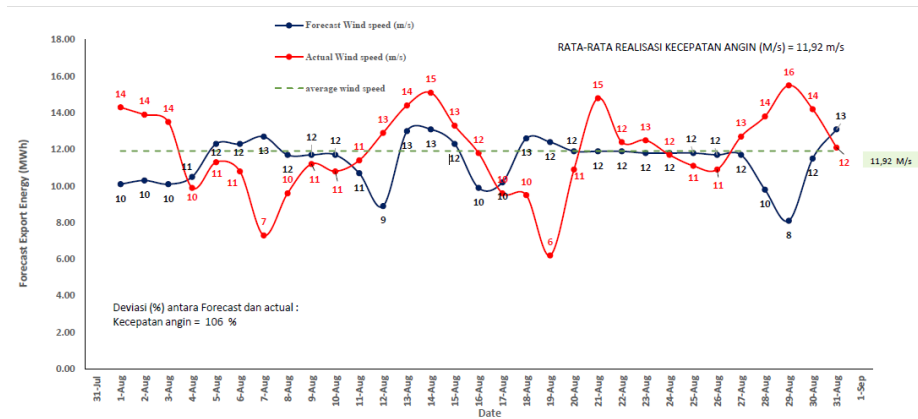
Tingkat kecepatan angin 10 meter di atas permukaan tanah		
Kelas angin	Kecepatan angin (m/d)	Kondisi Alam di daratan
1	0.00-0.02	-----
2	0.3-1.5	Angin tenang, asap lurus ke atas
3	1.6-3.3	Asap bergerak mengikuti arah angin
4	2.4-5.4	Wajah terasa ada angin, daun-daun bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5	5.5-7.9	Debu jalan, kertas terbang, ranting pohon bergoyang
6	8.0-10.7	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
7	10.8-13.8	Ranting pohon bergoyang, air plumpang berombak kecil
8	13.9-17.1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
9	17.2-20.7	Dapat mematahkan ranting

		pohon, jalan berant melawan arah angin
10	20.8-24.4	Dapat mematahkan ranting pohon, rumah rubuh
11	24.5-29.4	Dapat merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	29.5-32.6	Menimbulkan kerusakan parah
13	32.7-36.9	Tornado

Berdasarkan Tabel 2, tingkat kecepatan angin, di wilayah Indonesia secara umum adalah 5,9 meter / detik yang secara ekonomi tidak layak untuk pembangkit listrik tenaga angin. Namun bukan berarti itu tidak bisa dimanfaatkan. Gambar 6 adalah kondisi aktual kecepatan angin untuk Kabupaten Jeneponto pada Agustus 2019. Dalam hal estimasi dan realisasi kecepatan angin Agustus pada tahun 2019. Faktor-faktor alami sangat berpengaruh, sehingga produksi energi tidak dapat dipastikan oleh manusia yang hanya dapat merencanakan.

Energi yang dihasilkan dapat memasok beban, memasuki sistem yang saling berhubungan. Untuk alasan ini, faktor alam yang besar perlu diantisipasi sejak awal, terutama ketika kondisi turbin angin beroperasi.

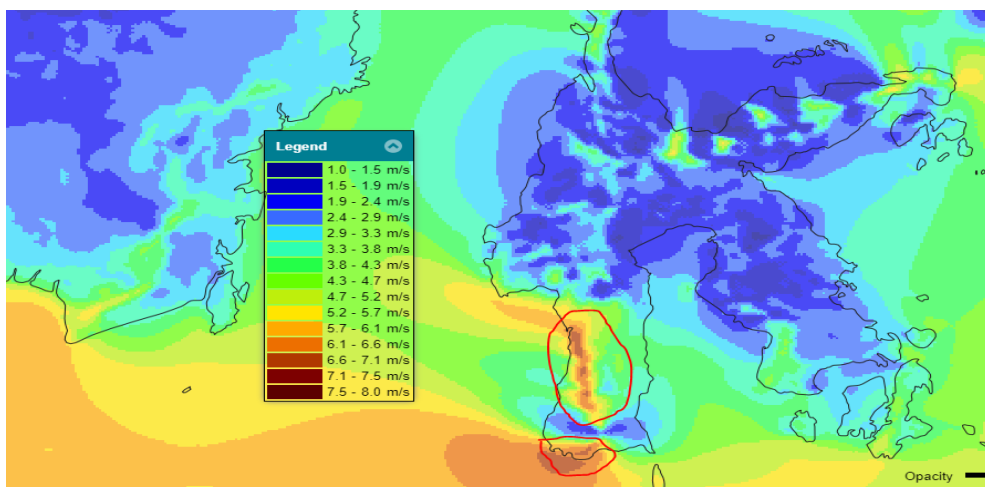
PRAKIRAAN, REALISASI & RATA-RATA REALISASI KECEPATAN ANGIN (m/det) AGUSTUS 2019



Gambar 6. Perkiraan dan realisasi kecepatan angin agustus 2019.
Sumber dari (PT. Vena Energy Bapak Andi Amir Hamzah (*Operation Asset Manager, Technical Service*), saat acara Seminar Ilmiah Nasional).

Lokasi Tempat

Pada Gambar 7. Menunjukkan tingkat kecepatan angin wilayah Sulawesi Selatan di dekat khatulistiwa lebih cepat daripada yang jauh dari khatulistiwa. Ketika diamati dari Legenda, tingkat kecepatan angin mulai dari 4,7-5,2 m/s hingga 6,6-7,1 m/s.



Gambar 7. Potensi Kecepatan angin di wilayah Sulawesi Selatan

e. Tempat yang tinggi

Semakin tinggi tempat semakin kuat angin bertiup. Ini disebabkan oleh pengaruh gaya gesek yang menghambat laju udara. Di permukaan bumi, gunung, pohon, dan topografi tidak rata lainnya memberikan gaya gesekan yang hebat. Semakin tinggi tempat gaya gesek semakin kecil.

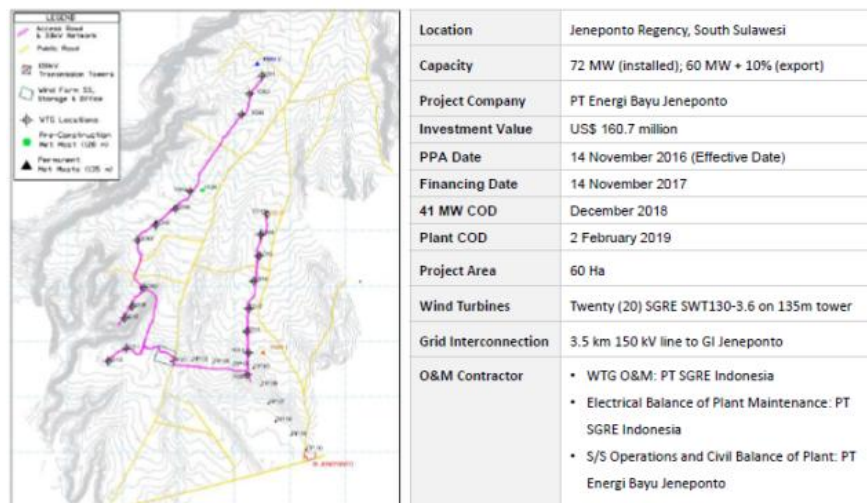
d. Waktu

Dari penelitian yang telah dilakukan dan data statistik tentang kecepatan angin di wilayah Sulawesi Selatan menunjukkan bahwa kondisi angin di siang hari bergerak lebih cepat daripada di malam hari.

3. Kapasitas PLTB

Pada Gambar 8 menunjukkan gambaran umum proyek pemasangan Tolo 1 PLTB, yang berlokasi di Kabupaten Jeneponto, Sulawesi Selatan, dengan kapasitas 72 MW yang telah dipasang, dan 60 MW+10% adalah (ekspor), yang dibangun oleh PT. Energi Bayu Jeneponto dengan investasi US \$ 160,7 Juta dalam nilai tukar rupiah menjadi Rp. 2 255 4084 300 000.00, total area 60 hektar yang terhubung ke Jeneponto GI 150 kV dengan tingkat interkoneksi 3,5 km. Gambaran Umum Tolo 1 Jeneponto PLTB dapat diperluas lagi jika energi turbin angin dapat memberikan kontribusi yang baik untuk pengembangan listrik, terutama di Sulawesi Selatan.

PLTB Tolo 1 Project Overview

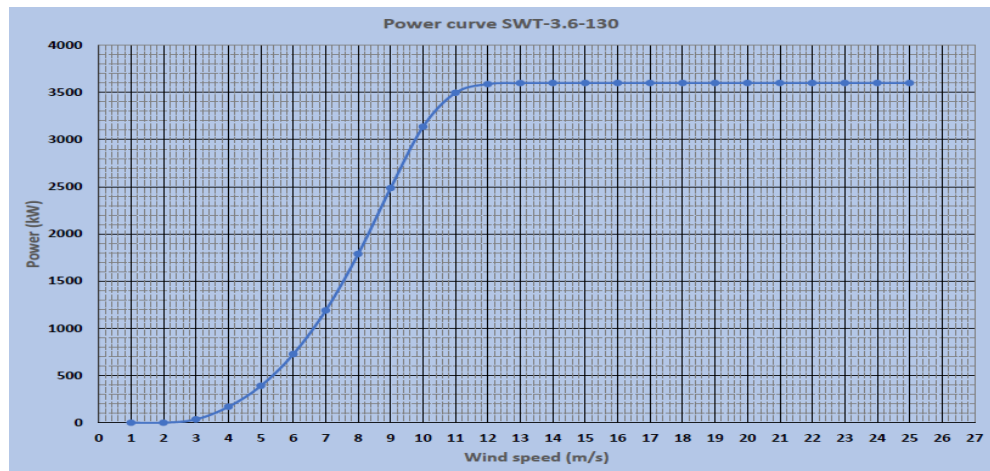


Gambar 8. Project Overview PLTB Tolo 1 Jeneponto.

Sumber dari (PT. Vena Energy Bapak Andi Amir Hamzah (*Operation Asset Manager, Technical Service*), saat acara Seminar Ilmiah Nasional).

4. Potensi PLTB di Sulawesi Selatan di Jeneponto

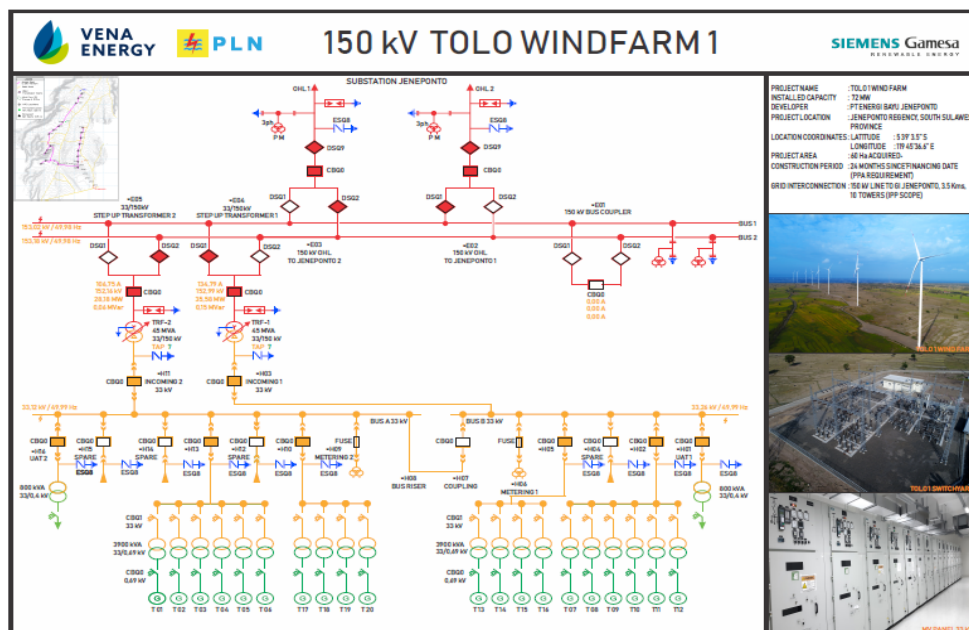
Pembangkit PLTB di Jeneponto Tolo 1 memiliki karakteristik kecepatan angin (m / s) dengan nilai daya 3600 KW yang menunjukkan kurva daya SWT-3.6-130. Gambar 9 adalah hasil nyata dari kecepatan angin yang dikonversi menjadi kurva daya. Periode kecepatan angin dalam meter per detik menjadi kurva daya 3.600 KW.



Gambar 9. Karakteristik Turbin PLTB Tolo 1 Jeneponto.

Sumber dari (PT. Vena Energy Bapak Andi Amir Hamzah (*Operation Asset Manager, Technical Service*), saat acara Seminar Ilmiah Nasional).

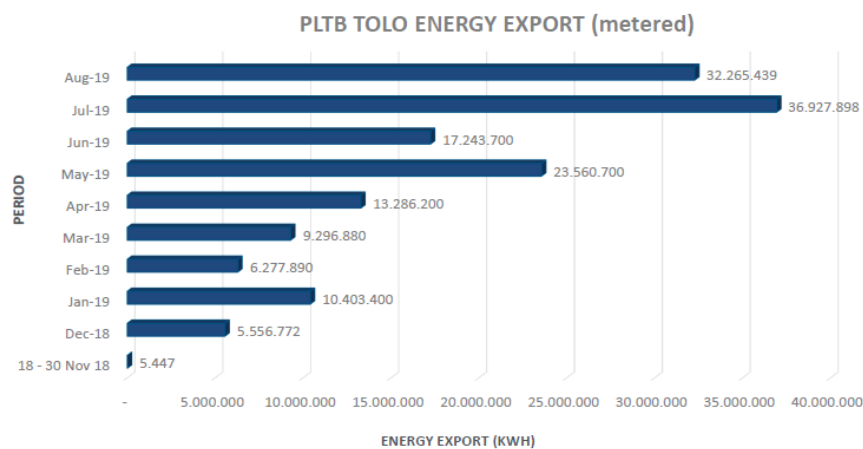
Hasil ini disampaikan oleh Manajer PT. Vena Energi saat mengisi kuliah umum di Universitas Hasanuddin, Fakultas Teknik Gowa.



Gambar 10. Diagram singline 150 kV Tolo Wind form 1.

Sumber dari (PT. Vena Energy Bapak Andi Amir Hamzah (*Operation Asset Manager, Technical Service*), saat acara Seminar Ilmiah Nasional).

Pada Gambar 11, ini adalah ekspor energi dalam bentuk KWH dengan periode dari November 2018 hingga Agustus 2019. Dari sembilan bulan, nilai energi terendah dalam bentuk KWH pada bulan Desember adalah 5.556.772 KWH, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada bulan Juli. pada 36.927. 898 KWH.



Gambar 11. Export Energy PLTB Tolo November 2018 sampai dengan Agustus 2019.

Sumber dari (PT. Vena Energy Bapak Andi Amir Hamzah (*Operation Asset Manager, Technical Service*), saat acara Seminar Ilmiah Nasional).

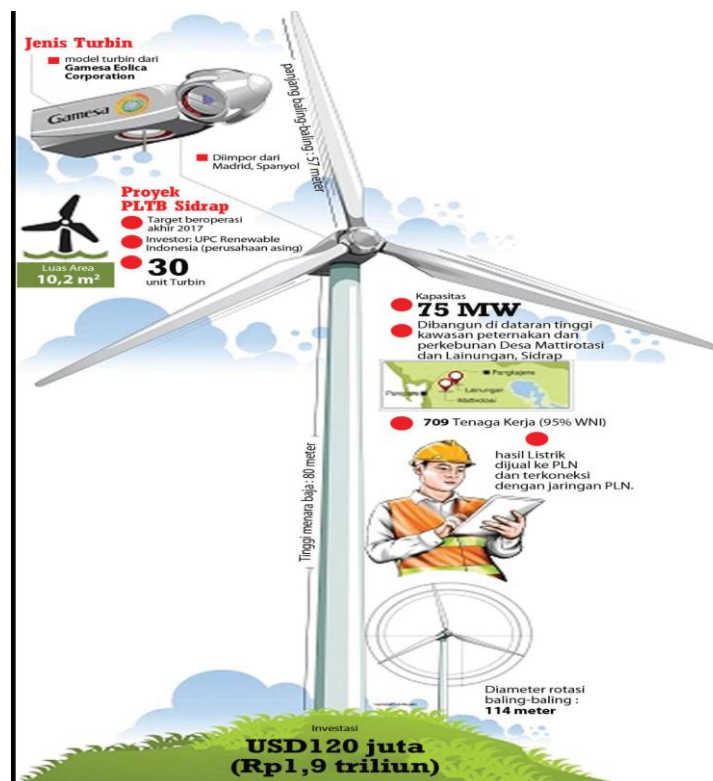
5. Potensi PLTB di Sulawesi Selatan di Sidrap

Pembangkit listrik tenaga angin Sidrap - 75 MW yang diwakili dalam Gambar 12 adalah PLTB di Sidrap. Sebanyak 30 unit dengan kapasitas 2,5 MW per unit. Tinggi konstruksi 80 meter tiang, panjang baling-baling 57 Meter dengan diameter putaran baling-baling 114 meter. Luas lahan yang digunakan adalah 10,2 m2, sedangkan untuk jenis turbin yang menggunakan Ganesha Eolica Corporation, investasi untuk pembangunan

PLTB Sidrap adalah US \$ 120 juta atau setara dengan 1,9 triliun, jika dikonversi ke Rupiah adalah Rp. 266.663.100.000.000,00.



Gambar 12. PLTB Sidrap



Gambar 13. Kontruksi PLTB Sidrap

6. Konversi Energi Angin

Potensi angin untuk menggerakkan rotor berputar kemudian dari rotasi poros yang terhubung ke generator sehingga menghasilkan arus listrik. Angin itu sendiri memiliki kecepatan dinamis yang dirumuskan sebagai berikut:

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1)$$

Keterangan:

q = Tekanan dinamik angin

ρ = Kecepatan udara (m/s)

V = Kecepatan angin (m/s)

Kekuatan angin diperoleh dengan mengalikan tekanan angin dinamis dan area sapuan sebagai berikut:

$$F = q A \quad (2)$$

Keterangan:

F = Gaya angin

A = Luas daerah sapuan angin (m²)

Dalam hal ini area sapuan adalah area rotor, yaitu:

$$A = \frac{1}{2} \pi r^2 \quad (3)$$

Keterangan :

r = Jari-jari rotor (m)

Menurut definisi penggandaan antara kekuatan angin dan kecepatan angin menghasilkan tenaga angin, yaitu:

$$\text{Angin} = F \cdot V \quad (4)$$

Keterangan:

P_{angin} = Daya angin (Watt)

F = Gaya Angin

V = Kecepatan Angin (m/s)

Statistik pemrosesan data time-series kecepatan dan arah angin. Metode statistik yang digunakan untuk menentukan karakteristik angin menggunakan metode Weibull. Metode distribusi Weibull, ada 2 parameter yang digunakan, yaitu parameter k (tanpa dimensi) dan parameter skala c (m/s). Nilai parameter k diperoleh dengan nilai berdasarkan data kecepatan angin aktual di lapangan sehingga cukup representatif untuk mengetahui distribusi sejumlah data kecepatan angin yang bervariasi. Untuk mengetahui nilai parameter k , jika nilai tengah dan varians diketahui, Anda dapat menggunakan persamaan. (Dr. Gary L. Johnson dalam Wiranti, et al, 2013).

Sedangkan untuk mencari frekuensi potensial kecepatan angin, dapat menggunakan rumus berikut:

$$Wp = \left(\frac{n_{ws}}{n_h} \right) \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan:

Wp = Weibull Probability (%)

n_{ws} = Jml kec. angin dalam periode jam (jam)

n_h = Jam dalam periode waktu (jam)

Perhitungan jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin per tahun dapat diperoleh dengan rumus:

$$AEP = P_{curve} * n_h \quad (6)$$

Keterangan :

AEP = *Annual Energy Production (KWh)*

P_{curve} = *Power curve (kW)*

Energi kinetik (gerak) adalah energi yang dimiliki oleh benda yang bergerak (kincir angin). Persamaan energi kinetik adalah sebagai berikut:

$$EK = \frac{1}{2} * m * V^2 \quad (7)$$

Keterangan:

EK = Energi Kinetik (*Joule*)

m = Massa (Kg)

V = Kecepatan (m/s)

Energi kinetik angin terbentuk karena angin melewati bidang turbin dengan luas penampang dan ketebalan penampang. Berdasarkan luas penampang turbin, ada persamaan volume turbin angin sebagai berikut:

$$Vol = A * D \quad (8)$$

$$\rho = m / Vol \quad (9)$$

$$m = \rho * Vol \quad (10)$$

Keterangan:

Vol = Volume turbin (m^3)

A = Luas penampang (m^2)

D = Diameter penampang (m)

ρ = Massa jenis angin (1.225 kg/m^3)

m = Massa udara (kg)

t = Waktu (detik)

Maka didapat persamaan energi sebagai berikut:

$$m = \frac{1}{2} * \rho * V^3 * A * t \quad (11)$$

Faktor kapasitas Turbin Angin (Capacity Factor) adalah ukuran kinerja Turbin Angin, bukan ukuran untuk menentukan energi listrik yang dihasilkan dalam satu tahun. Nilai-nilai Faktor Kapasitas biasanya berkisar antara 20% -40%, berdasarkan definisi-definisi ini dalam mendapatkan estimasi nilai energi listrik dengan persamaan:

$$P_{\text{max out}} = \text{Total jam/thn} * \text{Max. Power output TA.} \quad (12)$$

Sehingga ;

$$CF = \frac{P_{\text{bruto}}}{P_{\text{max out}}} \times 100\% \quad (13)$$

Keterangan:

CF = *Capsity Factor* (%)

P_{Bruto} = Energi total turbin angin (KWh)

$P_{\text{Max Out}}$ = Energi max. Output TA (KWh)

Daya atau disebut juga Daya (Watt), adalah jumlah energi yang dihasilkan per satuan waktu, maka diperoleh persamaan berikut:

$$\text{Power (P)} = \frac{1}{2} * \rho * V^3 * A. \quad (14)$$

Keterangan:

P = Power daya (*Watt*)

ρ = Massa jenis angin (1.225 kg/m^3)

V = Kecepatan (m/s)

A = Luas penampang (m^2)

D = Diameter penampang (m)

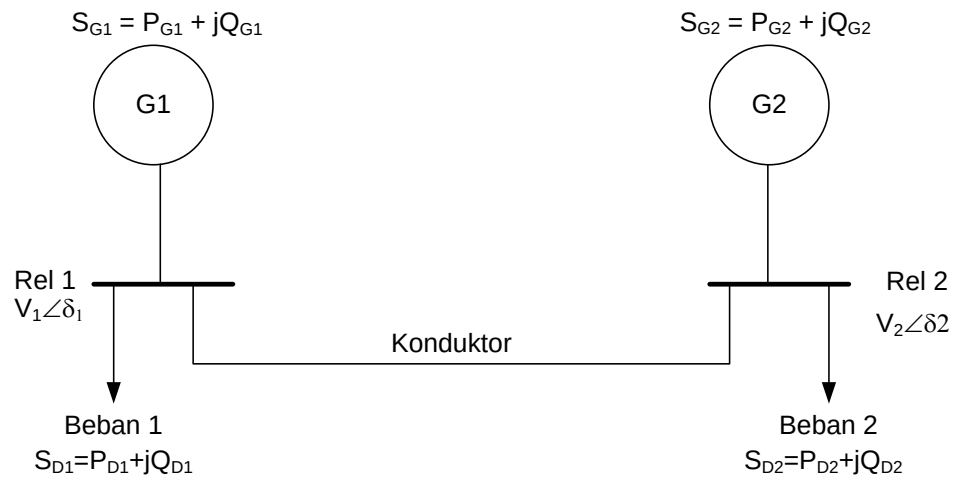
B. STUDI ALIRAN DAYA

Dalam sistem tenaga listrik, studi tentang aliran daya adalah langkah pertama untuk mengetahui kondisi sistem. Dari studi aliran daya dapat diketahui kinerja daya (aktif dan reaktif) untuk kondisi tertentu ketika sistem bekerja, ada tiga kondisi yaitu, transient, sub transient, dan steady-state. Studi aliran daya memberikan informasi tentang status saluran dan gardu transmisi (GI). Keadaan daya nyata (daya nyata) dan daya reaktif (daya reaktif) di titik gerbang utama dalam keadaan normal sesuai dengan batas yang diizinkan.

Studi aliran daya adalah studi awal sebelum sistem disuntikkan oleh generator baru atau energi terbarukan. Perencanaan dan desain injeksi generator baru, kapasitor, atau peralatan pengontrol dimulai dengan studi aliran daya ini. Setiap beban atau generator tambahan dapat mempengaruhi aliran daya yang terjadi.

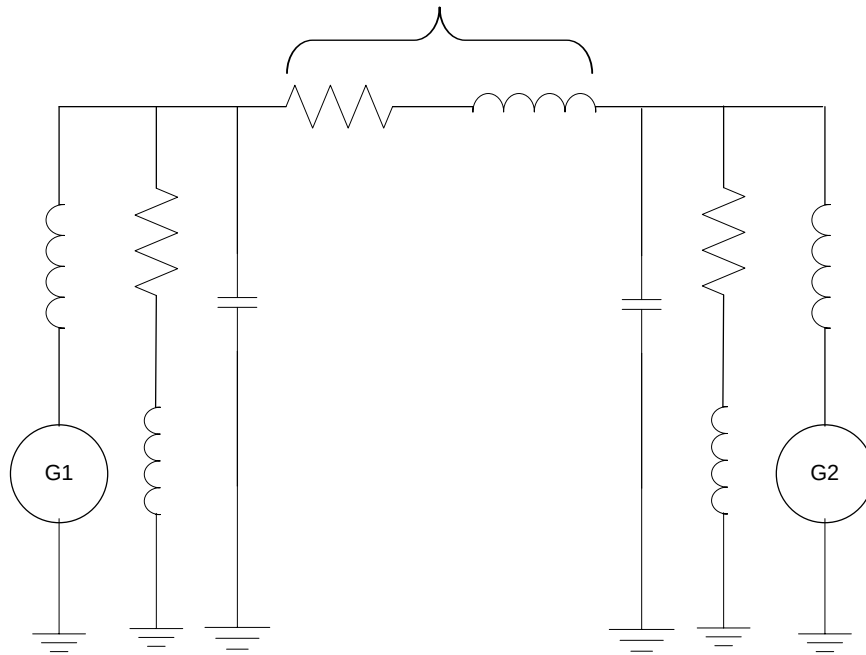
1. Persamaan Aliran Daya

Pada Gambar 14 adalah representasi sederhana dari aliran daya, karena sistem itu memiliki generator dan beban, tetapi pada kenyataannya tidak semua bus memiliki generator. Konduktor menghubungkan antara bus 1 dan bus 2, setiap bus memiliki 6 jumlah listrik yang terdiri dari: PD, PG, QD, QG, V dan δ (Kundur, 1994).



Gambar 14. Diagram satu garis sistem 2 bus

Pada Gambar 14, persamaan aliran daya dapat dihasilkan menggunakan diagram impedansi. Dalam Gambar 15. Ini adalah diagram impedansi generator sinkron yang mewakili sebagai sumber yang memiliki model reaktansi dan transmisi π (ϕ). Diasumsikan bahwa beban memiliki impedansi konstan dan daya konstan pada diagram impedansi.



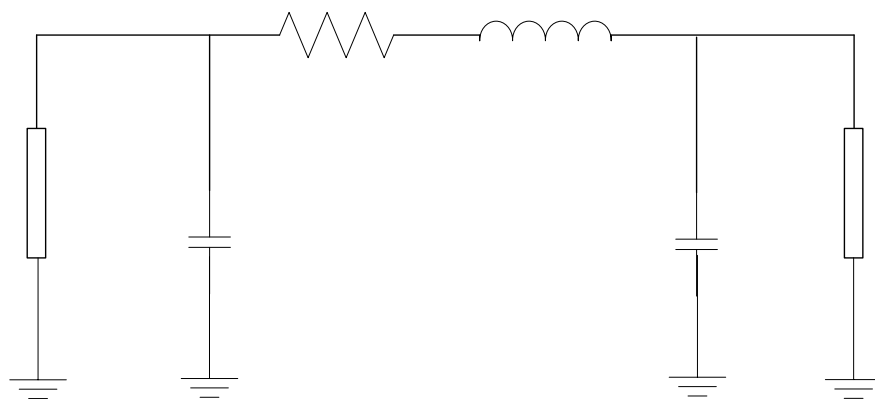
Gambar 15. Gambar impedansi sistem 2 bus

Besaran daya pada bus 1 dan bus 2 adalah sebagai berikut:

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1} = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \quad (15)$$

$$S_2 = S_{G2} - S_{D2} = (P_{G2} - P_{D2}) + j(Q_{G2} - Q_{D2}) \quad (16)$$

Gambar 16 adalah penyederhanaan dari Gambar 15 sebagai bus daya (bus power) untuk setiap bus.



Gambar 16. Bus daya dengan transmisi model π untuk sistem 2 bus

Jumlah arus yang disuntikkan pada bus 1 dan bus 2 dapat ditulis dalam persamaan berikut:

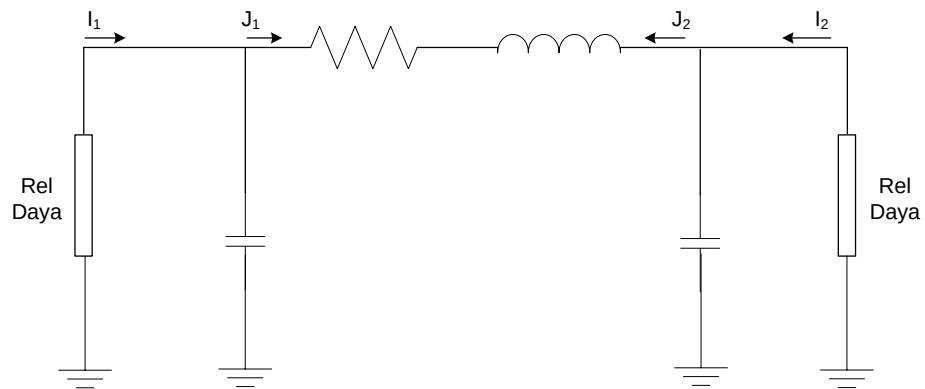
$$I_1 = I_{G1} - I_{D1} \quad (17)$$

$$I_2 = I_{G2} - I_{D2} \quad (18)$$

Semua jumlah diasumsikan dalam sistem per unit, sehingga persamaan berikut diperoleh:

$$S_1 = \hat{V}_1 \hat{I}_1 = P_1 + jQ_1 \rightarrow (P_1 - jQ_1) = V_1 I_1 \quad (19)$$

$$S_2 = \hat{V}_2 \hat{I}_2 = P_2 + jQ_2 \rightarrow (P_2 - jQ_2) = V_2 I_2 \quad (20)$$



Gambar 17. Aliran arus dalam rangkaian ekivalen

Aliran arus dapat dilihat pada Gambar 17. Arus pada bus 1 dapat direpresentasikan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_1 + \hat{I}_1^n \quad (21)$$

2. Klasifikasi Bus

Dalam sistem tenaga listrik, jenis bus dibagi menjadi tiga jenis, yaitu: Slack bus, bus generator dan load bus (Kundur, 1994). Fungsi dan cara kerja ketiga bus tersebut adalah:

2.1. Slack Bus

Slack bus juga disebut sebagai (swing) bus atau swinging rails. Parameter magnitudo rel yang diketahui adalah voltase (V) dan sudut (δ). Dalam sistem dirancang untuk memiliki rel ini yang digunakan sebagai referensi ya itu jumlahnya $\delta = 0^\circ$. Jumlah yang dapat dihitung dari rel ini adalah daya aktif dan reaktif (Kundur, 1994).

2.2. Generator Bus

Generator bus sering disebut sebagai bus yang dikendalikan tegangan, bus ini memiliki tegangan konstan atau bus memiliki generator. Untuk pembangkit listrik aktif dapat menyesuaikan penggerak utama, dan nilai tegangan yang dikendalikan mengatur eksitasi generator. Jadi bus ini sering disebut bus PV. Besarnya yang dapat dihitung dari bus ini adalah Q dan δ sudut beban (Kundur, 1994).

2.3. Bus Beban

Bus yang tidak memiliki generator disebut load bus. Pada bus ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dikenal sehingga sering disebut bus

PQ. Daya aktif dan reaktif yang dimasukkan ke dalam sistem daya memiliki nilai positif, sementara daya aktif dan reaktif diserap oleh beban nilai negatif. Jumlah yang dapat dihitung dari bus ini adalah V dan δ sudut beban (Kundur, 1994).

Dari ketiga jenis bus tersebut dapat diklasifikasikan jumlah yang dapat diketahui dan jumlah yang tidak diketahui dalam tabel berikut:

Tabel 3 mengklasifikasikan jumlah yang dapat diketahui dan jumlah yang tidak diketahui.

Tabel 3. Klasifikasi jenis bus dan besaran

Jenis bus	Besaran yang diketahui	Besaran yang tidak diketahui
Slack Bus	P, Q	V, δ
Bus Generator (Bus PV)	P, V	Q, δ
Bus Beban (bus PQ)	$V, \delta = 0$	P, Q

3. Metode Newton Raphson

Dalam memecahkan aliran daya menggunakan metode persamaan dalam sistem multi-bus. Metode yang digunakan dalam menyelesaikan aliran daya untuk ini adalah metode Newton raphson.

Metode Newton Raphson banyak digunakan untuk masalah persamaan non-linear. Solusi ini menggunakan persamaan linear dengan pendekatan solusi. Metode ini dapat diterapkan pada satu persamaan atau beberapa persamaan dengan beberapa variabel yang tidak diketahui.

Kecepatan nyata dari berbagai metode analisis aliran beban sulit untuk dipastikan karena mereka dapat berubah dari alat yang berbeda. Perlu diingat keefektifan suatu teknik adalah fungsi dari kecepatan konvergensi, lamanya waktu untuk setiap iterasi dan sensitivitasnya terhadap parameter urutan.

Metode untuk menghitung aliran daya yang terjadi adalah metode Newton Raphson. Metode Newton Raphson memiliki perhitungan yang lebih baik untuk sistem tenaga yang lebih besar dan tidak linier, karena lebih efisien dan praktis. Jumlah iterasi yang dibutuhkan kecil untuk mendapatkan solusi berdasarkan ukuran sistem. metode ini lebih disukai karena konvergensinya jauh lebih cepat dan persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk kutub.

