



TUGAS AKHIR - EE 184801

**ANALISA STABILITAS DINAMIK SISTEM KELISTRIKAN
KALIMANTAN 500 KV MENGGUNAKAN METODE
MODAL ANALYSIS DENGAN MEMPERTIMBANGKAN
BEBAN DI SABAH / INTERKONEKSI DENGAN SABAH**

Zikra Faradis

NRP 07111140000025

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2019



FINAL PROJECT - EE 184801

***DYNAMIC STABILITY ANALYSIS OF 500 KV
KALIMANTAN ELECTRICAL SYSTEM USING MODAL
ANALYSIS BY CONSIDERING LOADS IN SABAH /
INTERCONNECTION WITH SABAH***

Zikra Faradis

NRP 07111140000025

Supervisors

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2019

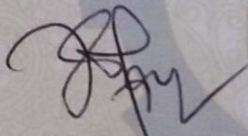
**ANALISA STABILITAS DINAMIK SISTEM
KELISTRIKAN KALIMANTAN 500 KV
MENGUNAKAN METODE MODAL ANALYSIS
DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BEBAN DI
SABAH / INTERKONEKSI DENGAN SABAH**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

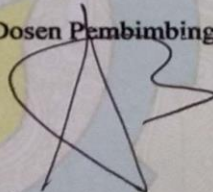
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
NIP. 197309271998031004

Dosen Pembimbing II



Ir. Sjamsjul Anam, M.T.
NIP. 196307251990031002



PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **“Analisa Stabilitas Dinamik Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV Menggunakan Metode Modal Analysis dengan Mempertimbangkan Beban di Sabah / Interkoneksi dengan Sabah”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2019



Zikra Faradis
07111140000025

Halaman sengaja dikosongkan

ABSTRAK

ANALISA STABILITAS DINAMIK SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN 500 KV MENGUNAKAN METODE MODAL ANALYSIS DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BEBAN DI SABAH / INTERKONEKSI DENGAN SABAH

Nama Mahasiswa : Zikra Faradis

Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.

Dosen Pembimbing II : Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

Abstrak :

Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) merupakan sebuah pedoman pengembangan sistem kelistrikan Indonesia untuk tujuan tertentu, seperti : tercapainya keandalan dan kualitas listrik yang semakin membaik, meningkatkan rasio elektrifikasi nasional, mengatasi kekurangan pasokan listrik dan lain-lain. Dengan adanya rencana pengembangan sistem kelistrikan, maka dibutuhkan suatu analisis untuk menentukan kelayakan sistem tersebut.

Pada tugas akhir ini akan dibahas stabilitas dinamik sistem kelistrikan Kalimantan 500 kv yang menghubungkan Kalimantan Barat, Kalimantan Tengah, Kalimantan Utara, Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan dengan mempertimbangkan beban di Sabah / interkoneksi dengan Sabah dengan menggunakan metode *Modal Analysis* untuk mendapatkan nilai *eigenvalue*. Nilai-nilai *eigenvalue* tersebut dapat dianalisis faktor mana saja yang dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Sehingga mendapat nilai *eigenvalue* yang stabil pada sistem kelistrikan Kalimantan dan dinyatakan layak dari segi *small-signal stability* .

Kata kunci : (*modal analysis, eigenvalue, small-signal stability*)

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

DYNAMIC STABILITY ANALYSIS OF 500 KV KALIMANTAN ELECTRICAL SYSTEM USING MODAL ANALYSIS BY CONSIDERING LOADS IN SABAH / INTERCONNECTION WITH SABAH

Student Name : Zikra Faradis
Supervisore I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M. Eng.
Supervisore II : Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

Abstract :

The Electricity Supply Business Plan (RUPTL) is a guideline for the development of Indonesia's electricity system for certain purposes, such as : achieving access and increasing electricity quality, increasing the national electrification ratio, increasing electricity supply and others. With the electricity system development plan, an analysis is needed to determine the feasibility system.

This final project will discuss the 500 kV Kalimantan electricity system that connects west Kalimantan, Central Kalimantan, North Kalimantan, East Kalimantan and South Kalimantan by discussing the load in Sabah / interconnection with Sabah by using modal analysis method to obtain eigenvalue. Eigenvalue values can be analyzed which factors can cause system instability. A stable eigenvalue is obtained on the Kalimantan electricity system and is declared feasible in term of small signal stability.

Key Word : *(modal analysis, eigenvalue, small-signal stability)*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Analisa Stabilitas Dinamik Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV Menggunakan Metode *Modal Analysis* dengan Mempertimbangkan Beban di Sabah / Interkoneksi dengan Sabah.**

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini.
2. (Alm) Nurjarah selaku ibu dari penulis yang selalu memberikan kasih, perhatian, doa, harapan dan dukungan kepada penulis baik dukungan moral maupun dukungan finansial serta motivasi kepada penulis selama masa perkuliahan sehingga penulis terus semangat untuk menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini. Semoga semua harapan ibu dari penulis dapat penulis lakukan danenuhi dengan baik.
3. Afridal selaku ayah dari penulis yang selalu mengingatkan, memotivasi dan mendukung penulis untuk menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini.
4. Keluarga penulis baik dari keluarga (alm) ibu dan keluarga ayah dari penulis yang terus mendoakan dan mendukung penulis.
5. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. dan Ir. Sjamsjul Anam, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
6. Rony Yusuf Rahmatullah selaku teman seperjuangan tugas akhir dari angkatan e51 yang terus mengingatkan dan membantu dalam penyelesaian tugas akhi ini.
7. Memet dari angkatan e53 yang telah sangat banyak membantu dalam penyusunan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu besar harapan penulis untuk menerima sara dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhi ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Surabaya, Desember 2019

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1. Latar Belakang.....	1
2. Perumusan Masalah	1
3. Tujuan	1
4. Batasan Masalah	2
5. Metodologi	2
6. Sistematika Penulisan	3
7. Relevansi.....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga	5
2.3 Kestabilan Sudut Rotor.....	6
2.4 Small Signal Stability	8
2.5 Analisis Modal	11
2.5.1 State Space.....	11
2.5.2 Titik Ekuilibrium.....	12
2.5.3 Linierisasi	13
2.5.4 Eigenvalue	14
2.5.5 Eigenvector	14
2.5.6 Eigenvalue dan Kestabilan	15
2.5.7 Eigenvector Kanan-Mode Shape.....	16
2.5.8 Participation Factor.....	16
BAB 3 PERENCANAAN SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN	19
3.1 Sistem Kelistrikan Kalimantan dengan <i>backbone</i> 500 kV AC.....	19
3.1.1 Data Sistem Kelistrikan Kalimantan Backbone 500 kV AC	21
3.1.2 Data Kelistrikan Kalimantan Barat.....	22
3.1.3 Data Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara.....	24

3.1.4 Data Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah	28
3.2 Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC yang Terhubung dengan Beban Sabah.....	32
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan Kalimantan	33
4.2 Modal Analysis pada DigSILENT Power Factory.....	34
4.2.1 Memulai Modal Analysis	34
4.2.2 Basic Command pada Modal Analysis.....	35
4.2.3 Pengaturan Lanjutan	35
4.3 Modal Analysis Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2022.	36
4.3.1 Eigenvalue Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2022.	36
4.3.2 Mode Shape Eigenvalue (Mode 242).....	38
4.3.3 Participation Factor (Mode 242).....	39
4.3.4 Mode Shape Eigenvalue (Mode 243).....	40
4.3.5 Participation Factor (Mode 243).....	41
4.4 Modal Analysis Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2025.	43
4.4.1 Eigenvalue Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2025.	43
4.4.2 Mode Shape Eigenvalue (Mode 291).....	46
4.4.3 Participation Factor (Mode 291).....	47
4.4.4 Mode Shape Eigenvalue (Mode 290).....	49
4.4.5 Participation Factor (Mode 290).....	50
4.5 Modal Analysis Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2027.	52
4.5.1 Eigenvalue Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2027.	52
4.5.2 Mode Shape Eigenvalue (Mode 333).....	54
4.5.3 Participation Factor (Mode 333).....	56
4.5.4 Mode Shape Eigenvalue (Mode 334).....	58
4.5.5 Participation Factor (Mode 334).....	60
4.6 Modal Analysis Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2050.	62
4.6.1 Eigenvalue Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2050.	62
4.6.2 Mode Shape Eigenvalue (Mode 335).....	67
4.6.3 Participation Factor (Mode 335).....	68
4.6.4 Mode Shape Eigenvalue (Mode 336).....	69
4.6.5 Participation Factor (Mode 336).....	71
BAB 5 PENUTUP	73
5.1 Kesimpulan	73
5.2 Saran.....	73

DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN	77
BIOGRAFI PENULIS	

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi Sistem Tenaga.....	6
Gambar 2.2 Sistem Stabil dengan Tegangan Konstan.....	9
Gambar 2.3 Non-Oscilatory Instability dengan Tegangan Konstan...	9
Gambar 2.4 Sistem Stabil dengan Kontrol Eksitasi.....	9
Gambar 2.5 Oscilatory Instability dengan Kontrol Eksitasi.....	10
Gambar 3.1 Skema Sistem Transmisi Kalimantan 500 kV AC.....	20
Gambar 3.2 Skema Sistem Trasn misi Kalimantan 500 kV AC dengan Sabah.....	32
Gambar 4.1 Toolbar Modal Analysis.....	34
Gambar 4.2 Plot Eigenvalue Kelistrikan Kalimantan Tahun 2022....	36
Gambar 4.3 Phasor Observeability δ Mode 242.....	38
Gambar 4.4 Plot Bar Participation Factor Mode 242.....	40
Gambar 4.5 Phasor Observeability δ Mode 243.....	41
Gambar 4.6 Plot Bar Participation Factor Mode 243.....	43
Gambar 4.7 Plot Eigenvalue Kelistrikan Kalimantan Tahun 2025....	44
Gambar 4.8 Phasor Observeability δ Mode 291.....	47
Gambar 4.9 Plot Bar Participation Factor Mode 291.....	48
Gambar 4.10 Phasor Observeability δ Mode 290.....	50
Gambar 4.11 Plot Bar Participation Factor Mode 290.....	51
Gambar 4.12 Plot Eigenvalue Kelistrikan Kalimantan Tahun 2027...	52
Gambar 4.13 Phasor Observeability δ Mode 333.....	56
Gambar 4.14 Plot Bar Participation Factor Mode 333.....	58
Gambar 4.15 Phasor Observeability δ Mode 334.....	60
Gambar 4.16 Plot Bar Participation Factor Mode 334.....	62
Gambar 4.17 Plot Eigenvalue Kelistrikan Kalimantan Tahun 2050...	63
Gambar 4.18 Phasor Observeability δ Mode 335.....	68
Gambar 4.19 Plot Bar Participation Factor Mode 335.....	69
Gambar 4.20 Phasor Observeability δ Mode 336.....	70
Gambar 4.21 Plot Bar Participation Factor Mode 336.....	72

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Kabel Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC....	21
Tabel 3.2 Data Transformer Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC.....	21
Tabel 3.3 Data Beban Kelistrikan Kalimantan Barat.....	22
Tabel 3.4 Data Pembangkitan Terpasang Kalimantan Barat.....	24
Tabel 3.5 Data Penambahan Pembangkitan Tetap Kalimantan Barat.	24
Tabel 3.6 Data Penambahan Pembangkit Variabel Kalimantan Barat .	24
Tabel 3.7 Data Beban Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara	25
Tabel 3.8 Data Pembangkitan Terpasang Kalimantan Timur dan Utara	27
Tabel 3.9 Data Penambahan Pembangkitan Tetap Kalimantan Timur dan Utara.....	27
Tabel 3.10 Data Penambahan Pembangkit Variabel Kalimantan Timur dan Utara.....	27
Tabel 3.11 Data Beban Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah.....	28
Tabel 3.12 Data Pembangkitan Terpasang Kalimantan Selatan dan Tengah.....	30
Tabel 3.13 Data Penambahan Pembangkitan Tetap Kalimantan Selatan dan Tengah.....	30
Tabel 3.14 Data Penambahan Pembangkit Variabel Kalimantan Selatan dan Tengah.....	31
Tabel 3.15 Data Beban Sabah.....	31
Tabel 4.1 Eigenvalue dengan Damping Ratio dibawah 10% Tahun 2022.....	37
Tabel 4.2 Observeability δ Mode 242.....	38
Tabel 4.3 Participation Factor δ Mode 242.....	39
Tabel 4.4 Participation Factor ω Mode 242.....	39
Tabel 4.5 Observeability δ Mode 243.....	40
Tabel 4.6 Participation Factor δ Mode 243.....	42
Tabel 4.7 Participation Factor ω Mode 243.....	42

Tabel 4.8 Eigenvalue dengan Damping Ratio dibawah 10% Tahun 2025.....	44
Tabel 4.9 Observeability δ Mode 291.....	46
Tabel 4.10 Participation Factor δ Mode 291.....	47
Tabel 4.11 Participation Factor ω Mode 291.....	48
Tabel 4.12 Observeability δ Mode 290.....	49
Tabel 4.13 Participation Factor δ Mode 290.....	50
Tabel 4.14 Participation Factor ω Mode 290.....	51
Tabel 4.15 Eigenvalue dengan Damping Ratio dibawah 10% Tahun 2027.....	53
Tabel 4.16 Observeability δ Mode 333.....	55
Tabel 4.17 Participation Factor δ Mode 333.....	56
Tabel 4.18 Participation Factor ω Mode 333.....	57
Tabel 4.19 Observeability δ Mode 334.....	58
Tabel 4.20 Participation Factor δ Mode 334.....	60
Tabel 4.21 Participation Factor ω Mode 334.....	61
Tabel 4.22 Eigenvalue dengan Damping Ratio dibawah 10% Tahun 2050.....	63
Tabel 4.23 Observeability δ Mode 335.....	67
Tabel 4.34 Participation Factor δ Mode 335.....	68
Tabel 4.25 Participation Factor ω Mode 335.....	68
Tabel 4.26 Observeability δ Mode 336.....	70
Tabel 4.27 Participation Factor δ Mode 336.....	71
Tabel 4.28 Participation Factor ω Mode 336.....	71

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berdasarkan Badan Pusat Statistik laju pertumbuhan penduduk secara umum di Kalimantan terus meningkat dari tahun ke tahun. Dengan meningkatnya laju pertumbuhan penduduk maka meningkat pula kebutuhan energi listrik meskipun kebutuhan energi listrik di Kalimantan saat ini masih rendah dibandingkan kebutuhan energi listrik di Jawa-Bali. Tentu saja dimasa mendatang kebutuhan energi listrik di Kalimantan akan meningkat.