Dalam bentuk matrik admitansi, dapat ditulis sebagai berikut:

$$I_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (22)$$

Atau dalam bentuk polar menjadi :

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} \delta_j \quad (23)$$

Daya kompleks di GI 1 adalah :

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} \delta_j \quad (24)$$

Daya aktif di GI 1 adalah:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (25)$$

Daya reaktif di GI adalah :

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (26)$$

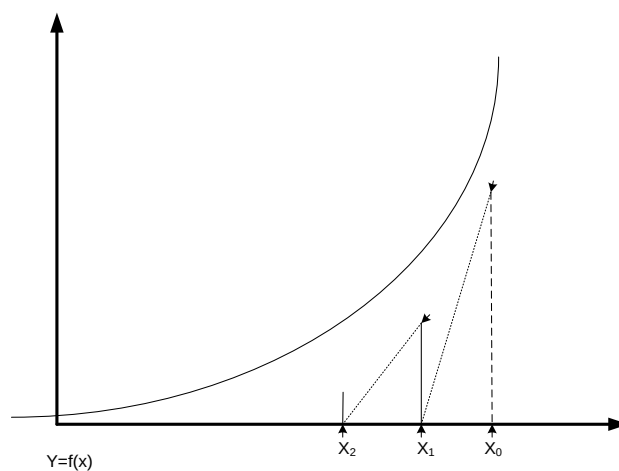
G.I. beban dapat dibentuk oleh sepasang persamaan P_i dan Q_i , sedangkan untuk generator GI persamaan P_i dapat dibentuk. Dengan memasukkan nilai estimasi level tegangan $|V|$ dan sudut fase tegangan δ di setiap GI dan memperluas Persamaan (25) dan Persamaan (26) ke Taylor Daret sampai urutan pertama, persamaan berikut diperoleh:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j^1 & j^2 \\ j^3 & j^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (27)$$

Perbedaan atau perubahan sudut dan tegangan dapat dihitung dari Persamaan (27), yang merupakan produk dari matriks terbalik Jakartian dengan perubahan daya sebagai berikut:

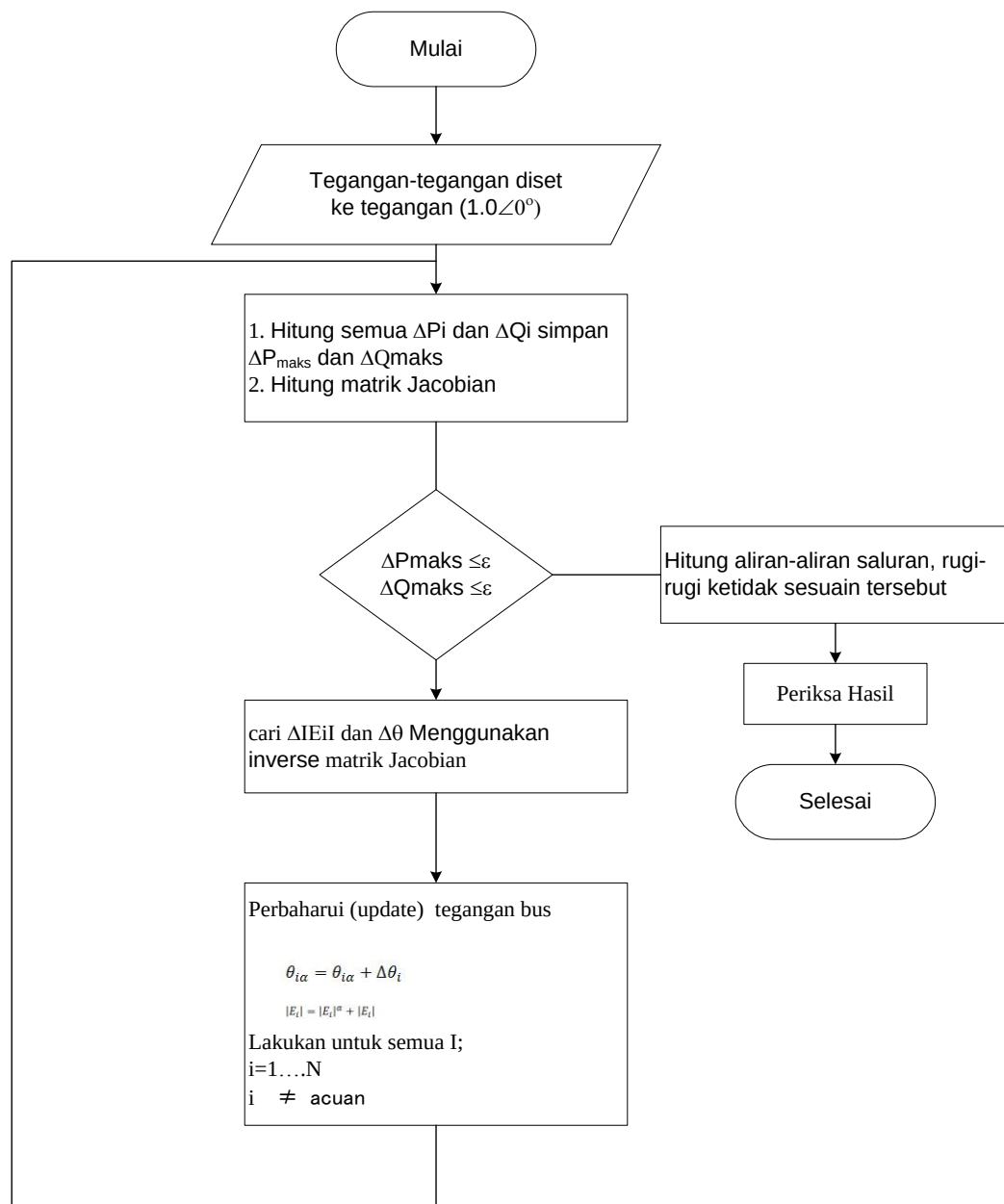
$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j^1 & j^2 \\ j^3 & j^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (28)$$

Ilustrasi grafis dari metode Newton raphson dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 18. Ilustrasi metode Newton raphson

Gambar 18 dapat dilihat bahwa kurva dari garis lengkung diasumsikan sebagai grafik persamaan $y = F(x)$. Nilai X_0 pada garis x adalah nilai estimasi awal kemudian dilakukan dengan nilai estimasi kedua hingga estimasi ketiga. Dalam Newton Raphson, metode iterasi Newton Raphson dapat dilakukan sebagai berikut:



Gambar 19. Diagram alir metode Newton Raphson

Perhitungan mencapai tingkat konvergensi yang ditetapkan (konvergen), dari besarnya tegangan V dan sudut fase tegangan masing-masing GI yang diperoleh. Kemudian lakukan perhitungan aliran daya dari masing-masing fasilitas transmisi, jumlah daya aktif P dan daya reaktif Q yang harus dihasilkan oleh setiap generator dan kerugian pada saluran transmisi.

4. Standar Kinerja Jaringan Sistem

Mengacu pada aturan Perusahaan Listrik Negara (disingkat PLN) atau nama resminya adalah PT PLN (Persero) bahwa setiap jaringan harus memiliki titik penghubung maksimum sehingga distribusi daya tidak mengalami kerugian. Ini diatur dalam Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia) Peraturan Menteri (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral) pada tahun 2007. Ada enam hal yang sangat dipertimbangkan dalam aturan, yaitu:

- A. Frekuensi nominal 50 Hz, dalam ketentuan ini, dicari agar tidak lebih rendah dari 49,5 Hz atau lebih tinggi dari 50,5 Hz, dan selama masa darurat dan gangguan, frekuensi sistem dibiarkan berkurang menjadi 47,5 Hz atau meningkat 52,0 Hz sebelum pembangkit unit keluar dari operasi sistem.

- b. Tegangan Sistem harus dipertahankan dalam batas-batas berikut:

Tegangan Nominal	Kondisi normal
500 kV	+5%, -5%
150 kV	+5%, -10%
70 kV	+5%, -10%
20 kV	+55%, -10%

- c. Distorsi Harmonik total total maksimum pada setiap titik koneksi dalam kondisi operasi normal dan pada kondisi keluar yang terencana dan tidak terencana harus memenuhi kondisi berikut:

Tegangan Nominal	Kondisi normal
500 kV	Tidak termasuk
150 kV	3%
70 kV	3%
20 kV	3%

- d. Komponen urutan negatif maksimum dari tegangan fasa dalam jaringan tidak boleh melebihi 1% dalam kondisi operasi normal dan keluar yang direncanakan, dan tidak boleh melebihi 2% selama terjadinya tegangan impuls instan (rarely short duration peaks)
- e. Fluktuasi tegangan pada titik koneksi dengan beban berfluktuasi, tidak boleh melebihi batas berikut:

1. Tingkat tegangan untuk setiap perubahan langkah hanya 2%, yang dapat terjadi berulang kali. Setiap kejadian dari perjalanan tegangan besar di luar perubahan langkah dapat diizinkan hingga 3% selama itu tidak menimbulkan risiko bagi jaringan transmisi, atau instalasi pengguna jaringan. Tegangan berkedip hingga 5% ketika menjalankan motor listrik yang tidak terjadi sering dapat memberikan toleransi.
 2. Flicker memiliki durasi jangka pendek 1,0 unit dan jangka panjang 0,8 unit yang diukur dengan meteran flicker sesuai dengan spesifikasi IEC-868.
- f. Faktor daya ($\cos \phi$) pada titik koneksi antara pengguna jaringan dengan jaringan minimum 0,85 lagging.

Waktu penghentian untuk gangguan di sisi pengguna jaringan terhubung langsung ke jaringan transmisi, dari saat gangguan hingga pemadaman busur dengan pembukaan PMT, harus kurang dari atau sama dengan aturan berikut:

1	500 kV	: 90 milidetik
2	150 kV	: 120 milidetik
3	70 kV	: 150 milidetik

Jika terjadi kesalahan pada perangkat perlindungan peralatan jaringan utama, perlindungan cadangan (backup) untuk gangguan pada titik koneksi tegangan tinggi yang disediakan oleh pengguna jaringan, harus diatur dengan waktu pemutusan kurang dari 400 milidetik.

5. Sistem Per Unit

Dalam sistem tenaga listrik, saluran transmisi adalah komponen yang dapat mengirimkan daya dari generator ke beban. Dalam transmisi ada kehilangan daya karena konduktor itu sendiri dipengaruhi oleh panjang, luas penampang, dan faktor jenis. Dalam operasi pada level tegangan kilovolt adalah unit yang mudah untuk mengekspresikan tegangan. Karena jumlah daya yang harus didistribusikan dalam satuan kilovolt atau megawatt dan kilo volt ampere atau ampere mega volt. Ini adalah istilah yang umum digunakan. Misal karena tegangan dasar dipilih 120 kV, maka tegangan 108, 120 dan 126 kV masing-masing adalah 0,90.1 dan 1,05 pu. definisi nilai per unit untuk kuantitas adalah perbandingan jumlah itu dengan nilai dasar yang dinyatakan dalam desimal (Stevenson 1994).

Dalam sistem tiga fase tegangan dan daya digunakan untuk menghitung nilai dasar menggunakan rumus berikut:

$$1. \text{ Arus dasar, } = I \frac{\text{dasar } kVA_{1\phi}}{\text{tegangan dasar } kV_{LN}} \quad (29)$$

$$2. \text{ Impedansi dasar } = \frac{\text{Tegangan dasar } V_{LN}}{\text{arus dasar } A} \quad (30)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{Tegangan dasar } kV_{LN})^2 \times 1000}{\text{dasar } kVA_{1\phi}} \quad (31)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar } kV_{LN})^2}{\text{Dasar } MVA_{1\phi}} \quad (32)$$

$$\text{Impedansi per-unit} = \frac{\text{impedansi sebenarnya } , \Omega}{\text{impedansi dasar } , \Omega} \quad (33)$$

$$3. \text{ Daya dasar, } KW_{1\phi} = \text{dasar } kVA_{1\phi} \quad (34)$$

$$\text{Daya dasar, } MW_{1\phi} = \text{dasar } MVA_{1\phi} \quad (35)$$

$$\text{Daya per-unit} = \frac{\text{daya sebenarnya } , MW_{1\phi}}{\text{daya dasar } , MVA_{1\phi}} \quad (36)$$

$$\text{Daya tegangan per-unit} = \frac{\text{tegangan sebenarnya } , kV_{LL}}{\text{tegangan sebenarnya } , kV_{LL}} \quad (37)$$

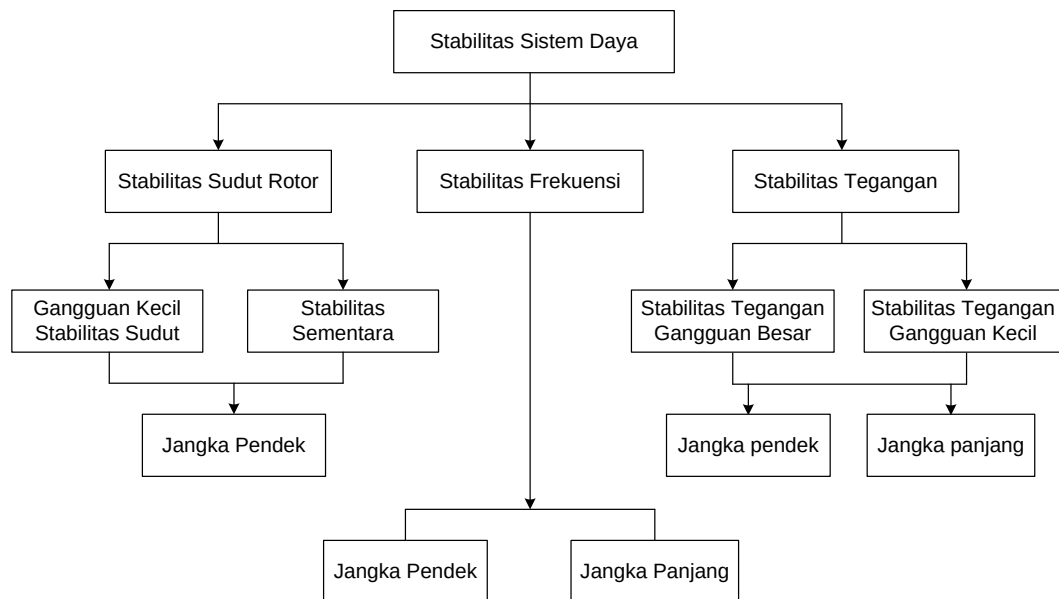
$$\text{Resistansi per-unit} = \frac{\text{resistansi sebenarnya } , \Omega}{\text{resistansi dasar } , \Omega} \quad (38)$$

C. STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK

Sistem tenaga listrik terdiri dari tiga komponen utama yaitu, generator lengkap dengan mulai drive, transmisi dan distribusi, dan beban. Setiap komponen memiliki karakteristik yang sangat rentan terhadap perubahan operasi. Oleh karena itu perlu untuk mengklasifikasikan stabilitas sistem sehingga dapat mengetahui penyebab ketidakstabilan tersebut. Klasifikasi stabilitas sistem tenaga dibagi berdasarkan beberapa kriteria:

1. Parameter yang diamati
2. Besar kecilnya gangguan
3. Waktu terjadinya gangguan

Klasifikasi stabilitas sistem tenaga listrik menurut IEEE / CIGRE dapat dilihat pada Gambar 20. Para ahli sistem tenaga listrik telah mengklasifikasi jenis dan penyebab fenomena stabilitas. Pertama, Gupta (1998) menjelaskan bahwa, stabilitas sistem fisik mengacu pada kemampuan sistem setelah osilasi terjadi, sehingga untuk kembali ke posisi keseimbangan awal ketika gangguan terjadi atau secara alami titik-titik keseimbangan baru yang mendekati keseimbangan lama. Second Hadi Saadat (1999) osilasi yang terjadi adalah penyebab gangguan.



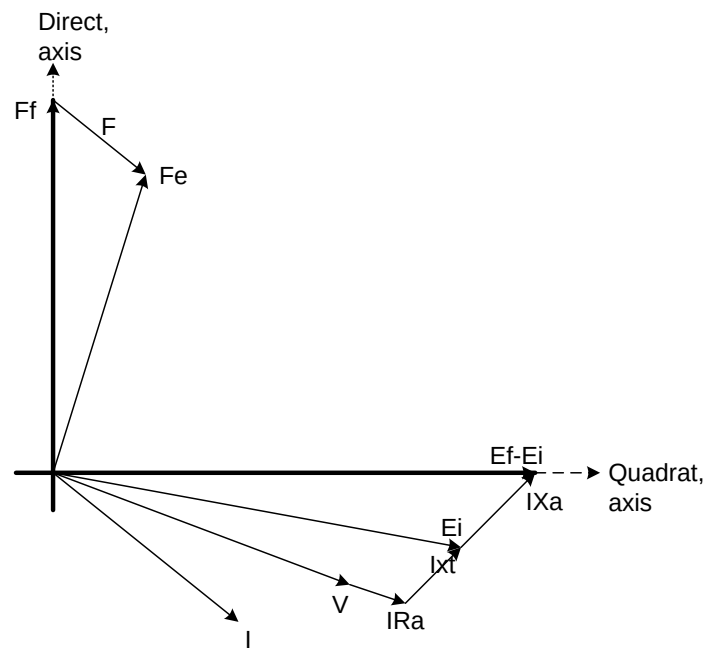
Gambar 20. Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik (Kundur, 2004)

Gangguan dapat berupa gangguan kecil dan gangguan besar yang menyebabkan sistem menjadi tidak stabil. Masalah stabilitas sangat tergantung pada perilaku mesin sinkron setelah gangguan terjadi. Jadi dalam hal ini, masalah stabilitas dibagi menjadi dua kategori yaitu: stabilitas steady-state dan transient stabilitas.

1. Analisis stabilitas keadaan stabil

Dalam sistem tenaga listrik, dibutuhkan keseimbangan antara daya mekanik dan daya listrik. Tenaga mekanik berupa penggerak utama dari generator, maka daya listrik dipengaruhi oleh jumlah beban listrik. Jadi dalam diagram fluks dan tegangan fasor pada mesin sinkron silinder, yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini semua efek saturasi diabaikan. Fluks medan F sebanding dengan terminal stator. Jika arus medan untuk

sirkuit sirkuit terbuka E_i sebanding dengan I_f pada sumbu quadrature. Tegangan sebanding dengan tegangan medan yang diterapkan sebagai E_f .



Gambar 21. Diagram fasor dari mesin sinkron rotor silinder dalam keadaan stabil.

Ketika mesin sinkron diberi beban, fluks F sebanding dengan arus stator yang dihasilkan oleh penambahan faktor fluks F_1 yang memberikan nilai fluks F_e . Tegangan efektif stator E_i memiliki hubungan dengan F_e dan tertinggal 90° . tegangan terminal V_d dan V_q diperoleh dari tegangan E_i melalui pertimbangan penurunan tegangan karena reaktansi X_1 dan tahanan jangkar R_a . Perbedaan antara E_f dan E_i adalah dalam fase dengan jath tegangan di $|x|$ dan sebanding dengan I , oleh karena itu, perbedaan tegangan dapat dikatakan sebagai penurunan tegangan dalam

jangkar X_a yang berlaku. Jumlah antara X_1 dan X_d disebut reaktansi sinkron (Arrilaga, 1990)

$$X_d = X_1 + X_{ad} \quad (39)$$

$$X_q = X_1 + X_{aq} \quad (40)$$

$$E_i - V_q = R_a I_q - X_d I_d \quad (41)$$

$$-V_d = R_a I_d - X_q I_q \quad (42)$$

Keterangan:

X_d = reaktansi sumbu direct

X_q = Reaktansi sumbu quatature

I_d = arus jangkar sumbu direct

I_q = Arus jangkar sumbu quadrature

2. Stabilitas transien

Dalam mempelajari sistem kelistrikan skala besar atau sistem multi-mesin perlu mengetahui masalah kestabilan sementara (Transient Stability). Diasumsikan bahwa ketika sistem dalam kondisi mapan (steady-state) stabil dan daya input mekanik untuk generator sama dengan daya listrik yang dikirim ke jaringan. Ketika gangguan besar terjadi (such as short circuit, sudden loss of large load, etc.), Operasi berada dalam kondisi gangguan permanen atau mapan. Kecuali jika gangguan dapat diselesaikan sebelum waktu maksimum tertentu yang kritis atau CCT (Clearing Critical Time), maka sinkronisasi dapat terjadi, sehingga sistem tidak dapat melakukan sinkronisasi.

3. Voltage Stability

Stabilitas Tegangan adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan nominal pada semua bus setelah terjadi gangguan pada sistem tenaga. Secara umum, stabilitas tegangan didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan konstan pada semua bus dalam sistem setelah mengalami gangguan dari kondisi operasi awal yang diberikan. Itu tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan/mengembalikan keseimbangan antara permintaan beban dan pasokan beban dari sistem tenaga. Kemungkinan ketidakstabilan terjadi dalam bentuk penurunan progresif atau peningkatan tegangan beberapa bus. Kemungkinan hasil dari ketidakstabilan tegangan adalah hilangnya beban di suatu daerah, atau jalur transmisi yang terputus dan elemen lainnya karena perlindungan yang menyebabkan pemadaman bertingkat yang pada gilirannya dapat menyebabkan hilangnya sinkronisasi beberapa generator (Ajarapu, 2006). Kemudian stabilitas tegangan diklasifikasikan ke dalam empat kategori, yaitu sebagai berikut: stabilitas tegangan gangguan besar, stabilitas tegangan gangguan kecil, stabilitas tegangan jangka pendek dan stabilitas tegangan jangka panjang. Ringkasan singkat dari klasifikasi ini diberikan di bawah ini.

1. Stabilitas tegangan gangguan besar, yaitu: Mengacu pada kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan stabil setelah gangguan besar seperti gangguan sistem, kehilangan pasokan,

atau kontingensi sirkuit. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik sistem dan beban, dan interaksi keduanya kontinu dan kontrol serta perlindungan terpisah. Periode operasi yang menarik dapat diperpanjang dari beberapa detik hingga puluhan menit.

2. Stabilitas tegangan gangguan kecil, yaitu: Mengacu pada kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan stabil ketika mengalami gangguan kecil seperti perubahan tambahan pada beban sistem. Bentuk stabilitas ini dipengaruhi oleh karakteristik beban, kontrol kontinu, dan kontrol diskrit pada waktu yang cepat
3. Stabilitas tegangan jangka pendek, yaitu: Melibatkan dinamika komponen beban kerja cepat seperti motor induksi, beban yang dikontrol secara elektronik, dan konverter tegangan HVDC. Periode studi yang menarik adalah dalam urutan beberapa detik, dan analisisnya membutuhkan solusi sistem diferensial yang sesuai dengan persamaan.
4. Stabilitas tegangan jangka panjang, yaitu: Melibatkan peralatan kerja yang lebih lambat seperti transformator, transformator beban, dan generator pembatas arus terkontrol secara termostatis. Periode operasi yang menarik dapat meluas ke beberapa atau beberapa menit, dan simulasi jangka panjang diperlukan untuk analisis kinerja sistem yang dinamis. Ketidakstabilan disebabkan oleh hilangnya keseimbangan jangka panjang, titik operasi pasca-gangguan adalah gangguan kecil yang tidak stabil, atau kurangnya minat

pada gangguan keseimbangan pasca-stabil. Gangguan juga bisa menjadi beban pembangunan yang berkelanjutan.

4. Stabilitas Sudut Rotor

Secara umum masalah stabilitas sistem tenaga listrik terkait dengan stabilitas sudut rotor (rotor angle stability) dan stabilitas tegangan. Klasifikasi ini didasarkan pada rentang waktu dan ketidakstabilan meteran mekanik. Stabilitas sudut rotor diklasifikasikan ke dalam stabilitas sinyal kecil dan stabilitas sementara. Stabilitas sinyal kecil adalah stabilitas sistem untuk gangguan kecil dalam bentuk osilasi elektromekanis yang tidak dimatikan, sementara stabilitas sementara karena kurangnya sinkronisasi torsi dan dimulai dengan gangguan besar.

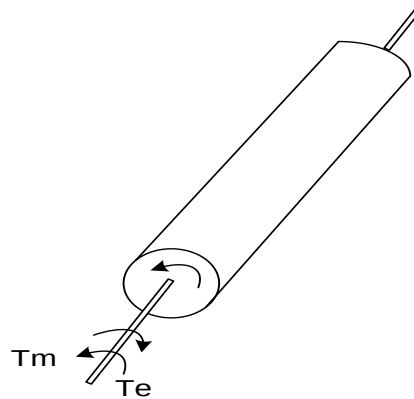
Dalam prinsip dinamika sistem tenaga listrik, telah dinyatakan bahwa torsi akselerasi generator (*acceleration torque*) adalah produk momen inersia rotor dan kecepatan sudutnya. Dalam hal ini, untuk menyatakan ini generator simultan, direpresentasikan dalam persamaan berikut:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad N - M \quad (43)$$

J: Momen-kelembaman total dari massa rotor, dalam kg-m²

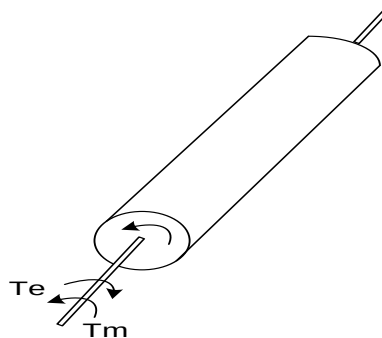
Momen balik mekanik T_m dan momen balik listrik T_e dianggap positif untuk generator sinkron. Itu θ_m (m) adalah momen balik yang

dihasilkan dari poros generator yang memiliki kecenderungan untuk mempercepat rotor ke arah positif rotasi θ_+ (m) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 22.



Gambar 22. Momen putar mekanik

Prinsip motor secara sinkron arah aliran daya berlawanan dengan arah putaran generator, sehingga motor baik T_m dan T_e terbalik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 23.



Gambar 23. Momen putar mekanis

5. Indeks Stabilitas

Pada prinsip stabilitas, sistem kelistrikan dinyatakan stabil jika mampu mempertahankan tegangan di semua bus setelah mengalami gangguan. Menurut (Kundur, 1994), stabilitas tegangan adalah kemampuan untuk mempertahankan tegangan tetap pada semua bus setelah kerusakan. Ada berbagai jenis gangguan beban kecil dan gangguan dinamis. Ini dapat menyebabkan kondisi osilasi yang dapat menyebabkan kurangnya daya reaktif sehingga tegangan turun. Untuk mengetahui stabilitas tegangan, Anda dapat menggunakan kriteria kriteria luas yang sama. Tegangan sistem berada pada titik kritis atau sebaliknya.

6. Kurva P-V

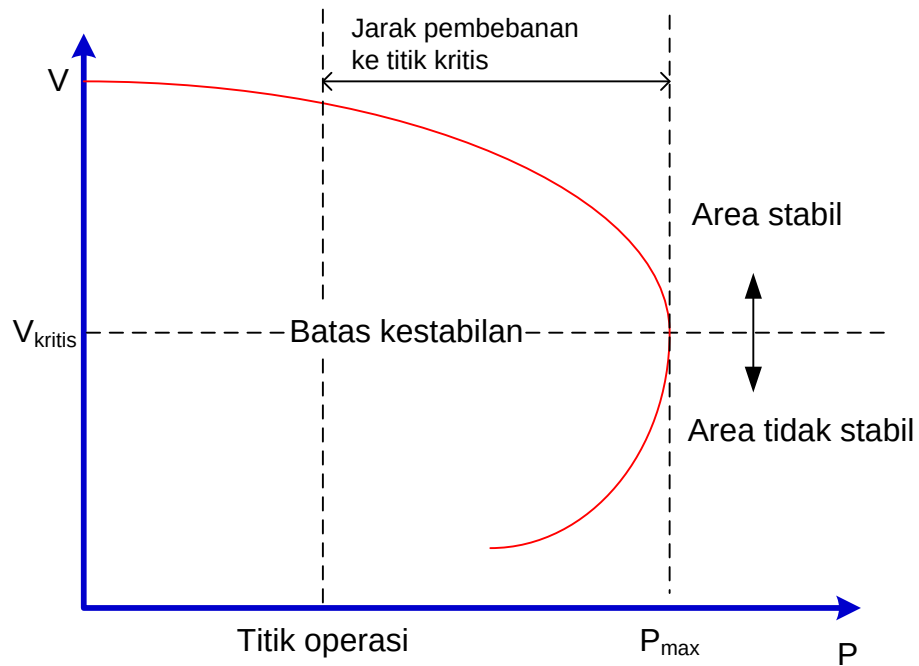
Pada Gambar 24 menunjukkan kurva P-V, menunjukkan beban puncak ($P_{\max}$) dapat menghasilkan kondisi kritis. Kurva P-V mewakili titik penurunan tegangan selama V_{kritis} . Pada titik ini menunjukkan bahwa beban maksimum telah terjadi pada batas stabilitas tegangan.

Kurva P-V dapat digunakan sebagai batas pada pemuatan daya aktif (P_{margin}) dan pemuatan daya reaktif (Q_{margin}), sehingga perbedaan antara daya awal dan kritis dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$P_{\text{margin}} = P_{\text{critical}} - P_{\text{initial}} \quad (44)$$

$$Q_{\text{margin}} = Q_{\text{critical}} - Q_{\text{initial}} \quad (45)$$

Sehingga diperoleh nilai P_{critical} , P_{initial} , Q_{critical} , Q_{initial} didapat dari kurva PV.



Gambar 24. Kurva PV

7. SIMPLIFIED VOLTAGE STABILITY INDEX (SVSI)

Mengacu pada penelitian (Yuli Asmi Rahman, 2018) tentang SVSI adalah persamaan untuk meningkatkan indeks stabilitas VSI menggunakan faktor koreksi β yang diperoleh dari persamaan berikut:

$$\beta = 1 - (\max(|V_j| - |V_k|)^2) \quad (46)$$

Asalkan nilai V_j dan V_k memiliki nilai bus sisi tegangan pengirim dan penerima.

Jadi persamaan SVSI ditunjukkan dalam Persamaan 46 yang merupakan indeks stabilitas dengan memperhitungkan kondisi beban maksimum yang sering disebut beban puncak, dengan persamaan berikut:

$$SVSI = \frac{\Delta V_i}{\beta * V_i} \quad (47)$$

8. Sistem Besar Skala Dinamis

Sistem dinamis adalah bagian yang terdiri dari jumlah sub-sistem yang terhubung ke pembangkit listrik. Dalam sistem yang dinamis dapat digambarkan melalui struktur persamaan matematika, yaitu:

$$\dot{x} = f(t, x) \quad (48)$$

dan menuliskannya dalam formulir

$$\dot{x} = g_i(t, x_i) + h_i(t, x), \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (49)$$

Dalam persamaan deskripsi sistem baru δ fungsi $g_1(t, x_1)$ mewakili sub-sistem terisolasi δ_i sementara fungsi $h_i(t, x)$ menggambarkan interaksi subsistem yang ada. Dalam menentukan dinamika stabilitas sistem skala besar dari stabilitas sub-sistem dan sifat interaksi (pada tingkat subsistem), dan model stabilitas yang sesuai (pada tingkat sistem keseluruhan) dapat menggunakan konsep vektor Liapnov.

D. KECERDASAN BUATAN

1. Persamaan Rei-Dimo

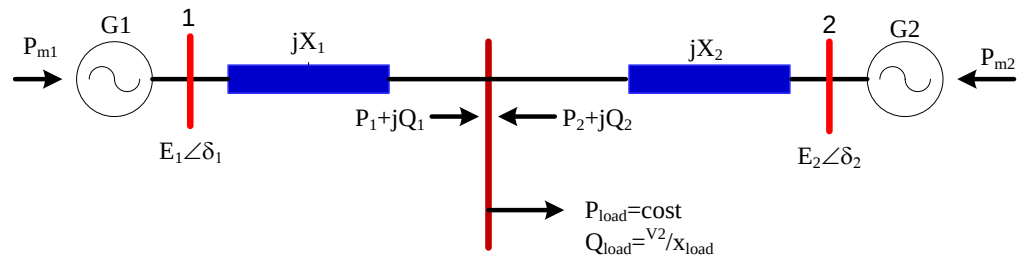
Sistem tenaga listrik adalah kombinasi dari sub-sistem linier, masing-masing terdiri dari: saluran transmisi untuk menghantarkan daya dari generator ke beban, Step-Up Transformer untuk meningkatkan tegangan, reaktor, kapasitor dan bus masuk ke tanah (line) pengisian dan ketuk

Trasformator dan sub-sistem non-linear yang terdiri dari generator lengkap dengan starter, beban, dan kondensor sinkron. Bus yang dapat dibagi menjadi non-esensial, bus jenis ini dapat dihilangkan, dan bus esensial, bus jenis ini harus dipertahankan tidak boleh diubah.

Jaringan transmisi memiliki sifat nonlinear, oleh karena itu tidak dapat dikurangi, bus jenis ini disuntikkan dengan daya MW dan Mvar. Secara umum, model yang setara mematuhi ketentuan berikut:

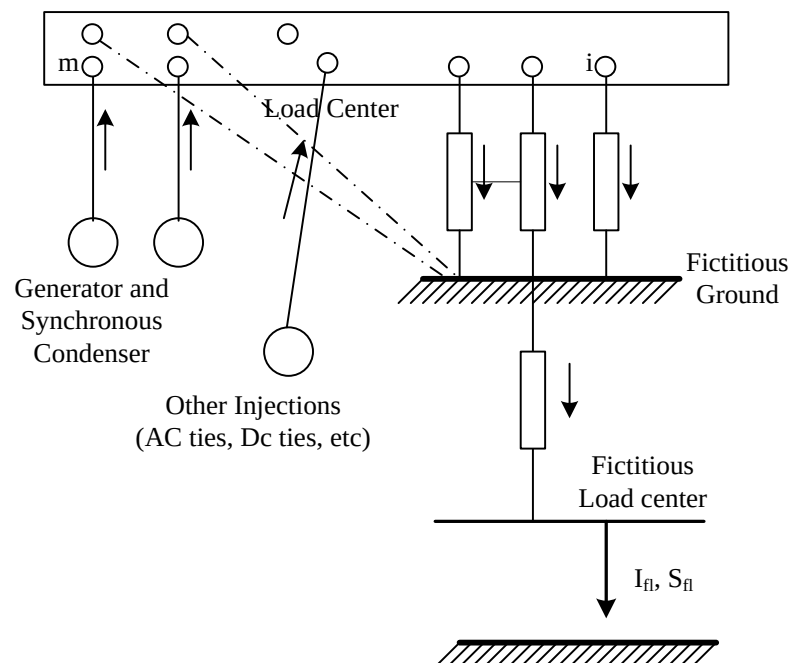
1. Dapat dilihat dari batasannya, padanannya harus akurat dan pasti untuk mewakili sistem.
2. Model Pengurangan harus menghasilkan sifat fisik yang dekat dengan sistem tenaga.
3. Setara harus sesuai dengan prosedur komputasi yang digunakan untuk memecahkan masalah berikutnya.
4. Aktivasi harus memastikan bahwa solusi matematika dapat dilakukan.

Metodologi Rei-Dimo memiliki proses looping tertutup sehingga untuk injeksi tipe linierisasi dengan hal yang sama dapat menggantikan jaringan transmisi dengan penerimaan konstan. Kemudian pengelompokan jaringan transmisi menjadi injeksi non-linear tunggal diterapkan melalui bus fiktif yang disebut REI-Bus.



Gambar 25. Jaringan transmisi dengan admitansi konstan

Metode yang dikembangkan oleh Paul Dimo, memperkenalkan jaringan keseimbangan daya nol, bertujuan untuk membuat sistem beban gabungan menjadi pusat muatan tunggal fiktif dengan mempertahankan sifat dan keseimbangan daya dasar. Gambar 26 menunjukkan langkah numerik demi langkah yang menggambarkan proses menciptakan keseimbangan daya nol.