Kalimantan merupakan penghasil batubara dan migas terbesar di Indonesia yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk pembangkit listrik. Pembangunan pembangkit listrik di Kalimantan sangatlah memungkinkan mengingat sumber energi yang melimpah namun pertumbuhan beban yang lambat dapat menyebabkan kerugian sehingga sebagian daya yang dibangkitkan harus disalurkan ke luar daerah sekitar Kalimantan seperti Sabah dengan menggunakan sistem kelistrikan Kalimantan 500 kv. Interkoneksi dengan beban yang ada di Sabah dengan beban-beban di Kalimantan sendiri tentunya tidak dapat terhindar dari gangguan-gangguan kecil maupun besar sehingga dapat mempengaruhi kualitas daya yang disalurkan. Oleh karena itu dibutuhkan studi *small-signal stability* menggunakan metode *modal analysis* untuk menentukan kelayakan sistem tersebut.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas di Tugas Akhir ini adalah :

8. Memodelkan sistem kelistrikan Kalimantan yang saling terinterkoneksi dengan menggunakan tegangan 500 kv.
9. Menganalisa kestabilan dinamik dengan menggunakan metode modal analysis.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah :

10. Melakukan pemodelan dan simulasi sistem kelistrikan Kalimantan 500 kv dengan mempertimbangkan beban di Sabah.
11. Mendapatkan dan menganalisis sistem kelistrikan Kalimantan berdasarkan nilai *eigenvalue* yang didapatkan dari analisis modal.
12. Mengetahui kestabilan dinamik sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2022, 2025, 2027 dan 2050.
13. Sebagai acuan untuk PT. PLN mengenai kelayakan sistem dari segi kestabilan dinamik.

Dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya yang mengambil topik serupa.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada Tugas Akhir ini adalah :

14. Sabah diasumsikan sebagai beban statis.
15. Nilai *eigenvalue* yang akan diperhatikan adalah *eigenvalue* dengan mode elektromagnetik dengan *damping ratio* dibawah 5%.
16. Analisis akan dilakukan pada tahun 2022, 2025, 2027 dan 2050.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

17. Studi Pustaka
Studi pustaka yang dilakukan yaitu mengenai *small-signal stability*. Pada tahap ini akan dicari literatur-literatur yang berhubungan dengan topic yang dibahas. Selanjutnya dilakukan kajian untuk mengetahui bagian-bagian yang diadopsi dan dikembangkan pada penelitian ini.
18. Pengumpulan Data
Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data yang dibutuhkan untuk pemodelan sistem kelistrikan Kalimantan. Data-data yang dibutuhkan adalah data beban, pembangkit dan peralatan.
19. Pemodelan Sistem

Pada tahap ini dilakukan pemodelan sistem berdasarkan data yang telah diperoleh ke dalam single line diagram dan dimodelkan dalam software digSILENT Power Factory. Pemodelan sistem tersebut digunakan untuk mensimulasikan analisis kestabilan.

20. Simulasi dan Analisis Kestabilan

Dari hasil simulasi menggunakan *modal analysis* didapatkan nilai *eigenvalue* yang selanjutnya dianalisis untuk menentukan kestabilan sistem.

21. Kesimpulan

Pada akhir penelitian ini akan ditarik kesimpulan berdasarkan analisis yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi.

Bab 2 : Kajian Pustaka

Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini.

Bab 3 : Perancangan Sistem Kelistrikan Kalimantan

Bab ini membahas sistem kelistrikan Kalimantan dan pengembangannya beserta data-data penunjang yang digunakan untuk penulisan Tugas Akhir.

Bab 4 : Simulasi dan Analisis

Bab ini membahas hasil simulasi dengan memperhatikan nilai *eigenvalue* yang didapatkan dan melihat *observeability* atau *mode shape* dan *participation factor* dari *eigenvalue* yang didapat.

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan memberi manfaat sebagai berikut :

22. Sebagai acuan untuk PT. PLN mengenai kelayakan sistem kelistrikan Kalimantan dari sisi kestabilan *small-signal stability*.
23. Dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya yang hendak mengambil topik serupa.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

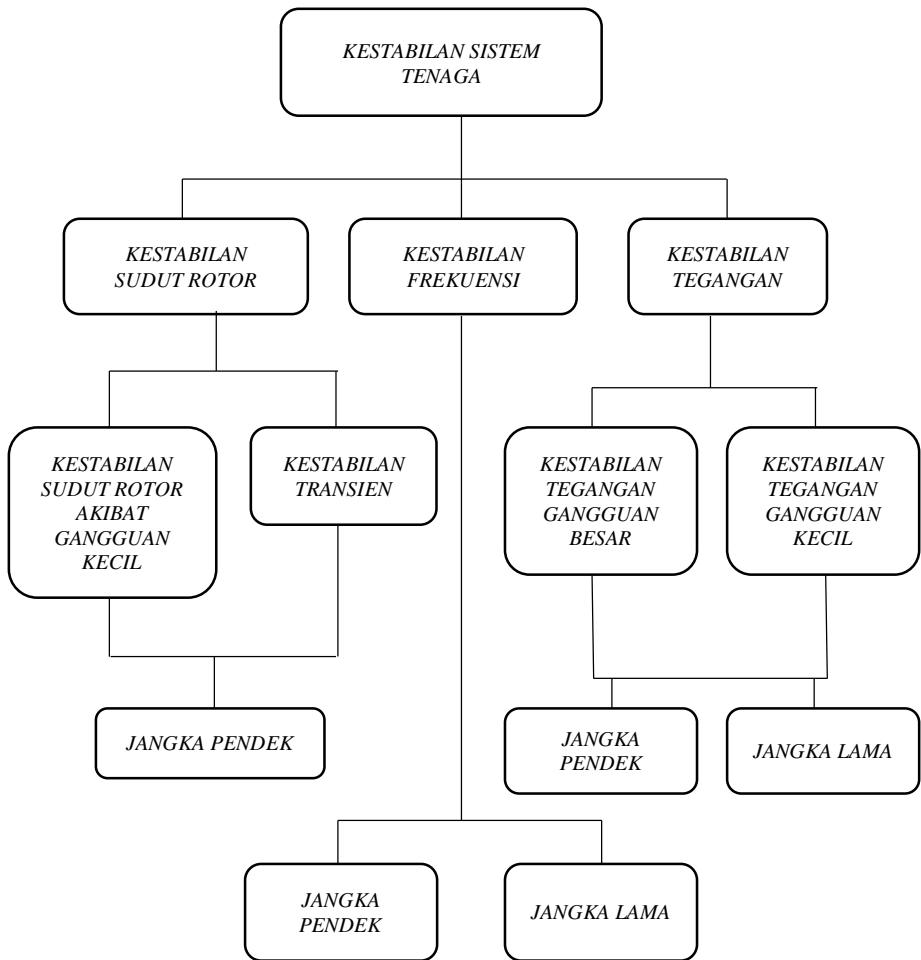
2.1 Kestabilan Sistem Tenaga listrik

Sistem tenaga listrik yang stabil merupakan suatu sistem yang berada pada kondisi operasi yang seimbang atau dalam kondisi operasi normal dan sistem yang mempunyai kemampuan untuk mendapatkan kembali kondisi operasi normal setelah mendapatkan gangguan [1]. Sedangkan sistem tenaga listrik yang tidak stabil merupakan sistem yang tidak memiliki kemampuan untuk kembali pada kondisi normal setelah mengalami gangguan.

Pada sistem tenaga listrik yang menjadi perhatian adalah perilaku sistem setelah mengalami gangguan transien. Sistem dikatakan stabil apabila sistem dapat mempertahankan sinkronisasinya hingga akhir dari periode gangguan. Respon osilasi sistem tenaga dinyatakan stabil bila gangguan mengalami peredaman pada periode transien sampai akhirnya mencapai kondisi *steady state*. Namun jika selama periode gangguan sistem tidak mengalami peredaman maka sistem dinyatakan tidak stabil [1]. Sistem yang baik merupakan sistem yang dapat menjaga kondisi operasi normal dan dapat kembali ke kondisi normal jika terdapat gangguan kecil maupun gangguan besar. Gangguan kecil dapat terjadi jika adanya perubahan beban dan perubahan operasi pembangkitan. Sedangkan gangguan besar dapat berupa gangguan hubung singkat pada saluran, lepasnya generator besar atau beban besar dari sistem, atau putusnya saluran yang menghubungkan subsistem.

2.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

Berdasarkan referensi [2] dari paper *IEEE Transaction on Power Systems* dengan judul *definition and Classification of Power System Stability*, kestabilan sistem tenaga listrik dapat dikategorikan menjadi tiga yaitu : kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi dan kestabilan tegangan.



Gambar 2.1 Klasifikasi Sistem Tenaga

2.3 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor berkaitan dengan kemampuan mesin sinkron yang saling terhubung pada sistem tenaga listrik untuk menjaga sinkronisasinya jika terjadi gangguan.

Untuk menjaga sistem dalam keadaan sinkron bergantung pada kemampuan setiap mesin sinkron yang terhubung untuk menjaga atau mengembalikan kesetimbangan pada torsi elektromagnetik dan torsi mekanik pada sistem. Ketidakstabilan sistem dapat terjadi akibat perubahan kecepatan rotor mesin beberapa generator sehingga hilangnya sinkronisasi dengan generator lainnya.

Permasalahan kestabilan sudut rotor meliputi studi osilasi elektromagnetik pada sistem tenaga listrik. Faktor mendasar pada permasalahan ini adalah perbedaan keluaran tenaga listrik pada masing-masing mesin sinkron jika terjadinya perubahan sudut rotor. Pada kondisi mantap (*steady state*) terdapat kondisi dimana sudut torsi mekanikal dan keluaran torsi elektromagnetik dari masing-masing generator adalah sama dan kecepatannya dijaga konstan, namun jika kondisi tersebut mengalami gangguan maka akan mengakibatkan rotor mesin mengalami percepatan atau perlambatan. Jika kecepatannya rotor suatu mesin sinkron berputar lebih cepat dibandingkan mesin sinkron yang lainnya, maka sudut rotor mesin sinkron yang berputar lebih cepat akan lebih besar dibandingkan mesin sinkron yang rotornya berputar lebih lambat. Perbedaan sudut rotor inilah yang mengakibatkan perubahan keluaran tenaga listrik dari mesin sinkron sehingga menyebabkan ketidakstabilan.

Pada saat mesin sinkron kehilangan sinkronisasinya, rotor akan bergerak dengan kecepatan tertinggi atau dalam kecepatan terendahnya dibandingkan dengan kecepatan rotor untuk membangkitkan tegangan pada frekuensi sistem. *Slip* Antara stator yang berputar dan kumparan rotor mengakibatkan fluktuasi yang besar pada keluaran daya mesin, arus, dan tegangan dan mengharuskan sistem proteksi untuk mengisolasi mesin sinkron yang tidak stabil dari sistem.

Pada sistem tenaga listrik, perubahan torsi elektrik pada mesin sinkron yang disebabkan oleh gangguan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (2.1)$$

Dimana : $T_s \Delta\delta$ adalah komponen dari perubahan torsi pada fasa dengan sudut rotor gangguan $\Delta\delta$ dan dapat disebut juga dengan komponen sinkronisasi torsi; dan T_s adalah koefisien sinkronisasi torsi.

$T_D \Delta\omega$ adalah komponen torsi dengan fasa pada perubahan kecepatan $\Delta\omega$ dan disebut juga sebagai torsi redaman; dan T_D adalah koefisien torsi redaman.

Kestabilan sistem bergantung pada kedua komponen pada persamaan 2.1 yaitu pada komponen torsi. Kurangnya torsi sinkronisasi menyebabkan ketidakstabilan pada sudut rotor, sedangkan kurangnya torsi redaman menyebabkan ketidakstabilan osilasi.

Untuk lebih jauh dalam menganalisis tentang masalah stabilitas maka stabilitas sudut rotor dapat ditinjau lebih jauh dalam 2 kategori:

a. *Small-signal stability*

Small-signal stability adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkronnya setelah mengalami gangguan kecil. Seperti gangguan yang terjadi secara kontinu pada sistem seperti perubahan beban ataupun pembangkitan. Ketidakstabilan ini terjadi akibat dua hal Antara lain kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi damping.

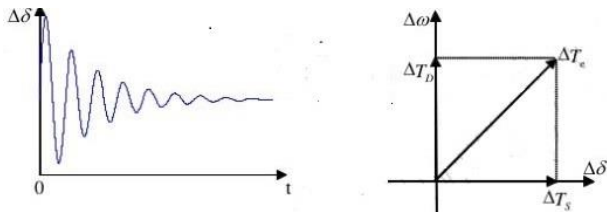
b. *Transien stability*

Transien stability adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi setelah mengalami gangguan besar untuk studi gangguan stabilitas transien memiliki kurun waktu 3-5 detik setelah terjadi gangguan untuk sistem yang sangat besar dengan ayunan antar wilayah yang dominan maka kurun waktu dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik.

2.4 Small Signal Stability

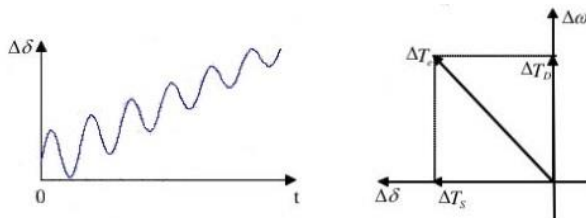
Small-signal stability atau stabilitas akibat gangguan kecil berkaitan dengan kondisi awal operasi dari sistem. Ketidakstabilan dapat terjadi

akibat 2 hal yaitu kenaikan konstan pada sudut generator dikarenakan kurangnya torsi sinkronisasi atau dapat berupa osilasi rotor dan kenaikan amplitude karena kurangnya torsi redaman. Ketidakstabilan *non-osilasi* disebabkan oleh kurangnya torsi sinkronisasi pada generator tanpa adanya *automatic voltage regulator*, sedangkan dengan adanya *automatic voltage regulator* terjadinya gangguan kecil menyebabkan ketidakstabilan osilasi yang dapat di ilustrasikan seperti pada gambar berikut ini :



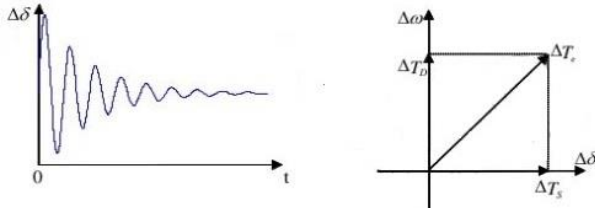
Gambar 2.2 Sistem Stabil dengan Tegangan Konstan

Gambar 2.2 merupakan respon sistem dengan tegangan konstan yang stabil dengan nilai torsi redaman dan torsi sinkronisasi bernilai positif.