Gambar 26. Bus fiktif

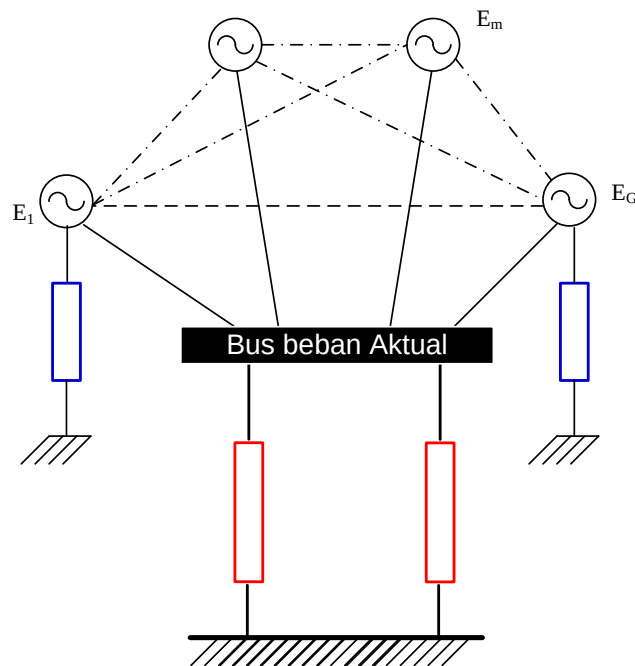
Sifat radial REI dapat memenuhi salah satu aturan yang ada pada stabilitas daya reaktif kondisi-stabil (voltage stability). Untuk sistem mulai dari 1,, I,, generator G, kondensor sinkron, dan injektor aktif seperti ikatan DC atau ikatan AC, terhubung secara radial ke salah satu bus muatan fiktif atau aktual melalui penerimaan $Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_G$, Dimo mengembangkan persamaan berikut:

$$\frac{d\Delta Q}{dV} = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos \delta_m} - 2(\sum_m Y_m + Y_{load})V \quad (50)$$

Keterangan:

E_m = Tegangan internal mesin (diasumsikan konstan, tidak terpengaruh oleh perubahan kecil yang dibuat di bawah stabilitas kondisi tunak)

δ_m = Sudut internal engine dengan mengacu pada tegangan V pada bus beban (baik fiktif dan aktual)



Gambar 27. REI untuk bus beban aktual

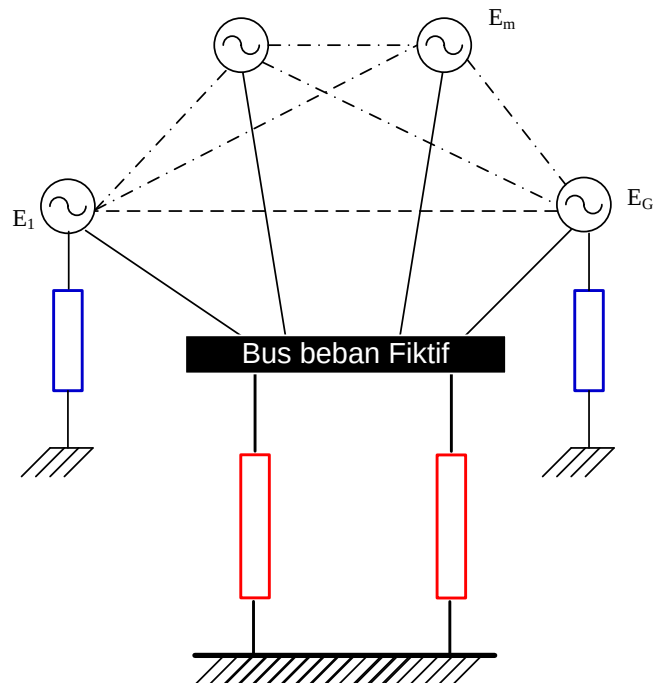
Dalam pendekatan ini, nilai MW mewakili bagian nyata, sedangkan untuk daya reaktif dapat bervariasi sesuai dengan kuadrat tegangan dari persamaan berikut:

$$Y_{load} = \frac{Q_{Load}}{V^2} \quad (51)$$

Dari Persamaan 51 nilai Q_{load} dapat dihitung ulang pada setiap langkah dengan mempertimbangkan struktur beban konstan, $\cos \theta$ tetap, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 28.

Dalam Persamaan 52 di bawah ini untuk menentukan kriteria umum yang telah dikembangkan sebagai berikut:

$$\frac{d\Delta Q}{dV} = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos(\delta_m + \gamma_m)} - 2(\sum_m Y_m \cos \gamma_m + Y_{load} + Y^r)V \quad (52)$$



Gambar 28. REI untuk bus beban Fiktif

Eliminasi Gauss-Seidel adalah algoritma aljabar linier, aljabar ini dapat diterapkan tanpa menimbulkan kesalahan karena simpul dapat

dihapus dan tidak memiliki injeksi (tidak ada arus), sedangkan algoritmenya adalah sebagai berikut:

$$y_{ij}^{new} = y_{ij}^{old} - \frac{y_{ik}^{old} y_{jk}^{old}}{y_{kk}^{old}} \quad (53)$$

dengan :

y_{ijold} = nilai i - j dari matrik Y

y_{kkold} = elemen diagonal k - k yang dieleminasikan step k

y_{ijnnew} = nilai baru dari i - j setelah simpul k dieleminasikan

2. Neural Network Network

Jaringan Syaraf Tiruan (JST), disingkat JST, adalah jaringan syaraf yang meniru prinsip kerja neuron otak manusia (neuron biologis). JST diperkenalkan oleh Mcculloch dan Paitt pada tahun 1943. (Kusumadewi, 2004). Pemodelan sistem Human Artificial Neural Network (ANN) dalam bentuk matematika untuk algoritma jaringan saraf didasarkan pada beberapa asumsi, yaitu sebagai berikut:

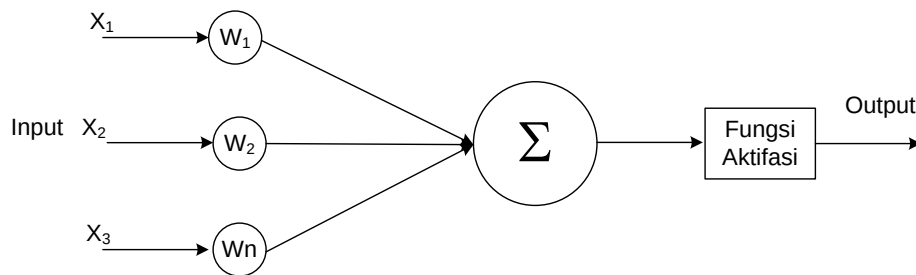
1. Proses informasi dapat terjadi dalam elemen-elemen prosedur sederhana yang disebut neuron.
2. Sinyal dilewatkan oleh neuron melalui tautan.
3. Setiap tautan memiliki bobot tertentu, dengan sinyal yang dikirim secara otomatis dikalikan.
4. Setiap neuron memiliki fungsi aktivasi (dalam bentuk non-linear) ke input yang menghasilkan sinyal output.

Karakteristik jaringan saraf ditentukan berdasarkan hal berikut:

Sebuah. Pola koneksi antar neuron (arsitektur)

b. Metode penentuan bobot (algoritma penelitian atau pembelajaran)

c. Fungsi aktivasi



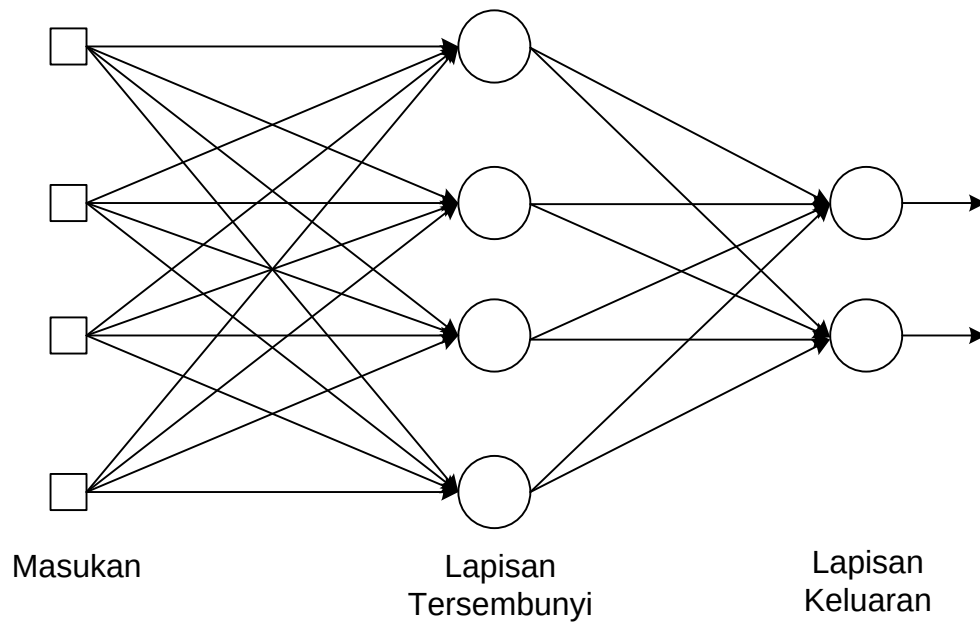
Gambar 29. Struktur dari Neural Network

Dalam Gambar 29 adalah neuron yang memproses nilai N untuk input ($W_1, W_2, \dots, W_n$) masing-masing memiliki nilai bobot $W_1, W_2, \dots, W_n$ sehingga bobot bias b dapat ditulis dalam rumus berikut:

$$a = \sum_{i=1}^N x_i w_i \quad (54)$$

Kemudian fungsi F dapat mengaktifkan output jaringan ke dalam bentuk y . Dalam JST ada beberapa fungsi aktivasi yang biasanya digunakan dalam jaringan saraf tiruan. Fungsi aktivasi yang disediakan dalam program MATLAB toolbox adalah 7 fungsi sebagai berikut:

$$a = \sum_{i=1}^N x_i w_i \quad (54)$$



Gambar 30. Jaringan umpan maju dengan satu lapis tersembunyi

3. Extreme Learning Machine

Extreme Learning Machine adalah metode pembelajaran baru jaringan saraf tiruan. ELM adalah jaringan saraf tiruan feedforward dengan lapisan tersembunyi tunggal atau yang biasa disebut jaringan serat feedforward tersembunyi (SLFNs). Metode pembelajaran ELM dibuat untuk mengatasi kelemahan jaringan saraf tiruan feedforward, terutama dalam hal kecepatan belajar. Huang et al menyatakan dua alasan mengapa jaringan saraf feedforward memiliki kecepatan belajar yang rendah, yaitu:

1. Menggunakan *slow gradient based learning algorithm* untuk melakukan *training*.

2. Semua parameter pada jaringan ditentukan secara *iterative* dengan menggunakan metode pembelajaran tersebut.

Dalam belajar dengan parameter yang dimaksud adalah bobot input dan bias tersembunyi. Parameter-parameter ini juga saling terkait antara satu lapisan dengan yang lain, sehingga membutuhkan kecepatan belajar yang panjang dan sering terjebak dalam minimum lokal. Sedangkan dalam parameter ELM seperti bobot input dan bias tersembunyi dipilih secara acak, sehingga ELM memiliki kecepatan belajar cepat dan mampu menghasilkan kinerja generalisasi yang baik.

Metode ELM memiliki model matematika yang berbeda dari jaringan saraf tiruan umpan maju. Model matematika ELM lebih sederhana dan lebih efektif. Untuk pasangan target input dan output yang berbeda.

(x_i, t_i) , dengan $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T \in \mathbf{R}^n$ dan $t_i = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}]^T \in$

$\mathbf{R}^m$, standar SLFNs dengan jumlah *hidden nodes* sebanyak $\tilde{N}$ dan fungsi aktivasi (ϕ) dapat dimodelkan secara matematis sebagai berikut:

$$\sum (x_j) = \sum (w_j + b_i) = 0 \quad (55)$$

$$j = 1, 2, \dots, N$$

di mana

- a. $w_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}]^T$ merupakan vektor bobot yang menghubungkan *hidden node* ke- i dan *input nodes*.
- b. $\beta_i = [\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{im}]^T$ merupakan vektor bobot yang menghubungkan *hidden node* ke- i dan *output nodes*.

- c. b_i merupakan *threshold* dari *hidden node* ke- i
- d. $w_i \cdot x_j$ merupakan *inner product* dari w_i dan x_j

SLFNs standar dengan $\tilde{N}$ *hidden nodes* dan fungsi aktivasi (g) diasumsikan dapat memperkirakan N sampel ini dengan tingkat *error* 0 yang artinya,

$$\sum_{j=1}^N \|o_j - t_j\| = 0 \quad (56)$$

sehingga terdapat β_i , w_i , dan b_i sedemikian hingga [9]

$$\sum_{i=1}^{\tilde{N}} \beta_i g(w_i \cdot x_j + b_i) = t_j, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (57)$$

Persamaan di atas dapat dituliskan secara sederhana sebagai [12]:

$$H\beta = T, \quad (58)$$

di mana;

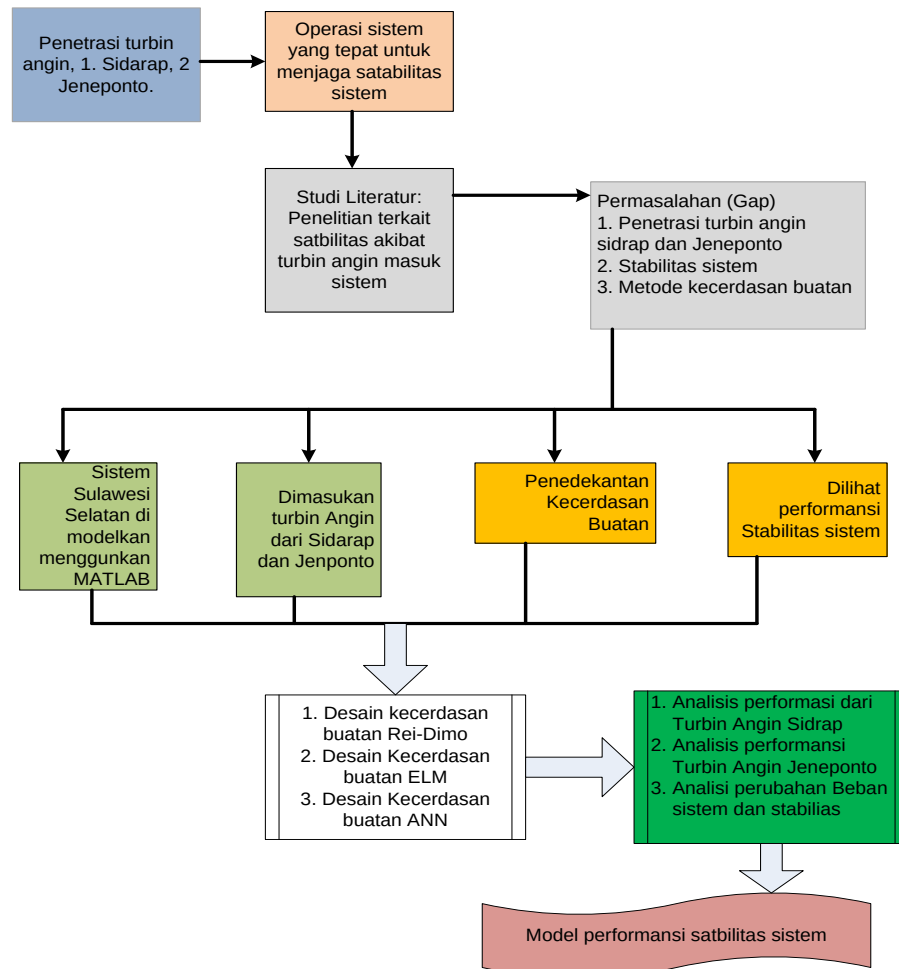
$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_{\tilde{N}}^T \end{bmatrix} \text{ dan } T = \begin{bmatrix} t_1^T \\ \vdots \\ t_N^T \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} g(w_1 \cdot x_1 + b_1) & \cdots & g(w_{\tilde{N}} \cdot x_1 + b_{\tilde{N}}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(w_1 \cdot x_N + b_1) & \cdots & g(w_{\tilde{N}} \cdot x_N + b_{\tilde{N}}) \end{bmatrix}$$

H pada persamaan di atas adalah matriks *output hidden layer* dari jaringan syaraf. $g(w_i \cdot x_j + b_i)$ menunjukkan *output* dari *hidden neuron* yang berhubungan dengan *input* x_j . β merupakan matriks dari bobot *output* dan T matriks dari target. Pada ELM, *input weight* dan *hidden bias* ditentukan secara acak, sehingga bobot *output* yang berhubungan dengan *hidden layer* dapat ditentukan dari persamaan.

E. Kerangka untuk Berpikir

Dalam melakukan penelitian disertasi ini, mengacu pada kerangka pemikiran yang diilustrasikan dalam bentuk diagram blok yang ditunjukkan pada Gambar 31.



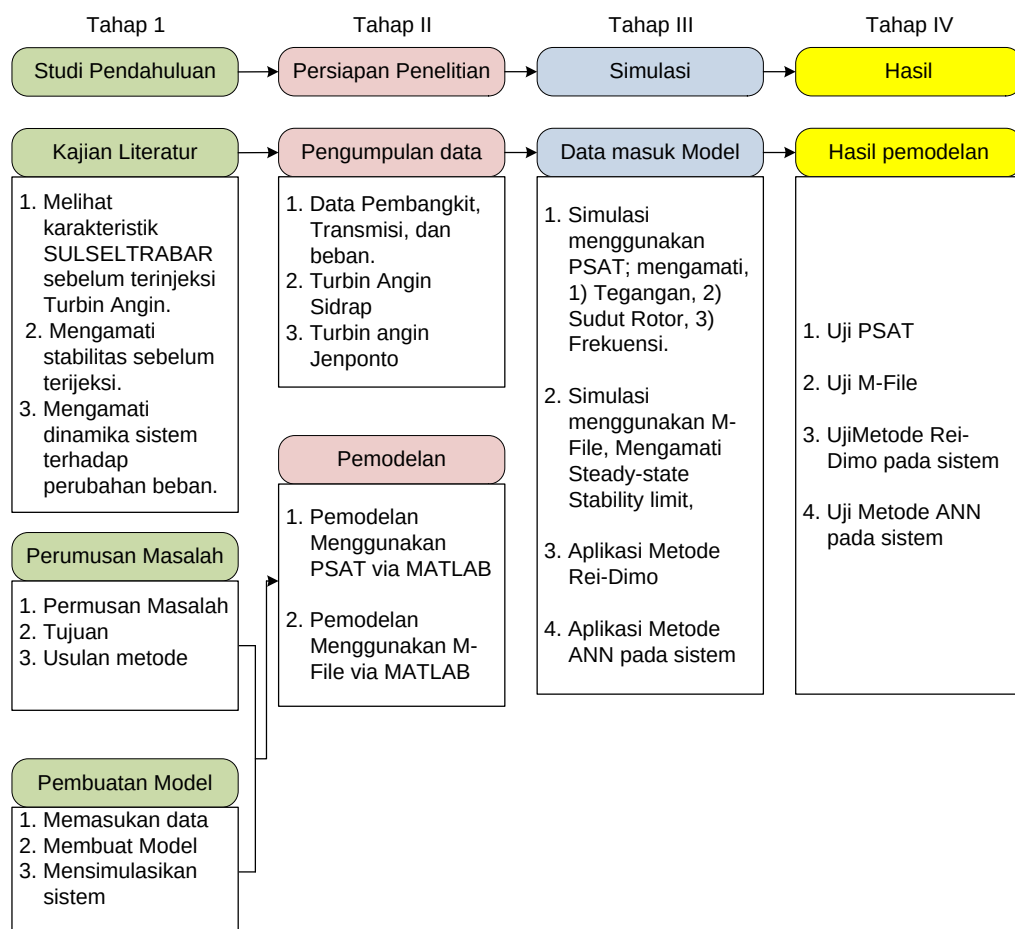
Gambar 31, Blok diagram kerangka disertasi

BAB III

METODE DAN DESAIN PENELITIAN

A. Deskripsi Penelitian

Dalam melakukan penelitian stabilitas pada sistem skala besar, hal itu dilakukan dengan menentukan nilai Eigen dan simulasi domain waktu (TDS) yang dapat diperoleh dari proses perhitungan dan pemrosesan data menggunakan MATLAB (Matrix Laboratory) dengan pemodelan menggunakan PSAT (Power System Analysis Toolbox) dan M File.



Gambar 31. Rancangan penelitian

Studi kasus yang dimodelkan adalah Sulawesi Selatan yang terdiri dari 15 Generator Konvensional, 2 sistem pembangkit turbin angin, 44 bus, 47 jalur beban yang dibagi menjadi variasi tegangan, yaitu: 30 kV, 70kV, 150 kV dan 275 kV (Arief dan Nappu, 2016)

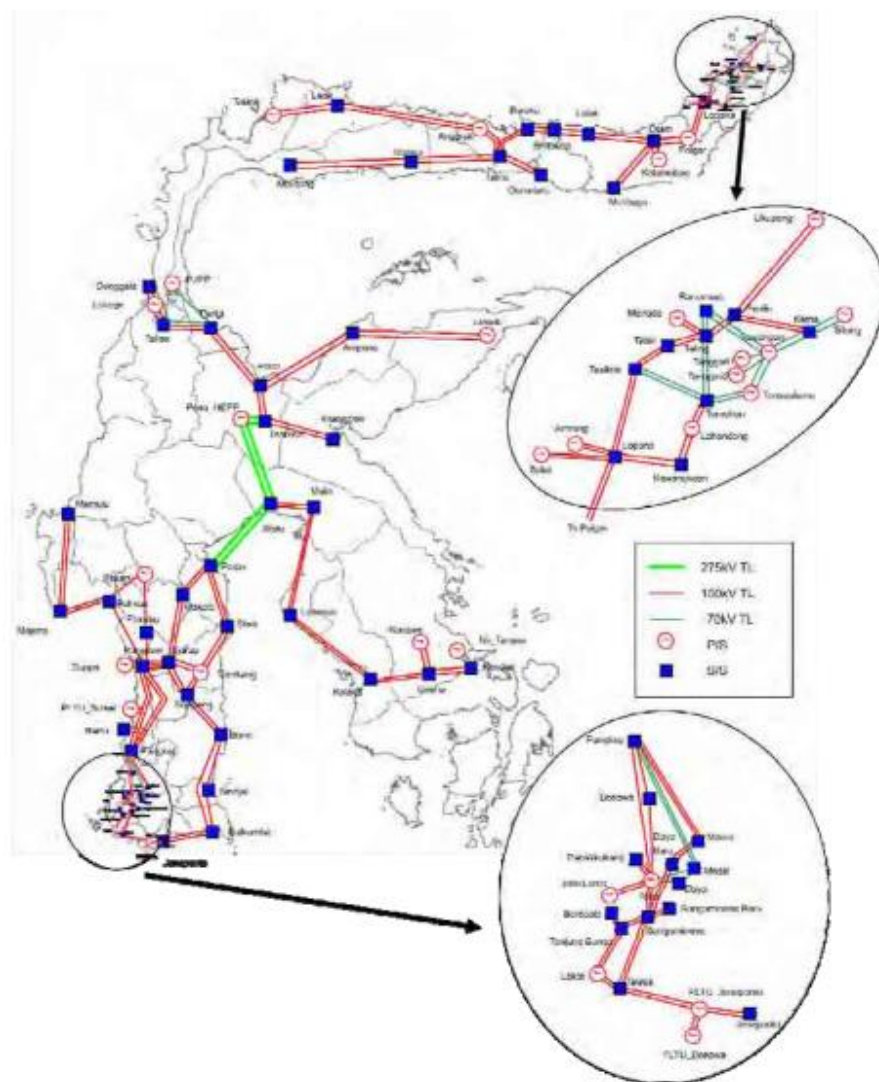
1. Jenis Penelitian

Penelitian ini adalah penelitian kuantitatif yang dilakukan dalam suatu simulasi. Studi ini berupaya menjelaskan, mensimulasikan, memodelkan dan menganalisis fenomena yang terjadi dalam sistem kelistrikan di Sulawesi Selatan setelah turbin angin dipasang di Sidrap dan akan dibangun di Jeneponto. Dalam penelitian ini metode eksperimental atau model kuantitatif yang digunakan adalah model yang membutuhkan data sistem kelistrikan (angka) yang dianalisis menggunakan model matematika, teori dan hipotesis.

2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Sulawesi Selatan, sistem kelistrikan ditunjukkan pada Gambar 33. Memulai penelitian dimulai dengan mengumpulkan data sistem termasuk: Data generator di semua generator, data jaringan 20kV, 70 kV dan 150 kV. Dan memuat data yang terhubung ke sistem. Ada 31 pembangun dengan perakitan 850 MW, dengan total beban 750 MW. Panjang jaringan 150 kV. Pada 2016, mengumpulkan data yang dibutuhkan. Pada 2017, buat model dalam bentuk simulasi

menggunakan MATLAB. Pada tahun 2018 model sistem kelistrikan dirancang menggunakan turbin angin berbasis kecerdasan buatan.



Gambar 32. Sistem Sulawesi Selatan

3. Teknik Pengumpulan Data, Pemrosesan Data, dan Validasi

Penelitian ini melewati beberapa tahap, yaitu studi awal sistem Sulawesi Selatan, mengamati kondisi stabilitas saat beroperasi. Kondisi ini

menggunakan data yang terdiri dari data primer dan data sekunder sebagai berikut:

A. Data utama

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data tentang sistem kelistrikan sistem Sulawesi Selatan dan Barat yang saling berhubungan oleh jaringan 150 kV, yang sering disingkat menjadi (Sulselbar).

b. Data sekunder

Dalam metode ini, kutipan telah dilakukan dari literatur yang bersumber dari buku, jurnal nasional, dan jurnal internasional bereputasi.

Data yang telah diperoleh diproses menggunakan perangkat lunak MATLAB melalui pembuatan model yang meliputi, model mesin, model, jaringan, dan model muat sesuai dengan persamaan yang diperoleh dari teori-teori dari buku-buku dan jurnal internasional.

Teknik validasi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Simulasikan model sulselbar dengan model perawatan yang sama.
2. Diskusi intensif dengan pakar turbin angin dari PT. Vena Energy Bapak Andi Amir Hamzah (Manajer Aset Operasi, Layanan Teknis), selama Seminar Ilmiah Sains dan Teknologi Nasional 2019, Rabu 25

September 2019, Kampus Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin,
Universitas Gowa, Indonesia.

3. Periksa teori yang terkait dengan penetrasi turbin angin.

4. Parameter Ukur

Parameter yang digunakan untuk penelitian ini meliputi: bus data, generator bersama dengan parameter mesin, beban dan saluran transmisi sistem listrik interkoneksi Sulselbar.

5. Alat Penelitian

Dalam melakukan penelitian menggunakan perangkat lunak dan catatan perangkat keras untuk menganalisis dan membuktikan teori yang digunakan.

a. Software meliputi:

- Windus 10
- Aplikasi MATLAB 2014 dan power System Analisis Toolbox (PSAT) 2.1.10 yang telah terintegrasi dalam MATLAB.

b. Hardwers meliputi:

- Laptop Sony Vaio
- RAM DDR3 8 GB
- 64-bit, x64-besed prosesor

Tabel 4. Data operasi sistem Sulselbar

No Bus	Nama Bus	Tegangan (pu)	Generator		Beban	
			P (pu)	Q (pu)	P (pu)	Q (pu)
1	Bakaru	1.034	1.257	-0.017	0.034	0.002
2	Barongloe	1	0.187	-0.006	-	-
3	Barru	1	-	-	0.0386	0.012
4	Bone	1	-	-	0.168	0.063
5	Bontoala	1	-	-	0.299	-
6	Bosowa	1	-	-	0.127	-
7	Bulukumba	1	-	-	0.135	0.021
8	Daya	1	-	-	0.204	0.029
9	Jeneponto	1	-	-	0.116	0.013
10	Majene	1.02667	-0.023	-	0.11	0.005
11	Makale	1.00667	0.023	0.0028	0.07	0.005
12	Mandai	1	-	-	0.14	0.02
13	Maros	1	-	-	0.053	0.0141
14	Palopo	0.99333	0.0635	0.018	0.213	0.022
15	Panakukang	1	-	-	0.405	0.127
16	Pangkep 150 kV	1	-	-	0.125	0.055
17	Pangkep 70 kV	1	-	-	-	-
18	Pare-pare	1	-	-	0.112	0.035
19	Pinrang	1	0.0066	-	0.136	0.034
20	Polmas	1	-	-	0.098	0.032

Lanjutan :

Tabel 4. Data operasi sistem SULSELBAR

No Bus	Nama Bus	Tegangan (pu)	Generator		Beban	
			P (pu)	Q (pu)	P (pu)	Q (pu)
21	Senkang	1	1.961	0.092	0.15	0.078
22	Sidrap	1	-	-	0.135	0.09
23	Sinjai	1	-	-	0.128	-
24	Soppeng	1	-	-	0.092	0.047
25	Sungguminasa	1	-	-	0.158	0.005
26	Suppa	1	0.47	0.16	-	-
27	Tallasa	1	-	-	0.145	0.045
28	Tanjung Bunga	1	-	-	0.196	0.088
29	Tello 150 kV	0.96666	0.53	0.34	-	-
30	Tello 30 kV A	1	-	-	-	-
31	Tello 30 kV B	1	0.102	0.022	-	-
32	Tello 70 kV	1	-	-	-	-
33	T lama 150 kV	1	-	-	0.317	0.038
34	T Lama 70 kV	1	-	-	-	-
35	Tonasa	1	-	-	0.212	0.124

Pada Tabel 5, data transmisi sistem Sulselbar bahwa ada 44 bus yang terhubung antara generator dan beban. Data transmisi sistem Sulselbar memiliki urutan positif R, jX dan Y/2.

Tabel 5. Data transmisi sulselbar

No bus	Dari Bus	Ke Bus	Total impedansi saluran (pu)		
			Urutan Positif		Y/2
			R	jX	
1	Bakaru	Pinrang	0.03076	0.11023	0.01012
2	Bakaru	Polmas	0.02627	0.09440	0.00743
3	Borongloe	Tello 70 kV	0.06069	0.11141	0.00034
5	Barru	Pangkep 150kV	0.02419	0.08667	0.01167
6	Barru	parepare	0.02314	0.08290	0.01116
7	Bone	bulukumba	0.07195	0.25851	0.02035
8	Bone	Sinjai	0.04064	0.14603	0.01149
9	Bone	Soppeng	0.02289	0.08153	0.00804
10	Bontoala	Tlama 70kV	0.02023	0.03714	0.00011
11	Bosowa	Pangkep 150 kV	0.0109	0.03919	0.00493
12	Bosowa	Tello 150 kV	0.01683	0.06049	0.00761
13	Bulukumba	Jeneponto	0.02431	0.08733	0.00687
14	Bulukumba	Sinjai	0.03131	0.11249	0.00885
15	Daya	Mandai	0.0342	0.06278	0.00019
16	Daya	Tello 70 kV	0.02408	0.04421	0.00013
17	Jeneponto	Tallasa	0.03333	0.11974	0.00942
18	Majene	Polmas	0.0263	0.09451	0.00744
19	Makale	Palopo	0.01959	0.07038	0.00554
20	Makale	Sidrap	0.03137	0.18876	0.02406
21	Mandai	Pangkep 70 kV	0.18159	0.33335	0.001

Lanjutan :

Tabel 5. data Transmisi sulselbar

No bus	Dari Bus	Ke Bus	Total Impedansi saluran (pu)		
			Urutan Positif		Y/2
			R	jX	
22	Mandai	Tello 70 kV	0.05828	0.10699	0.00032
23	Mandai	Maros	0.13631	0.25024	0.00075
24	Maros	Pangkep 70 kV	0.08188	0.15032	0.00045
25	Panakukang	Tello 150 kV	0.00236	0.00848	0.00067
26	Pangkep 150 kV	Pangkep 70 kV	0	0.13164	0
27	Pangkep 150 kV	Pare-pare	0.04732	0.16958	0.02283
28	Pangkep 150 kV	Tello 150 kV	0.02382	0.08535	0.01149
29	Pangkep 70 kV	Tonasa	0.01638	0.03006	0.00009
30	Pare-pare	Pinrang	0.01388	0.04974	0.0067
31	Pare-pare	Polmas	0.03663	0.13159	0.01819
32	Pare-pare	Sidrap	0.01002	0.03599	0.00283
33	Pare-pare	Suppa	0.00393	0.01413	0.00111
34	Sengkang	Soppeng	0.01053	0.06335	0.00807
35	Sidrap	Soppeng	0.02821	0.10138	0.00964
36	Sunggumina sa	Tallasa	0.00485	0.03324	0.00627
37	Sunggumina sa	Tanjung bunga	0.00354	0.02128	0.00271
38	Sunggumina sa	Tello 150 kV	0.00192	0.01318	0.00249
39	Tello 150 kV	Tello 30 kV A	0	0.5535	0
40	Tello 150 kV	Tello 70 kV	0	0.20794	0

Lanjutan :

Tabel 5. data Transmisi sulselbar

No bus	Dari Bus	Ke Bus	Total Impedansi saluran (pu)		
			Urutan Positif		Y/2
			R	jX	
41		TLama 150 KV	0.00363	0.013	0.00175
42	Tello 150 kV Tello 30 kV B	Tello 70 kV	0	0.5535	0
43	TLama 150 kV	TLama 70 kV	0	0.20794	0

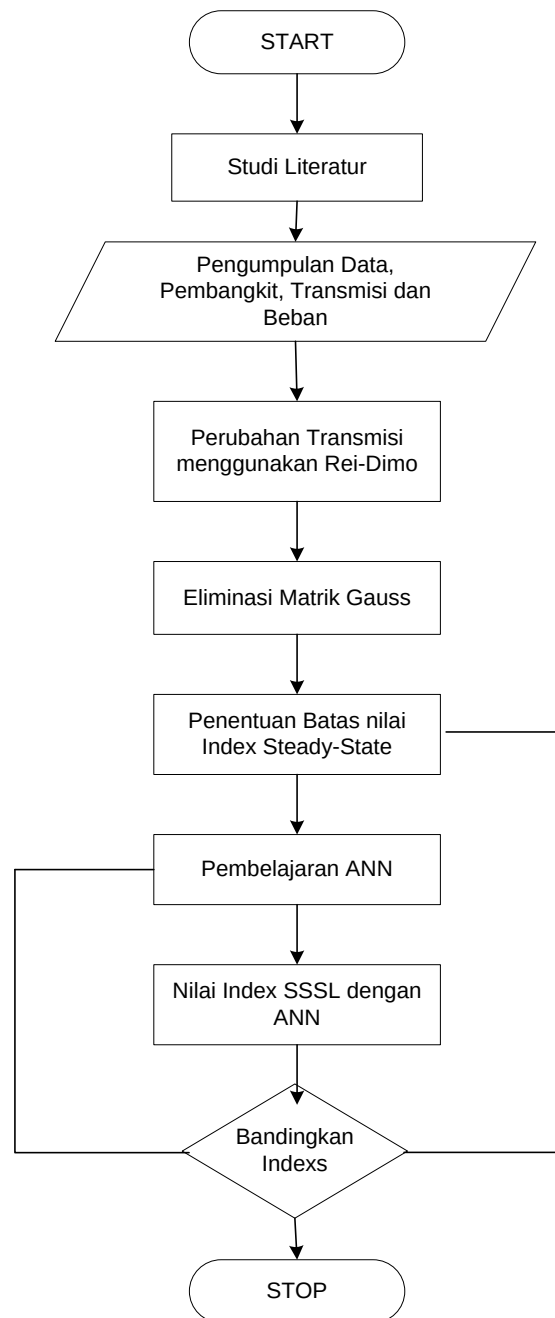
Dalam Tabel 6. Ini adalah persentase injeksi PLTB yang dilakukan untuk menentukan kinerja stabilitas sistem Sulselbar. Ini terkait dengan kinerja sistem sehingga tahapan-tahapan ini diperlukan.

Tabel 6. Prosentase penetrasi PLTB

No	Prosentase	Daya injeksi (MW)
1	1 %	9.63325
2	5 %	48.16625
3	10 %	96.3325
4	15 %	144.49875
5	20 %	192.665
6	25%	240.83125
7	30%	288.9975

2. PROSEDUR PENELITIAN

Pada bagian ini, prosedur untuk melakukan penelitian dijelaskan dalam beberapa tahap. Langkah awal dari penelitian ini dimulai dengan studi literatur, yang mencakup pengumpulan data dari semua parameter sistem yang diperlukan seperti menghasilkan, mengirim dan memuat data. Kemudian keadaan transmisi diubah ke bentuk REI-Dimo. Untuk mengubah sistem transmisi yang memiliki banyak bus yang diubah menjadi satu bus yang digunakan, ini adalah Dimo. Metode ini dipilih karena memperhitungkan pengaruh model generator dalam memberikan daya, lebih penting daya yang dihasilkan oleh turbin angin dari Jeneponto dan Sidrap. Nilai internal reaktansi generator (X_d' , X_d'' dan X_d) telah dimasukkan dalam analisis stabilitas keadaan tunak. Pada Gambar 35. Flowchart adalah prosedur penelitian yang telah dilakukan.



Gambar 34. Skema Penelitian awal

1. Model turbin angin

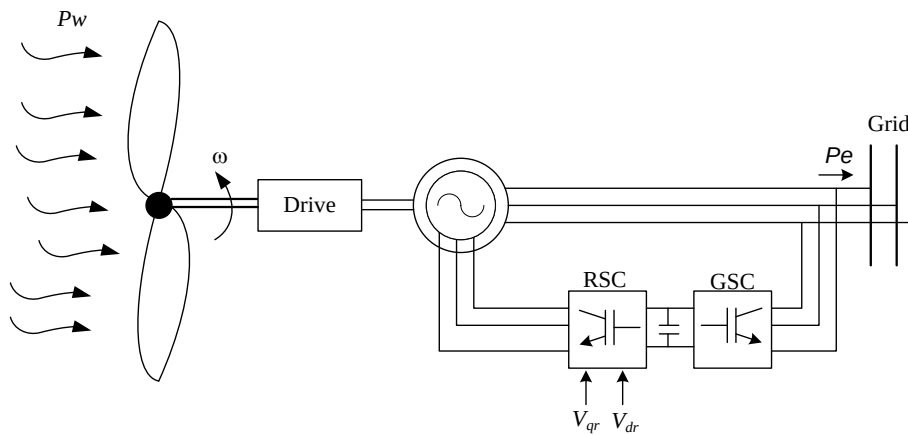
Gambar 36 adalah struktur model turbin angin dalam bentuk matematika, model ini untuk perhitungan dan simulasi yang mudah.

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (60)$$

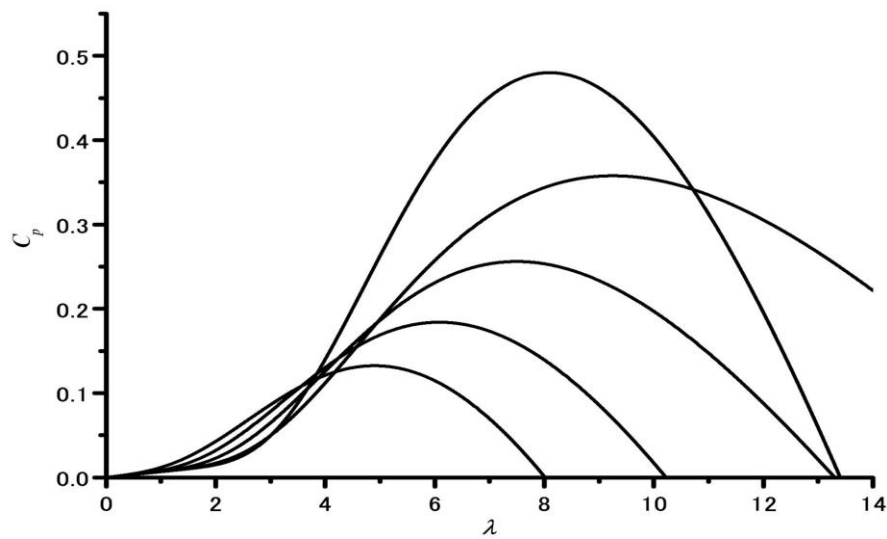
With

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_w} \quad (61)$$

sebagaimana dinyatakan dalam (59), (60) dan (61) di sini c_1 ke c_6 adalah koefisien karakteristik turbin angin, r adalah kecepatan putar turbin angin β) koefisien daya (C_p) dari sudut pitch blade (ρ) menghitung berdasarkan kepadatan udara (λ) Output daya angin (P_{wt}) Jari-jari rotor blade (R) Kecepatan angin (V_w) Koefisien daya tergantung pada rasio tip.



Gambar 37. Struktur model turbin angin



Gambar 38. Karakteristik Wind Turbine

2. Prosedur Radial Equivalent Independent REI-Dimo

Prosedur reduksi jaringan sistem daya yang diterapkan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Menyiapkan data sistem tenaga listrik.
2. Menjalankan load flow untuk mendapatkan tegangan dan sudut tegangan.
3. Menentukan bus beban.
4. Menentukan bus netral fiktif.
5. Menghubungkan bus beban ke bus netral fiktif dengan admintansi Y bus konstan. Persamaan Y bus konstan adalah

$$Y_{bus} = \frac{P+jQ}{V^2} \quad (62)$$

dengan :

P = daya aktif

Q = daya reaktif

V = tegangan bus

1. Menentukan arus I dari bus beban ke bus netral fiktif dengan persamaan

$$I = \left(\frac{S_{in}^*}{E_i - j F_i} \right) \quad (63)$$

dengan :

S_{in}^* = Daya nyata konjugatif dari bus I ke bus netral fiktif

E_i = Tegangan aktif bus i ($E_i = V \cos \alpha$)

F_i = Tegangan reaktif bus i ($E_i = V \sin \alpha$)

2. Menentukan bus *load center*.
3. Menentukan arus yang mengalir ke bus *load center* menggunakan hukum Kirchhoff.
4. Menghitung daya yang menuju bus netral fiktif.
5. Menentukan nilai impedansi Z_{lc} dari bus netral fiktif ke bus *load center* menggunakan persamaan.

$$R_{lc} + jX_{lc} = \left(\frac{P + jQ}{I_x I^*} \right) \quad (64)$$

dengan :

Z_{lc} = impedansi *load center*

R_{lc} = resistansi *load center*

X_{lc} = reaktansi *load center*

I_{lc} = arus *load center*

11. Mengubah impedansi Z_{lc} ke dalam bentuk admintansi Y_{lc}

12. Menentukan tegangan di *load center* dengan persamaan

$$V_{lc} = \frac{S_{lc}}{I_{lc}^*} \quad (65)$$

dengan :

V_{lc} = tegangan *load center*

S_{lc} = daya nyata *load center*

I_{lc} = arus *load center*

13. Menjalankan load flow untuk menghasilkan admintansi Y_{bus} baru.

14. Mereduksi matrik Y dengan *Gaussian*

15. Mengubah nilai admitansi Y menjadi impedansi ekivalen Z .

16. Menghitung nilai E menggunakan Persamaan (64) dengan X yang diperoleh dari nilai impedansi ekivalen Z .

17. Menghitung daya maksimum yang dapat dibangkitkan generator yang merupakan batas stabilitas *steady state* generator dengan Persamaan (65).

3. Usulan Skenario

Tabel 9 merupakan usulan skenario dalam penelitian ini, terdapat empat tahap dan 8 kali objek penelitian.

Tabel 7. Usulan skenario

Tahapan	Objek	Urutan	Bentuk	Teknik Optimasi
I	Sistem Suselbar	Model 1	Tanpa turbin angin	-
	Sistem Suselbar	Model 2	Tanpa turbin angin dan beban berubah	Rei-Dimo
II	Sistem Suselbar	Model 3	Turbin angin Sidrap	Rei-Dimo
	Sistem Suselbar	Model 4	Turbin angin Sidrap dan beban berubah	Rei-Dimo
III	Sistem Suselbar	Model 5	Turbin angin Jeneponto	Rei-Dimo ANN
	Sistem Suselbar	Model 6	Turbin angin Jeneponto dan beban berubah	Rei-Dimo ANN
IV	Sistem Suselbar	Model 7	Turbin angin Sidrap dan Jeneponto	Rei-Dimo ELM
	Sistem Suselbar	Model 8	Turbin angin Sidrap dan Jeneponto dan beban berubah	Rei-Dimo ELM

3. Alur program SSSL menggunakan kombinasi Rei-Dimo dan ANN pada sistem Sulawesi Selatan

Sudah banyak penelitian tentang batas kondisi mapan yang telah dikembangkan oleh para peneliti, yaitu Paul Dimo, sehingga redundansi tidak terjadi dalam penelitian, maka pada bagian ini dibahas aspek-aspek

utama penelitian. Referensi (Gunadin et al., 2013) telah melakukan studi batas stabilitas kondisi-mapan menggunakan JST pada sistem. Dalam sistem ini tidak terhubung oleh energi baru terbarukan, sehingga mengabaikan faktor intermiten. Paul Dimo telah membahas aspek metodologi secara rinci terkait dengan:

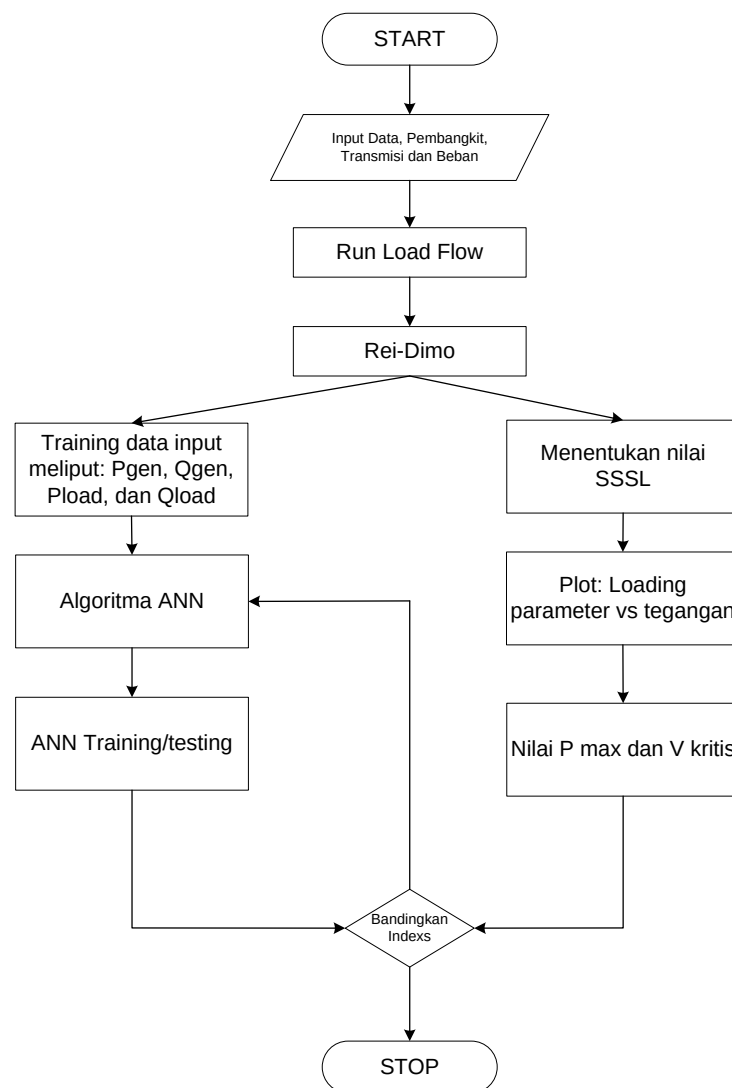
1. Transformasi arus hubung singkat jaringan
2. Metode keseimbangan daya jaringan untuk mengubah beban sistem dalam sebuah bus fiktif
3. Model Sederhana dari generator
4. Kriteria kestabilan steady-state (tegangan) untuk daya reaktif
5. Melakukan penentuan kondisi terburuk sistem tidak menggunakan perhitungan load flow berulang.

Dalam penyederhanaan Persamaan Dimo dalm Persamaan (67) dapat dipisahkan menjadi dua komponen, yaitu:

$$D \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos \delta_m} \quad \text{dan} \quad E = 2(\sum_m Y_m + Y_{load})V \quad (67)$$

Untuk mendapatkan hubungan faktor ekonomis maka nilai index kestabilan dapat dilihat pada nilai $\frac{d\Delta Q}{dV}$ dimana nilai berubah bila parameter V dan $\cos \delta_m$ juga berubah. Semakin dekat jarak pembangkit untuk mensuplay daya beban maka nilai $\cos \delta_m$ menjadi semakin besar karena selisih sudut bus kirim dan bus terima semakin kecil, akibatnya nilai $d \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos \delta_m}$ akan berubah nilai kecil dan $e = 2(\sum_m Y_m + Y_{load})V$

bernilai besar. Kecil nilai d dan besarnya nilai e mengakibatkan jarak menjadi $d=e$ atau $\frac{d\Delta Q}{dV} = 0$ semakin jauh hal ini kelebihan metode ini yaitu mampu menaikkan batas kesatbilan.

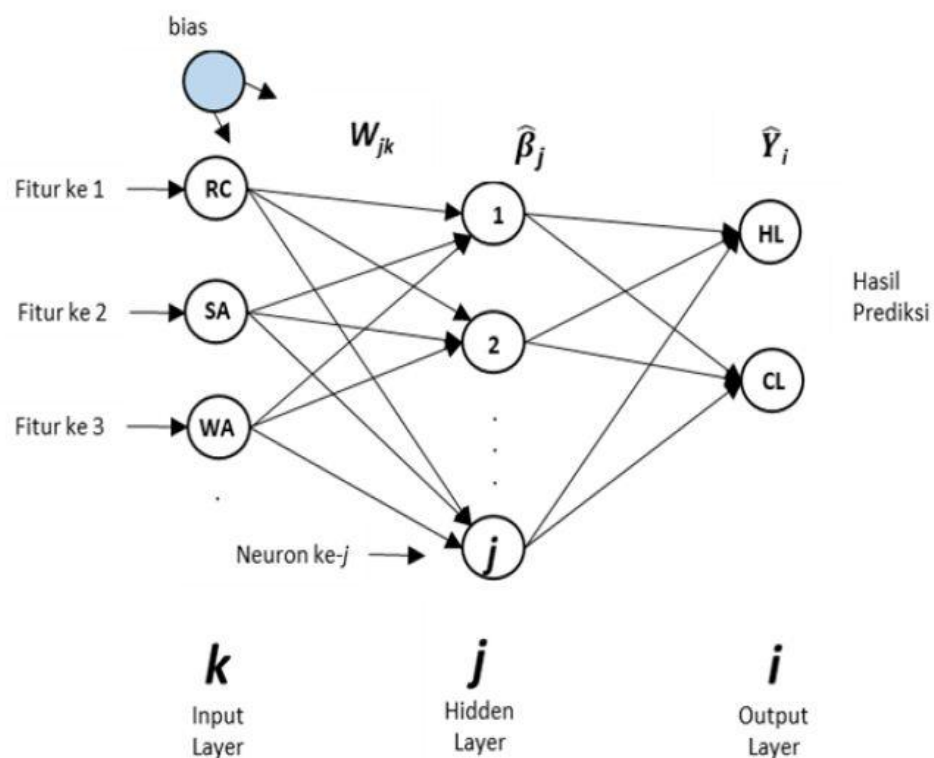


Gambar 40. Alur penelitian Steady-state Limit menggunakan ANN

4. Konsep Metode Extreme Learning Machine

Mesin pembelajaran ekstrim adalah jaringan saraf tiruan feedforward dengan satu lapisan tersembunyi atau lebih dikenal sebagai jaringan saraf feedforward lapisan tersembunyi tunggal (Sun, Choi, Au, & Yu, 2008).

Pada Gambar 42 dapat dilihat arsitektur algoritma ELM yang terdiri dari tiga lapisan, yaitu lapisan input, lapisan tersembunyi dan lapisan keluaran. Dalam arsitektur ELM hanya ada satu lapisan tersembunyi yang merupakan karakteristik dari algoritma ELM.



Gambar 41. Arsitektur ELM

Pada layer *input layer* terdapat masukan dari fitur ke 1 sampai fitur ke k . Sebelum masuk *hidden layer*, bobot *input* W_{jk} menjadi masukan untuk perhitungan h di *hidden neuron* menggunakan fungsi aktivasi. Setelah perhitungan h , *hidden layer* akan menghasilkan β_i sebagai masukan *output layer* untuk menghitung keluaran Y_i . Menurut Srimuang & Intarasothonchun (2015), terdapat beberapa jenis fungsi aktivasi antara lain:

1. Fungsi Sigmoid Biner

$$H = \frac{1}{1 + \exp(-H_{init})} \quad (68)$$

2. Fungsi Linier

$$H = H_{init} \quad (69)$$

3. Fungsi Sin

$$H = \sin(H_{init}) \quad (70)$$

4. Fungsi Radial Basis

$$H = \exp(-(H_{init})^2) \quad (71)$$

5. Fungsi Sigmoid Bipolar

$$H = \frac{1 - \exp(-H_{init})}{1 + \exp(-H_{init})} \quad (72)$$

Langkah-langkah yang dilakukan untuk training menggunakan ELM adalah sebagai berikut :

1. Tentukan bobot W dan bias secara *random*.
2. Hitung matriks keluaran pada *hidden layer* menggunakan Persamaan (73) dan (74).

$$H_{init} = X_{training} \cdot W^T + bias \quad (74)$$

$$H = \frac{1}{1 + \exp(-H_{init})} \quad (74)$$

Dimana x adalah matriks data training sedangkan W^T adalah transpose matriks bobot.

3. Hitung matriks *Moore-Penrose Generalized inverse* menggunakan Persamaan (75).

$$H^+ = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \quad (75)$$

H^+ Merupakan matriks *Moore-Penrose Generalized invers* dari matriks H merupakan matriks yang tersusun dari *output* masing-masing *hidden layer*. Sedangkan Y merupakan matriks target.

4. Hitung matriks bobot keluaran dari *hidden layer* menggunakan Persamaan (76).

$$\beta = H^+ Y \quad (76)$$

Dimana β ialah matriks bobot kelauaran. H^+ ialah matriks *Moore-Penrose* dan Y ialah matriks target.

Langkah-langkah yang dilakukan untuk testing menggunakan algoritma ELM adalah sebagai berikut :

1. Diketahui bobot W dan bias serta β yang telah di peroleh dari proses training sebelumnya.
2. Hitung matriks keluaran hidden layer menggunakan Persamaan (77) dan (78).

$$H_{init} = X_{testing} \cdot W^T + bias \quad (77)$$

$$H = \frac{1}{1 + \exp(-W^2 H_{init})} \quad (78)$$

Dimana X adalah matriks data *testing* sedangkan W^2 adalah *transpose* matriks bobot.

3. Menghitung semua keluaran di unit
4. Output dengan menggunakan Persamaan (79)

$$\hat{Y} = H \cdot \hat{B} \quad (79)$$

Dimana $\hat{Y}$ ialah matriks target hasil prediksi. H adalah matriks keluaran *hidden layer* dan $\hat{B}$ adalah matriks bobot keluaran yang di peroleh dari proses *training*.

BAB IV

SIMULASI DAN HASIL PENELITIAN

A. Stabilitas Sistem Sulselbar

Bab ini menyajikan langkah demi langkah model yang digunakan dalam penelitian, yang bertujuan untuk menjawab tujuan pertama. Deskripsi penelitian untuk mengetahui kinerja model dilakukan dengan menggunakan data sistem Sulselbar. Sistem yang digunakan adalah sebagai berikut:

- i) Sistem multimesin klasik (sistem Sulselbar) dengan jaringan.
- ii) Sistem multimesin (sistem Sulselbar) yang terhubung ke turbin angin.

Untuk membuktikan dan mengetahui hasil kinerja stabilitas sistem akibat penetrasi sistem turbin angin Sulawesi Selatan menggunakan program komputer sebagai alat untuk melakukan penelitian dalam hal ini menggunakan matlab. Program matlab dapat mensimulasikan dan melakukan analisis stabilitas dari analisis aliran beban pada sistem. Analisis aliran beban digunakan untuk mendapatkan parameter tegangan dan daya memasuki setiap bus di sistem Sulselbar. Dalam sistem ini ada 44 bus, 6 transformator, 47 saluran udara, 15 generator dan 34 muatan yang telah dimodelkan secara detail.

1. Aliran beban sistem 44 bus

Dalam penelitian ini setelah disimulasikan maka hasil Line Flow dan Kerugian diperoleh pada Tabel 8 di bawah ini: Dari Tabel 8 adalah hasil dari sistem interkoneksi aliran beban pada sistem kelistrikan Sulselbar, sistem menunjukkan jumlah daya yang melewati saluran transmisi dan jumlah daya yang hilang pada masing-masing konduktor. Kemudian pada Tabel 9, di bawah ini adalah saluran listrik dan kehilangan daya setelah PLTB terhubung. Berikut adalah Aliran Daya sebelum PLTB Terhubung.

Tabel 8. Power Flow Jaringan interkoneksi

No. Bus	Nama Bus	Voltage Mag.	Angle Degree	Beban		Generator	
				MW	Mvar	MW	Mvar
1	Bakaru	1.03	0	3.5	0.2	78.492	73.092
2	Polmas	0.997	-2.619	17.1	4.1	0	0
3	Majene	0.989	-3.97	23.3	3.7	0	0
4	Mamuju	0.981	-4.525	9.6	4.8	0	0
5	Pinrang	1	-0.548	24.4	6.2	14.3	-49.439
6	Parepare	0.996	-2.42	18.7	4.7	0	0
7	Suppa	1	-2.488	0	0	0	5.759
8	Sidrap	0.974	3.184	26.5	10.3	0	0
9	PLTU Barru	1	-5.159	0	0	60.4	62.971
10	Barru	0.953	-13.604	10.1	2.4	0	0
11	Pangkep 150 kV	0.944	-16.116	22.1	8	0	0
12	Pangkep 70 kV	0.947	-17.474	0	0	0	0
13	Tonasa	0.918	-19.282	18.9	10.6	0	0

Lanjutan:

Tabel 8. *Power Flow* Jaringan interkoneksi

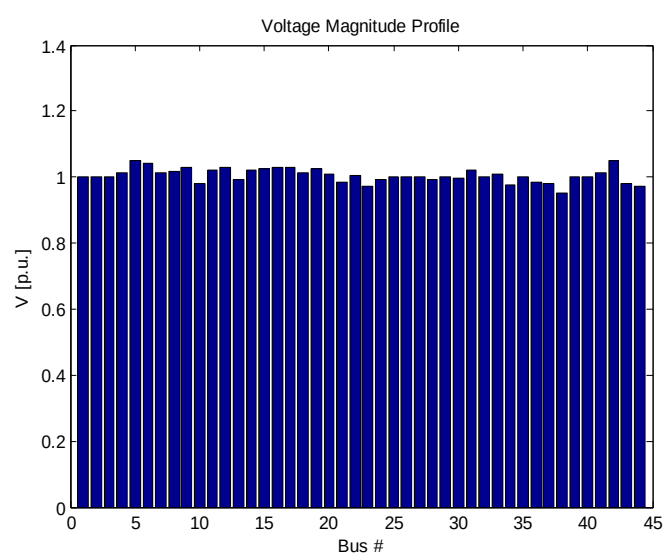
No. Bus	Nama Bus	Voltage Mag.	Angle Degree	Beban		Generator	
				MW	Mvar	MW	Mvar
14	Bosowa	0.941	-16.811	33.1	15.4	0	0
15	Kima	0.953	-19.413	18	5.8	0	0
16	Tello 150 kV Panakukang Tello 70 kV	1	-17.563	63.3	18.3	21	90.757
17		0.98	-20.119	68.3	17.7	0	0
18		0.981	-22.067	0	-20	0	0
19	Borongloe	1	-22.863	11.4	0	5.2	13.565
20	Mandai	0.951	-21.329	24.3	2.6	0	0
21	Daya	0.957	-23.55	45.5	2.8	0	0
22	Tello 30 kV	1	-17.572	0	0	0	0
23	Barawaja	1.001	-17.581	0	0	0	0
24	Tellolama 150 kV	1	-18.427	19.7	4.7	12.6	18.115
25	Tellolama 70 kV	0.975	-20.831	0	0	0	0
26	Bontoala	0.958	-21.027	26.5	7.7	0	0
27	Sunggu minaa	1	-10.903	15.7	3.6	20	129.075
28	Tanjung Bunga	0.968	-13.739	55.2	16.7	0	0
29	Tallasa	1	19.195	20.6	4.7	79	28.457
30	Maros	0.959	-0.819	18.6	5.5	0	0
31	Punagaya	1	28.971	0	0	196.1	-0.573
32	Jeneponto	0.983	17.891	17.4	3.4	0	0
33	Bulukumba	0.989	11.123	27.1	6.5	0	0
34	Sinjai	1	9.557	21.9	4.6	4	69.544
35	Bone	0.99	8.984	32.1	8.2	0	0
36	Soppeng	0.975	8.593	14.1	3.4	0	0

Lanjutan:

Tabel 8. *Power Flow* Jaringan interkoneksi

No. Bus	Nama Bus	Voltage Mag.	Angle Degree	Beban		Generator	
				MW	Mvar	MW	Mvar
39	Palopo	1	37.652	49.2	0	4	128.97
40	Latuppa	0.972	60.992	0	0	0	0
41	PLTAposo	1	105.23	0	0	195	55.638
42	Pamona 270 kV	0.993	103.767	0	0	0	0
43	Pamona 150 kV	0.989	103.19	4.9	0.5	0	0
44	Poso	0.986	102.337	11	1.8	0	0
Total				812.4	181.9	963.492	661.106

Selain itu, model rinci berdasarkan turbin angin telah dikembangkan dalam penelitian ini. Untuk mengetahui model kinerja awal sistem Sulselbar pada Gambar 42. profil tegangan ditampilkan pada setiap bus dalam sistem.



Gambar 42. Profile tegangan pada sistem Sulselbar

B. PENGARUH TURBIN ANGIN PADA SISTEM SULSELBAR

Untuk mengetahui kondisi awal kondisi sistem, analisis aliran daya dilakukan pada sistem selselbar tanpa turbin angin. Analisis aliran daya disimulasikan oleh metode Newton-Rapshon menggunakan perangkat lunak matlab R2016a yang mencapai akurasi 0,0001 dari 100 iterasi hasil simulasi yang dipertimbangkan adalah tegangan dan kerugian.

1. Kondisi awal sistem sulselbar

Sistem Sulselbar digunakan untuk mengetahui performansi stabilitas akibat dari penetrasi turbin angin yang diinstal di Sidarap dan Jeneponto, Pada Tabel 9, ditunjukan Nomor dan nama generator dalam generator pada sistem sulselbar sebagai berikut:

Tabel 9. Nama Generator

No. Generator	Nama Generator	Keterangan
1	PLTU Tello	Syn 1
2	PLTU Barru	Syn 2
3	PLTA Teppo (Pinrang)	Syn 3
4	PLTD Suppa	Syn 4
5	PLTA Bakar	Syn 5
6	PLTD Makale (Toraja)	Syn 6
7	PLTD Palopo	Syn 7
8	PLTA Poso	Syn 8
9	PLTGU Sengkang	Syn 9

10	PLTA Bili-bili	Syn 10
11	PLTD Sgmnsa	Syn 11
12	PLTD Tallasa	Syn 12
13	PLTU Arena (Jeneponto)	Syn 13
14	PLTA Tangka Manipi Sinjai	Syn 14
15	PLTD Agrekko (Tello Lama)	Syn 15
16	PLTB Sidrap	WTG1
17	PLTB Jeneponto	WTG2

Hasil simulasi aliran daya awal yang menggambarkan kondisi awal sistem suselbar sebelum penetrasi turbin angin di Sidrap dan Jeneponto ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Profil tegangan sistem suselbar 44 bus

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Beban		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.03	0	3.5	0.2	46.837	76.245
2	1.001	-1.394	17.1	4.1	0	0
3	0.993	-2.734	23.3	3.7	0	0
4	0.985	-3.285	9.6	4.8	0	0
5	1	-0.123	24.4	6.2	14.3	-53.607
6	1.001	-0.915	18.7	4.7	0	0
7	1	0.472	0	0	31.1	-9.321
8	1	4.321	26.5	10.3	0	125.103

Lanjutan Tabel 10

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Beban		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
9	1	-3.531	0	0	60.4	49.862
10	0.953	-11.922	10.1	2.4	0	0
12	0.948	-15.768	0	0	0	0
13	0.919	-17.574	18.9	10.6	0	0
14	0.941	-15.102	33.1	15.4	0	0
15	0.953	-17.661	18	5.8	0	0
16	1	-15.749	63.3	18.3	21	90.821
17	0.98	-18.305	68.3	17.7	0	0
18	0.981	-20.321	0	-20	0	0
19	1	-21.114	11.4	0	5.2	13.449
20	0.951	-19.599	24.3	2.6	0	0
21	0.957	-21.811	45.5	2.8	0	0
22	1	-15.758	0	0	0	0
23	1.001	-15.768	0	0	0	0
24	1	-16.613	19.7	4.7	12.6	18.115
25	0.975	-19.018	0	0	0	0
26	0.958	-19.214	26.5	7.7	0	0
27	1	-9.054	15.7	3.6	20	113.51
28	0.968	-11.89	55.2	16.7	0	0
29	1	20.731	20.6	4.7	79	-11.789

Lanjutan Tabel 10

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Beban		Generator	
30	0.98	0.645	18.6	5.5	0	0
31	1.044	29.673	0	0	196.1	38.6
32	1	19.183	17.4	3.4	0	9.797
33	0.993	12.656	27.1	6.5	0	0
34	1	11.133	21.9	4.6	4	50.399
35	0.993	10.495	32.1	8.2	0	0
36	0.982	9.851	14.1	3.4	0	0
37	1	14.128	28.4	11.5	265.2	-69.767
38	1	6.587	11.9	1.5	8.2	28.837
39	1	39.551	49.2	0	4	128.97
40	0.972	62.891	0	0	0	0
41	1	107.129	0	0	195	55.638
42	0.993	105.666	0	0	0	0
43	0.989	105.089	4.9	0.5	0	0
44	0.986	104.236	11	1.8	0	0
Total			812.4	181.9	962.937	654.862

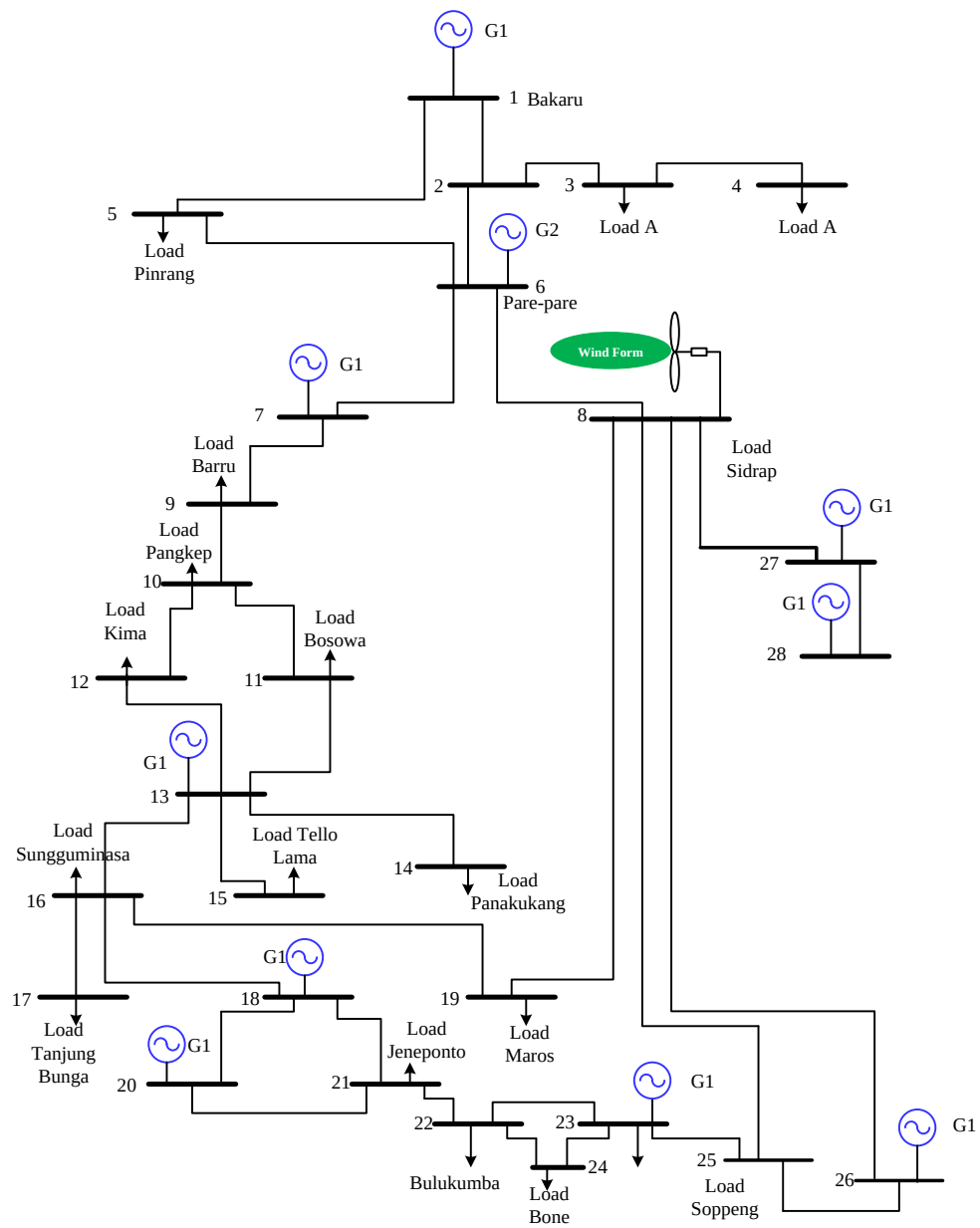
Untuk mengetahui hasil kinerja stabilitas sistem yang saling berhubungan dengan turbin angin, suatu pendekatan digunakan dengan menggunakan program komputer sebagai media dalam melakukan penelitian untuk membuktikan hasil yang diperoleh.