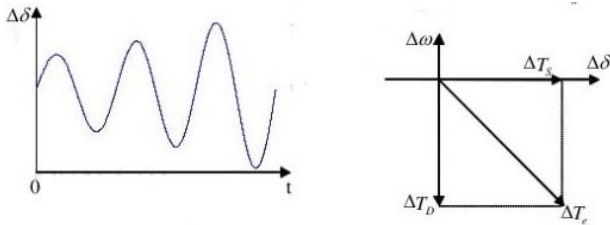
Gambar 2.3 Non-Oscillatory Instability dengan Tegangan Konstan

Gambar 2.3 merupakan respon sistem tenaga yang tidak stabil dengan menggunakan tegangan konstan dengan nilai torsi redaman positif sedangkan torsi sinkronisasinya bernilai negatif.



Gambar 2.4 Sistem Stabil dengan Kontrol Eksitasi

Gambar 2.4 merupakan respon sistem tenaga yang stabil dengan menggunakan control eksitasi dimana nilai torsi redaman positif sedangkan torsi sinkronisasinya bernilai negatif.



Gambar 2.5 Oscillatory Instability Menggunakan Kontrol Eksitasi

Gambar 2.5 merupakan respon sistem tenaga yang tidak stabil dengan menggunakan control eksitasi dimana nilai torsi redaman negatif sedangkan torsi sinkronisasi bernilai positif,

Perubahan pada sistem tenaga seperti perubahan tegangan, arus, dan aliran daya Antara area yang berbeda. Sistem tenaga yang besar akan memiliki mode osilasi elektromekanikal yang dominan pada saat terjadi gangguan. Mode osilasi elektromekanik diklasifikasikan berdasarkan [1] sebagai berikut :

1. *Mode Inter-area* pada frekuensi 0.1 - 0.8 Hz

Pada mode inter-area dimana generator dari dua area yang berbeda saling ber-osilasi satu sama dengan yang lain. Mode ini dapat muncul saat terjadi gangguan pada saluran yang menghubungkan kedua area pembangkitan ini atau pada saluran transmisi yang dimatikan untuk keperluan pemeliharaan.

2. *Mode Local area* pada frekuensi 0.7 - 2 Hz

Pada mode local area ini dimana generator pada satu area yang sama saling berisolasi satu dengan yang lain. Mode ini dapat muncul saat terjadi gangguan yang letaknya dekat dengan area generator tersebut.

2.5 Analisis Modal

Analisis modal atau *modal analysis* adalah salah satu metode yang digunakan untuk menganalisa kestabilan yang dikarenakan oleh gangguan kecil atau biasa disebut dengan *small signal stability*, *modal analysis* biasa juga disebut dengan perhitungan *eigenvalue* dimana *eigenvalue* dapat memberikan informasi tentang kestabilan sistem tenaga.

Berikut ini adalah beberapa konsep dasar stabilitas dinamik sistem :

2.5.1 *State Space*

Perilaku sistem yang dinamis, seperti sistem tenaga, dapat dijelaskan oleh satu set n orde pertama persamaan diferensial nonlinier berikut ini :

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.2)$$

Dimana n adalah urutan sistem dan r adalah jumlah input. Ini bisa ditulis dalam bentuk berikut dengan menggunakan notasi vektor-matriks:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (2.3)$$

Dimana

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}$$

Kolom vektor x disebut sebagai *state vector*, dan isinya x_i sebagai *state variable*. Kolom vektor u adalah vektor masukan ke sistem. Itu semua adalah sinyal eksternal yang mempengaruhi performa sistem. Waktu dinotasikan sebagai t , dan turunan dari *state variable* x sehubungan dengan waktu dinotasikan sebagai \dot{x} . Jika turunan dari *state variable* sistem tidak merupakan persamaan yang berhubungan dengan waktu maka sistem dapat dikatakan *autonom* yang persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.4)$$

Sedangkan untuk keluaran dari sistem dapat pula diformulasikan dalam bentuk *state variable* dan *input variable* sebagai berikut :

$$y = g(x, u) \quad (2.5)$$

state variable x meliputi kecepatan rotor, sudut rotor dan semua variabel yang ada pada generator, seperti pada contoh berikut :

$$x = \begin{bmatrix} \delta_{gen1} \\ \delta_{gen2} \\ \omega_{gen1} \\ \omega_{gen2} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Jumlah dari *state variable* bergantung pada model yang digunakan untuk merepresentasikan generator serta banyaknya generator pada sistem, namun pada mode elektromekanik variabel yang sangat berpengaruh adalah sudut rotor δ_i dan kecepatan sudut rotor dari generator ω_i . *State variable* y meliputi variabel keluaran dari sistem seperti tegangan pada bus U_i sudut tegangannya θ_i .

$$y = \begin{bmatrix} U_{Bus1} \\ U_{Bus2} \\ \theta_{Bus1} \\ \theta_{Bus2} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

2.5.2 Titik Ekuilibrium

Titik ekuilibrium adalah titik dimana semua turunan $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n$ bernilai nol. Dimana dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut :

$$f(x_0) = 0 \quad (2.6)$$

Dimana x_0 adalah *state vector* x pada titik ekuilibrium.

Jika fungsi $f_i (i = 1, 2, \dots, n)$ pada persamaan 2.4 linier, maka sistem tersebut linier. Sebuah linier sistem hanya mempunyai satu titik ekuilibrium (jika matrik sistem nonsingular). Untuk nonlinier sistem kemungkinan ada lebih dari satu titik ekuilibrium.

2.5.3 Linierisasi

Untuk dapat mengamati performa *small signal stability* maka sistem harus dilinierisasi pada titik ekuilibriumnya dan stabilitas dari sistem tersebut dapat dilihat dari nilai *eigenvalue* yang didapatkan setelah sistem dilinierisasi sebagai berikut :

$$x_0 = f(\dot{x}_0, u_0) = 0 \quad (2.7)$$

state diasumsikan diberikan gangguan sebagai berikut :

$$x = x_0 + \Delta x \quad u = u_0 + \Delta u$$

dimana Δ merupakan perubahan kecil, sehingga didapatkan state baru sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} \\ \dot{x} &= f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \end{aligned} \quad (2.8)$$

Karena gangguan dianggap kecil maka fungsi $f(x,u)$ dapat dituliskan dalam bentuk deret Taylor dengan mengabaikan orde kedua dan selanjutnya dari Δx dan Δu sehingga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\dot{x}_i = \dot{x}_{i0} + \Delta \dot{x}_i = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (2.9)$$

$$\dot{x}_i = f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \Delta x_i + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_i} \Delta u_i + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (2.10)$$

...

ena $\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0$, didapatkan

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (2.11)$$

...

$$\Delta y_i = \frac{\partial y_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial y_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial y_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial y_i}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (2.12)$$

sehingga bentuk *state space* yang sudah dilinierisasi di titik ekuilibrium dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (2.13)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (2.14)$$

2.5.4 Eigenvalue

Eigenvalue adalah sebuah bilangan skalar dari sebuah matriks A yang dapat menjadi suatu karakteristis dari sebuah matriks *eigenvalue* yang dinotasikan sebagai λ , dimana *eigenvalue* atau biasa juga disebut dengan akar ciri atau merupakan suatu nilai yang dapat menunjukkan seberapa besar pengaruh suatu variabel terhadap pembentukan karakteristik sebuah matriks, *eigenvalue* didapatkan berdasarkan persamaan :

$$A\phi = \lambda\phi \quad (2.15)$$

Berdasarkan persamaan 2.11, nilai *eigenvalue* didapatkan dari :

$$(A - \lambda I)\phi = 0 \quad (2.16)$$

Karena $\phi \neq 0$ maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (2.17)$$

Keterangan,

A Matriks n x n

I Matrik identitas n x n

Eigenvalue dapat berupa bilangan real atau kompleks. Jika matriks A adalah real, maka nilai *eigenvalue* yang akan muncul dapat berupa bilangan kompleks.

2.5.5 Eigenvector

Untuk setiap nilai *eigenvalue* λ , n-kolom *vector* Φ disebut dengan *eigenvector* kanan dari matriks A yang berhubungan dengan nilai *eigenvalue* λ sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$A\Phi_i = \lambda_i\Phi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.18)$$

Eigenvector kanan memiliki bentuk sebagai berikut,

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} \\ \Phi_{2i} \\ \vdots \\ \Phi_{ni} \end{bmatrix}$$

Karena persamaan $(A - \lambda I)\Phi_i$ adalah homogen, $k\Phi_i$ juga merupakan solusi, *eigenvector* yang ditentukan hanya oleh faktor pengali skalar atau dapat ditulis sebagai berikut :

$$\psi_i A = \lambda_i \psi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.19)$$

ψ_i disebut dengan *eigenvector* kiri yang berhubungan dengan nilai *eigenvalue*. *Eigenvector* kiri memiliki bentuk sebagai berikut,

$$\psi_i = [\psi_{i_1} \psi_{i_2} \dots \psi_{i_n}]$$

2.5.6 *Eigenvalue dan Kestabilan*

Karakteristik suatu mode yang berdomain waktu pada sistem berdasarkan *eigenvalue* λ adalah sesuai dengan persamaan $e^{\lambda t}$ sehingga sistem dapat ditentukan kestabilannya berdasarkan *eigenvalue* dengan ketentuan sebagai berikut :

- a. *Eigenvalue* real berhubungan dengan mode non-osilasi. Nilai real negative dari *eigenvalue* menunjukkan mode penurunan atau *decaying* mode. Semakin besar magnitudnya, semakin cepat. Nilai real positif dari *eigenvalue* menunjukkan ketidakstabilan sistem.
- b. *Eigenvalue* kompleks muncul dalam bentuk pasangan konjunggasi, setiap nilai berhubungan dengan mode osilasi. Nilai real dari *eigenvalue* kompleks memberikan informasi tentang redaman sedangkan bagian imajiner memberikan informasi tentang frekuensi osilasi. Nilai negative dari bagian real menunjukkan osilasi yang teredam sedangkan nilai positif menunjukkan osilasi yang amplitudonya terus meningkat. *Eigenvalue* kompleks diberikan sebagai berikut

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (2.21)$$

Dimana frekuensi osilasi dalam Hz didapatkan .

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.22)$$

Dan rasio redaman didapatkan berdasarkan :

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.23)$$

2.5.7 Eigenvector Kanan – Mode Shape

Matriks dari *eigenvector* kanan Φ bisa juga disebut sebagai *mode shape*. Setiap *mode shape* Φ memberikan informasi spesifik tentang aktivitas dari *state variable* Δx saat terjadi mode osilasi. Variasi dari suatu *state variable* saat muncul suatu mode adalah :

$$\Delta x_i = \sum_{j=1}^{j=n} \phi_{ij} \xi_j \quad (2.24)$$

Koefisie dari Φ memberikan informasi bagaimana *state variable* x_i akan terdampak pada saat terjadi mode osilasi. Semakin besar magnitude dari Φ semakin besar pula *state variable* terdampak sehingga *state variable* tersebut dapat diamati, oleh karena itu *eigenvector* kanan dapat juga disebut sebagai *observeability*. *Mode shape* juga memberikan informasi mengenai variasi yang disebabkan oleh suatu mode, ini dapat digunakan untuk mengumpulkan generator yang memiliki karakteristik yang sama dan untuk mengetahui tipe dari osilasi baik itu osilasi inter-area, lokal, maupun intra-area.

2.5.8 Participan Factor

Mode shape dapat digunakan untuk mengetahui *state variable* mana yang dapat dengan mudah dilihat atau dalam hal ini disebut dengan *observeability*. Namun belum memberikan informasi *state variable* mana yang memberikan kontribusi terhadap nilai *eigenvalue*. *Participan factor* merupakan kombinasi dari *eigenvector* kanan dan kiri yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$P = [P_1 P_2 \dots P_n] \quad (2.25)$$

Dengan

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ \vdots \\ P_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i} & \psi_{1i} \\ \phi_{2i} & \psi_{2i} \\ \vdots & \vdots \\ \phi_{ni} & \psi_{ni} \end{bmatrix}$$

Participan factor digunakan untuk menentukan *state variable* atau generator mana yang sangat berpengaruh terhadap suatu mode atau terhadap suatu nilai *eigenvalue*.

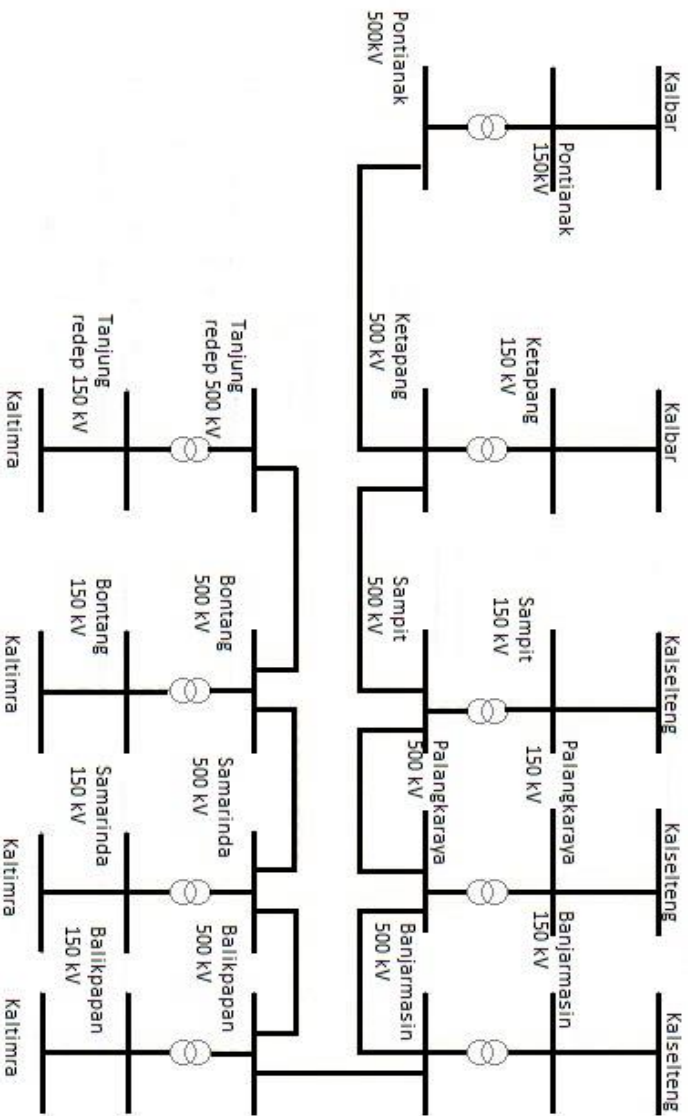
BAB 3

PERENCANAAN SISTEM KELISTRIKAN KALIMANTAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang perencanaan sistem kelistrikan Kalimantan yang saling terinterkoneksi dengan *backbone* 500 kV AC dengan mempertimbangkan beban di Sabah. Sistem kelistrikan Kalimantan akan dibagi menjadi 3 area yaitu area Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara (Kaltimra), area Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah (Kalselteng), dan area Kalimantan Barat (Kalbar). Ketiga area tersebut dihubungkan dengan tegangan 500 kV sedangkan pada masing-masing area dihubungkan dengan tegangan 150 kV untuk transmisinya.

1.1 Sistem Kelistrikan Kalimantan dengan *backbone* 500 kV AC

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya sistem kelistrikan Kalimantan akan dibagi menjadi tiga area yaitu Kaltimra dengan titik penghubungnya adalah Balikpapan, Samarinda, Bontang, dan Tanjung Redep), area Kalselteng dengan titik penghubungnya adalah Sampit, Palangkaraya, dan Banjarmasin, area Kalbar dengan titik penghubungnya adalah Pontianak dan Ketapang.



Gambar 3.1 Sekma Sistem Transmisi Kalimantan 500 kV AC

3.1.1 Data Sistem Kelistrikan Kalimantan Backbone 500 kV AC

Pada subbab ini akan diberikan data tentang peralatan pada perencanaan pada sistem kelistrikan Kalimantan seperti berikut :

Tabel 3.1 Data Kabel Sistem Kelistrikan Kalimantan 500kV AC

Asal	Menuju	Line	Panjang (km)	Jenis Kabel
Pontianak 500 kV	Ketapang 500 kV	2	230	Dove 500 kV
Ketapang 500 kV	Sampit 500 kV	2	180	Dove 500 kV
Sampit 500 kV	Palangkaraya 500 kV	2	220	Dove 500 kV
Palangkaraya 500 kV	Banjarmasin 500 kV	2	250	Dove 500 kV
Banjarmasin 500 kV	Balikpapan 500 kV	2	370	Dove 500 kV
Balikpapan 500 kV	Samarinda 500 kV	2	95	Dove 500 kV
Samarinda 500 kV	Bontang 500 kV	2	85	Dove 500 kV
Bontang 500 kV	Tanjung Redeb 500 kV	2	300	Dove 500 kV

Tabel 3.2 Data Transformer Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC

Bus	Tegangan (kV)	Kapasitas (MVA)	% Z
Pontianak 500 kV	500/150	500	12.5
Ketapang 500 kV	500/150	500	12.5
Sampit 500 kV	500/150	500	12.5
Palangkaraya 500 kV	500/150	500	12.5

Tabel 3.2 (Lanjutan) Data Transformer Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC

bus	Tegangan (kV)	Kapasitas (MVA)	% Z
Banjarmasin 500 kV	500/150	1000	12.5
Balikpapan 500 kV	500/150	500	12.5
Samarinda 500 kV	500/150	1500	12.5
Bontang 500 kV	500/150	500	12.5
Tanjung Redep 500 kV	500/150	500	12.5

3.1.2 Data Kelistrikan Kalimantan Barat

Pada Subbab ini akan dibahas tentang sistem kelistrikan Kalimantan Barat. Kalimantan Barat mempunyai 2 titik penghubung dengan 500 kV yaitu Pontianak 500 kV dan Ketapang 500 kV dimana bebas diasumsikan berada pada level tegangan 150 kV. Pada subbab ini akan ditampilkan data beban pada tahun 2022, 2025, 2027 dan 2050 serta data pembangkit dan penambahan pembangkit pada sistem kelistrikan Kalimantan Barat.

Tabel 3.3 Data Beban Kelistrikan Kalimantan Barat

Tahun	Beban (MW)			
	2022	2025	2027	2050
Nama GI				
Sei Raya	128.43	154.17	171.75	469.77
Air Upas	25	25	25	25
Bengkayang	10.58	14.13	17.03	84.68
Cemara	49.32	55.67	59.97	132.21
Entikong	6.70	8.95	10.78	37.01
Kendawangan	4.80	6.41	7.73	30.27
Ketapang	12.13	23.71	31.86	186.17
Kota Baru	43.15	57.62	69.44	272.13
Kota Baru 2	6.04	8.07	9.73	34.42
Nanga Pinoh	12.57	15.58	17.70	48.28

Table 3.3 (Lanjutan) Data Beban Kelistrikan Kalimantan Barat

kalbar	Beban (MW)			
	2022	2025	2027	2050
Nama GI				
Ngabang	10.57	13.12	14.91	41.09
Parit baru	30.06	43.42	52.69	225.06
Putussibau	11.80	14.62	16.61	45.19
Rasau	25	25	25	25
Sambas	31.36	38.79	44.01	118.12
Sandai	4.88	6.51	7.85	24.23
Sanggau	25.67	38.98	49.85	213.45
sekadau	11.82	15.79	19.03	78.21
Semparuk				
Senggiring	30.93	33.00	34.01	55.80
Siantan	63.56	79.75	91.70	420.59
Singkawang	53.14	69.53	80.63	285.36
Sintang	18.04	31.13	41.82	234.74
Sukadana	12.19	16.28	19.62	60.58
Tayan	16.92	22.59	27.22	123.08
total	644.65	817.82	945.92	3270.44

Pada tabel dibawah ini akan ditampilkan data tentang pembangkitan pada sistem kelistrikan Kalimantan Barat dimana dibagi menjadi tiga yaitu pembangkitan terpasang, rencana pembangkitan tetap dan rencana pembangkitan variable. Rencana pembangkitan tetap adalah pembangkitan yang sudah berada dalam proses konstruksi berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2017-2026 dan rencana pembangkitan variable adalah rencana pembangkitan yang belum tetap.

Pembangkitan terpasang Kalimantan Barat mempunyai total kapasitas 480 MW dengan perincian seperti pada tabel berikut :

Tabel 3.4 Data Pembangkitan Terpasang Kalimantan Barat

Jenis	Nama	Unit	Kapasistas (MW)
PLTGU	Parit Baru (FTP 1)	#1	1 x 50
PLTG	MPP Kalbar	#1,2,3,4	4 x 25
PLTG	Kalbar Peaker	#1,2,3,4	4 x 25
INT	Serawak		230
Total			480

Berikut ini adalah beberapa unit pembangkit dalam tahap konstruksi dan beberapa lagi direncanakan untuk dimasukkan kedalam sistem. Pembangkit-pembangkit tersebut adalah seperti dalam tabel berikut.

Tabel 3.5 Data Penambahan Pembangkitan Tetap Kalimantan Barat

Jenis	Nama	Unit	Kapasistas (MW)
PLTU	Kalbar 1	#1,2	2 x 100
PLTU	Parit Baru (FTP 1)	#1	1 x 50
PLTU	Parit Baru (FTP 2)	#1,2	2 x 55
PLTU	Pantai Kura-Kura	#1,2	2 x 27.5
Total			415

Tabel 3.6 Data penambahan Pembangkit Variabel Kalimantan Barat

Jenis	Nama	Unit	Kapasistas (MW)
PLTU	Kalbar 2	#1,2	2 x 100
PLTU	Kalbar 3	#1,2	2 x 100
PLTU	Kalbar 4	#1,2	2 x 100
PLTG	Kalbar 2	#1,2,3,4,5	5 x 50
Total			850

3.1.3 Data Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

Pada subbab ini akan dibahas tentang sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara yang mempunyai 4 titik penghubung dengan 500 kV. 4 titik penghubung tersebut adalah Balikpapan 500 kV, Samarinda 500 kV, Bontang 500 kV dan Tanjung Redeb 500 kV dimana beban diasumsikan berada pada level tegangan 150 kV dan beberapa pada 70 kV. Pada subbab ini akan ditampilkan data beban tahun 2022, 2025, 2027 dan tahun 2050 serta data pembangkit dan penambahan pembangkit pada sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara.

Tabel 3.7 Data Beban Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

		Beban (MW)		
Tahun	2022	2025	2027	2050
Nama GI				
Bontang Koala	12.3	15.8	18.6	95.5
BUKIT BIRU	39.20	50.20	59.10	304.10
BUKUAN	23.20	28.20	32.00	109.80
EMBALUT	30.20	36.20	40.60	121.30
Load long aparti	0	0	0	10
GIS BALIKPAPAN	25.50	32.80	38.60	198.40
GIS SAMARINDA	26.00	32.50	37.50	156.00
Grogot	28.50	37.60	44.90	98.60
HARU	36.80	44.70	50.70	171.70
KARJO	45.00	54.50	61.70	204.60
Kembang Janggut	1.90	2.30	2.60	7.80
KOMAM	4.10	5.20	6.00	12.80
KOTA BANGUN	6.10	7.90	9.20	47.60
KUARO	6.80	8.70	10.30	52.80
LOAD BONTANG	29	37.8	45	264.5
Maloi	3.00	4.60	6.00	105.40
MANGGAR	62.90	78.10	89.80	357.70
Melak	16.70	21.10	24.50	96.10
Muara Wahau	4.20	5.30	6.20	7.80
NEW BALIKPAPAN	41.40	53.10	62.50	321.60
NEW SAMARINDA	34.70	44.50	52.30	269.30
PETUNG	24.30	31.00	36.30	92.70
SAMBERAH	17.90	21.40	24.00	71.80
Samboja	7.70	9.70	11.30	52.40
SAMBUTAN	33.40	42.30	49.30	228.10
SANGA2	3.60	4.60	5.40	27.90
SANGATTA	26.20	32.80	38.10	96.50
Sei Durian	0.00	0.00	0.00	0.00
Senipah	12.50	15.80	18.40	85.00
Sepaku	2.50	2.90	3.30	10.00
Sepaso	2.88	3.70	4.34	5.51

Tabel 3.7 (Lanjutan) Data Beban Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

Tahun	Beban (MW)			
	2022	2025	2027	2050
Nama GI				
TENGGAWANG	96.60	107.70	115.30	201.40
TLK BPP				
UJOH BILANG	0.00	0.00	0.00	0.00
LOAD MUARA BENGKAL	2.2	2.6	3	14
Load Industri	64.1	73.4	80	172.4
Load Juata	0	0	0	0
Load LATI	5.48	6.62	7.51	27.31
Load Malinau	14.18	18.45	21.95	149.92
Load Nunukan	0	26.78	31.36	90.75
Load Sebuku	1	1.16	1.28	3.35
Load Sekatak	3.38	4.05	4.57	13.81
Load Talisayan	2.5	2.81	3.04	5.51
Load Tanjung Redep	38.21	48.09	56.2	296.87
Load Tanjung Selor	17.8	24.27	29.6	189.22
Load Tarakan	0	0	0	0
Load Tidang Pale	0	0	0	0
Load Tj Batu	0.9	1.2	1.3	92.7
Load kayan hulu	0	0	0	10
total	854.83	1082.43	1243.65	4950.55

Pada tabel dibawah ini akan ditampilkan data tentang pembangkitan pada sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara dimana dibagi menjadi tiga yaitu pembangkitan terpasang, rencana pembangkitan tetap dan rencana pembangkitan variable. Rencana pembangkitan tetap adalah pembangkitan yang sudah berada dalam proses konstruksi berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2017-2026 dan rencana pembangkitan variable adalah rencana pembangkitan yang belum tetap.

Total kapasitas terpasang adalah sekitar 768 MW dengan perincian seperti pada tabel berikut ini :

Tabel 3.8 Data Pembangkitan Terpasang Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

Jenis	Nama	Unit	Kapasistas (MW)
PLTU	Teluk Balik Papan	#1,2	2 x 50
PLTU	Embalut Ekspansi	#3	1 x 50
PLTU	Embalut	#1,2	2 x 25
PLTU	Kaltim (MT)	#1	1 x 27.5
PLTMG	MPP Kaltim	#1-4	4 x 10
PLTGU	Tanjung Batu	#1	60
PLTG	Senipah	#1,2	2 x 40
PLTG	Kaltim Peaking	#1,2	2 x 80
PLTG	Sambera	#1,2	2 x 20
PLTD	Cogindo	#1-4	4 x 10
Total			767.5

Berikut ini adalah beberapa unit pembangkit dalam tahap konstruksi dan beberapa lagi direncanakan untuk dimasukkan kedalam sistem. Pembangkit-pembangkit tersebut adalah seperti dalam tabel berikut :

Tabel 3.9 Data Penambahan Tetap Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

Jenis	Nama	Unit	Kapasistas (MW)
PLTU	Kaltim 4	#1,2	2 x 100
PLTU	Kaltim (FTP 2)	#1,2	2 x 100
PLTU	Kaltim 5 (MT)	#1,2	2 x 100
PLTU	Kaltim (MT)	#2	1 x 27.5
PLTGU	Senipah	#1	1 x 36
PLTG	Kaltim peaker 2	#1-5	5 x 50
Total			913.5

Tabel 3.10 Data Penambahan Pembangkit Variabel Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

Jenis	Nama	Unit	Kapasistas (MW)
PLTU	Kaltimra (MT)	#1,2	2 x 200
PLTU	Kaltim 3 (MT)	#1,2	2 x 100
PLTU	Kaltim 6 (MT)	#1,2	2 x 100
PLTA	Kelai		55
PLTA	Tabang		360

Tabel 3.10 (Lanjutan) Data Penambahan Pembangkit Variabel Sistem Kelistrikan Kalimantan Timur dan Utara

Jenis	Nama	Unit	Kapasistas (MW)
-------	------	------	-----------------

PLTA	Kaltara / Kayan 1		660
Total			1875

3.1.4 Data Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah

Pada subbab ini akan dibahas tentang sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah dimana Kalimantan Selatan dan Tengah memiliki 3 titik penghubung dengan 500 kV yaitu Sampit 500 kV, Palangkaraya 500 kV dan Banjarmasin 500 kV dimana beban diasumsikan berada pada level 150 kV dan beberapa pada 70 kV. Pada subbab ini akan ditampilkan data beban tahun 2022, 2025, 2027 dan tahun 2050 serta data pembangkit dan penambahan pembangkit pada sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah.