Dalam penelitian ini data yang diperoleh dari PT. PLN (Persero) di Area Pengiriman dan Penyaluran (AP2B) Sulawesi Selatan, Makassar, yang kemudian diproses dan dianalisis, untuk menentukan kondisi sistem. Tabel 14 adalah jumlah generator yang saling berhubungan. Ada 15 generator yang terdiri dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

Masing-masing pabrik ini memiliki kapasitas yang berbeda. Dari penggerak awal yang digunakan, karakteristik memasok beban tidak sama. Generator yang beroperasi ketika interferensi terjadi bervariasi, kondisi rotor selalu terjadi ketika interferensi tidak dalam kondisi asli. Sudut rotor mengalami kondisi sudut baru setelah osilasi atau gangguan selama operasi.

2. Penempatan Wind Turbin di Sidrap

Untuk mengetahui kondisi sistem Selselbar, informasi aliran daya dengan jumlah bus 44 perlu dianalisis menggunakan matlab. Turbin angin dipasang pada bus 8 pada Gambar 43 berikut. Hasil aliran daya ditunjukkan pada Tabel 11.



Gambar 43. Penetrasi Turbin Angin di bus Sidrap

Tabel 11. Hasil simulasi penetrasi turbin angin sidrap

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Beban		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.03	0	3.5	0.2	-25.486	93.448
2	0.999	1.525	17.1	4.1	0	0
3	0.991	0.18	23.3	3.7	0	0
4	0.984	-0.373	9.6	4.8	0	0
5	1	0.84	24.4	6.2	14.3	-52.745
6	1	2.689	18.7	4.7	0	0
7	1	4.07	0	0	31.1	-8.698
8	1	10.938	26.5	10.3	75	123.799
9	1	0.29	0	0	60.4	46.442
10	0.956	-7.63	10.1	2.4	0	0
11	0.947	-9.97	22.1	8	0	0
12	0.95	-11.264	0	0	0	0
13	0.921	-13.062	18.9	10.6	0	0
14	0.944	-10.579	33.1	15.4	0	0
15	0.954	-12.771	18	5.8	0	0
16	1	-10.321	63.3	18.3	21	91.519
17	0.98	-12.877	68.3	17.7	0	0
18	0.982	-15.472	0	-20	0	0
19	1	-16.245	11.4	0	5.2	12.479
20	0.953	-14.898	24.3	2.6	0	0

Lanjutan Tabel 11

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Beban		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
22	1	-10.33	0	0	0	0
23	1.001	-10.339	0	0	0	0
24	1	-11.185	19.7	4.7	12.6	18.115
25	0.975	-13.59	0	0	0	0
26	0.958	-13.785	26.5	7.7	0	0
27	1	-3.314	15.7	3.6	20	118.745
28	0.968	-6.15	55.2	16.7	0	0
29	1	26.911	20.6	4.7	79	-10.252
30	0.979	7.045	18.6	5.5	0	0
31	1.044	35.906	0	0	196.1	38.6
32	1	25.471	17.4	3.4	0	9.083
33	0.994	19.063	27.1	6.5	0	0
34	1	17.575	21.9	4.6	4	50.312
35	0.993	16.964	32.1	8.2	0	0
36	0.982	16.407	14.1	3.4	0	0
37	1	20.709	28.4	11.5	265.2	-70.01
38	1	13.204	11.9	1.5	8.2	28.837
39	1	46.167	49.2	0	4	128.97
40	0.972	69.508	0	0	0	0
41	1	113.745	0	0	195	55.638

Lanjutan Tabel 11

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Beban		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
43	0.989	111.705	4.9	0.5	0	0
44	0.986	110.853	11	1.8	0	0
Total			812.4	181.9	965.614	674.281

Turbin angin di Sindrap datang pada 75 di bus 8, generator memasok daya aktif pada 965.614 MW, untuk daya reaktif pada 674.281 Mvar. Total beban untuk daya aktif adalah 812,4 dan daya aktif adalah 181,9 Mvar. kondisi daya reaktor telah meningkat dibandingkan ketika Sidrap Pltb belum memasuki daya aktif sebesar 962.937 MW, ada perbedaan%, sedangkan daya reaktif adalah 654.862 MVar. peningkatan%.

Tabel 12. Total Losses dan aliran daya

No	Aliran daya dan Losses	Normal [pu]	Injeksi Sidrap
1	Total pembangkit		
	Daya Aktif [MW]	963.325	965.938
	Daya Reaktif [MVar]	660.031	676.504
2	Total Beban		
	Daya Aktif [MW]	812.400	812.400
	Daya Reaktif [MVar]	181.900	181.900
3	Total Losses		
	Daya Aktif [MW]	150.925	153.539
	Daya Reaktif [MVar]	478.132	494.604

Tabel 12 menunjukkan kondisi tegangan pada bus yang terhubung ke bus sidrap sebesar 1 pu. jika dibandingkan dengan sebelum turbin angin yang masuk adalah 0,919 di bus 13 setelah memasuki turbin angin itu menjadi 0,921 pu. Secara keseluruhan, sistem tenurial SULSELBAR masih dalam batas toleransi sesuai dengan peraturan PLN yang diizinkan, yaitu $\pm 5\%$ atau dengan nilai 0,95 ketika kondisi meningkat atau meningkat. Sedangkan untuk kondisi turtun atau dikurangi sebesar 10% PU berdasarkan peraturan PLN. Dalam Tebel 13 berikut ini menunjukkan kondisi Total Beban dan Kehilangan sebelum dan sesudah PLTB terhubung.

3. Penempatan Wind Turbine di Jeneponto

Demikian juga, untuk mengetahui kondisi sistem sulselbar dengan penetrasi turbin angin di Jeneponto untuk mendapatkan informasi tentang hasil aliran daya dalam sistem ini, pada Gambar 44 yang telah terakumulasi dan dapatkan hasilnya dalam Tabel berikut. 13.

Tabel 13. Hasil run aliran daya Penetrasi PLTB Jenepono

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Beban		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.03	0	3.5	0.2	-14.022	94.537
2	0.995	1.12	17.1	4.1	0	0
3	0.986	-0.237	23.3	3.7	0	0
4	0.979	-0.795	9.6	4.8	0	0
5	1	0.684	24.4	6.2	14.3	-48.445
6	0.994	2.207	18.7	4.7	0	0
7	1	3.501	0	0	31.1	-0.521
8	0.969	10.198	26.5	10.3	0	0
9	1	-0.212	0	0	60.4	59.668
10	0.957	-7.93	10.1	2.4	0	0
11	0.948	-10.204	22.1	8	0	0
12	0.951	-11.474	0	0	0	0
13	0.922	-13.267	18.9	10.6	0	0
14	0.945	-10.78	33.1	15.4	0	0
15	0.955	-12.815	18	5.8	0	0
16	1	-10.131	63.3	18.3	21	91.9
17	0.98	-12.688	68.3	17.7	0	0
18	0.983	-15.534	0	-20	0	0
19	1	-16.3	11.4	0	5.2	12.083
20	0.954	-15.024	24.3	2.6	0	0

Lanjutan Tabel 13						
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Beban		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
21	0.96	-17.126	45.5	2.8	0	0
23	1.001	-10.15	0	0	0	0
24	1	-10.995	19.7	4.7	12.6	18.115
25	0.975	-13.4	0	0	0	0
26	0.958	-13.596	26.5	7.7	0	0
27	1	-2.989	15.7	3.6	20	145.322
28	0.968	-5.825	55.2	16.7	0	0
29	1	33.179	20.6	4.7	79	7.84
30	0.957	6.395	18.6	5.5	0	0
31	1.044	42.822	0	0	196.1	38.6
32	1.004	33.105	17.4	3.4	72	0
33	0.992	23.601	27.1	6.5	0	0
34	1	21.169	21.9	4.6	4	61.775
35	0.991	19.888	32.1	8.2	0	0
36	0.97	17.224	14.1	3.4	0	0
37	1	20.509	28.4	11.5	265.2	-21.221
38	1	11.564	11.9	1.5	8.2	76.902
39	1	44.528	49.2	0	4	128.97
40	0.972	67.868	0	0	0	0
41	1	112.105	0	0	195	55.638

Lanjutan Tabel 13

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Beban		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
43	0.993	110.643	0	0	0	0
44	0.989	110.065	4.9	0.5	0	0
Total			812.4	181.9	974.078	721.163

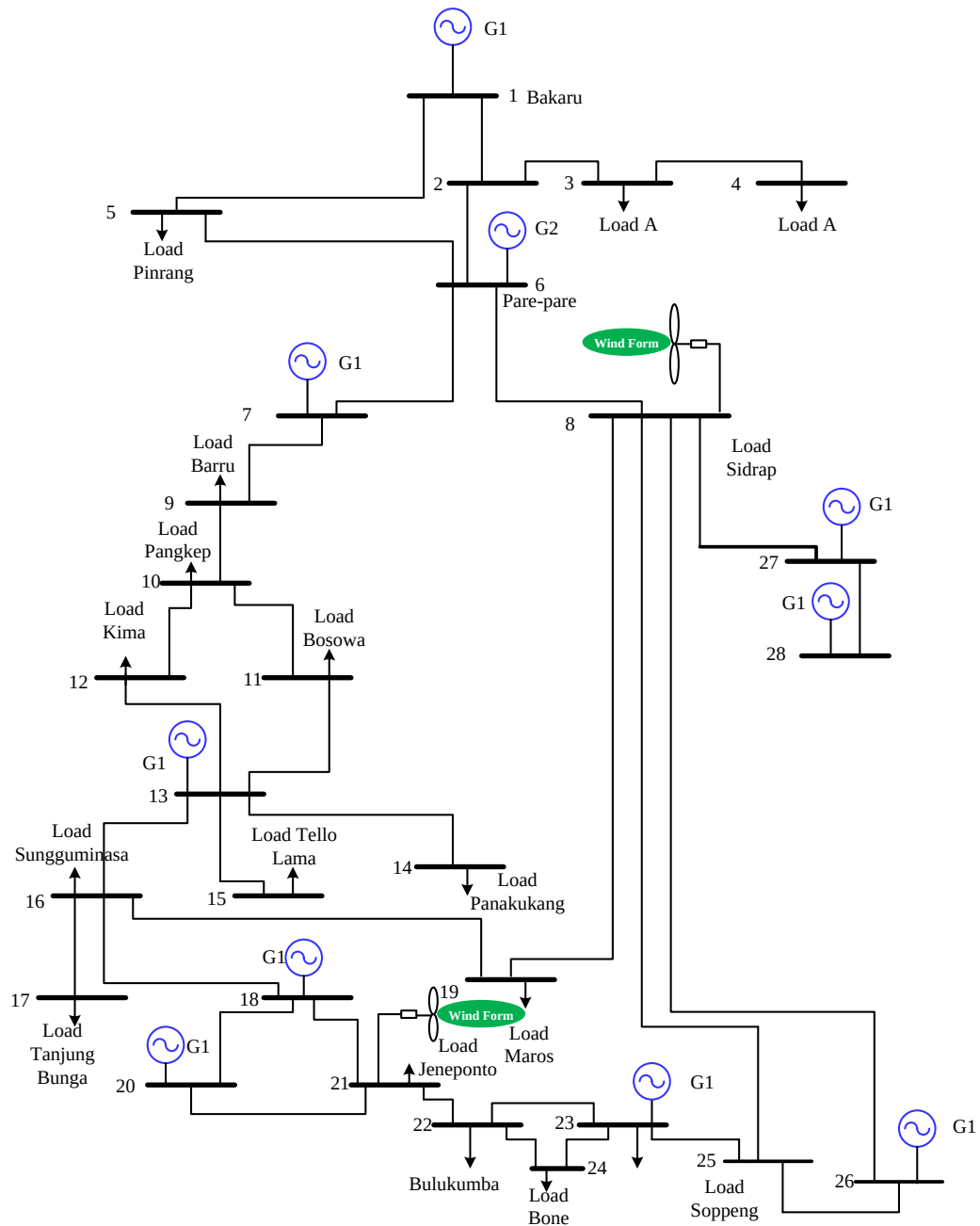
Diperoleh daya aktif sebesar 974.078 MW dan daya reaktif sebesar 721.163 saat penetrasi turbin angin Jeneponto. Terdapat perbedaan besaran daya aktif pada saat penetrasi turbin angin sidrap dengan besar daya aktif sebesar **965.614 MW, dan** daya reaktif **674.281**. Penempatan turbin angin di Jeneponto berdasarkan kondisi alam yang dipasang dengan koordinat lintang 5 ° 39'11.63 "S longitudinal 119 ° 46'24.26" E.

TABEL 14. Total Losses dan aliran daya

No	Aliran daya dan Losses	Normal	Penetrasi PLTB Jeneponto
1	Total pembangkit		
	Daya Aktif [MW]	963.325	974.314
	Daya Reaktif [MVar]	660.031	722.850
2	Total Beban		
	Daya Aktif [MW]	812.400	812.400
	Daya Reaktif [MVar]	181.900	181.900
3	Total Losses		
	Daya Aktif [MW]	150.925	161.914
	Daya Reaktif [MVar]	478.132	540.951

4. Pengaruh wind turbine di Sulselbar

Pada bagian ini turbin angin dipasang di dua sisi sistem Sulselbar yang ditunjukkan pada Gambar 45 tepatnya di bus Sidrap dan Jeneponto. Hasil simulasi yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 18.



Gambar 45. Penetrasi turbin angin Sidrap dan Jeneponto

Tabel 15. Hasil run alran daya PLTB Sidarp dan Jeneponto

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degre	Beban		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.03	0	3.5	0.2	-84.034	110.353
2	0.997	3.937	17.1	4.1	0	0
3	0.988	2.586	23.3	3.7	0	0
4	0.981	2.03	9.6	4.8	0	0
5	1	1.621	24.4	6.2	14.3	-49.725
6	0.999	5.669	18.7	4.7	0	0
7	1	7.032	0	0	31.1	-7.001
8	1	16.151	26.5	10.3	75	147.968
9	1	3.591	0	0	60.4	43.116
10	0.959	-3.609	10.1	2.4	0	0
11	0.951	-5.716	22.1	8	0	0
12	0.953	-6.923	0	0	0	0
13	0.925	-8.708	18.9	10.6	0	0
14	0.948	-6.208	33.1	15.4	0	0
15	0.957	-7.839	18	5.8	0	0
16	1	-4.556	63.3	18.3	21	93.105
17	0.98	-7.112	68.3	17.7	0	0
18	0.984	-10.608	0	-20	0	0
19	1	-11.355	11.4	0	5.2	11.127

Lanjutan Tabel 15						
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degre	Beban		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
21	0.962	-12.279	45.5	2.8	0	0
22	1	-4.566	0	0	0	0
23	1.001	-4.575	0	0	0	0
24	1	-5.42	19.7	4.7	12.6	18.115
25	0.975	-7.825	0	0	0	0
26	0.958	-8.021	26.5	7.7	0	0
27	1	2.936	15.7	3.6	20	132.391
28	0.968	0.1	55.2	16.7	0	0
29	1	39.242	20.6	4.7	79	12.649
30	0.98	12.515	18.6	5.5	0	0
31	1.042	48.959	0	0	196.1	38.6
32	1	39.281	17.4	3.4	72	-6.991
33	0.991	29.722	27.1	6.5	0	0
34	1	27.292	21.9	4.6	4	55.906
35	0.994	25.988	32.1	8.2	0	0
36	0.979	23.177	14.1	3.4	0	0
37	1	26.838	28.4	11.5	265.2	-62.802
38	1	18.417	11.9	1.5	8.2	28.837
39	1	51.381	49.2	0	4	128.97
40	0.972	74.721	0	0	0	0

Lanjutan Tabel 15

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degre	Beban		Generator	
			MW	Mvar	MW	Mvar
42	0.993	117.496	0	0	0	0
43	0.989	116.919	4.9	0.5	0	0
44	0.986	116.066	11	1.8	0	0
Total			812.4	181.9	979.066	750.256

Dengan mengintegrasikan dua sistem turbin angin ke dalam jaringan interkoneksi sulselbar, dampak pada peningkatan pasokan daya dibandingkan dengan satu atau turbin angin yang dipasang, memberikan hasil yang baik dengan profil daya aktif 979.066 dan daya reaktif 750.256.

TABEL 16. Total Losses dan aliran daya

No	Aliran daya dan Losses	Normal	Penetrasi Jeneponto & Sidrap	PLTB
1	Total pembangkit			
	Daya Aktif [MW]	963.325	979.236	
	Daya Reaktif [MVar]	660.031	751.570	
2	Total Beban			
	Daya Aktif [MW]	812.400	812.400	
	Daya Reaktif [MVar]	181.900	181.900	
3	Total Losses			
	Daya Aktif [MW]	150.925	166.836	
	Daya Reaktif [MVar]	478.132	569.670	

C. Uji penetrasi turbin angin pada stabilitas sistem Sulawesi Selatan

Untuk menguji stabilitas sistem dengan menambahkan beban dalam bentuk persentase pada Tabel 17 adalah skenario beban sebelum PLTB memasuki sistem.

Tabel 17. Tabel Skenario Penambahan beban

PLTB	Beban	Initial power angle	(Maximum angle swing)	Sudut CCA	Indek stabilitas
Tanpa PLTB	Normal	22.153	158.129	111.903	-11.6376
Tanpa PLTB	5 %	23.324	156.974	108.791	-11.6105
Tanpa PLTB	10%	25.269	155.181	104.317	-11.4994
Tanpa PLTB	15%	25.187	155.304	104.632	-11.4282
Tanpa PLTB	20%	27.417	152.942	99.134	-11.3556
Tanpa PLTB	30%	27.200	153.156	99.602	-11.2058
Tanpa PLTB	40%	33.191	147.260	88.173	-11.0497
Tanpa PLTB	50%	35.742	144.755	84.169	-10.8866

1. Akibat Penetrasi Turbin Angin di Sidrap

Tabel 18. Tabel Skenario Penambahan beban saat PLTB sidrap Masuk

PLTB Sidrap 75 MW	Prosentase Beban	Initial power angle	(Maximum angle swing)	Sudut CCA	Indek stabilitas
Penetrasi Sidrap	Normal	22.153	158.129	111.903	-15.2648
Penetrasi Sidrap	5 %	23.324	156.974	108.791	-15.2450
Penetrasi Sidrap	10%	25.269	155.181	104.317	-15.1693
Penetrasi Sidrap	15%	25.187	155.304	104.632	-15.1202
Penetrasi Sidrap	20%	27.417	152.942	99.134	-15.0700
Penetrasi Sidrap	30%	27.200	153.156	99.602	-14.9665
Penetrasi Sidrap	40%	33.191	147.260	88.173	-14.8589
Penetrasi Sidrap	50%	35.742	144.755	84.169	-14.7469

2. Akibat Penetrasi Turbin Angin di Jeneponto

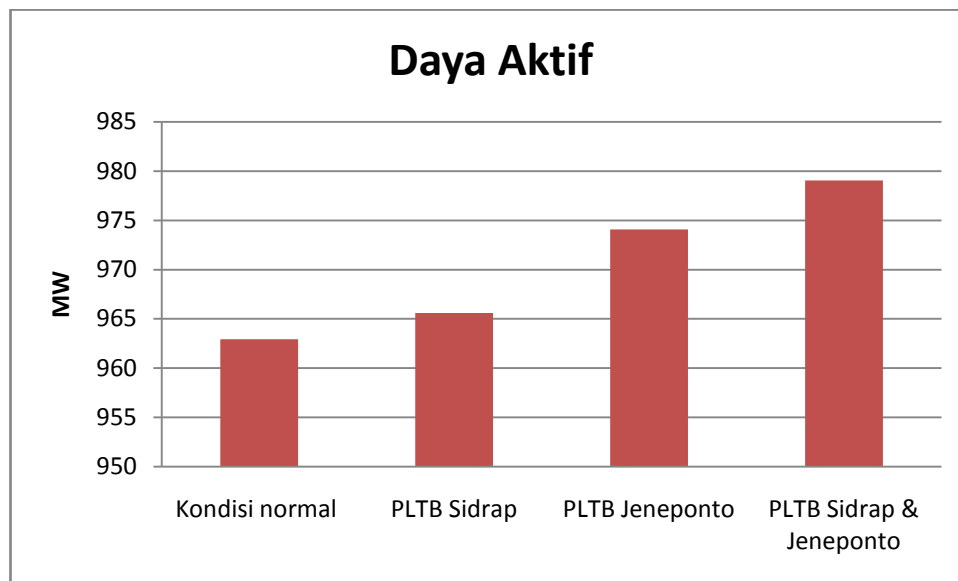
Tabel 19. Tabel Skenario Penambahan beban saat PLTB Jeneponto Masuk

PLTB Jeneponto 72 MW	Beban	Initial power angle	(Maximum angle swing)	Sudut CCA	Indek stabilitas	V load bus
Penetrasi Jeneponto	Normal	22.153	158.129	111.903	-15.6001	0.9242
Penetrasi Jeneponto	5 %	23.324	156.974	108.791	-15.5816	0.9242
Penetrasi Jeneponto	10%	25.269	155.181	104.317	-15.5119	0.9242
Penetrasi Jeneponto	15%	25.187	155.304	104.632	-15.4664	0.9242
Penetrasi Jeneponto	20%	27.417	152.942	99.134	-15.4200	0.9242
Penetrasi Jeneponto	30%	27.200	153.156	99.602	-15.3242	0.9242
Penetrasi Jeneponto	40%	33.191	147.260	88.173	-15.2244	0.9242
Penetrasi Jeneponto	50%	35.742	144.755	84.169	-15.1205	0.9242

3. Pengaruh Penetrasi Total Sidrap dan Jeneponto

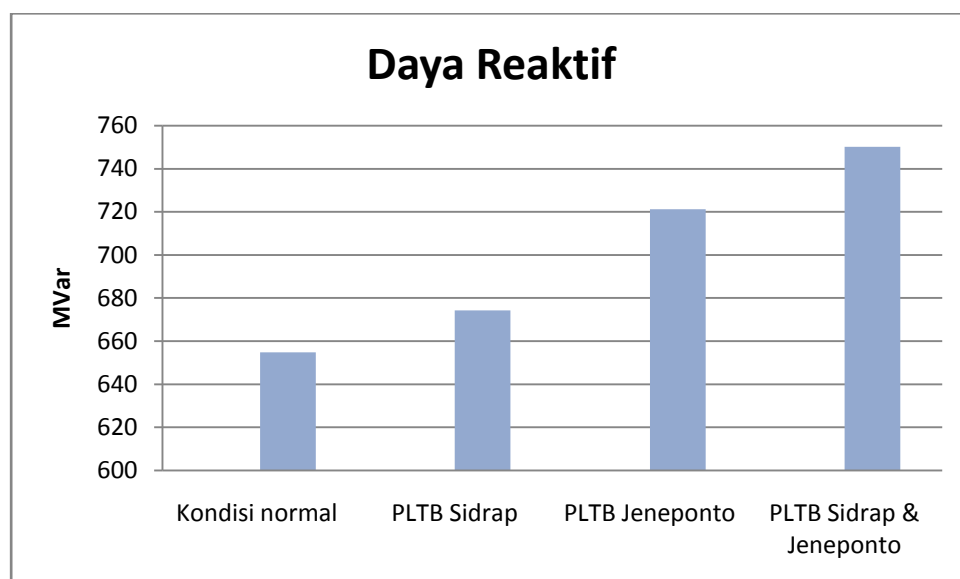
Tabel 20. Tabel Skenario Penambahan beban saat PLTB sidrap dan Jeneponto Masuk sistem sulselbar

PLTB Sidrap &Jeneponto	Beban	Initial power angle	(Maximum angle swing)	Sudut CCA	Indek stabilitas	V load bus
Penetrasi Sidrap dan Jeneponto	Normal	22.153	158.129	111.903	-20.5625	0.9242
Penetrasi Sidrap dan Jeneponto	5 %	23.324	156.974	108.791	-20.5586	0.9242
Penetrasi Sidrap dan Jeneponto	10%	25.269	155.181	104.317	-20.5497	0.9242
Penetrasi Sidrap dan Jeneponto	15%	25.187	155.304	104.632	-20.5422	0.9242
Penetrasi Sidrap dan Jeneponto	20%	27.417	152.942	99.134	-20.5340	0.9242
Penetrasi Sidrap dan Jeneponto	30%	27.200	153.156	99.602	-20.5155	0.9242
Penetrasi Sidrap dan Jeneponto	40%	33.191	147.260	88.173	-20.4942	0.9242
Penetrasi Sidrap dan Jeneponto	50%	35.742	144.755	84.169	-20.4699	0.9242



Gambar 46. Pengaruh daya aktif PLTB pada sistem sulselbar

Pada Gambar 46. Merupakan perbandingan daya raktif yang meningkat dari kondisi normal, belum ada penetrasi turbin angin, kemudian terdapat penetrasi turbin angin sidrap, penetrasi turbin angin Jeneponto dan hybrid dari PTLB sidrap dan jeneponto. Begitu juga pada Gambar 47. Merupakan kondidi daya reaktif.

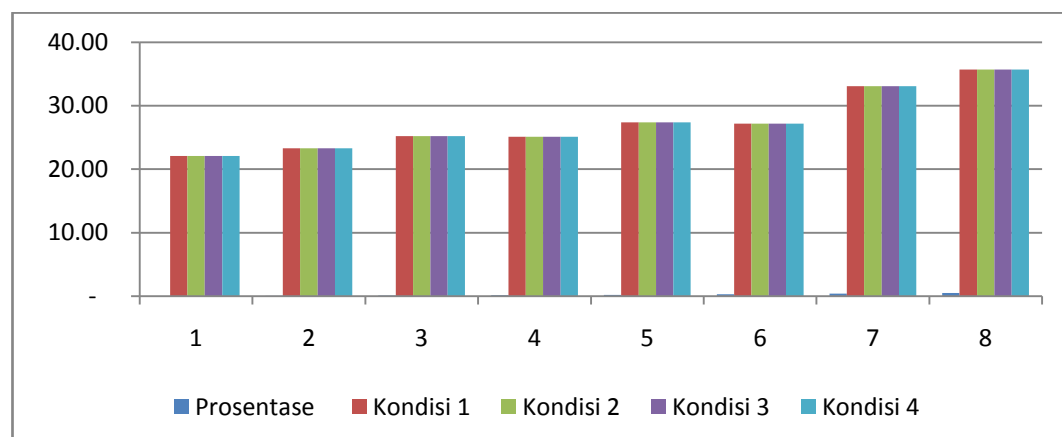


Gambar 47. Pegaruh Daya Reaktif PLTB pada sistem sulselbar

Tabel 21. Hasil prosentase daya

Prosentase	Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4
-	22.1	22.1	22.1	22.1
0.05	23.3	23.3	23.3	23.3
0.10	25.2	25.2	25.2	25.2
0.15	25.1	25.1	25.1	25.1
0.20	27.4	27.4	27.4	27.4
0.30	27.2	27.2	27.2	27.2
0.40	33.1	33.1	33.1	33.1
0.50	35.7	35.7	35.7	35.7

Tabel 21 merupakan hasil prosentase daya dari kondisi sebelum PLTM masuk sistem, kemudian masuk PLTB sidrap, masuk PLTB Jeneponto dan Hybrid dari PLTB sidrap dan jeneponto. Sehingga dapat direpresentasikan pada Gambar 48.

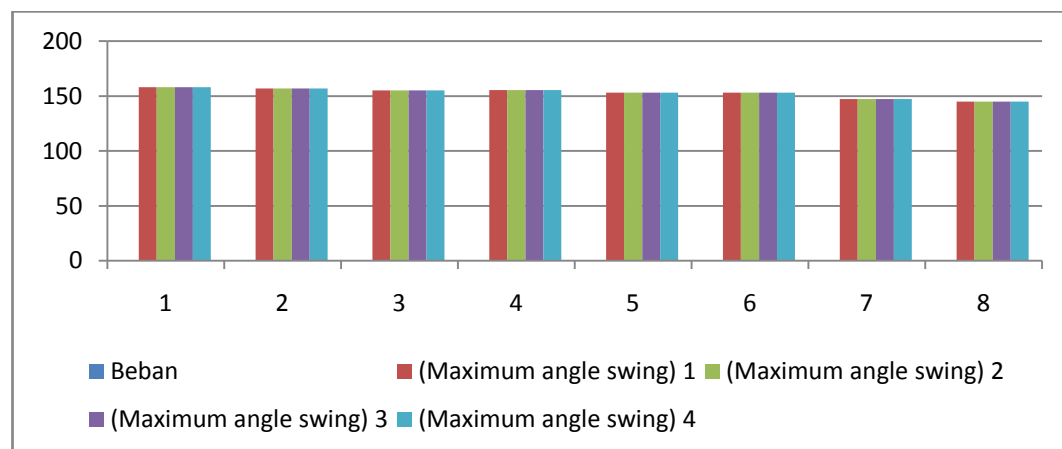


Gambar 48. Gambar Penbandingan kondisi satu hingga 4

Tabel 22. Perbandingan Maximum angle swing 4 kondisi

Beban	(Maximum angle swing) 1	(Maximum angle swing) 2	(Maximum angle swing) 3	(Maximum angle swing) 4
Normal	158.129	158.129	158.129	158.129
5%	156.974	156.974	156.974	156.974
10%	155.181	155.181	155.181	155.181
15%	155.304	155.304	155.304	155.304
20%	152.942	152.942	152.942	152.942
30%	153.156	153.156	153.156	153.156
40%	147.26	147.26	147.26	147.26
50%	144.755	144.755	144.755	144.755

Tabel 22, merupakan perbandingan swing dari sudut generator saat terjadi perunahan atau kenaikan beban. Kondisi ini sesuai dengan prosentase penambahan kondisi beban.

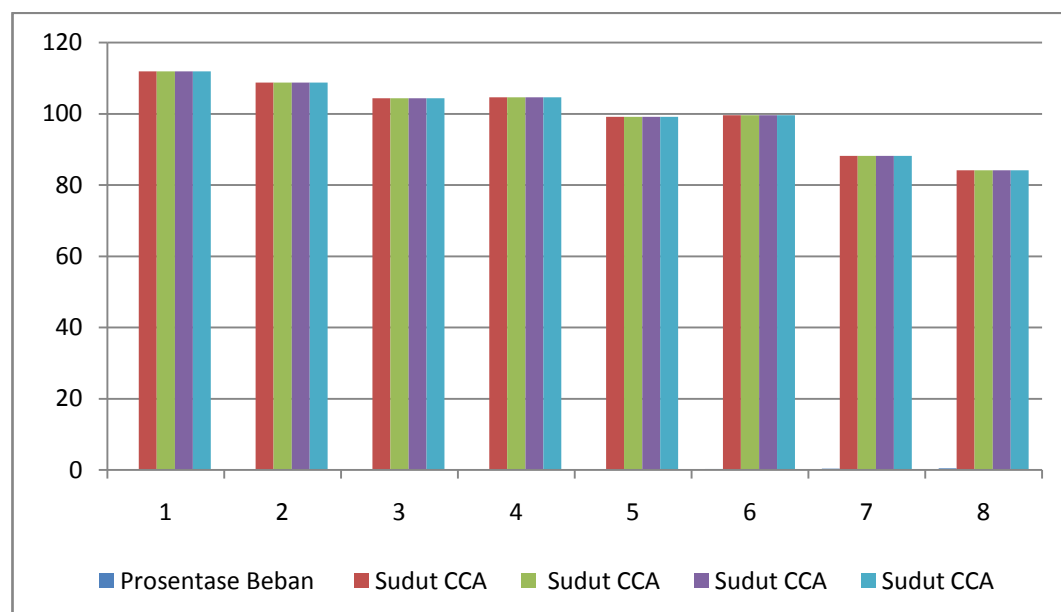


Gambar 49. Perbandingan kondisi swing sudut

Tabel 23. Perbandingan Sudut CCA 4 kondisi

Prosentase Beban	Sudut CCA	Sudut CCA	Sudut CCA	Sudut CCA
Normal	111.903	111.903	111.903	111.903
5%	108.791	108.791	108.791	108.791
10%	104.317	104.317	104.317	104.317
15%	104.632	104.632	104.632	104.632
20%	99.134	99.134	99.134	99.134
30%	99.602	99.602	99.602	99.602
40%	88.173	88.173	88.173	88.173
50%	84.169	84.169	84.169	84.169

Tabel 23, perbandingan nilai dari sudut CCA, hal ini terjadi sesuai dengan kondisi penambahan beban yang meningkat. Perlakuan mesin menyesuaikan kondisi pengkatan beban yang meningkat.

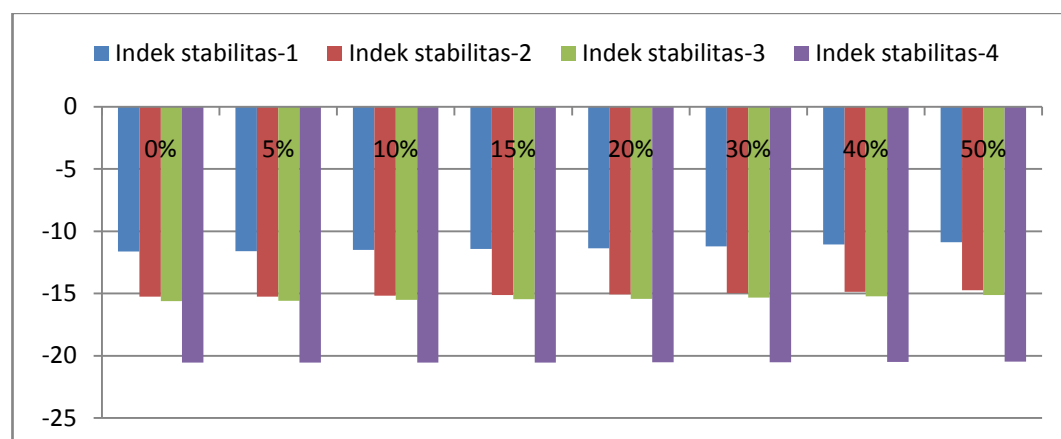


Gambar 50. Prosentase CCA 4 keadaan

Tabel 24. Perbandingan Index Stabilitas 4 kondisi

	Indek stabilitas-1	Indek stabilitas-2	Indek stabilitas-3	Indek stabilitas-4
0%	-11.6376	-15.2648	-15.6001	-20.5625
5%	-11.6105	-15.245	-15.5816	-20.5586
10%	-11.4994	-15.1693	-15.5119	-20.5497
15%	-11.4282	-15.1202	-15.4664	-20.5422
20%	-11.3556	-15.07	-15.42	-20.534
30%	-11.2058	-14.9665	-15.3242	-20.5155
40%	-11.0497	-14.8589	-15.2244	-20.4942
50%	-10.8866	-14.7469	-15.1205	-20.4699

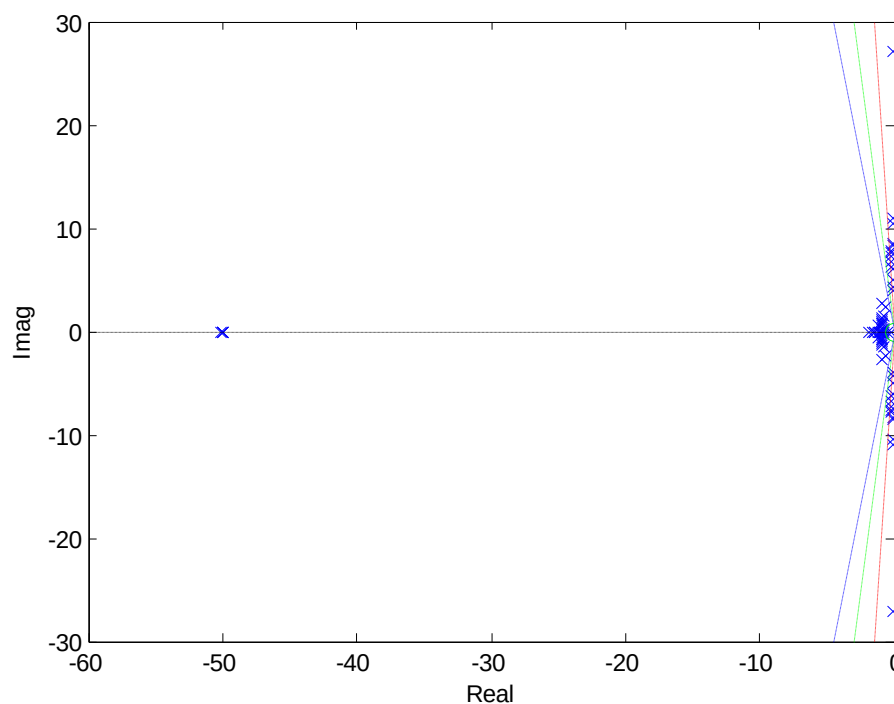
Pada Tabel 24 merupakan kondisi index stabilitas sistem yang mengalami penambahan beban, dengan bertambahnya beban yang semakin meningkat maka kondisi index stabilitas semakin menurun.



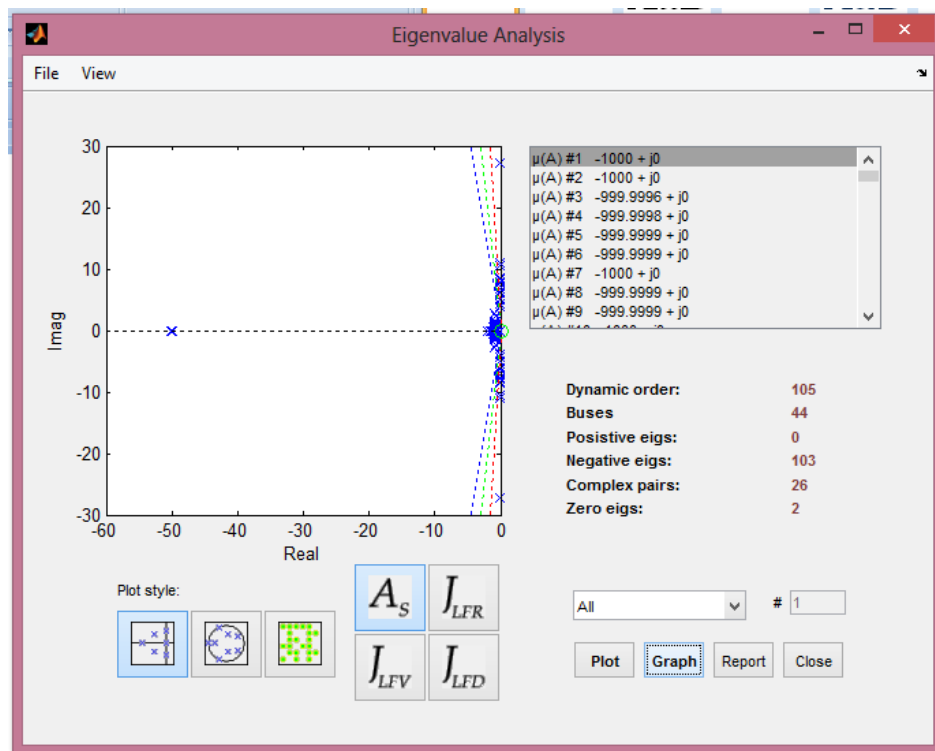
Gambar 51. Perbandingan Index Stabilitas

D. ANALISIS PERFORMANSI STABILITAS DINAMIK

Untuk mengetahui kinerja sistem, terutama stabilitas dinamis yang disuntikkan oleh PLTB, analisis dilakukan pada stabilitas sudut rotor, frekuensi dan tegangan pada pembangkit. Dalam Gambar 52, ini mewakili grafik nilai eigen dari kekuatan nyata (Nyata) dan Kekuatan semu (Imag). Ditunjukkan dalam a, untuk gambar b menunjukkan jumlah bus 44, eigen positif 0, eigen negatif 103. Suatu sistem yang memiliki 0 positif adalah parameter sistem yang stabil.



Gambar 52, Grafik Eigenvalue sistem

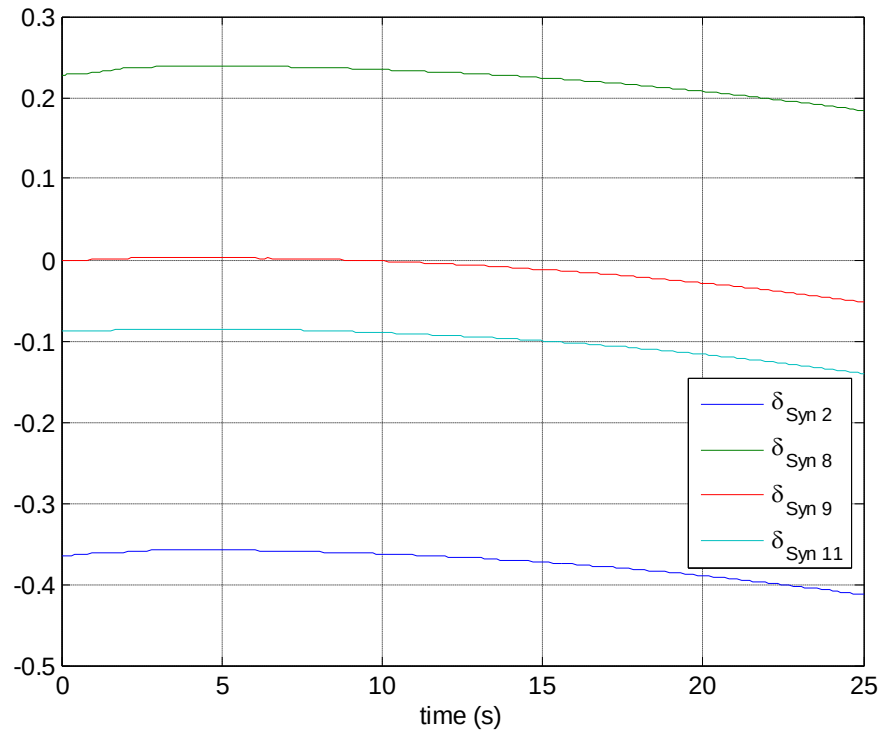


Gambar 53, Grafik Elgenvalue sistem

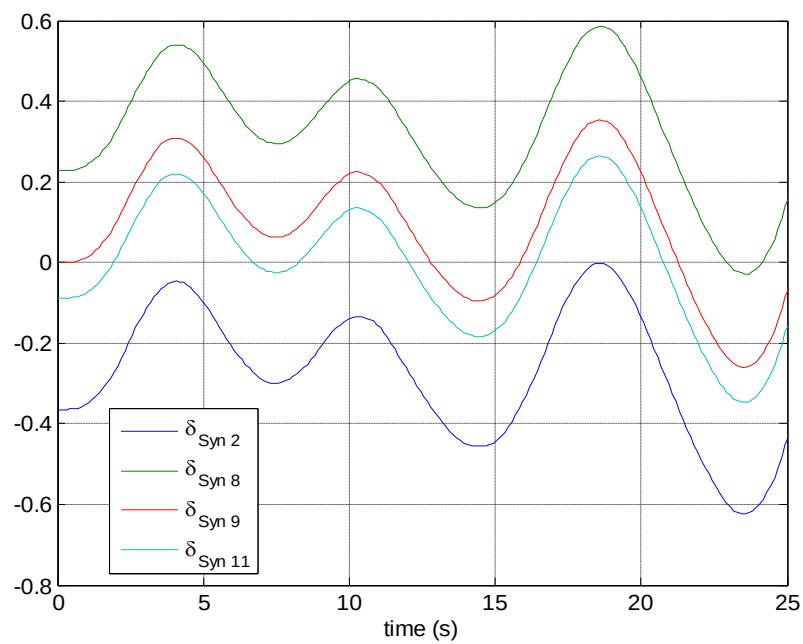
1. Stabilitas sudut rotor

Hasil analisis kinerja stabilitas rotor pada sistem SULSELBAR sebelum injeksi daya Sidrap dan Jeneponto PLTB ditunjukkan pada Gambar 54, hasil stabilitas digunakan sebagai PLTGU Senkang (GI) sebagai sudut referensi, sebuah PLTU baru (G7), Poso (G13) dan PLTD PLTD Sungguminasa (G6), adalah sistem yang menggunakan primover yang memiliki kekuatan rotasi lawan yang dapat menghasilkan daya reaktif. Beberapa generator ini memiliki kemampuan rotor tipikal dan sudut yang berbeda.

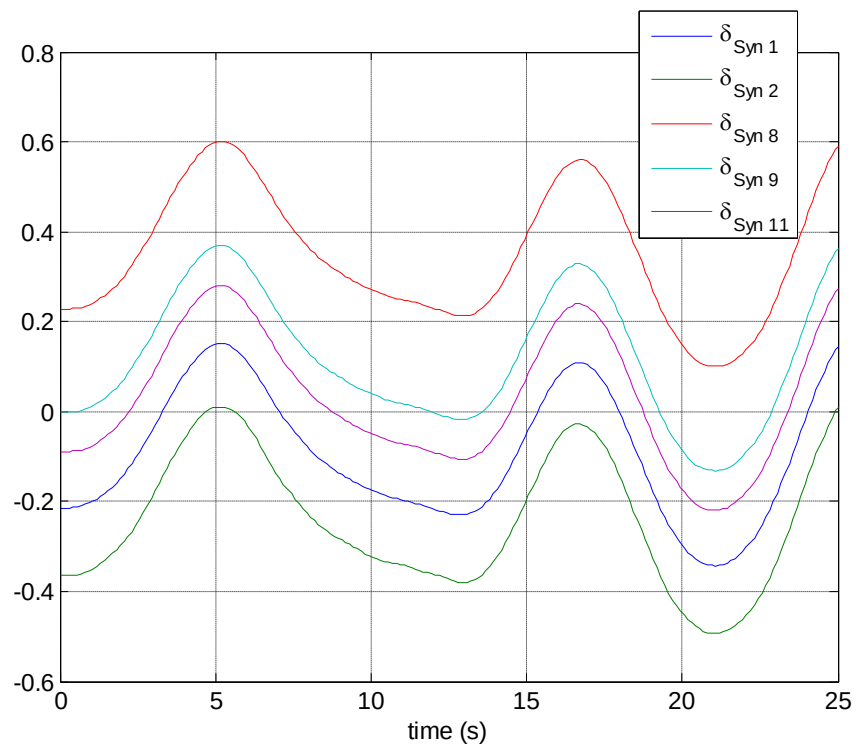
Pada Gambar 54-56, hasil simulasi kinerja grafik sudut rotor dan fungsi waktu dapat dinyatakan dalam bentuk tabel.



Gambar 54. Grafik sudut rotor $f(t)$ sebelum penetrasi PLTB



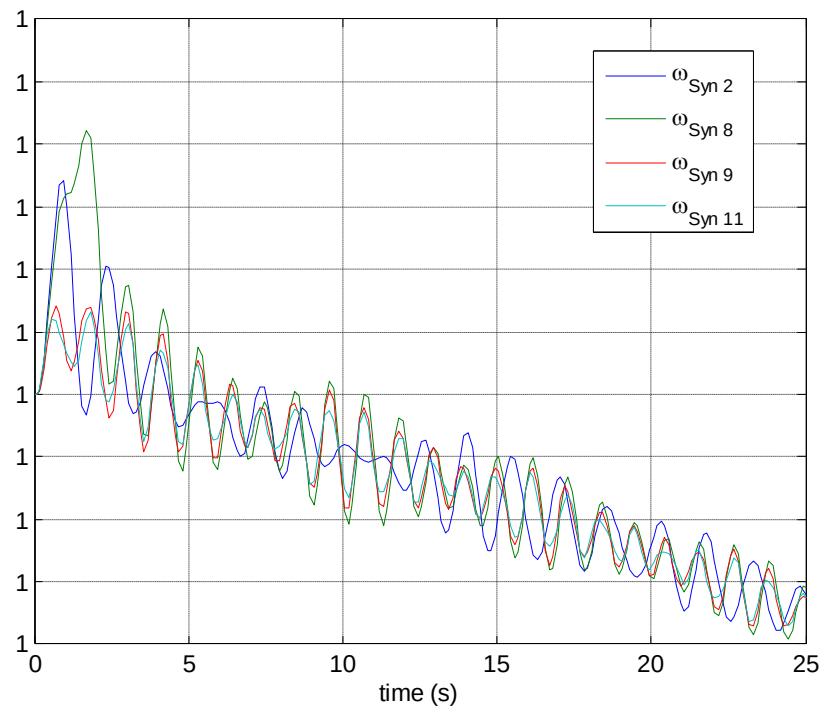
Gambar 55. Grafik sudut rotor $f(t)$ setelah penetrasi PLTB Jeneponto



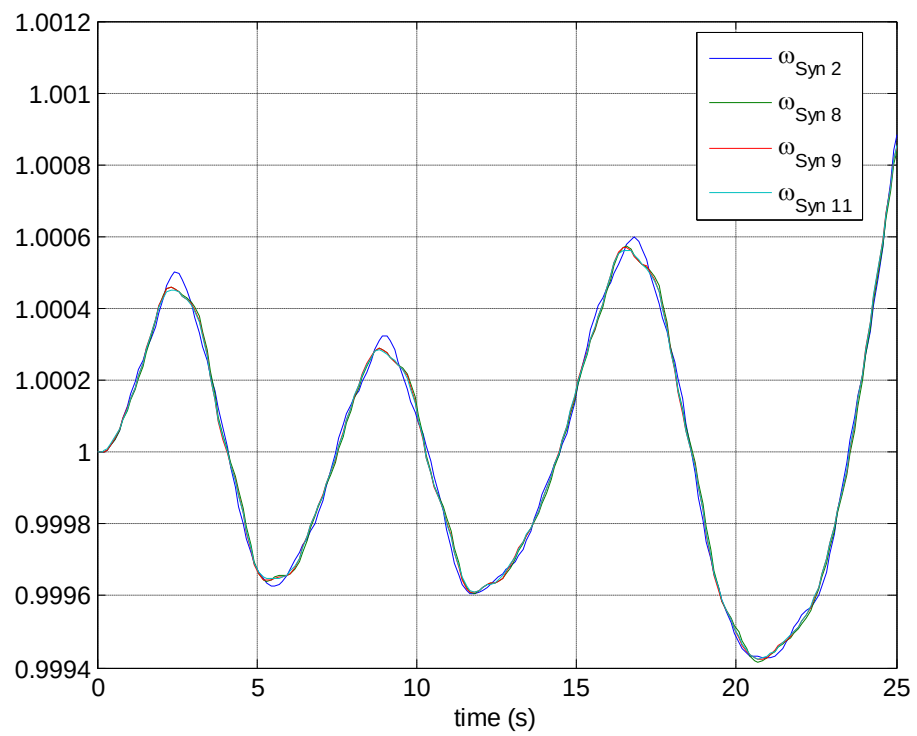
Gambar 56. Grafik sudut rotor $f(t)$ setelah penetrasi PLTB Jeneponto & Sidrap

5. Stabilitas frekuensi

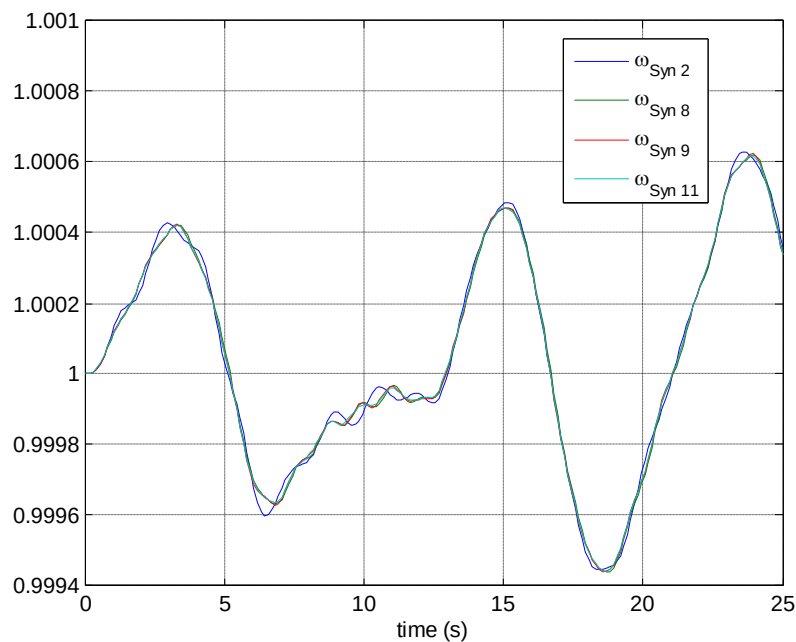
Kinerja hasil simulasi frekuensi sebelum injeksi PLTB ditunjukkan pada Gambar 58, respons frekuensi PLTGU Sengkang (G9), PLTU Barru (G2), PLTA Poso (G8) dan PLTD Sungguminasa (G11). Berada pada frekuensi kerja 50 Hz.



Gambar 57. Grafik frekuensi sebelum penetrasi PLTB



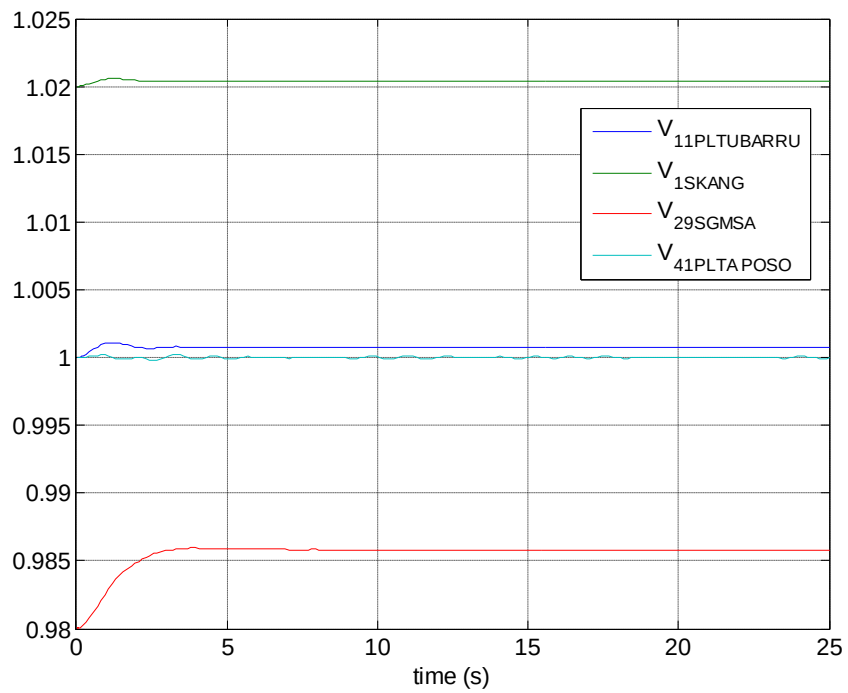
Gambar 58. Grafik frekuensi setelah penetrasi PLTB Jeneponto



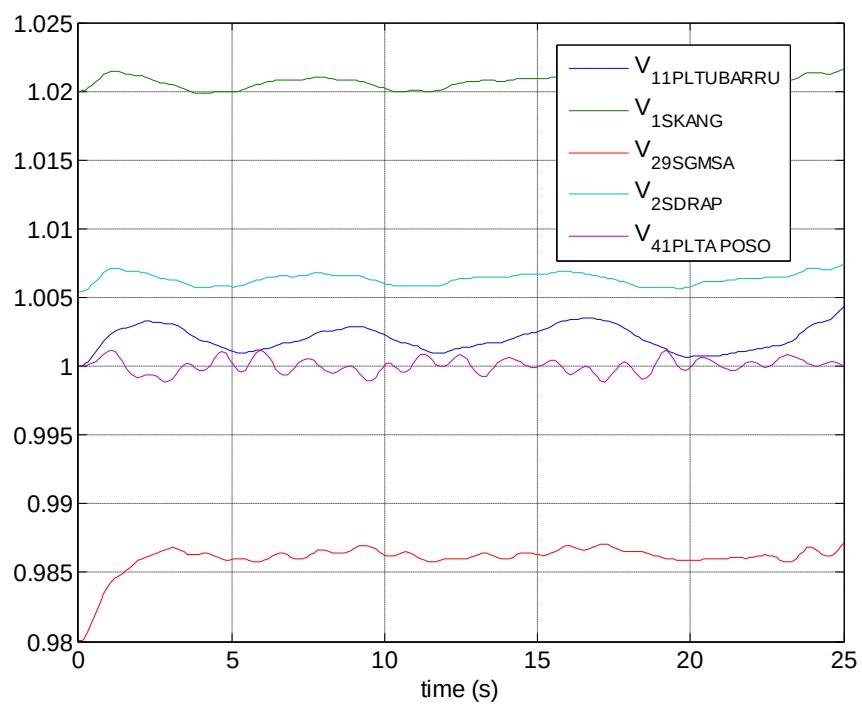
Gambar 59. Grafik frekuensi setelah penetrasi PLTB Jeneponto dan Sidrap

6. Stabilitas Tegangan

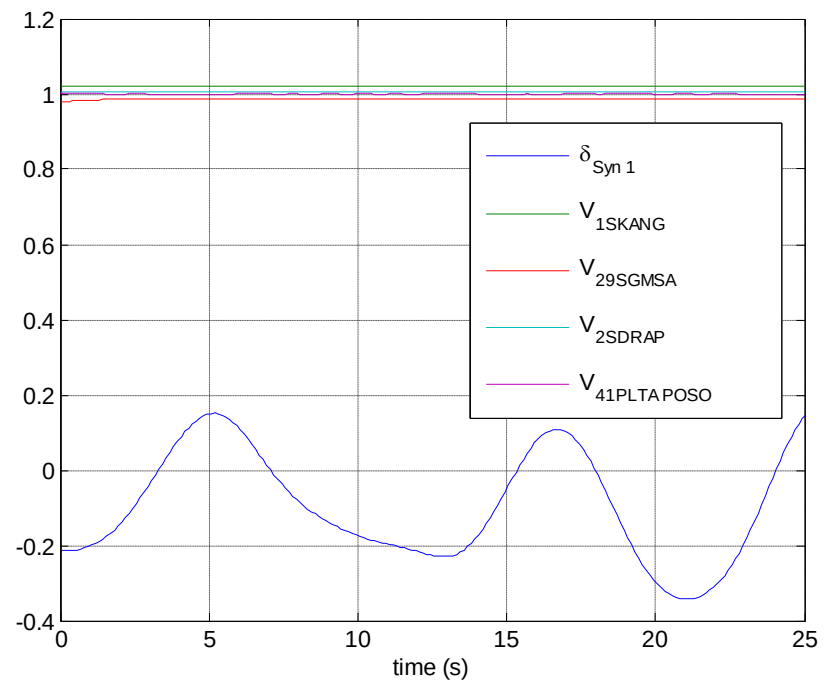
Kinerja stabilitas tegangan sebelum penetrasi oleh PLTB pada Gambar 30 untuk generator bus PLTGU Sengkang, PLTU Barru, PLTD Poso dan PLTD Sungguminasa. Generator ini yang memiliki primer yang berbeda memiliki tegangan yang berbeda. Pembangkit listrik Sengkang memiliki tegangan 1,02 pu, pembangkit listrik Barru memiliki tegangan 1,001pu. Pembangkit listrik tenaga air Poso memiliki tegangan 1 pu sedangkan pembangkit listrik Sungguminasa memiliki tegangan di bawah 1, 0,986.



Gambar 60. Grafik tegangan sebelum penetrasi PLTB



Gambar 61. Grafik tegangan setelah penetrasi PLTB Jeneponto

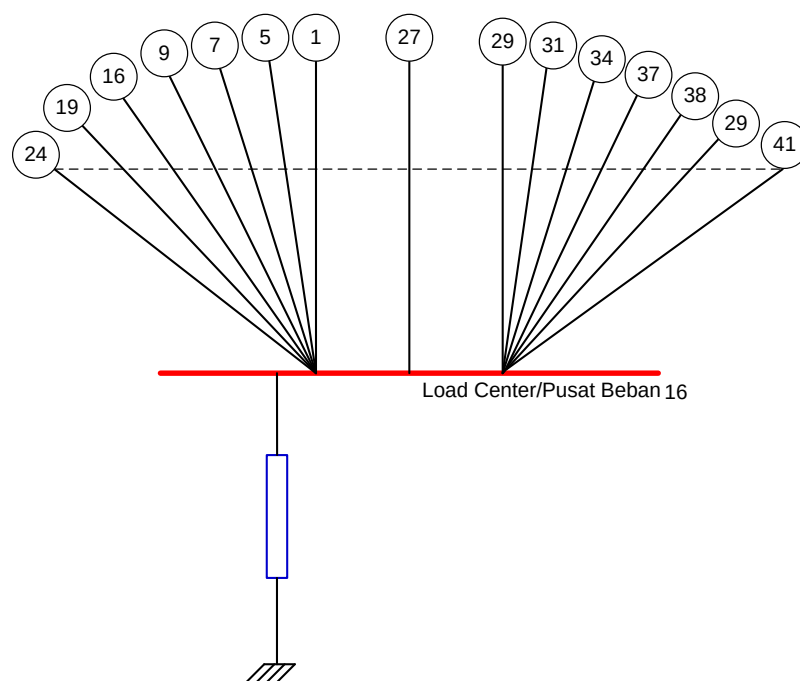


Gambar 62. Grafik tegangan setelah penetrasi PLTB Jeneponto & Sidrap

E. PERFORMANSI MENGGUNAKAN KECERDASAN BUATAN

1. Performansi SSSL menggunakan Rei-dimo

Studi awal load flow menggunakan Metode Newton Raphson sebagai dasar untuk mengetahui keadaan sistem. hasil dari studi ini diperoleh nilai tegangan dan nilai sudut pada setiap bus sistem. Kemudian proses selajutnya adalah melakukan proses REI-Dimo Equivalent yaitu proses reduksi jumlah bus di sistem, pada awal jumlah bus 44 bus direduksi menjadi 15 bus yaitu bus generator dan 1 bus beban. Pada Gambar 50 memperlihatkan bentuk Rei-Dimo equivalent dari sistem Sulselbar dengan jumlah bus generator ada 15 dan 1 bus load center. Nilai Y bus setelah eliminasi Gaussian dan parameter Rei-Dimo dapat dilihat pada Tabel 28.



Gambar 63. Singel Load REI-Dimo sistem Sulselbar

Penerimaan konstan dan arus beban setiap bus dapat diperoleh dari metode REI-Dimo. Dalam Tabel 25 adalah hasil komputasi dari metode Rei-Dimo dalam mendapatkan nilai konstan penerimaan konstan dan arus beban pada setiap bus.

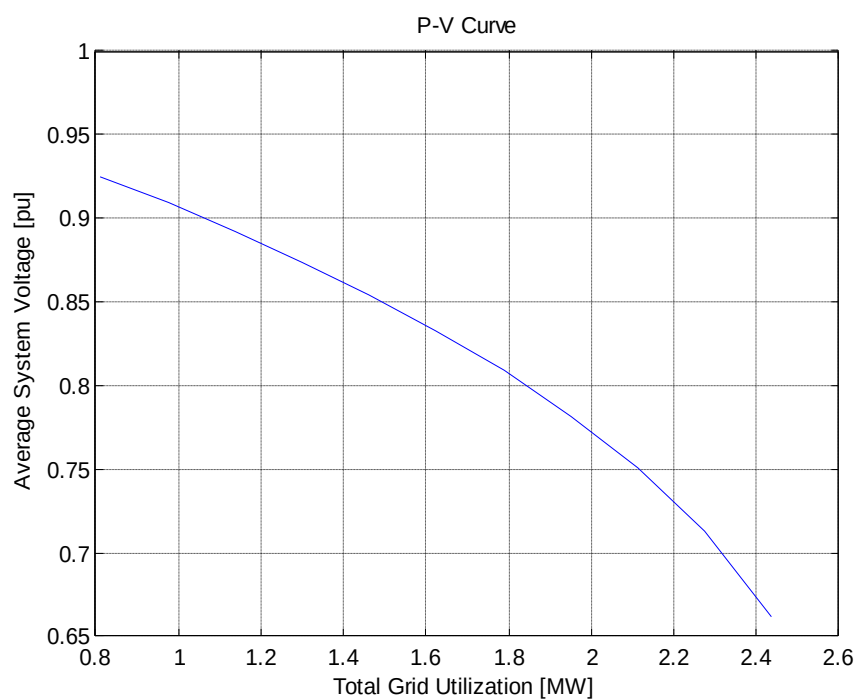
Tabel 25. Indeks stabilitas saat injeksi PLTB

% PLTB	Beban		Tegangan	Sudut Tegangan	Indek stability
	P (MW)	Q (Mvar)			
Normal	812.400	181.900	0.997	-1.354	-11.6391
Sidrap	812.400	181.900	0.999	1.524	-15.2648
Jeneponto	812.400	181.900	0.995	1.118	-15.5603
Sidrap dan Jeneponto	812.400	181.900	0.997	3.937	-20.5625
1 Gen lepas	812.400	181.900	0.999	3.727	-20.1214
2 Gen Lepas	812.400	181.900	1.000	2.510	-18.6724

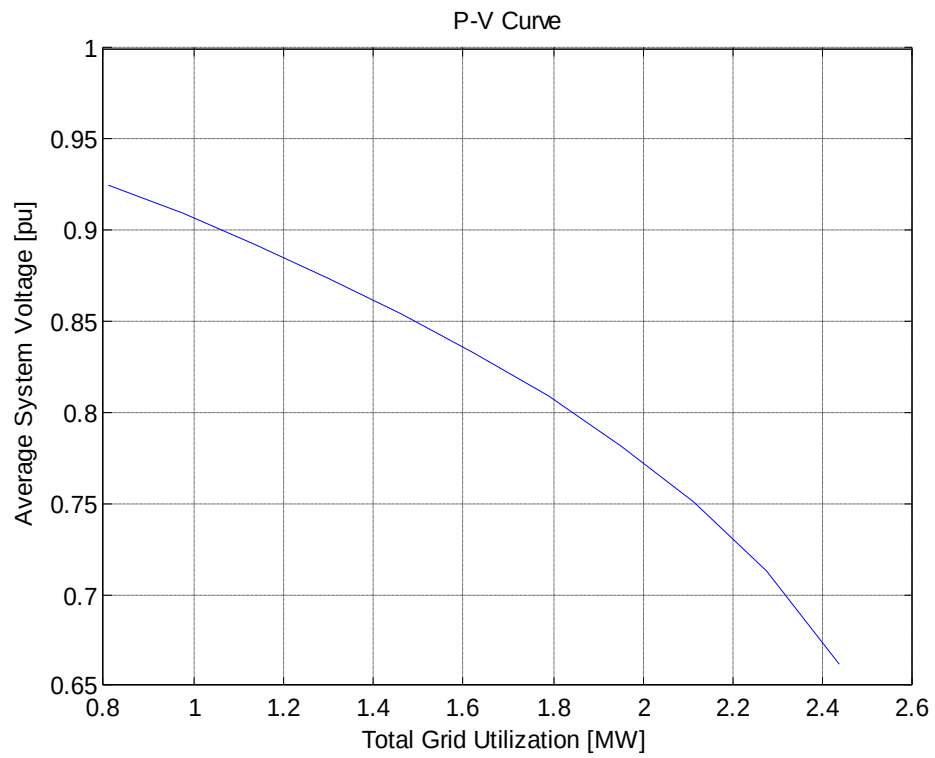
Dalam simulasi, skenario pertama dilakukan dengan melepaskan 1 generator 14,3 MW sehingga indeks stabilitas menurun dari -20,5625 menjadi -20,1214. kemudian skenario kedua dilakukan dengan melepaskan 2 generator lepas dengan kapasitas 14,3 MW dan 31,1 MW, yang menghasilkan penurunan indeks stabilitas dari -20,5625 menjadi -18,6724.