Tabel 3.11 Data beban Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

Tahun	Beban (MW)			
	2022	2025	2027	2050
Nama GI				
Amuntai	33.30	35.03	40.35	143.66
Aranio	3.70	4.11	4.39	6.56
Asam	16.32	20.00	22.83	73.05
Bandara	29.07	37.65	44.59	218.02
Barikin	35.39	42.78	48.37	139.03
Bati	22.87	28.83	33.52	132.69
Batulicin	39.38	51.02	60.42	295.38
Cempaka	84.18	110.57	132.76	655.85
Cempaka 70 kV	5.78	5.72	4.79	11.98
GIS Ulin	72.08	92.10	108.08	475.61
Kadangan	14.78	18.12	20.68	66.17
Kayutangi	17.37	21.89	25.45	100.75
Kotabaru	18.76	22.93	25.81	68.91
Mantul	42.41	54.94	65.07	318.12
Marabahan	9.27	11.05	12.38	31.94
Paringin	17.75	21.76	24.83	79.46

Tabel 3.11 (Lanjutan) Data Beban Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

Tahun	Beban (MW)			
	2022	2025	2027	2050
Pelaihari	17.75	21.76	24.83	79.46
Rantau	37.00	47.29	55.49	244.18

Satui	19.34	23.71	27.06	86.59
Sebar	14.01	16.94	19.16	55.06
Sei Tabuk	18.56	23.07	26.58	94.62
Tamiang	0.00	6.30	7.13	20.48
Tanjung	35.11	44.86	52.65	231.68
Trisakti 150 kV	82.23	110.07	133.32	586.71
Trisakti 70 kV	13.15	11.81	9.70	42.68
Ulin	0.00	0.00	0.00	0.00
Buntok	15.15	18.29	20.42	60.64
Kasongan	22.17	27.95	32.49	128.64
Kuala Kurun	4.99	5.95	6.60	17.03
Kuala Pambuang		5.94	6.59	11.64
Nanga Bulik	5.99	7.22	8.04	14.46
New Palangkaraya	35.16	44.92	52.72	231.99
Palangkaraya	39.74	50.78	59.59	262.23
Pangkalan Banteng	7.68	9.15	10.25	26.46
Pangkalan Bun	22.17	27.95	32.49	128.64
Paranggean	7.54	8.86	9.83	22.76
Pulpis	12.08	15.01	17.29	61.57
Puruk Cahu	6.63	8.05	9.03	23.70
Sampit	40.95	53.05	62.83	307.18
Selat	31.74	38.90	44.41	142.08
Sukamara	4.25	5.11	5.69	12.81
Taweh	13.57	16.27	18.08	45.86
Load Palangka	39.74	50.78	59.59	262.23
total	3031.08	3303.46	3513.16	8068.57

Pada tabel dibawah ini akan ditampilkan data tentang pembangkitan pada sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah dimana dibagi menjadi tiga yaitu pembangkitan terpasang, rencana pembangkitan tetap dan rencana pembangkitan variable. Rencana pembangkitan tetap adalah pembangkitan yang sudah berada dalam proses konstruksi berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2017-2026 dan

rencana pembangkitan variable adalah rencana pembangkitan yang belum tetap.

Total kapasitas terpasang adalah sekitar 640 MW dengan perincian seperti pada tabel berikut ini :

Tabel 3.12 Data pembangkitan Terpasang Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

Jenis	Nama	Unit	Kapasistas (MW)
PLTU	Asam-asam	#1,2	2 x 65
PLTU	Asam-asam	#2,4	2 x 65
PLTU	Pulang Pisau	#1,2	2 x 65
PLTMG	Bangkanai	#1-16	16 x 10
PLTA	Riam Kanan	#1	90
Total			640

Berikut ini adalah beberapa unit pembangkit dalam tahap konstruksi dan beberapa lagi direncanakan untuk dimasukkan kedalam sistem. Pembangkit-pembangkit tersebut adalah seperti dalam tabel berikut :

Tabel 3.13 Data Penambahan Pembangkit Tetap Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

Jenis	Nama	Unit	Kapasistas (MW)
PLTU	Kalsel (FTP 2)	#1,2	2 x 100
PLTU	Kalselteng 2	#1,2	2 x 100
PLTU	Kalselteng 1	#1,2	2 x 100
PLTU	Sampit	#1,2	2 x 25
PLTMG	Bangkanai 2	#1-15	15 x 9
Total			785

Tabel 3.14 Data Penambahan Pembangkit Variabel Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

Jenis	Nama	Unit	Kapasistas (MW)
PLTU	Kalselteng 3	#1,2	2 x 100
PLTU	Kalselteng 4	#1,2	2 x 100
PLTU	Kalselteng 5	#1,2	2 x 100
PLTGU	Kalsel Peaker 1	#1,2,3,4	4 x 50
PLTGU	Kalsel 1	#1,2	2 x 100
PLTGU	Kalteng	#1,2	2 x 50

PLTA	Kusan	#1	65
Total			1165

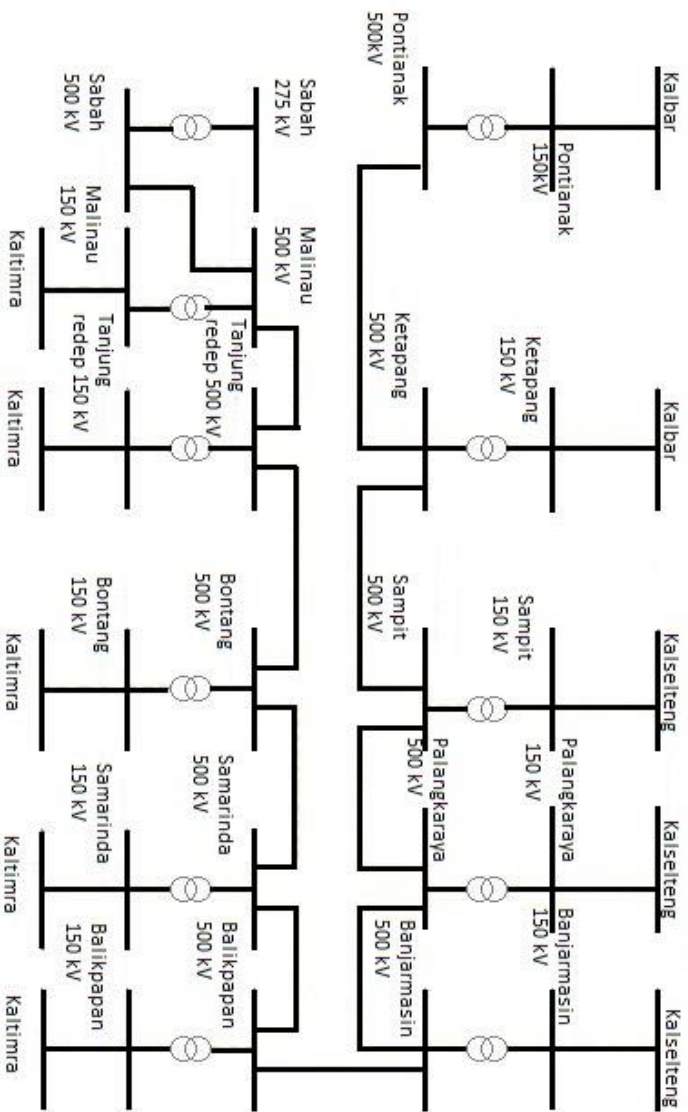
1.2 Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV AC yang Terhubung dengan Beban Sabah

Pada subbab sebelumnya telah dijelaskan mengenai sistem interkoneksi Kalimantan menggunakan *backbone* 500 kV AC. Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai scenario interkoneksi sistem Kalimantan dengan *backbone* 500 kV AC dan pengaruh beban di Sabah. Beban sabah diasumsikan beban statis dengan data sebagai berikut ini.

Tabel 3.15 Data Beban Sabah

Tahun	Beban (MW)			
	2022	2025	2027	2050
Nama GI				
sabah	50.00	150	300	300

Beikut ini akan ditampilkan skema interkoneksi Sabah dengan sistem kelistrikan Kalimantan melalui GI Malinau 500 kV.



Gambar 3.2 Skema Sistem Transmisi Kalimantanan 500 kV AC dengan Sabah

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pemodelan Sistem Kelistrikan Kalimantan

Pemodelan sistem kelistrikan Kalimantan dilakukan berdasarkan data-data yang ada dalam bentuk *single line diagram* dalam *software DigSILENT Power Factory*. Data-data yang digunakan dalam pemodelan sistem kelistrikan Kalimantan tersebut telah diberikan pada bab sebelumnya dan data-data yang terlampir.

Sebelum dilakukan pemodelan pada *software DigSILENT Power Factory* selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya untuk memastikan apakah sistem dalam keadaan stabil konvergen dan berjalan dengan baik. Setelah simulasi aliran daya telah berjalan dengan baik selanjutnya *modal analysis* dapat dilakukan dengan menggunakan menu *modal analysis* yang tersedia pada *software DigSILENT Power Factory*. *Modal analysis* membutuhkan model linier dari generator, pada tugas akhir ini *DigSILENT* menggunakan pemodelan 6^{th} order generator [5,6] dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta\delta = \dot{\omega}_0\Delta\omega \quad (4.1)$$

$$\Delta\omega = \frac{1}{2H}(\Delta T_m - \Delta T_e - K_D\Delta\omega_m) \quad (4.2)$$

$$\Delta\dot{\psi}_{fd} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \Delta\psi_{ad} - \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \Delta\psi_{fd} + \omega_0 \Delta e_{fd} \quad (4.3)$$

$$\Delta\dot{\psi}_{1d} = \frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \Delta\psi_{ad} - \frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \Delta\psi_{1d} \quad (4.4)$$

$$\Delta\dot{\psi}_{1q} = \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \Delta\psi_{1q} - \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \Delta\psi_{aq} \quad (4.5)$$

$$\Delta\dot{\psi}_{2q} = \frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} \Delta\psi_{2q} - \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \Delta\psi_{aq} \quad (4.6)$$

Keterangan :

ω_0	Kecepatan Sudut Rotor
H	Inersia
T_m	Torsi Mekanik
T_e	Torsi Elektrik

K_D	Koefisien Torsi Damping
L_{fd}	Field Winding Leakege Inductance
L_{1d}	Reaktansi d-axis amortisseur
L_{1q}, L_{2q}	1 st dan 2 nd q—axis amortisseur resistance reactance
e_{fd}	Tegangan Medan
R_{1d}	d-axis amortisseur resistance
R_{1q}, R_{2q}	1 st dan 2 nd q-axis amortisseur resistance resistance
$\psi_{aq}, \Delta\psi_{aq}$	d dan q-axis mutual flux linkage
$\dot{\psi}_{1d}$	d-axis amortisseur flux linkage
$\dot{\psi}_{1q}, \dot{\psi}_{2q}$	1 st dan 2 nd q-axis amortisseur flux linkage

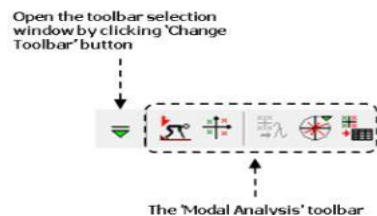
Pada tugas akhir ini analisis akan dilakukan pada tahun 2022, 2025, 2027 dan 2050 dengan menganalisis *eigenvalue* dengan *damping ratio* di bawah 5%. Alasan mengapa melakukan analisis *eigenvalue* dengan *damping ratio* di bawah 5% dikarenakan *eigenvalue* di bawah 5% sistem membutuhkan waktu lebih lama untuk kembali ke kondisi mantap atau *steady state* dan jika ada gangguan lain terjadi selama waktu ini ada resiko besar yang dapat menyebabkan ketidakstabilan.

2. Modal Analysis pada DigSILENT Power Factory




Modal analysis digunakan untuk mengkalkulasi nilai *eigenvalue* dari sistem multi-mesin. Metode ini biasa disebut dengan *small-signal stability analysis*, berikut langkah yang dilakukan untuk mendapatkan nilai *eigenvalue*.

4.3.1 Memulai Modal Analysis

Memilih toolbar *modal analysis* dengan memilih seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.1 Toolbar *Modal Analysis*

24. *Calculate initial condition* menggunakan tombol  lalu pilih tombol *execute*. Pada tahap ini load flow harus konvergen.
25. Setelah meng-*execute initial condition* selanjutnya klik  untuk melakukan perhitungan nilai *eigenvalue*.
26. Setelah perhitungan *eigenvalue* telah dilakukan selanjutnya bias dilihat hasil nilai *eigenvalue* dengan menggunakan tombol .

4.3.2 **Basic Command Pada Modal Analysis**

Pada menu ini ada dua metode perhitungan, yaitu :

27. QR / QZ-Method, metode ini adalah metode klasik untuk menghitung semua *eigenvalue* sistem.
28. *Selective Modal Analysis* (Arnoldi / Lanczos), metode ini hanya menghitung subset dari *eigenvalue* sistem di sekitar titik referensi tertentu. Seringkali metode ini digunakan dalam sistem yang sangat besar ketika menggunakan metode QR bisa sangat memakan waktu. Ini sangat berguna jika pengguna mengetahui area yang ingin diamati.

4.3.3 **Pengaturan Lanjutan**

Pada menu ini terdapat tiga metode perhitungan, yaitu :

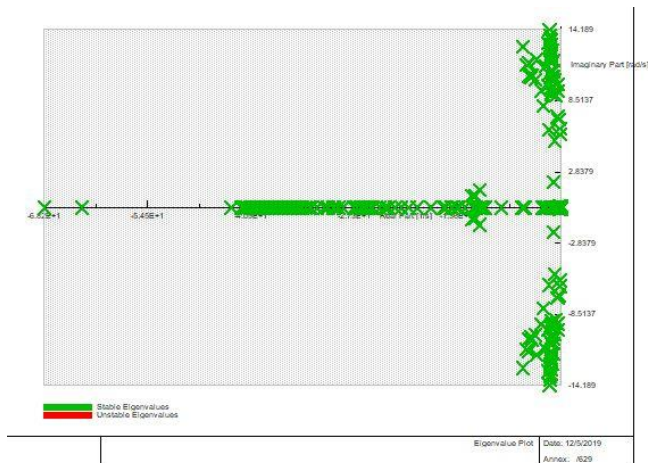
29. *Left Eigenvectors (Controllability)*, opsi ini digunakan untuk menampilkan hasil perhitungan *Eigenvector* kiri. Tampilan untuk hasil tersebut dapat berupa Mode Phasor atau Mode Bar Plot.
30. *Right Eigenvector (Observeability)*, opsi ini digunakan untuk menampilkan hasil perhitungan *Eigenvector* kanan. Tampilan untuk hasil tersebut dapat berupa Mode Phasor atau Mode Bar Plot.
31. *Participation Factor* , opsi ini digunakan untuk menampilkan hasil perhitungan factor partisipasi untuk setiap variable. Tampilan untuk hasil tersebut dapat berupa Mode Phasor atau Mode Bar Plot.

3. Modal Analysis Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2022

Pada tahun 2022 sistem kelistrikan Kalimantan sudah saling terhubung atau terinterkoneksi dengan sistem *backbone* 500 kV. Pembangkit dan beban yang digunakan sesuai dengan data pada bab 3.