Tabel 26. Penetrasi dalam prosentase

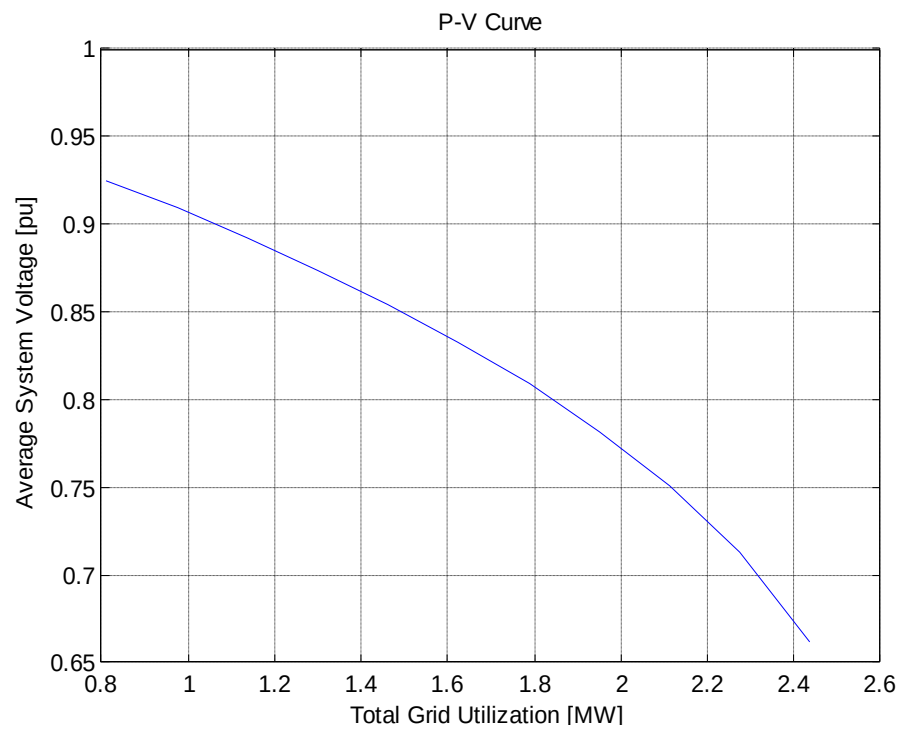
% PLTB	Beban		Tegangan	Sudut Tegangan	Indek stability
	P (MW)	Q (Mvar)			
Normal	812.400	181.900	0.997	-1.354	-11.6391
1 %	812.400	181.900	1.001	-1.030	-10.6516
5 %	812.400	181.900	1.000	0.381	-12.7704
10 %	812.400	181.900	0.999	2.152	-16.5110
15 %	812.400	181.900	0.997	3.852	-20.2098
20 %	812.400	181.900	0.995	5.527	-23.0295



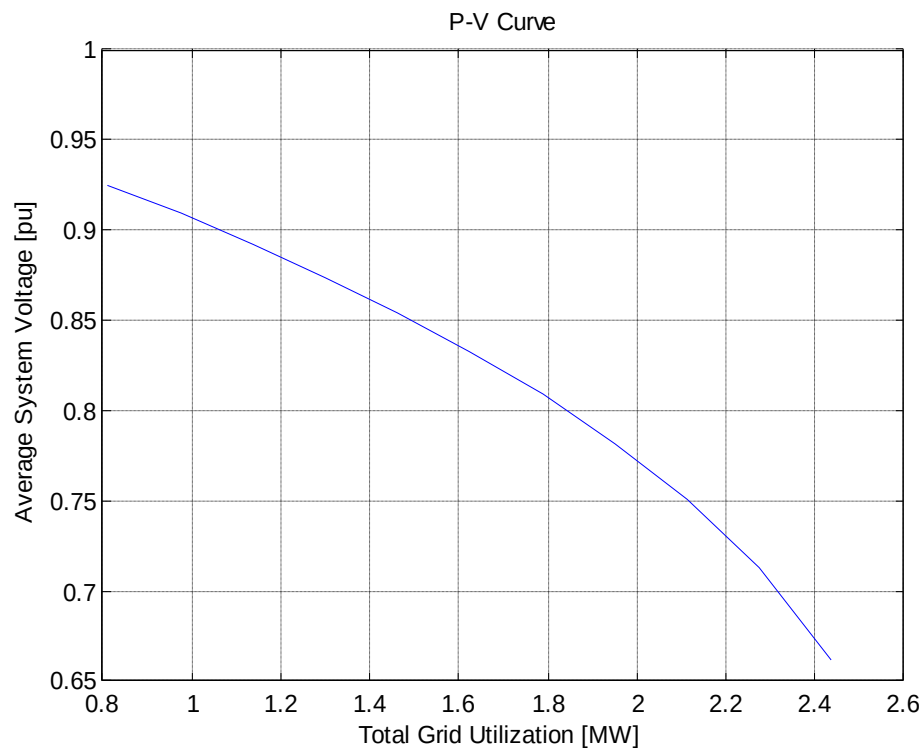
Gambar 64. Kurva P-V Sistem Sulselbar sebelum penetrasi PLTB Sidrap



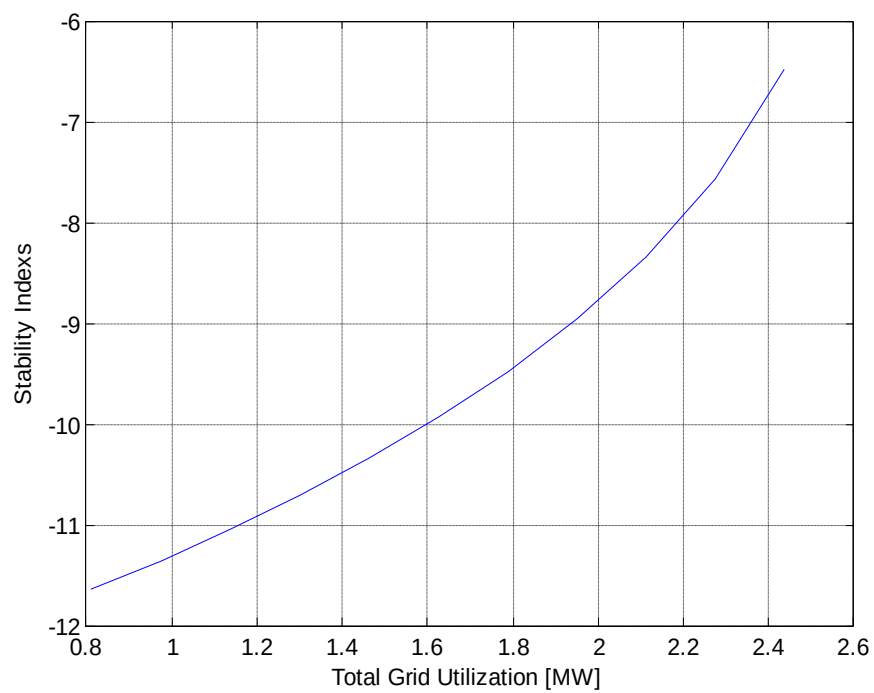
Gambar 65. Kurva P-V Sistem sulselbar setelah penetrasi PLTB Sidrap



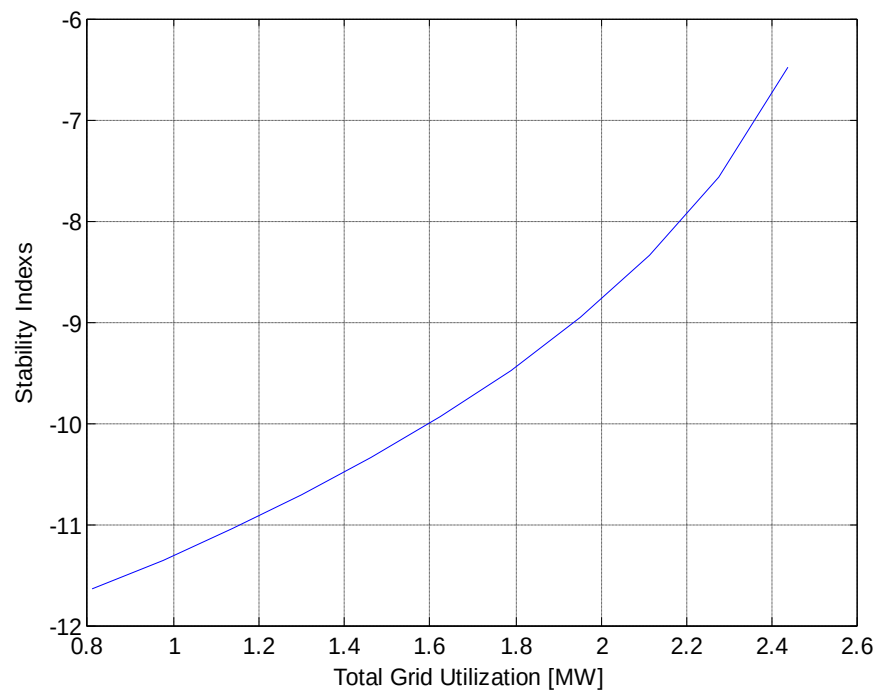
Gambar 66. Kurva P-V Sistem Sulselbar setelah penetrasi PLTB Jeneponto



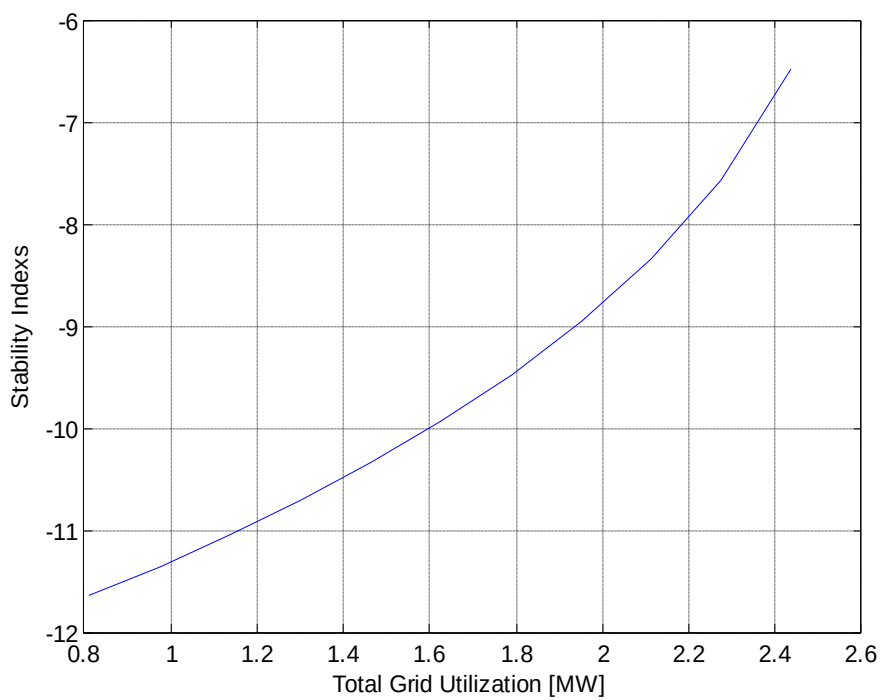
Gambar 67. Kurva P-V Sistem Sulselbar setelah penetrasi PLTB Sidrap dan Jenepono



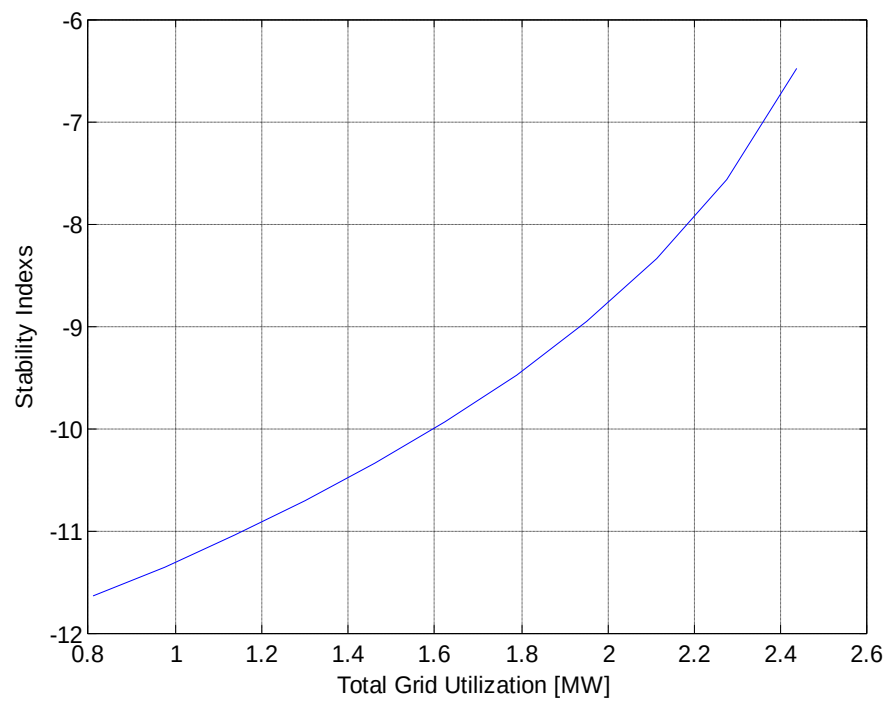
Gambar 68. Kurva perubahan indeks stabilitas sebelum penetrasi PLTB Sidrap



Gambar 69. Kurva perubahan indeks stabilitas setelah penetrasi PLTB Sidrap

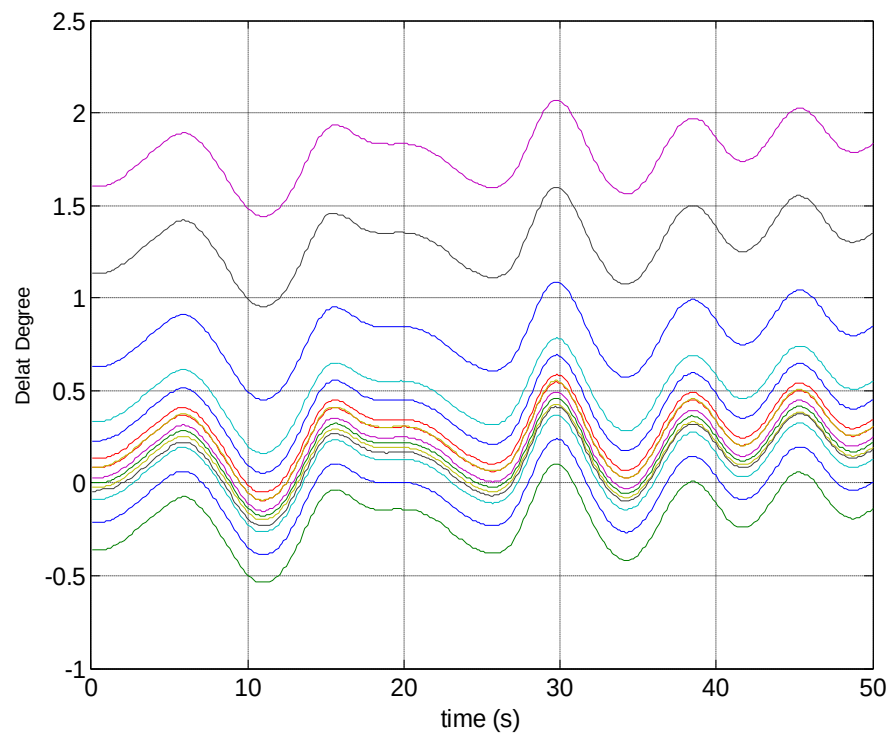


Gambar 70. Kurva perubahan indeks stabilitas setelah penetrasi PLTB Jeneponto

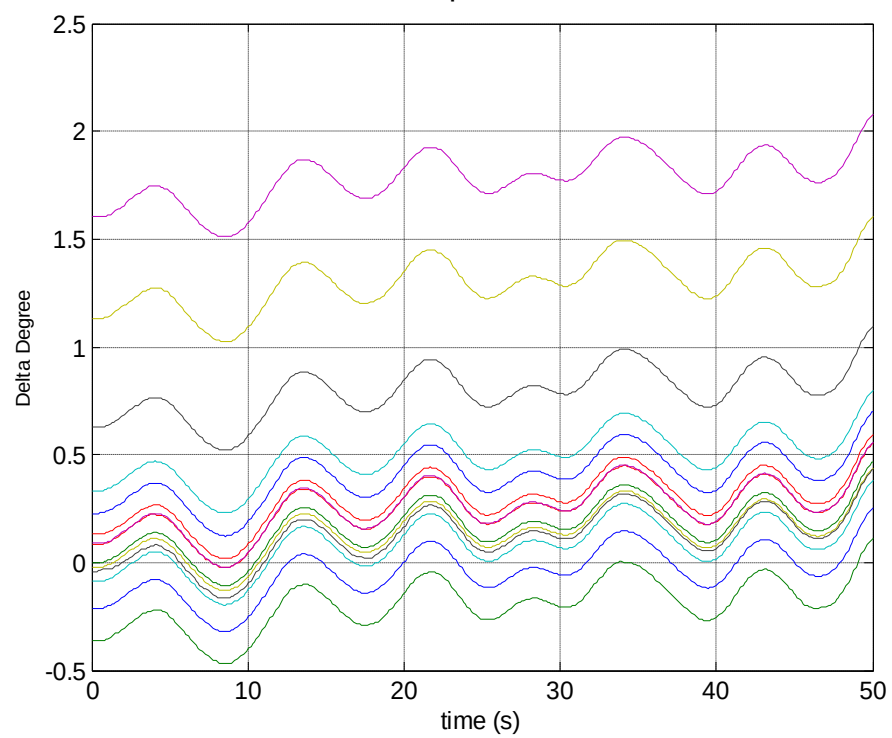


Gambar 71. Kurva perubahan indeks Stabilitas setelah penetrasi PLTB Sidrap dan Jeneponto

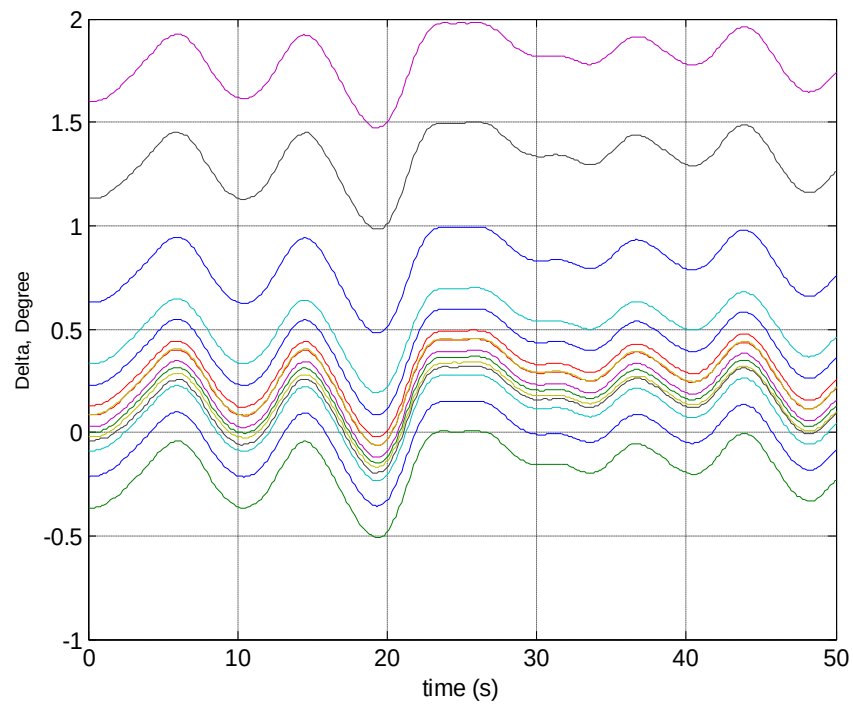
3. Analisis stabilitas transient



Gambar 72. Tampilan sudut rotor semua pembangkit penetrasi PLTB Jeneponto

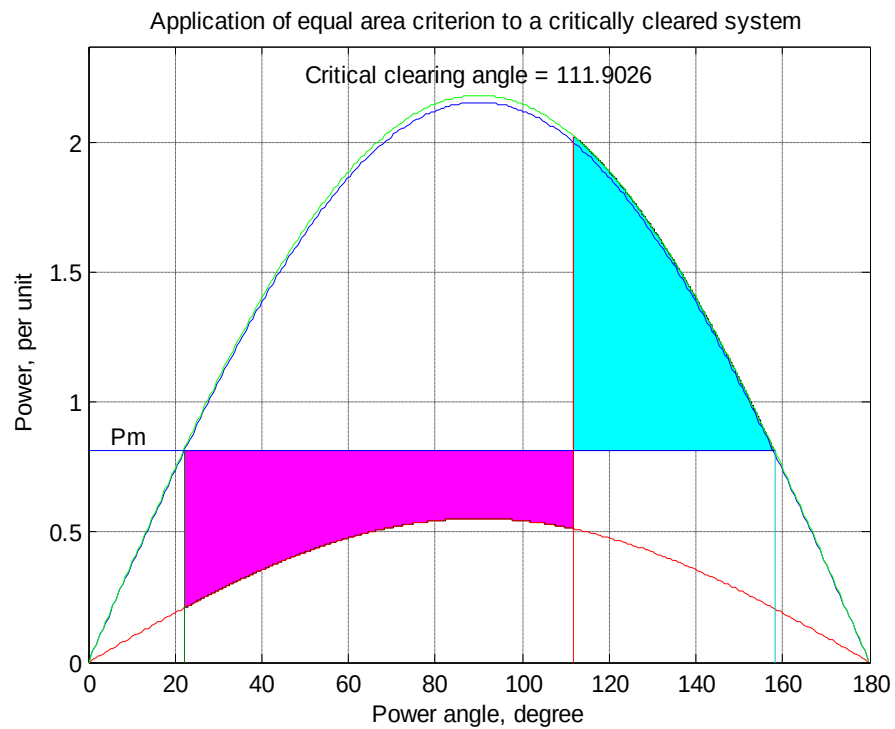


Gambar 73. Tampilan sudut rotor semua pembangkit penetrasi PLTB Sidrap

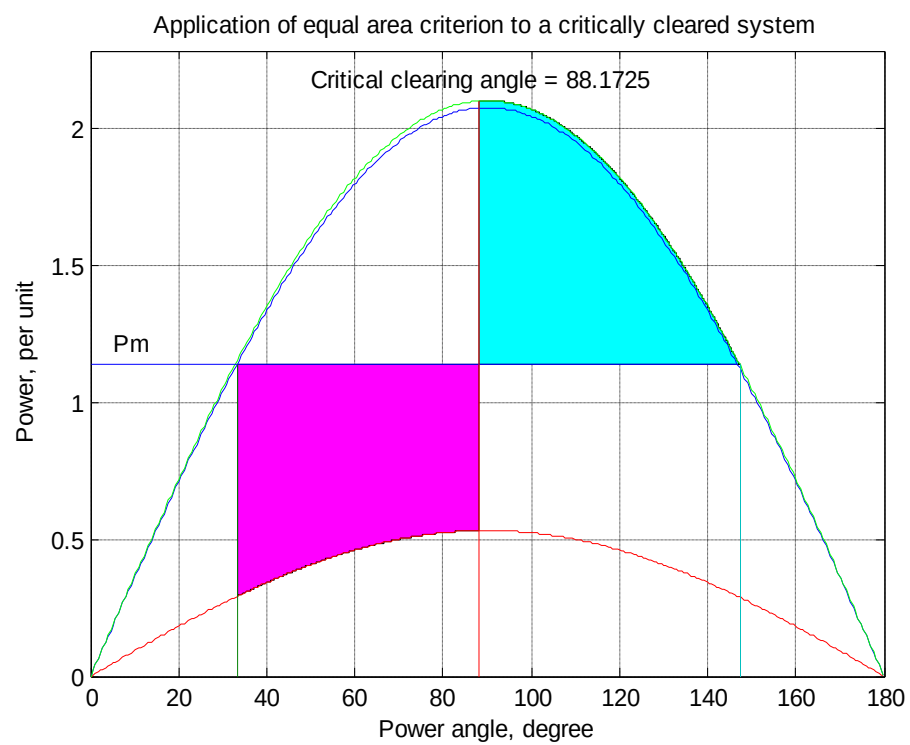


Gambar 74. Tampilan sudut rotor semua pembangkit penetrasi PLTB Sidrap dan Jenepono

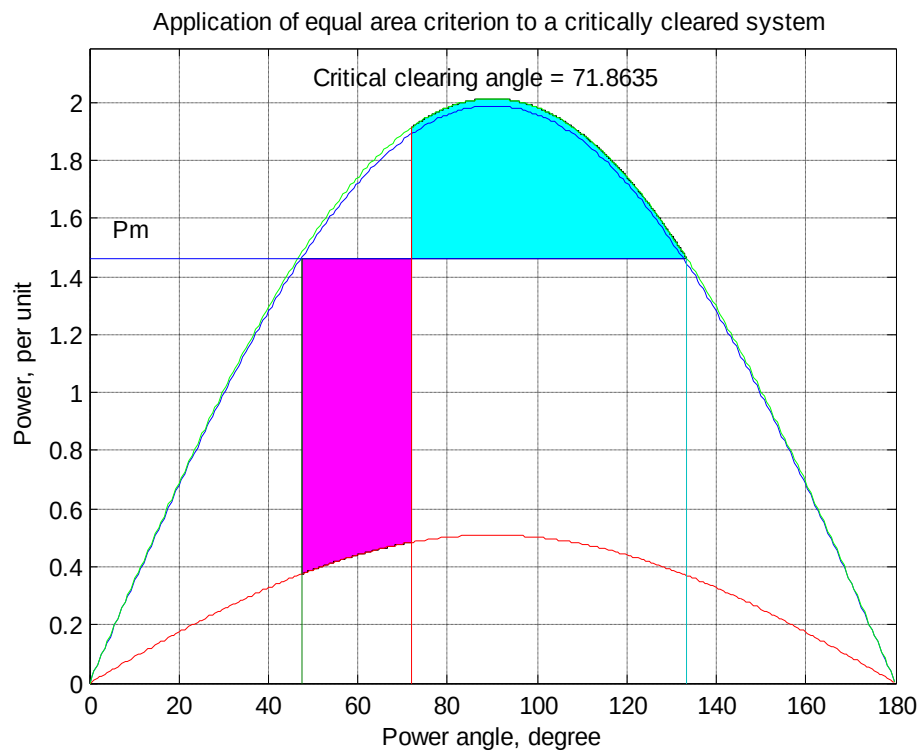
Selama kondisi beban normal dan tidak ada injeksi sidrap dan jenepono PLTB, menggunakan masing-masing fungsi kesalahan (P_m , E , V , X_1 , X_2 , dan X_3), nilai ayunan sudut maksimum diperoleh, dan nilai CCT adalah 111,91, sehingga dapat terwakili pada Gambar 74



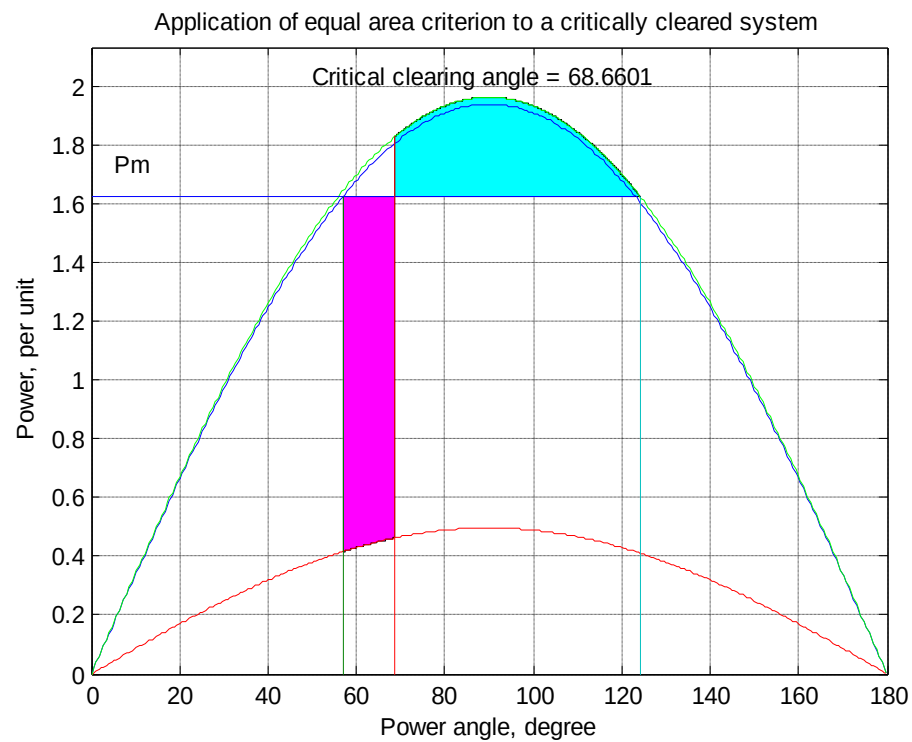
Gambar 75. Kurva equal area criterion pada beban normal



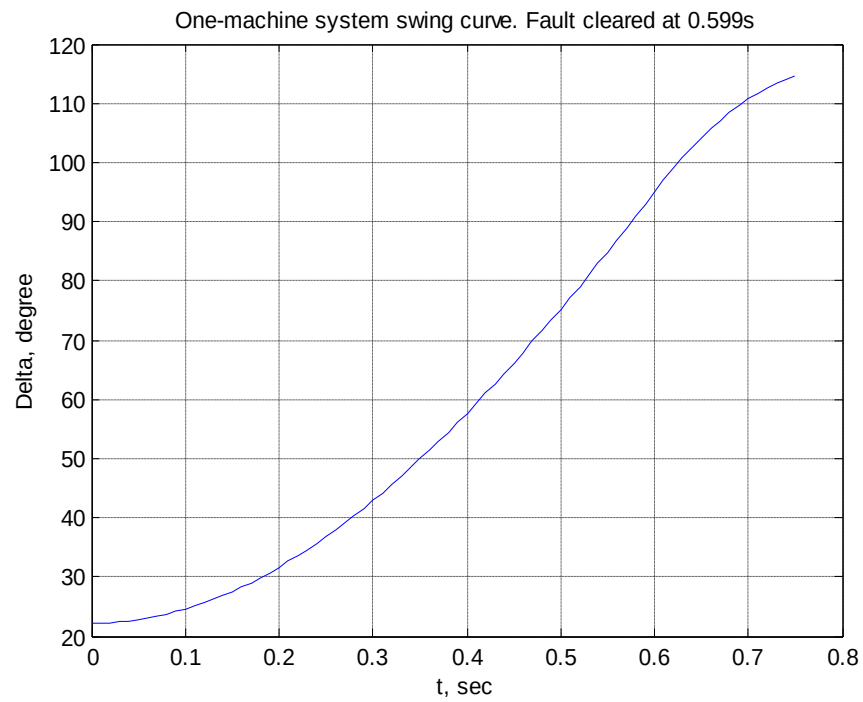
Gambar 76. Kurva equal area criterion pada kondisi beban 40%



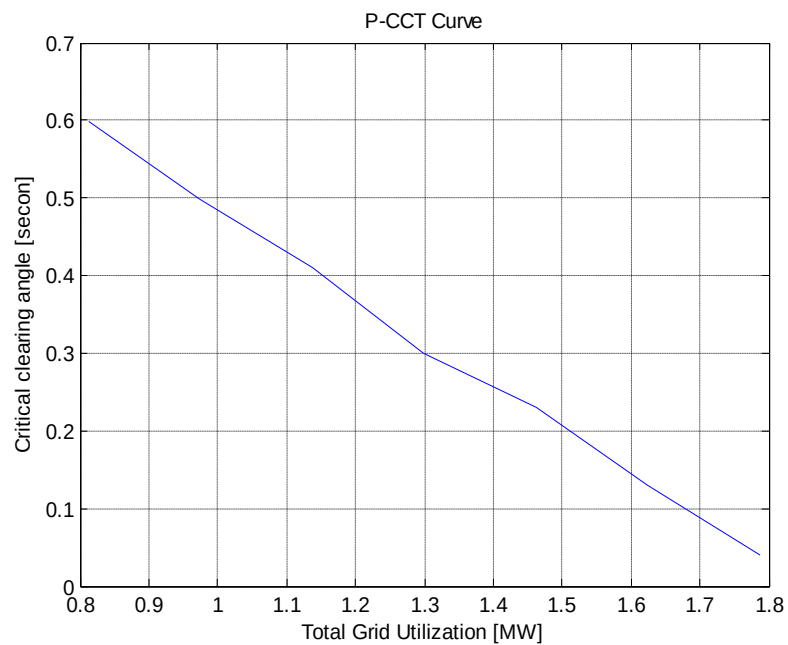
Gambar 77. Kurva equal area criterion pada kondisi beban 80%



Gambar 78. Kurva equal area criterion pada kondisi beban 100%



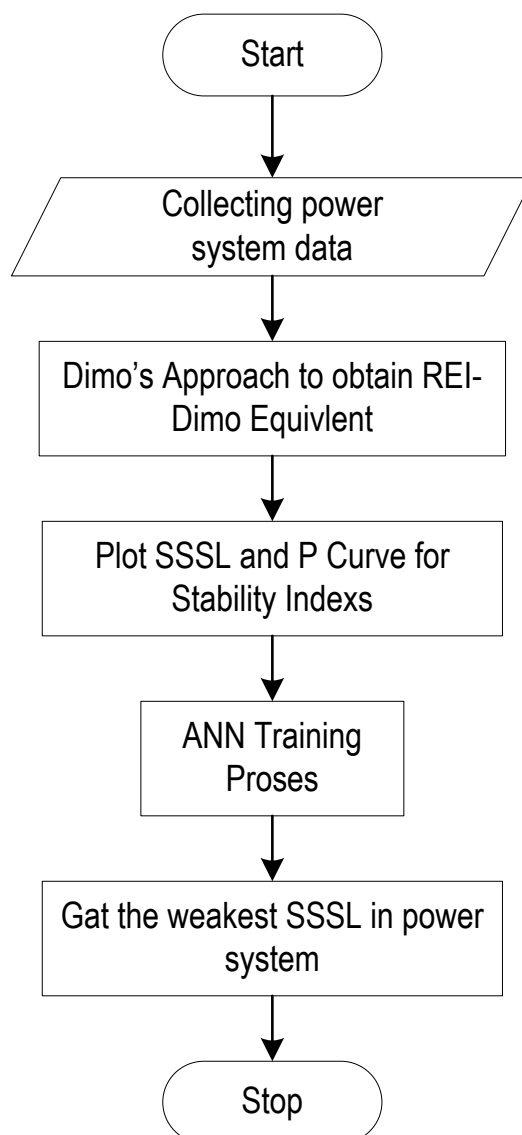
Gambar 79. Kurva swing mesin sinkron



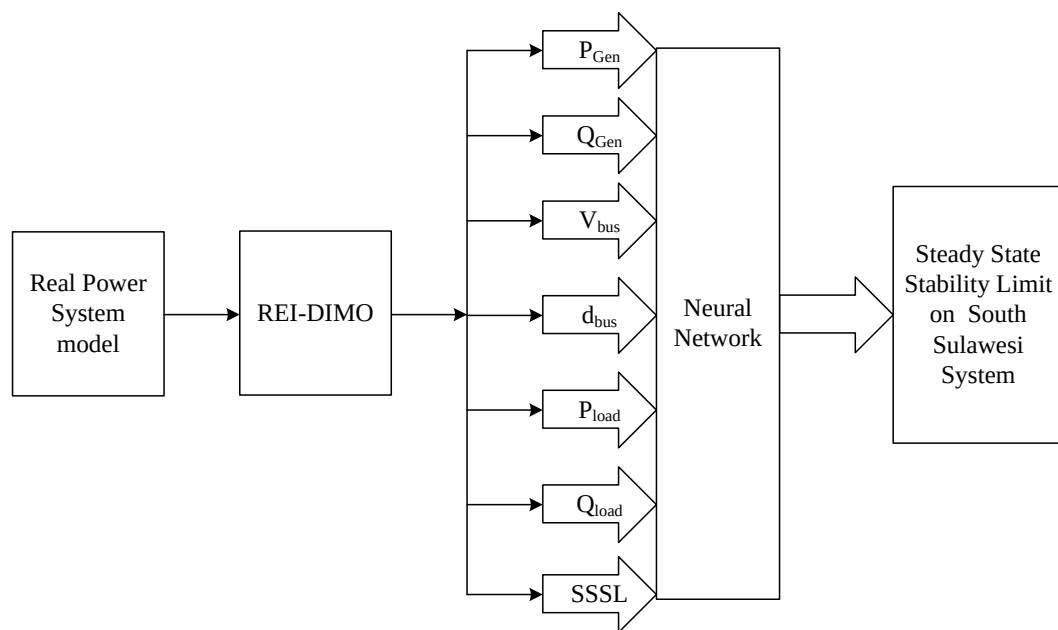
Gambar 80. Kurva CCT terhadap daya

3. Performansi SSSL menggunakan rei-dimo dan ANN

Dalam penelitian ini menggunakan model jaringan saraf tiruan (JST) untuk menilai batas stabilitas dalam sistem Sulawesi Selatan karena penetrasi turbin angin. Model JST dalam menilai membutuhkan praktik untuk mempelajari antara jumlah input yang merupakan nilai yang akan diberikan pada output.