1. Eigenvalue Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2022

Modal analysis pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2022 menghasilkan 795 nilai *eigenvalue* dimana seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif. Bagian *real* dari *eigenvalue* bernilai negatif menunjukkan bahwa sistem stabil. Berikut ini adalah plot seluruh nilai *eigenvalue*.



Gambar 4.2 Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2022

Dari 795 nilai *eigenvalue* akan ditampilkan nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis 2 nilai *eigenvalue* terendah dibawah *damping ratio* 5%. Hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5%, waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada waktu tersebut akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.

Tabel 4.1 Eigenvalue dengan Damping Ratio dibawah 10% Tahun 2022

mode	real	imaginer	frekuensi (Hz)	damping ratio (%)
242	-0.12482	5.84752	0.93066	2.13405
243	-0.12482	-5.84752	0.93066	2.13405
235	-0.16940	6.28788	1.00075	2.69310
236	-0.16940	-6.28788	1.00075	2.69310
229	-0.30958	7.02882	1.11867	4.40022
230	-0.30958	-7.02882	1.11867	4.40022
182	-0.49559	9.80075	1.55984	5.05016
183	-0.49559	-9.80075	1.55984	5.05016
190	-0.49337	9.27922	1.47683	5.30944
191	-0.49337	-9.27922	1.47683	5.30944
227	-0.48671	7.22256	1.14951	6.72354
228	-0.48671	-7.22256	1.14951	6.72354
198	-0.62928	8.95193	1.42474	7.01219
199	-0.62928	-8.95193	1.42474	7.01219
152	-1.01291	11.70478	1.86287	8.62161
153	-1.01291	-11.70478	1.86287	8.62161
176	-0.97423	10.46591	1.66570	9.26855
177	-0.97423	-10.46591	1.66570	9.26855
186	-0.95268	10.16480	1.61778	9.33142
187	-0.95268	-10.16480	1.61778	9.33142
129	-1.27009	13.31505	2.11916	9.49565
130	-1.27009	-13.31505	2.11916	9.49565
164	-1.04990	10.85022	1.72687	9.63130
165	-1.04990	-10.85022	1.72687	9.63130
139	-1.22530	12.51231	1.99140	9.74615
140	-1.22530	-12.51231	1.99140	9.74615

Dari tabel diatas dapat dilihat dua nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* terkecil dibawah 5% yaitu mode 242 dan mode 243 yang selanjutnya akan dianalisis untuk mengetahui pembangkit mana saja yang berpengaruh pada masing-masing mode tersebut.

2. Mode Shape Eigenvalue (Mode 242)

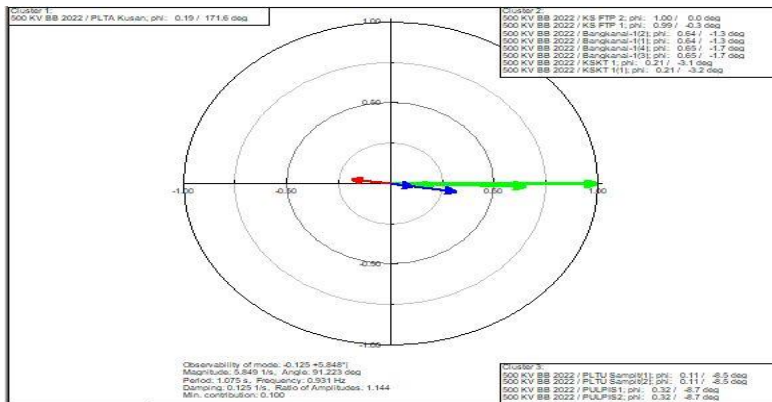
Pada subbab ini akan ditampilkan *mode shape* atau *observeability* pada mode 242 yang memiliki *damping ratio* sebesar 2.13405% dengan frekuensi 0.93066 Hz.

Mode shape atau *observeability* dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor (δ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor (ω). Mode 242 hanya menghasilkan *observeability* sudut rotor (δ) yang dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.2 *Observeability* δ mode 242

Observeability δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
PLTA Kusan	Kalselteng	0.19	171.6
Bengkanai	Kalselteng	0.65	-1.7
KSKT	Kalselteng	0.21	-3.1
KS FTP	Kalselteng	1	0
Pulpis	Kalselteng	0.32	-5.7
PLTU Sampit	Kalselteng	0.11	-5.5

Berikut ini akan ditampilkan *observeability* δ dalam bentuk fasor :



Gambar 4.3 Phasor *observeability* δ mode 242

Dari data tabel dan data phasor *observeability* δ pada mode 242 dapat dilihat bahwasanya pembangkit yang terlibat hanya pembangkit area Kalselteng saja. Mode 242 mengalami osilasi *local-area* karena pembangkit KS FTP yang paling *observeable* dengan magnitude paling besar saling berosilasi dengan pembangkit PLTA Kusan berdasarkan sudutnya yang berlawanan atau *counter phase*.

3. Participation Factor (Mode 242)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 242 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 242. Mode 242 memiliki *participation factor* sudut rotor (δ) dan *participation factor* kecepatan sudut rotor (ω) karena pada mode elektromekanikal erat kaitannya dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari δ dan ω .

Tabel 4.3 Participation Factor δ Mode 242

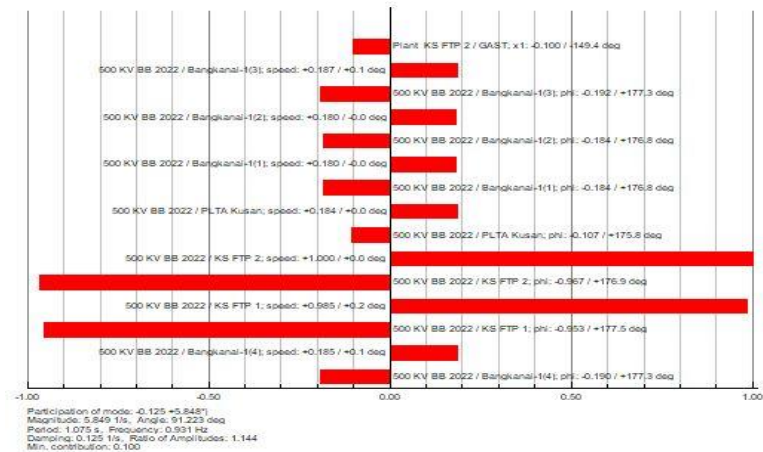
Participation Factor δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
PLTA Kusan	Kalselteng	0.11	175.8
Bengkanai	Kalselteng	0.19	177.3
KS FTP	Kalselteng	0.97	176.9

Tabel 4.4 Participation Factor ω Mode 242

Participation Factor ω			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
KS FTP	Kalselteng	1	0
Bengkanai	Kalselteng	0.19	0.1
PLTA Kusan	Kalselteng	0.18	0

Dari kedua tabel diatas dapat dilihat bahwa pembangkit yang berkontribusi besar pada *participation factor* mode 242 adalah pembangkit KS FTP pada area Kalselteng. Jika dilihat dari *observeability* dan *participation factor* mode 242 dimana pembangkit KS FTP lebih *observeasible* dibandingkan pembangkit lainnya maka pembangkit KS FTP lebih rentan terhadap gangguan dibandingkan dengan pembangkit lainnya.

Selain dari kedua tabel diatas, pembangkit dengan *participation factor* terbesar juga dapat dilihat dari bar plot *participation factor* mode 242 berikut ini



Gambar 4.4 Plot Bar *Participation Factor* Mode 242

4. Mode Shape Eigenvalue (Mode 243)

Pada subbab ini akan ditampilkan *mode shape* atau *observeability* pada mode 243 yang memiliki *damping ratio* sebesar 2.13405% dengan frekuensi 0.93066 Hz.

Mode shape atau *observeability* dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor (δ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor (ω). Mode 243 hanya menghasilkan *observeability* sudut rotor (δ) yang dapat dilihat pada tabel berikut :

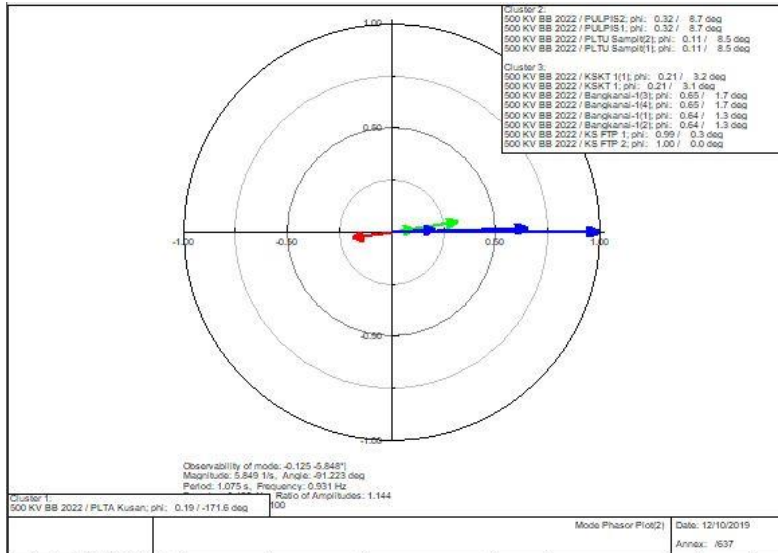
Tabel 4.5 *Observeability* δ mode 243

Observeability δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
PLTA Kusan	Kalselteng	0.19	-171.6
Pulpis	Kalselteng	0.32	8.7
PLTU Sampit	Kalselteng	0.11	8.5
KSKT	Kalselteng	0.21	3.2
Bengkanai	Kalselteng	0.65	1.7

Tabel 4.5 (Lanjutan) *Observeability* δ mode 243

Observeability δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
KS FTP	Kalselteng	1	0

Berikut ini akan ditampilkan *observeability* δ dalam bentuk phasor :



Gambar 4.5 Phasor *observeability* δ mode 243

Dari data tabel dan data phasor *observeability* pada mode 243 dapat dilihat bahwasanya pembangkit yang terlibat hanya pembangkit area Kalselteng saja. Mode 243 mengalami osilasi *local-area* karena pembangkit KS FTP yang paling *observeable* dengan magnitude paling besar saling berosilasi dengan pembangkit PLTA Kusan berdasarkan sudutnya yang berlawanan atau *counter phase*.

5. *Participation Factor (Mode 243)*

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 243 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 243. Mode 243 memiliki *participation factor* sudut rotor (δ) dan *participation factor*

kecepatan sudut rotor (ω) karena pada mode elektromekanikal erat kaitannya dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari δ dan ω .

Tabel 4.6 *Participation Factor* δ Mode 243

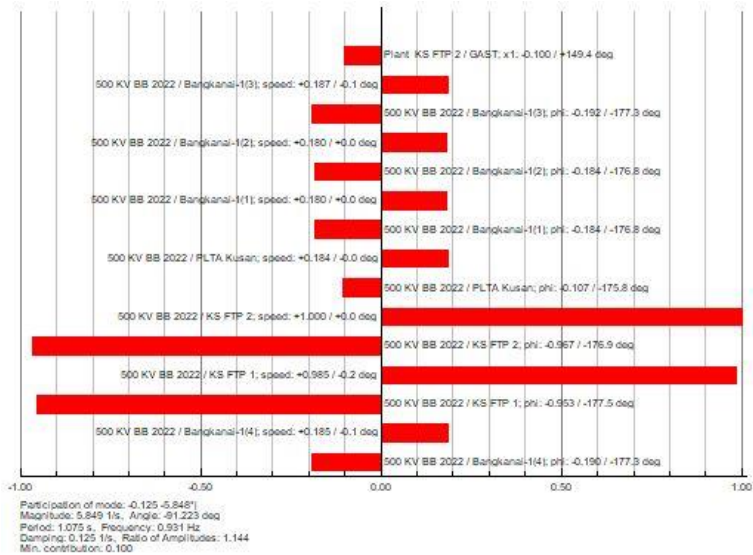
Participation Factor δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
KS FTP	Kalselteng	0.97	-176.9
Bengkanai	Kalselteng	0.19	-177.3
PLTA Kusan	Kalselteng	0.11	-175.8

Tabel 4.7 *Participation Factor* ω Mode 243

Participation Factor ω			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
Bengkanai	Kalselteng	0.19	-0.1
KS FTP	Kalselteng	1	0
PLTA Kusan	Kalselteng	0.18	0

Dari kedua tabel diatas dapat dilihat bahwa pembangkit yang berkontribusi besar pada *participation factor* mode 243 adalah pembangkit KS FTP pada area Kalselteng. Jika dilihat dari *observeability* dan *participation factor* mode 243 dimana pembangkit KS FTP lebih *observeasible* dibandingkan pembangkit lainnya maka pembangkit KS FTP lebih rentan terhadap gangguan dibandingkan dengan pembangkit lainnya.

Selain dari kedua tabel diatas, pembangkit dengan *participation factor* terbesar juga dapat dilihat dari bar plot *participation factor* mode 243 berikut ini :



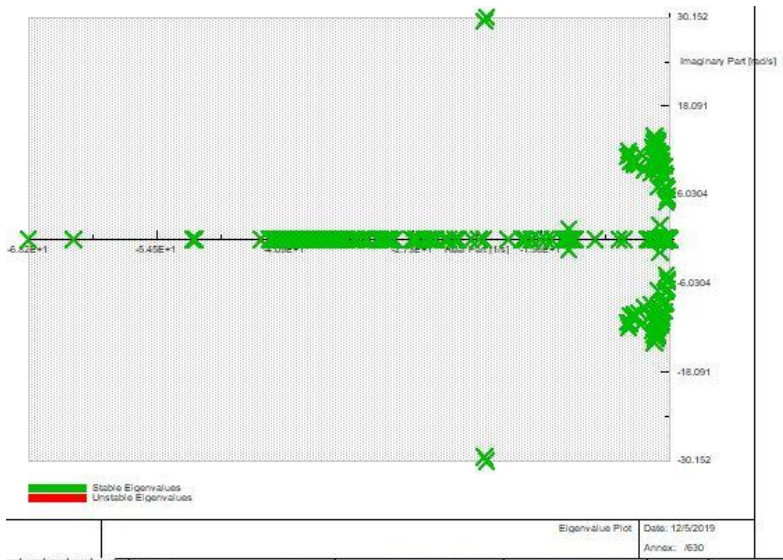
Gambar 4.4 Plot Bar Participation Factor Mode 243

4. Modal Analysis Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2025

Pada tahun 2025 sistem kelistrikan Kalimantan sudah saling terhubung atau terinterkoneksi dengan sistem *backbone* 500 kV. Pada tahun 2025 terdapat satu penambahan pembangkit dua unit jika dibandingkan dengan tahun 2022, yaitu PLTU Kaltim 3 MT pada GI kota Bangun area Kaltimra dengan daya 160 MW. Pembangkit dan beban yang digunakan sesuai dengan data pada bab 3.

1. Eigenvalue Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2025

Modal analysis pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2025 menghasilkan 856 nilai *eigenvalue* dimana seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif. Bagian *real* dari *eigenvalue* bernilai negatif menunjukkan bahwa sistem stabil. Berikut ini adalah plot seluruh nilai *eigenvalue*.



Gambar 4.5 Plot *Eiegenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2025

Dari 856 nilai *eigenvalue* akan ditampilkan nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis 2 nilai *eigenvalue* terendah dibawah *damping ratio* 5%. Hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5%, waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada waktu tersebut akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.

Tabel 4.8 *Eigenvalue* dengan *Damping Ratio* dibawah 10% Tahun 2025
damping ratio dibawah 10 % 2025

mode	real	imaginer	frekuensi (Hz)	damping ratio (%)
291	-0.15850	-5.86423	0.93332	2.70191
290	-0.15850	5.86423	0.93332	2.70191
294	-0.16630	-5.38538	0.85711	3.08655
293	-0.16630	5.38538	0.85711	3.08655
282	-0.23761	6.79322	1.08117	3.49565
283	-0.23761	-6.79322	1.08117	3.49565
278	-0.31337	7.09264	1.12883	4.41389

Tabel 4.8 (Lanjutan) *Eigenvalue* dengan *Damping Ratio* dibawah 10% Tahun 2025

damping ratio dibawah 10 % 2025				
mode	real	imaginer	frekuensi (Hz)	damping ratio (%)
279	-0.31337	-7.09264	1.12883	4.41389
252	-0.41486	8.66425	1.37896	4.78271
253	-0.41486	-8.66425	1.37896	4.78271
232	-0.55909	9.84116	1.56627	5.67200
233	-0.55909	-9.84116	1.56627	5.67200
254	-0.53214	8.88270	1.41373	5.98005
255	-0.53214	-8.88270	1.41373	5.98005
280	-0.44430	7.20940	1.14741	6.15118
281	-0.44430	-7.20940	1.14741	6.15118
297	-0.33857	4.89387	0.77888	6.90165
298	-0.33857	-4.89387	0.77888	6.90165
204	-0.86628	11.33035	1.80328	7.62341
205	-0.86628	-11.33035	1.80328	7.62341
226	-0.82366	10.55501	1.67988	7.77984
227	-0.82366	-10.55501	1.67988	7.77984
194	-0.94535	11.64812	1.85386	8.08928
195	-0.94535	-11.64812	1.85386	8.08928
228	-0.90488	10.62661	1.69128	8.48453
229	-0.90488	-10.62661	1.69128	8.48453
236	-0.87380	10.03059	1.59642	8.67848
237	-0.87380	-10.03059	1.59642	8.67848
169	-1.24015	13.13898	2.09113	9.39691
170	-1.24015	-13.13898	2.09113	9.39691
231	-1.02021	-10.62844	1.69157	9.55499
230	-1.02021	10.62844	1.69157	9.55499
179	-1.28070	13.02534	2.07305	9.78516
180	-1.28070	-13.02534	2.07305	9.78516

Dari tabel diatas dapat dilihat dua nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* terkecil dibawah 5% yaitu mode 291 dan mode 290 yang selanjutnya akan dianalisis untuk mengetahui pembangkit mana saja yang berpengaruh pada masing-masing mode tersebut.

2. Mode Shape Eigenvalue (Mode 291)

Pada subbab ini akan ditampilkan *mode shape* atau *observeability* pada mode 291 yang memiliki *damping ratio* sebesar 2.70191% dengan frekuensi 1.12883Hz.

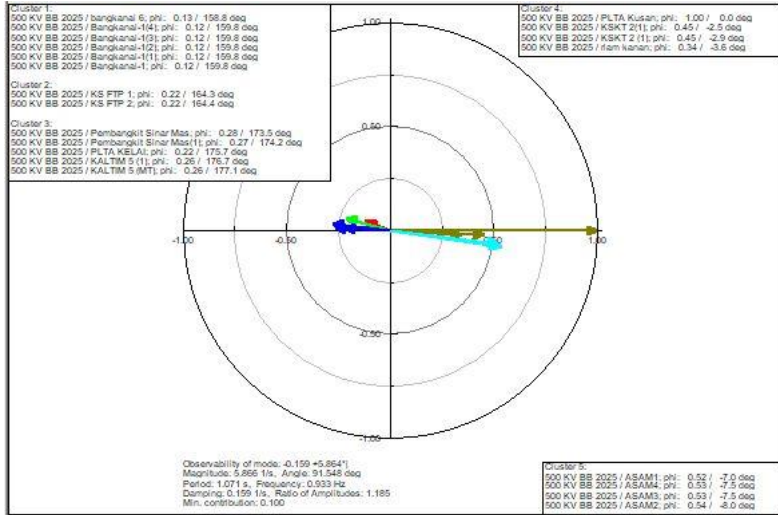
Mode shape atau *observeability* dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor (δ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor (ω). Mode 291 hanya menghasilkan *observeability* sudut rotor (δ) yang dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.9 *Observeability* δ mode 291

Observeability δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
KALTIM 5 (MT)	Kaltimra	0.26	-176.5
KALTIM	Kaltimra	0.26	-176.1
PLTA Kelai	Kaltimra	0.22	-175.1
Pembangkit Sinar Mas	Kaltimra	0.28	-173
KS FTP	Kalselteng	0.22	-163.9
Bengkanai	Kalselteng	0.13	-158.2
Asam	Kalselteng	0.54	8.5
Riam Kanan	Kalselteng	0.34	4.1
KSKT	Kalselteng	0.45	3.4
PLTA Kusan	Kalselteng	1	0.6

Dari data *observeability* δ dapat dilihat bahwa pembangkit yang terlibat mencakup dua area, yaitu area Kaltimra dan Kalselteng. Dari data tabel 4.9 dapat disimpulkan bahwa mode 291 merupakan metode *inter-area* dimana area Kalselteng yaitu PLTA Kusan yang mempunyai magnitude yang paling besar beresilasi dengan pembangkit yang berasal dari area Kaltimra berdasarkan sudutnya yang berlawanan atau *counter phase*.

Berikut ini akan ditampilkan *observeability* mode 291 dalam bentuk fasor.



Gambar 4.6 Phasor Plot *Observability* δ Mode 291

3. Participation Factor (Mode 291)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 291 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 291. Mode 291 memiliki *participation factor* sudut rotor (δ) dan *participation factor* kecepatan sudut rotor (ω) karena pada mode elektromekanikal erat kaitannya dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari δ dan ω .

Tabel 4.10 Participation Factor δ Mode 291

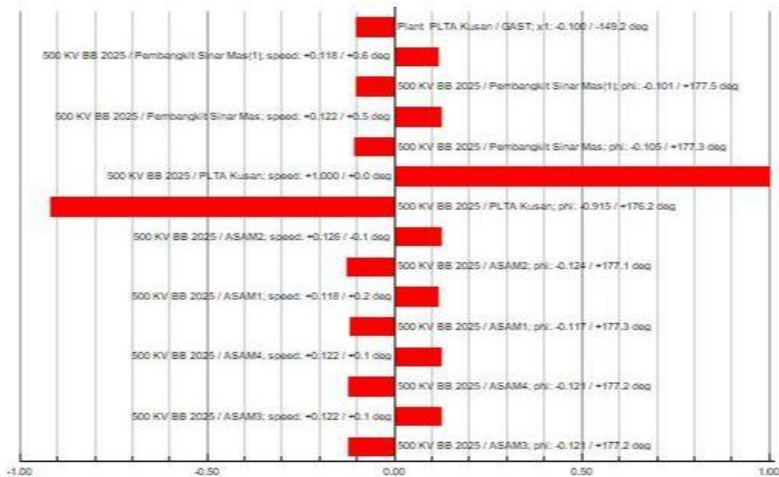
Participation Factor δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
Pembangkit Sinar Mas	Kaltimra	0.11	-177.3
Asam	Kalselteng	0.12	-177.2
PLTA Kusan	Kalselteng	0.92	-176.2

Tabel 4.11 Participation Factor ω Mode 291

Participation Factor ω			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
Asam	Kalselteng	0.13	0.1
PLTA Kusan	Kalselteng	1	0
Pembangkit Sinar Mas	Kaltimra	0.12	-0.5

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah yang berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 291 lebih sensitive terhadap pembangkit area Kalselteng terutama pada pembangkit PLTA Kusan. PLTA Kusan juga merupakan pembangkit yang paling *observeable* dilihat dari data tabel 4.9 oleh karena itu pembangkit PLTA Kusan merupakan pembangkit yang paling rentan terhadap gangguan jika dibandingkan pembangkit lainnya di mode 291.

Selain dari kedua tabel diatas, pembangkit dengan *participation factor* terbesar juga dapat dilihat dari bar plot *participation factor* mode 243 berikut ini :



Gambar 4.7 Plot Bar Participation Factor Mode 291

4. Mode Shape Eigenvalue (Mode 290)

Pada subbab ini akan ditampilkan *mode shape* atau *observeability* pada mode 290 yang memiliki *damping ratio* sebesar 2.70191% dengan frekuensi 1.12883Hz.

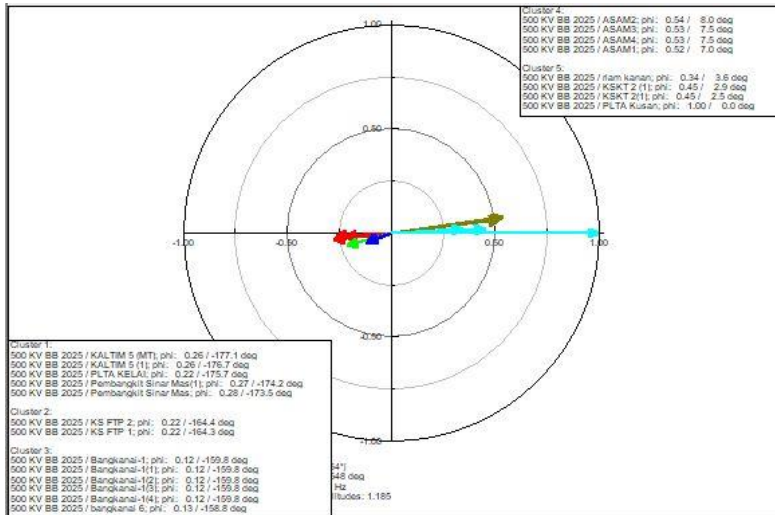
Mode shape atau *observeability* dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor (δ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor (ω). Mode 290 hanya menghasilkan *observeability* sudut rotor (δ) yang dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.12 *Observeability* δ Mode 290

Observeability δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
Bengkanai	Kalselteng	0.13	156.2
KS FTP	Kalselteng	0.22	163.7
Pembangkit Sinar Mas	Kaltimra	0.28	173
PLTA Kelai	Kaltimra	0.22	175.1
KALTIM 5	Kaltimra	0.26	176.1
KALTIM 5 (MT)	Kaltimra	0.26	176.5
PLTA Kusan	Kalselteng	1	-0.6
KSKT	Kalselteng	0.45	-3.1
Riam Kanan	Kalselteng	0.34	-4.1
Asam	Kalselteng	0.54	-8.5

Dari data *observeability* δ dapat dilihat bahwa pembangkit yang terlibat mencakup dua area, yaitu area Kaltimra dan Kalselteng. Dari data tabel 4.12 dapat disimpulkan bahwa mode 290 merupakan metode *inter-area* dimana area Kalselteng yaitu PLTA Kusan yang mempunyai magnitude yang paling besar beresilasi dengan pembangkit yang berasal dari area Kaltimra berdasarkan sudutnya yang berlawanan atau *counter phase*.

Berikut ini akan ditampilkan *observeability* mode 291 dalam bentuk fasor.



Gambar 4.8 Phasor Plot Observability δ Mode 290

5. Participation Factor (Mode 290)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 290 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 290. Mode 290 memiliki *participation factor* sudut rotor (δ) dan *participation factor* kecepatan sudut rotor (ω) karena pada mode elektromekanikal erat kaitannya dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari δ dan ω .

Tabel 4.13 Participation Factor δ Mode 290

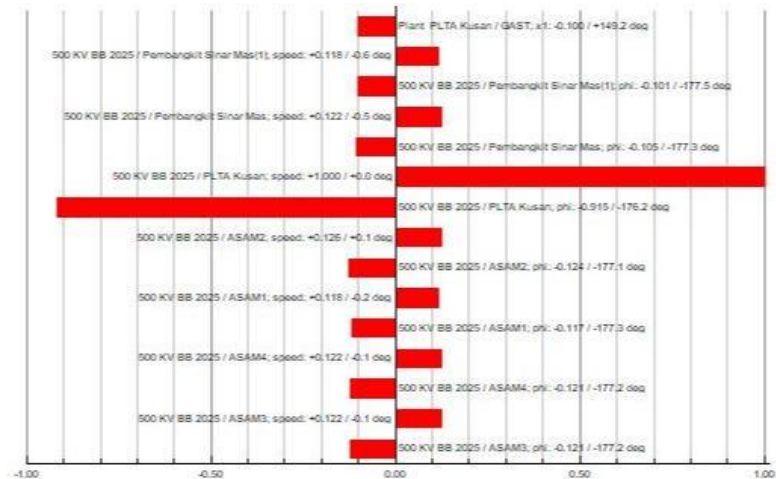
Participation Factor δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
PLTA Kusan	Kalselteng	0.92	176.2
Asam	Kalselteng	0.12	177.1
Pembangkit Sinar Mas	Kaltimra	0.11	177.3

Tabel 4.14 Participation Factor ω Mode 290

Participation Factor ω			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
Pembangkit Sinar Mas	Kaltimra	0.12	0.6
Asam	Kalselteng	0.13	-0.1
PLTA Kusan	Kalselteng	1	0

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah yang berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 290 lebih sensitive terhadap pembangkit area Kalselteng terutama pada pembangkit PLTA Kusan. PLTA Kusan juga merupakan pembangkit yang paling *observeable* dilihat dari data tabel 4.12 oleh karena itu pembangkit PLTA Kusan merupakan pembangkit yang paling rentan terhadap gangguan jika dibandingkan pembangkit lainya di mode 290.

Selain dari kedua tabel diatas, pembangkit dengan *participation factor* terbesar juga dapat dilihat dari bar plot *participation factor* mode 243 berikut ini.