Gambar 81. *Algorithm of Simulation*



Gambar 82. Skema penelitian

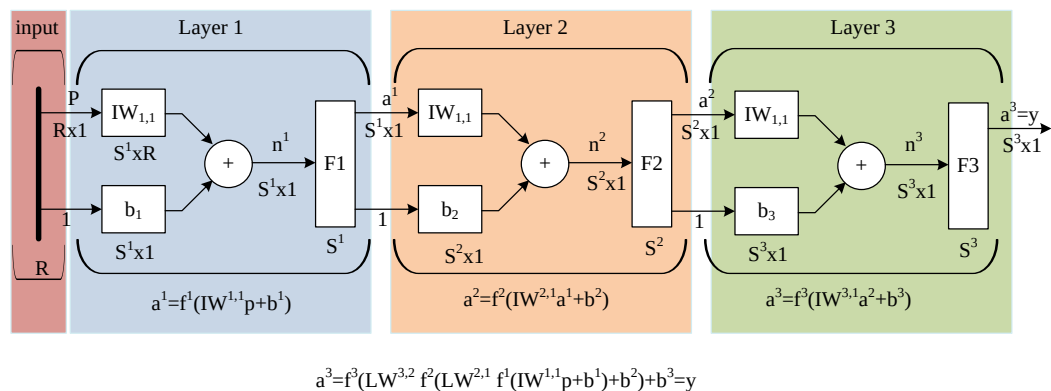
Setelah mencoba banyak kombinasi dari jumlah lapisan tersembunyi, jumlah neuron di lapisan tersembunyi dan fungsi transfer yang berbeda untuk neuron di lapisan tersembunyi dan output, arsitektur yang cocok untuk JST telah tiba. Arsitektur, menemukan yang paling cocok, memiliki 81 input di lapisan input, dua lapisan tersembunyi - satu dengan 40 neuron dan yang lainnya dengan 20 neuron. Dalam Gambar 71 adalah arsitektur yang digunakan untuk JST, ada input dan tiga lapisan sebagai berikut:

Table 27. Hasil simulasi Rei-Dimo

P_{Gen}	Q_{gen}	Voltage	Load Center	P_{load}	Q_{load}	SSSL
1336.226	269.003	1.0615	-0.2915	1650.994	794.902	-13.9422
1352.448	272.938	0.9831	-0.0845	1644.571	793.792	-13.9395
1368.696	276.576	0.9831	-0.0845	1661.556	800.19	-13.9171
1384.944	280.214	0.9831	-0.0845	1678.569	806.786	-13.8946
1401.192	283.852	0.9831	-0.0845	1695.607	813.582	-13.8718
1417.404	287.409	0.9831	-0.0845	1712.673	820.58	-13.8489
1433.688	291.128	0.9831	-0.0845	1729.765	827.78	-13.8258
1449.936	294.766	0.9831	-0.0845	1746.884	835.184	-13.8025
1466.184	298.404	0.9831	-0.0845	1764.031	842.793	-13.7791
1482.432	302.042	0.9831	-0.0845	1781.206	850.608	-13.7554
1498.608	305.608	0.9831	-0.0845	1798.408	858.63	-13.7316
1514.928	309.318	0.9831	-0.0845	1815.639	866.862	-13.7077
1531.176	312.956	0.9831	-0.0845	1832.898	875.303	-13.6835
1547.424	316.594	0.9831	-0.0845	1850.185	883.957	-13.6591
1563.672	320.232	0.9831	-0.0845	1867.502	892.823	-13.6346
1579.902	323.807	0.9831	-0.0845	1884.848	901.904	-13.6098
1596.168	327.508	0.9831	-0.0845	1902.223	911.002	-13.5849
1612.416	331.146	0.9831	-0.0845	1919.629	920.715	-13.5598
1628.664	334.784	0.9831	-0.0845	1937.064	930.448	-13.5344
1644.912	338.422	0.9831	-0.0845	1954.53	940.402	-13.5089
1661.106	342.006	0.9831	-0.0845	1972.027	950.578	-13.4832
1677.408	345.698	0.9831	-0.0845	1989.555	960.978	-13.4573
1693.656	349.336	0.9831	-0.0845	2007.114	971.603	-13.4311
1709.904	352.974	0.9831	-0.0845	2024.706	982.456	-13.4048
1726.152	356.612	0.9831	-0.0845	2042.329	993.538	-13.3782

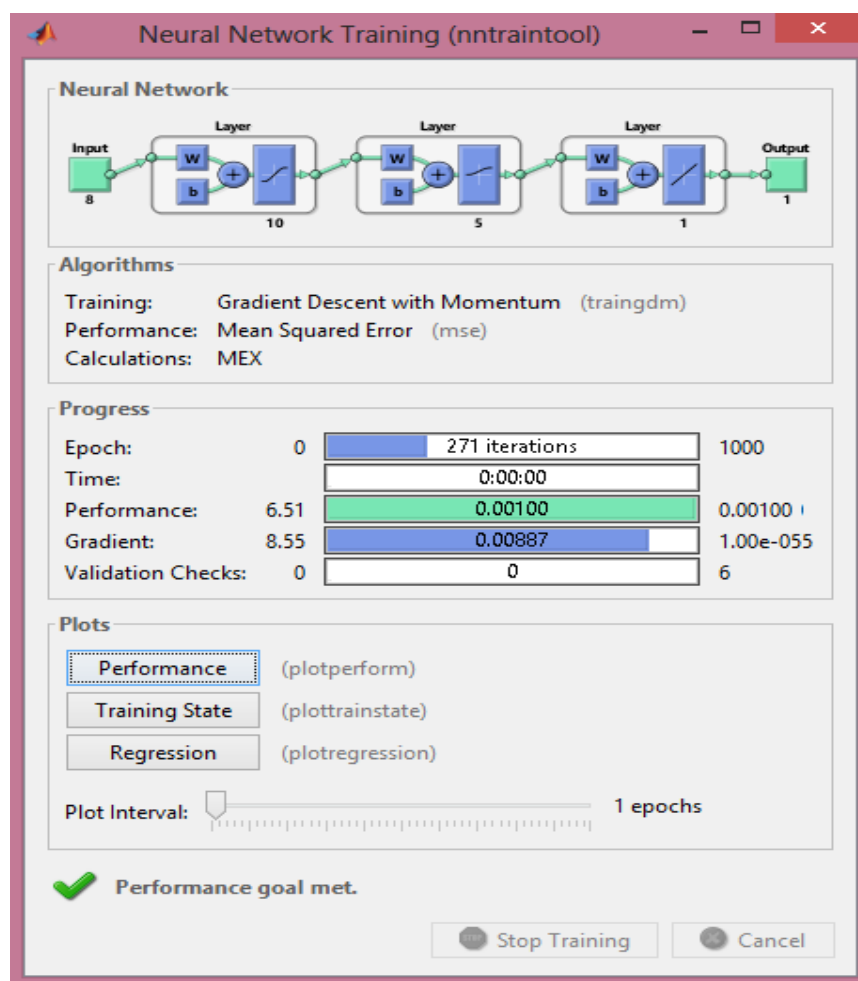
1742.004	360.205	0.9831	-0.0845	2059.985	1004.851	-13.3515
1758.648	363.888	0.9831	-0.0845	2077.674	1016.397	-13.3245
1774.896	367.526	0.9831	-0.0845	2095.396	1028.177	-13.2973
1791.144	371.164	0.9831	-0.0845	2113.151	1040.193	-13.2699
1807.392	374.802	0.9831	-0.0845	2130.941	1052.448	-13.2422
1823.604	378.404	0.9831	-0.0845	2148.765	1064.944	-13.2144
1839.888	382.078	0.9831	-0.0845	2166.624	1077.682	-13.1863
1856.136	385.716	0.9831	-0.0845	2184.518	1090.664	-13.1508
1888.632	392.992	0.9831	-0.0845	2220.415	1117.372	-13.1006
1904.808	396.603	0.9831	-0.0845	2238.418	1131.102	-13.0716
1921.128	400.268	0.9831	-0.0845	2256.458	1145.085	-13.0423
1937.376	403.906	0.9831	-0.0845	2274.535	1159.324	-13.0128
1953.624	407.544	0.9831	-0.0845	2292.651	1173.822	-13.0121
1969.872	411.182	0.9831	-0.0845	2310.805	1188.508	-13.0103

REI-Dimo telah mengurangi model berdasarkan ukuran, hasil reduksi digunakan sebagai Steady-State Stability Artificial Neural Network (SSSANN) input sesuai dengan jumlah neuron. Ada dua neuron output untuk memberikan estimasi input Steady-State Stability Limit (SSSL).



Gambar 83. Arsitek yang digunakan dalam ANN

Jumlah neuron tersembunyi ditentukan berdasarkan coba-coba. Secara umum, salah satu kelemahan dalam penerapan jaringan saraf dalam masalah sistem kelistrikan tergantung pada tegangan dan beban. Oleh karena itu, ketergantungan perlu diubah dalam proses pelatihan tentang parameter jaringan yang mengakibatkan perubahan perilaku sistem, yaitu adanya penetrasi turbin angin. Pola input SSSANN yang diusulkan dipilih sedemikian rupa untuk menentukan stabilitas sistem karena pencegah turbin angin.



Gambar 84. Optimized ANN Model in MATLAB

4. Hasil simulasi REI-Dimo ANN

Semua data diperoleh dari REI-Dimo yang meliputi: Pembangkit daya aktif (P Gen) daya reaktif (Q gen), tegangan semua bus, daya beban aktif dan daya beban reaktif dan tegangan di pusat beban (pusat beban V) indeks SSSL oleh REI -Dimo menjadi seluruh data oleh JST. Tabel ini adalah hasil dari nilai kesalahan antara turbin angin aktual dan JST. Hasil kesalahan terkecil adalah -0.2572, sedangkan hasil kesalahan terbesar adalah -2.6451.

Table 28. Nilai Perbandingan Actual ANN tanpa PLTB

Actual NN Error	Load MW NN	MW forecast (%)
-10.8039	-10.8317	-0.2572
-10.7713	-10.8240	-0.4893
-10.7384	-10.8191	-0.7516
-10.7051	-10.8160	-1.0360
-10.6716	-10.8141	-1.3352
-10.6378	-10.8130	-1.6468
-10.6036	-10.8125	-1.9700
-10.5691	-10.8125	-2.3028
-10.5343	-10.8129	-2.6451

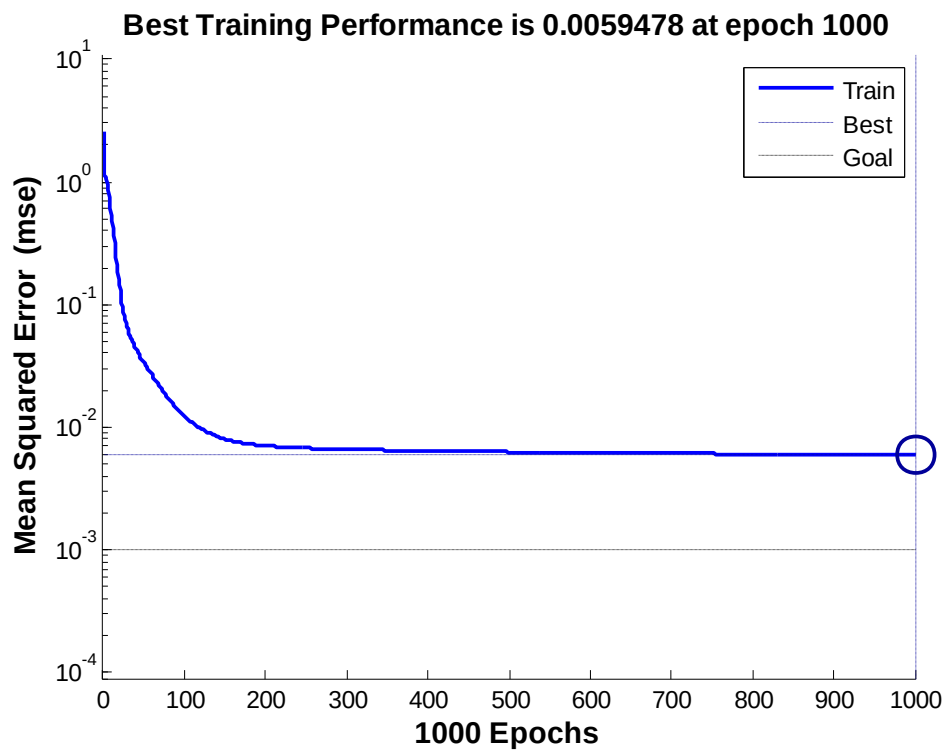
Untuk Tabel 28 adalah nilai kesalahan antara aktual dan JST menggunakan Turbin Angin, dengan nilai kesalahan terkecil adalah -0,1691 dan nilai kesalahan terbesar adalah -1,5098, sehingga dapat

dibandingkan antara penggunaan turbin angin dan sebelum menggunakan turbin angin ada perbedaan pada nilai terkecil adalah -0.0881 sedangkan nilai kesalahan terbesar memiliki perbedaan -1.1353. Hasil tes (SSSL) Penilaian turbin tidak ada angin.

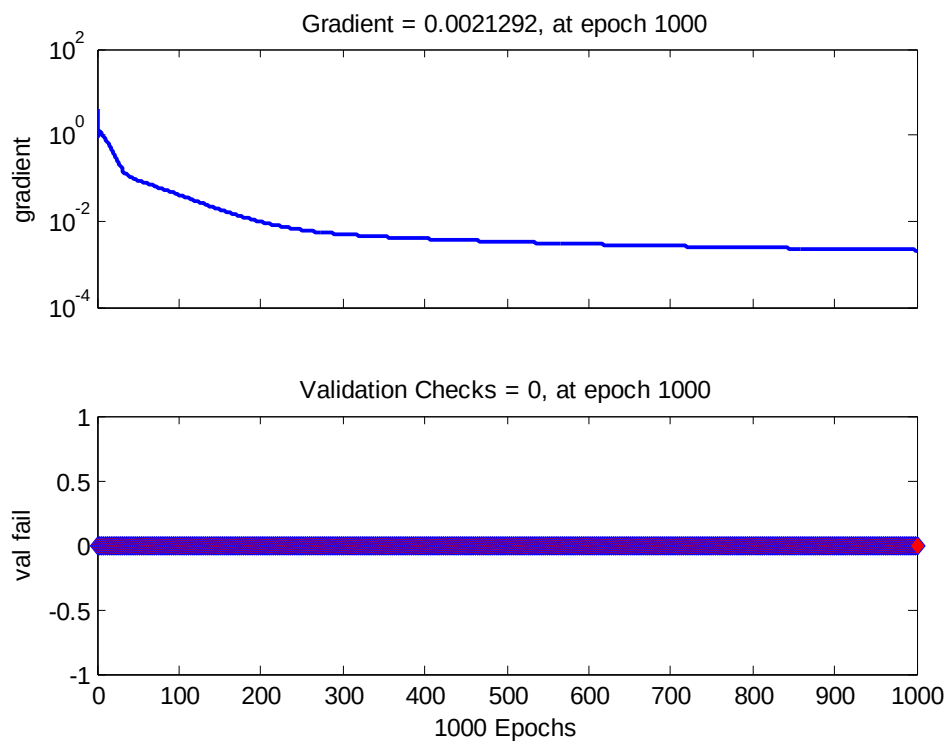
Table 29. Nilai Perbandingan Actual ANN menggunakan PLTB

Actual NN Error	Load MW NN	MW Forecast (%)
-13.4832	-13.5060	-0.1691
-13.4573	-13.4960	-0.2876
-13.4311	-13.4885	-0.4272
-13.4048	-13.4829	-0.5823
-13.3782	-13.4787	-0.7509
-13.3515	-13.4756	-0.9296
-13.3245	-13.4732	-1.1162
-13.2973	-13.4715	-1.3101
-13.2699	-13.4702	-1.5098

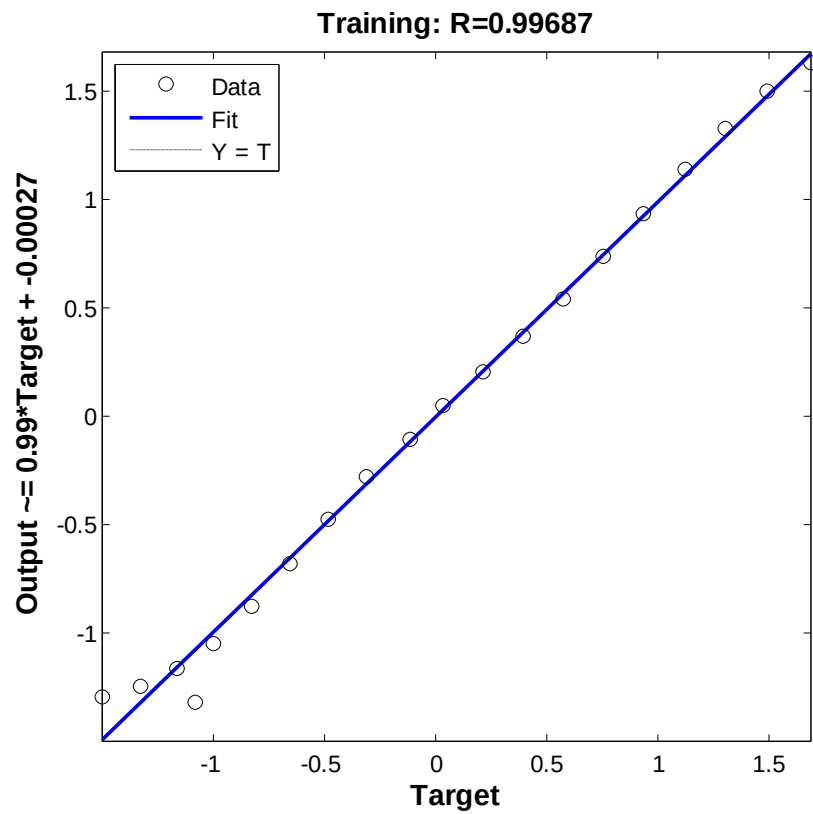
Pada Gambar 73, ini adalah hasil dari kinerja pelatihan terbaik yang telah dilakukan. Nilai kinerja pelatihan terbaik adalah 0,0059478 dengan waktu (pada zaman) adalah 1000. Pada Gambar 66 itu Gradien dan validasi dengan nilai gradien 0,0021292 dan pengecekan validasi adalah 0. Pada Gambar 75 itu adalah Output Pelatihan dengan nilai R sebesar 0,99687.



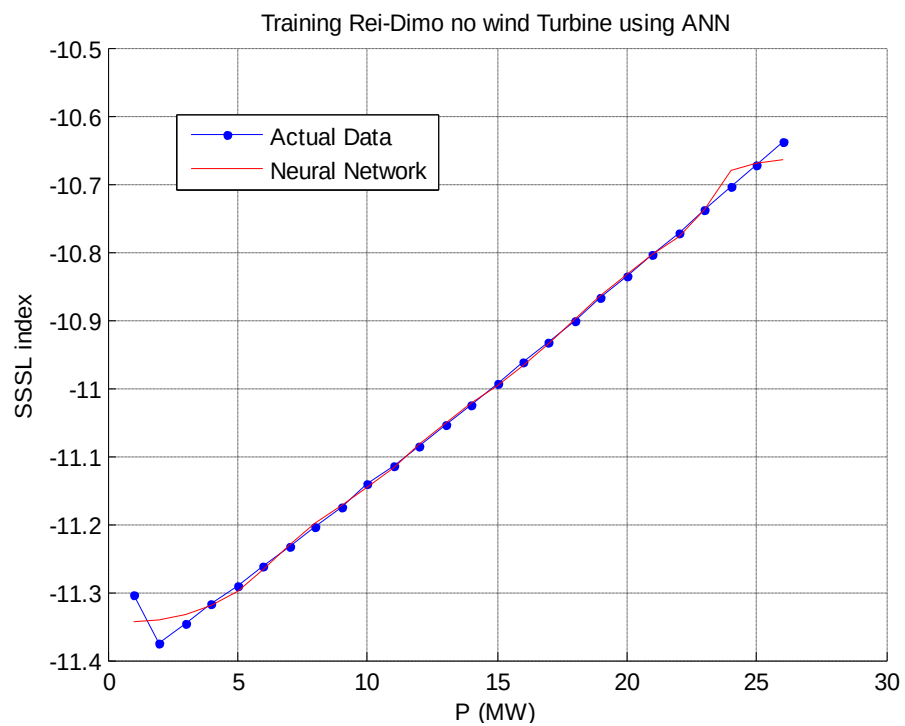
Gambar 85. Performa pelatihan terbaik



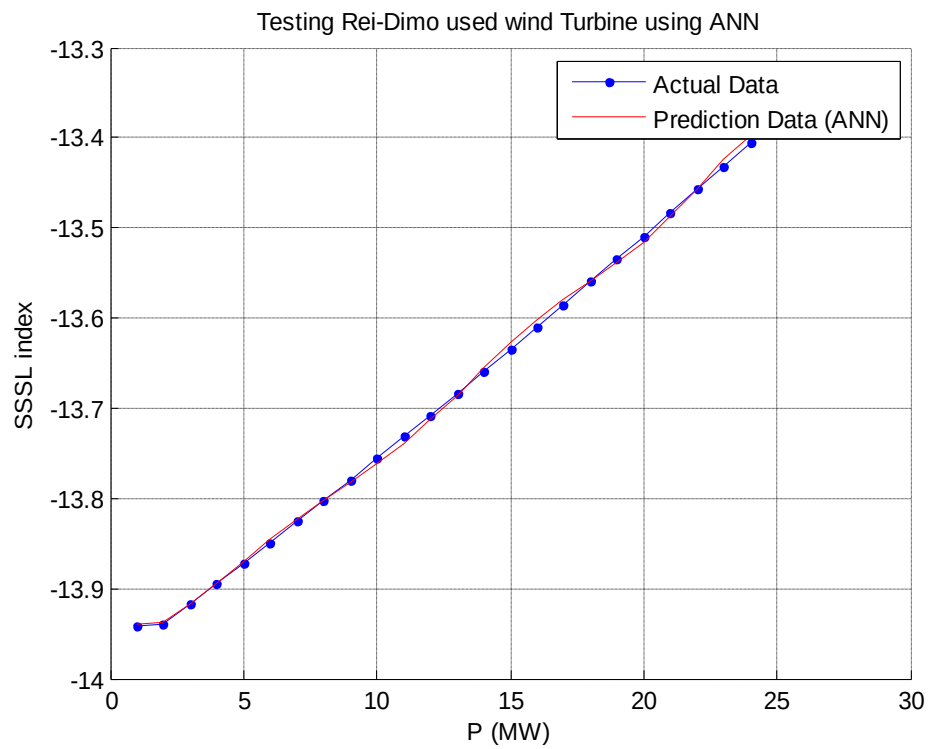
Gambar 86. Gradien dan validasi



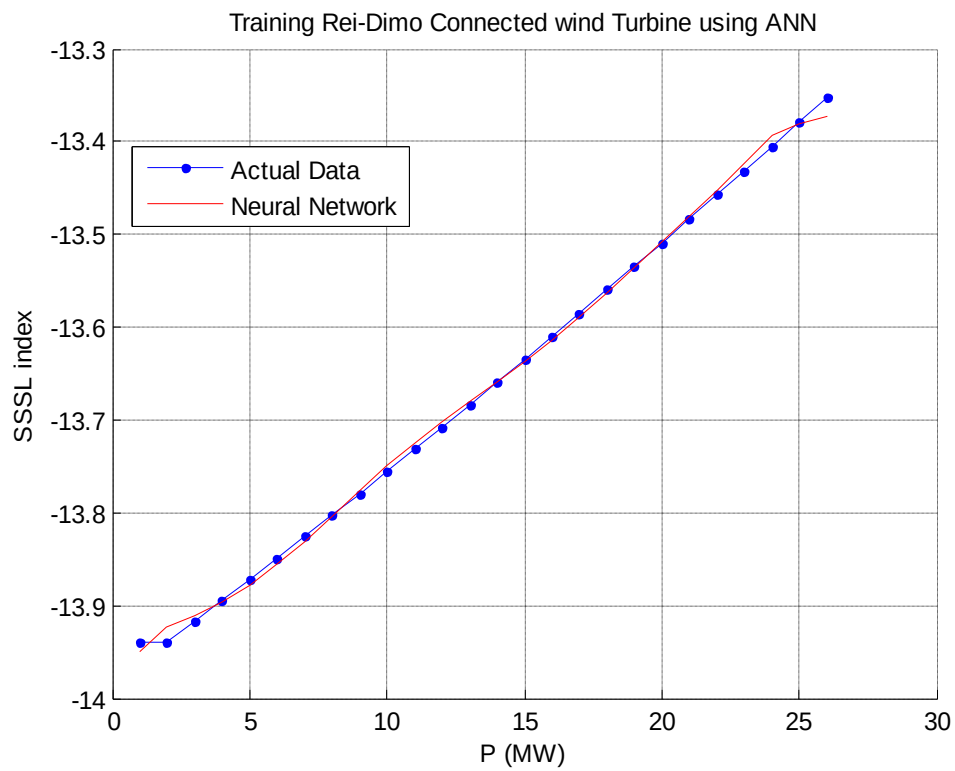
Gambar 87. Training Output



Gambar 88. Hasil Training Rei-Dimo tanpa Turbin Angin



Gambar 89. Hasil Training Rei-Dimo menggunakan Turbin Angin

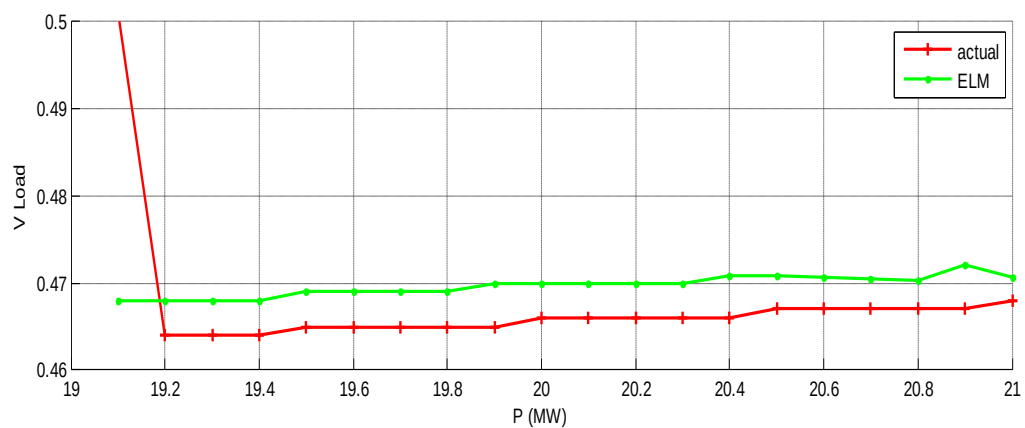


Gambar 90. Hasil training Rei-Dimo tanpa turbin angin

Table 30. Data testing from ELM

Actual	ELM	Error
0.4680	0.4680	0.0000
0.4680	0.4680	0.0000
0.4680	0.4680	0.0000
0.4680	0.4680	0.0000
0.4690	0.4690	0.0000
0.4690	0.4690	0.0000
0.4690	0.4690	0.0000
0.4690	0.4690	0.0000
0.4690	0.4690	0.0000
0.4700	0.4700	0.0000
0.4700	0.4700	0.0001
0.4700	0.4700	0.0001
0.4700	0.4699	0.0002
0.4700	0.4699	0.0002
0.4710	0.4708	0.0003
0.4710	0.4708	0.0005
0.4710	0.4707	0.0007
0.4710	0.4707	0.0014
0.4710	0.4703	0.0018
0.4730	0.4722	0.0020
0.4720	0.4708	0.0024

Dari hasil simulasi menggunakan ELM yang ditunjukkan pada Gambar 90 adalah nilai aktual dan nilai ELM, sehingga nilai kesalahan yang diperoleh pada Tabel 30 diperoleh. Nilai kesalahan terendah adalah 0,0001, sedangkan nilai kesalahan tertinggi adalah 0,0024. dari kecilnya nilai kesalahan yang didapat pada hasil ELM menunjukkan bahwa pembelajaran yang dilakukan oleh ELM mendekati keakuratan.



Gambar 91. Hasil ELM

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Penetrasi turbin angin di sidrap memiliki efek pada indeks stabilitas dengan nilai -14,7469. dan Jeneponto -15.1205. Ketika hibrida kedua PLTB adalah nilai indeks stabilitas -20,4699 dengan peningkatan besar.
2. Teknik untuk menentukan penetrasi turbin angin yang memasuki sistem mempengaruhi keadaan indeks stabilitas dengan menambahkan pola 5%, 15%, 30% dan 50%. Dalam situasi penetrasi sidrap PLTB nilai sudut CCA adalah 48.169 dengan nilai -0,7879 pada pembebanan 50%. Pada saat penetrasi Jeneponto dengan sudut CCA 48.169 dengan nilai -0.4796 pada pemuatan 50%. Saat Hibrida, nilai CCA adalah 48.169 dengan nilai -0,0926 pada pemuatan 50%.
3. Dalam studi kinerja batas stabilitas kondisi mapan menggunakan REI-Dimo. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perbandingan hasil Rei-Dimo dan JST memiliki nilai kesalahan terkecil yaitu 0,1691, nilai kesalahan terbesar adalah -1,5098. untuk penggunaan ELM nilai kesalahan terkecil adalah 0,0001 dan nilai kesalahan terbesar adalah 0,0024.

5. **Saran**

1. Diharapkan penelitian lebih lanjut dapat mempertimbangkan faktor ekonomi dalam operasi.
2. Penelitian di masa depan dapat melakukan penjadwalan ulang sementara beroperasi untuk mengantisipasi jika intermiten terjadi pada PLTB sehingga stabilitas sistem dapat dipertahankan sesuai dengan batas yang diizinkan.
3. Kinerja indeks stabilitas sebelum dan sesudah penetrasi PLTB diketahui mengantisipasi osilasi sistem. Studi selanjutnya dapat membandingkan dengan energi lain yang terintegrasi seperti PV.

DAFTAR PUSTAKA

- ARIEF, A. & NAPPU, M. B. Voltage drop simulation at Southern Sulawesi power system considering composite load model. 2016 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), 19-20 Oct. 2016 2016. 169-172.
- ALMASABI, S., SULAEMAN, S., NGUYEN, N. & MITRA, J. Cost benefit analysis for wind power penetration. 2017 North American Power Symposium (NAPS), 17-19 Sept. 2017 2017. 1-6.
- AJJARAPU, V. 2006. Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control. *Springer Iowa State University Ames, Iowa, 50011 U.S.A.*
- CÉSPEDES, M., BEECHNER, T., XING, L. & SUN, J. Stabilization of constant-power loads by passive impedance damping. 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 21-25 Feb. 2010 2010. 2174-2180.
- CHAIAMARIT, K. & NUCHPRAYOON, S. Economic dispatch solution considering demand and wind speed uncertainties based on Newton's method. 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 8-11 Dec. 2013 2013. 1-6.
- DJALAL, M. R., IMRAN, A. & ROBANDI, I. Optimal placement and tuning power system stabilizer using Participation Factor and Imperialist Competitive Algorithm in 150 kV South of Sulawesi system. 2015 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 20-21 May 2015 2015. 147-152.
- DJEMAI, N. & BOUKTIR, T. 2008. Impact of Wind Power on the Angular Stability of a Power System. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 7.
- DU, L. & DENG, Q. Impact of Wind Power and Photovoltaic Cell Power on Power System Stability Based on L Index. 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 27-29 March 2012 2012. 1-4.
- GAUTAM, D., VITTAL, V. & HARBOUR, T. Impact of increased penetration of DFIG based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems. IEEE PES General Meeting, 25-29 July 2010 2010. 1-1.

- ARIEF, A. & NAPPU, M. B. Voltage drop simulation at Southern Sulawesi power system considering composite load model. 2016 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), 19-20 Oct. 2016 2016. 169-172.
- GUNADIN, I. C., ABDILLAH, M., SOEPRIJANTO, A. & PENANGSANG, O. 2013. Steady-State Stability Assessment Using Neural Network Based on Network Equivalent. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 9, 411-422.
- GUNADIN, I., ABDILLAH, M., SOEPRIJANTO, A. & PENANGSANG, O. 2012. Determination of Steady State Stability Margin Using Extreme Learning Machine. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 7.
- GUNADIN, I., SAID, S. & IRSAN, M. 2016. *Determination of stability index of electrical power system using REI-Dimo methods*.
- GUNADIN, I. C., ABDILLAH, M., SOEPRIJANTO, A. & PENANGSANG, O. 2013. Steady-State Stability Assessment Using Neural Network Based on Network Equivalent. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 9, 411-422.
- HOSSAIN, M. J., POTA, H. R., MAHMUD, M. A. & RAMOS, R. A. 2012. Investigation of the Impacts of Large-Scale Wind Power Penetration on the Angle and Voltage Stability of Power Systems. *IEEE Systems Journal*, 6, 76-84.
- ROHDIAN, M. F. 2016. Potensi Tenaga Angin Di Indonesia Untuk Membangkitkan PLTB. *Gajah Mada Oil & Gas Club*, Accessed 29 Agustus 2017.
- KABIR, S., KRAUSE, O., BANSAL, R. & RAVISHANKER, J. Dynamic voltage stability analysis of sub-transmission networks with large-scale photovoltaic systems. 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, 27-31 July 2014 2014. 1-5.
- KHATTARA, A., ABOUBOU, A., BAHRI, M., BECHERIF, M., AYAD, M. Y. & AKHRIF, O. Influence of wind turbine location in the optimization of the economic dispatch using genetic algorithm method. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 13-17 May 2013 2013. 1498-1503.
- KUNDUR, P. 1994. *POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL McGraw-Hill Inc. USA*.

- KAYAL, P. & CHANDA, C. K. 2013. Placement of wind and solar based DGs in distribution system for power loss minimization and voltage stability improvement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53, 795-809.
- KUNDUR, P. 1994. POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL *McGraw-Hill Inc. USA*.
- LONDERO, R. R., AFFONSO, C. D. M. & VIEIRA, J. P. A. 2017. Effects of operational limits of DFIG wind turbines on long-term voltage stability studies. *Electric Power Systems Research*, 142, 134-140.
- MA, S., GENG, H., LIU, L., YANG, G. & PAL, B. C. 2018. Grid-Synchronization Stability Improvement of Large Scale Wind Farm During Severe Grid Fault. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33, 216-226.
- SCHMALL, J., HUANG, S. H., YING, L., BILLO, J., CONTO, J. & YANG, Z. Voltage stability of large-scale wind plants integrated in weak networks: An ERCOT case study. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 26-30 July 2015 2015. 1-5.
- SISWANTO, A. 2019. *Steady State Stability Limit Assessment when Wind Turbine Penetrated to the Systems using REI Approach*.
- WIHARTADY, H., HUTAHAEAN, R., POPOV, M., SLUIS, L. V. D. & TERZIJA, V. Dynamic out-of-step simulation and detection in 150 kV South Sulawesi system. 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 23-27 Sept. 2012 2012. 833-837.
- WEEKLY, E. 2017. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap 75 MW. *IKPT, WIJAYA KARYA, JASA MARGA, CIREBON ELECTRIC POWER dan NINDYA KARYA*, Nomor 57.
- YIGONG, Z., JUNCHUAN, J., WEIGUO, L., DAWEI, W. & JIN, L. Steady state characteristic analysis and stability assessment of doubly fed induction generator based wind power generation System. 2010 International Conference on Power System Technology, 24-28 Oct. 2010 2010. 1-5.
- YULI ASMI RAHMAN, A. S., AND IRWAN MAHMUDI 2018. Stability Issues in Presence Variable Distributed Generation Into Radial Distribution Network *International Conference on Industrial Electrical and Electronics (ICIEE)*

(RUPTL), R. U. P. T. L. tahun 2018-2027. Surat Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM),. *Nomor 1567 K/21/MEM/2018, 2018*