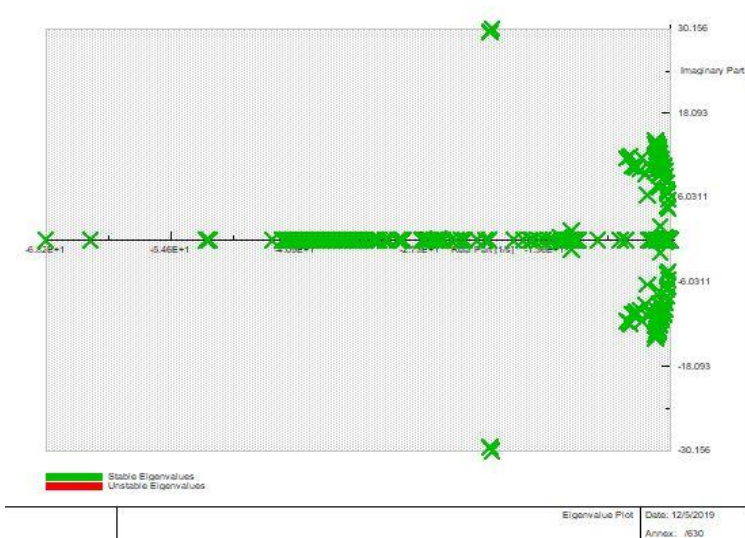
Gambar 4.9 Plot Bar Participation Factor Mode 290

5. Modal analysis Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2027

Pada tahun 2027 sistem kelistrikan Kalimantan sudah saling terhubung atau terinterkoneksi dengan sistem *backbone* 500 kV. Pada tahun 2027 terdapat penambahan tiga pembangkit jika dibandingkan dengan tahun 2025. Ketiga pembangkit tersebut adalah pembangkit Coal Kalselteng pada GI Batu Licin area Kalselteng dengan daya 80 MW, pembangkit MG Kaltara pada GI Tanjung Selor area Kaltimra dengan daya 80 MW dan pembangkit PLTU Kalselteng dua unit pada GI Amuntai area Kalselteng dengan daya 160 MW. Pembangkit dan beban yang digunakan sesuai dengan data pada bab 3.

1. Eigenvalue Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2027

Modal analysis pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2027 menghasilkan 911 nilai *eigenvalue* dimana seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif. Bagian *real* dari *eigenvalue* bernilai negatif menunjukkan bahwa sistem stabil. Berikut ini adalah plot seluruh nilai *eigenvalue*.



Gambar 4.10 Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2027

Dari 911 nilai *eigenvalue* akan ditampilkan nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis 2 nilai *eigenvalue* terendah dibawah *damping ratio* 5%. Hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5%, waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada waktu tersebut akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*

Tabel 4.15 *Eigenvalue* dengan Damping dibawah 10% Tahun 2027

mode	real	imaginer	frekuensi (Hz)	damping ratio (%)
333	-0.1659	5.7323617	0.912333692	2.893332207
334	-0.1659	-5.732362	0.912333692	2.893332207
324	-0.2163	6.6929073	1.065209277	3.230603768
325	-0.2163	-6.692907	1.065209277	3.230603768
346	-0.1605	4.4753655	0.712276541	3.583498235
347	-0.1605	-4.475365	0.712276541	3.583498235
297	-0.354	8.127417	1.293518592	4.351127085
298	-0.354	-8.127417	1.293518592	4.351127085
321	-0.3183	6.9950575	1.113297971	4.546185104
322	-0.3183	-6.995057	1.113297971	4.546185104
271	-0.5015	9.9498417	1.583566494	5.033753696
272	-0.5015	-9.949842	1.583566494	5.033753696
316	-0.3694	7.153013	1.138437378	5.157966584
317	-0.3694	-7.153013	1.138437378	5.157966584
259	-0.6028	10.526116	1.675283329	5.716912279
260	-0.6028	-10.52612	1.675283329	5.716912279
289	-0.5526	9.0571365	1.441488037	6.090461564
290	-0.5526	-9.057136	1.441488037	6.090461564
251	-0.703	10.712628	1.70496774	6.548400223
252	-0.703	-10.71263	1.70496774	6.548400223
273	-0.757	10.21461	1.625705724	7.390255362
274	-0.757	-10.21461	1.625705724	7.390255362
225	-0.9265	11.577617	1.842634994	7.976750496
226	-0.9265	-11.57762	1.842634994	7.976750496
342	-0.4008	4.8557852	0.772822217	8.225439087
343	-0.4008	-4.855785	0.772822217	8.225439087
265	-0.8697	10.438043	1.66126607	8.303649926

Tabel 4.15 (Lanjutan) *Eigenvalue* dengan Damping dibawah 10% Tahun 2027

mode	real	imaginer	frekuensi (Hz)	damping ratio (%)
266	-0.8697	-10.43804	1.66126607	8.303649926
275	-0.8424	10.061179	1.60128641	8.343894326
276	-0.8424	-10.06118	1.60128641	8.343894326
249	-0.9658	11.076248	1.762839627	8.686521006
250	-0.9658	-11.07625	1.762839627	8.686521006
216	-1.0753	12.275101	1.953642995	8.726276703
217	-1.0753	-12.2751	1.953642995	8.726276703
295	-0.7998	8.751806	1.392893193	9.100299655
296	-0.7998	-8.751806	1.392893193	9.100299655
277	-0.9137	9.995147	1.590777046	9.103753789
278	-0.9137	-9.995147	1.590777046	9.103753789
195	-1.2599	13.110857	2.086657659	9.565319601
196	-1.2599	-13.11086	2.086657659	9.565319601
210	-1.2671	13.028416	2.073536731	9.679934011
211	-1.2671	-13.02842	2.073536731	9.679934011
269	-1.0198	10.420372	1.658453792	9.739985294
270	-1.0198	-10.42037	1.658453792	9.739985294

Dari tabel diatas dapat dilihat dua nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* terkecil dibawah 5% yaitu mode 333 dan mode 334 yang selanjutnya akan dianalisis untuk mengetahui pembangkit mana saja yang berpengaruh pada masing-masing mode tersebut.

2. *Mode Shape Eigenvalue (Mode 333)*

Pada subbab ini akan ditampilkan *mode shape* atau *observeability* pada mode 333 yang memiliki *damping ratio* sebesar 2.89333% dengan frekuensi 0.91233Hz.

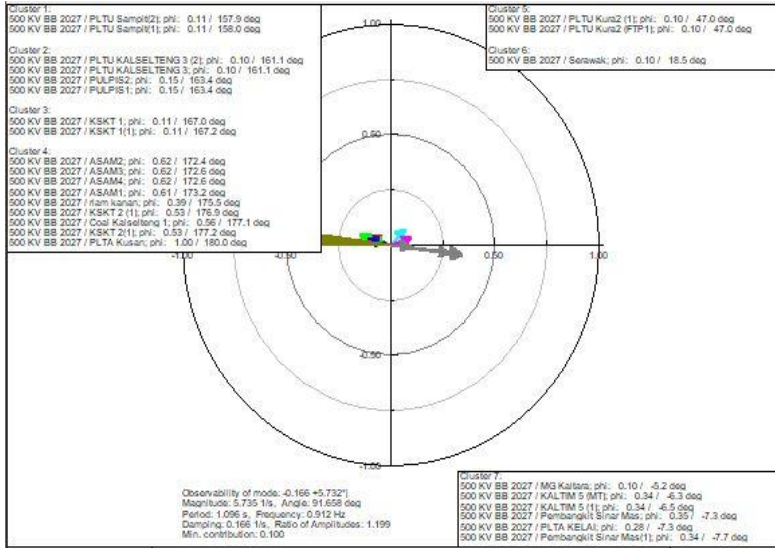
Mode shape atau *observeability* dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor (δ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor (ω). Mode 333 hanya menghasilkan *observeability* sudut rotor (δ) yang dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.16 *Observeability* δ Mode 333

Observeability δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
PLTU Sampit	Kalselteng	0.11	157.9
PLTU Kalselteng 3	Kalselteng	0.1	161.1
Pulpis	Kalselteng	0.15	163.4
KSKT	Kalselteng	0.11	167
Asam	Kalselteng	0.62	172.4
Riam Kanan	Kalselteng	0.39	175.5
Coal Kalselteng	Kalselteng	0.56	177.1
PLTA Kusan	Kalselteng	1	180
PLTU Kura2	Kalbar	0.1	47
Serawak	Kalbar	0.1	18.5
MG Kaltara	Kaltimra	0.1	-5.2
KALTIM 5	Kaltimra	0.34	-6.3
Pembangkit Sinar Mas	Kaltimra	0.35	-7.3
PLTA Kelai	Kaltimra	0.28	-7.3

Dari data *observeability* δ dapat dilihat bahwa pembangkit yang terlibat mencakup tiga area, yaitu area Kaltimra, Kalselteng dan Kalbar. Dari data tabel 4.16 dapat disimpulkan bahwa mode 333 merupakan metode *inter-area* dimana area Kalselteng yaitu PLTA Kusan yang mempunyai magnitude yang paling besar berosilasi dengan pembangkit yang berasal dari area Kaltimra berdasarkan sudutnya yang berlawanan atau *counter phase*.

Berikut ini akan ditampilkan *observeability* mode 333 dalam bentuk fasor.



Gambar 4.11 Phasor Plot Observability δ Mode 333

3. Participation Factor (Mode 333)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 333 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 333. Mode 333 memiliki *participation factor* sudut rotor (δ) dan *participation factor* kecepatan sudut rotor (ω) karena pada mode elektromekanikal erat kaitannya dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari δ dan ω .

Tabel 4.17 Participation Factor δ Mode 333

Participation Factor δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
PLTA Kusan	Kalselteng	0.92	175.7
KSKT	Kalselteng	0.12	175.7
Coal Kalselteng	Kalselteng	0.13	175.8
Asam	Kalselteng	0.17	176.4
Pembangkit Sinar Mas	Kaltimra	0.18	178.8

Tabel 4.18 *Participation Factor* ω Mode 333

Participation Factor ω			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
Pembangkit Sinar Mas	Kaltimra	0.21	1
KSKT	Kalselteng	0.13	0.4
Asam	Kalselteng	0.17	0.2
PLTA Kusan	Kalselteng	1	0
Coal Kalselteng	Kalselteng	0.14	-0.6

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah yang berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 333 lebih sensitive terhadap pembangkit area Kalselteng terutama pada pembangkit PLTA Kusan. PLTA Kusan juga merupakan pembangkit yang paling *observeable* dilihat dari data tabel 4.16 oleh karena itu pembangkit PLTA Kusan merupakan pembangkit yang paling rentan terhadap gangguan jika dibandingkan pembangkit lainnya di mode 333.

Selain dari kedua tabel diatas, pembangkit dengan *participation factor* terbesar juga dapat dilihat dari bar plot *participation factor* mode 333 berikut ini.



Gambar 4.12 Plot Bar Participation Factor Mode 333

4. Mode Shape Eigenvalue (Mode 334)

Pada subbab ini akan ditampilkan *mode shape* atau *observeability* pada mode 334 yang memiliki *damping ratio* sebesar 2.89333% dengan frekuensi 0.91233Hz.

Mode shape atau *observeability* dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor (δ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor (ω). Mode 334 hanya menghasilkan *observeability* sudut rotor (δ) yang dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.19 Observeability δ Mode 334

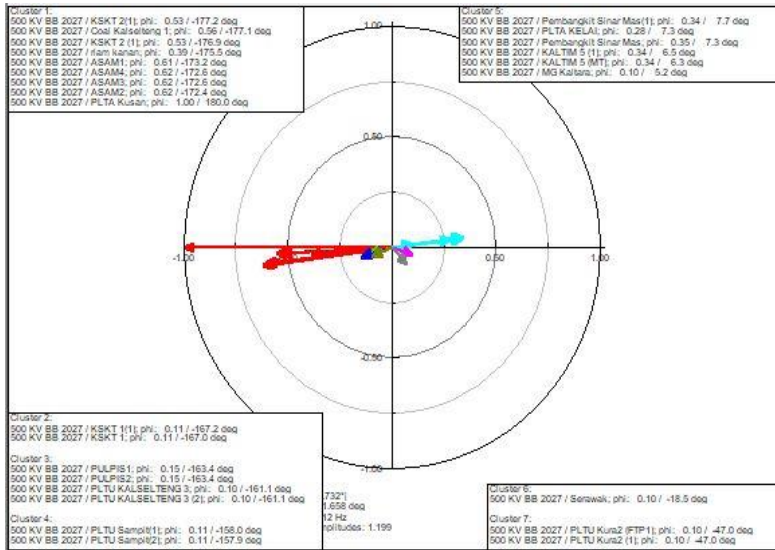
Observeability δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
KSKT	Kalselteng	0.53	-177.2
Coal Kalselteng	Kalselteng	0.56	-177.1
Riam Kanan	Kalselteng	0.39	-175.5
Asam	Kalselteng	0.62	-172.6
PLTA Kusan	Kalselteng	1	180
KSKT	Kalselteng	0.11	-167.2
Pulpis	Kalselteng	0.15	-163.4

Tabel 4.19 (Lanjutan) *Observeability* δ Mode 334

Observeability δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
PLTU Kalselteng 3	Kalselteng	0.1	- 161.1
PLTU Sampit	Kalselteng	0.11	-158
Pembangkit Sinar Mas	Kaltimra	0.35	7.3
PLTA Kelai	Kaltimra	0.28	7.3
KALTIM 5	Kaltimra	0.34	6.5
MG Katara	Kaltimra	0.1	5.2
Serawak	Kalbar	0.1	-18.5
PLTU Kura2	Kalbar	0.1	-47

Dari data *observeability* δ dapat dilihat bahwa pembangkit yang terlibat mencakup tiga area, yaitu area Kaltimra, Kalselteng dan Kalbar. Dari data tabel 4.19 dapat disimpulkan bahwa mode 334 merupakan metode *inter-area* dimana area Kalselteng yaitu PLTA Kusan yang mempunyai magnitude yang paling besar berosilasi dengan pembangkit yang berasal dari area Kaltimra berdasarkan sudutnya yang berlawanan atau *counter phase*.

Berikut ini akan ditampilkan *observeability* mode 334 dalam bentuk fasor.



Gambar 4.13 Phasor Plot Observability δ Mode 334

5. Participation Factor (Mode 334)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 334 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 334. Mode 334 memiliki *participation factor* sudut rotor (δ) dan *participation factor* kecepatan sudut rotor (ω) karena pada mode elektromekanikal erat kaitannya dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari δ dan ω .

Tabel 4.20 Participation Factor δ Mode 334

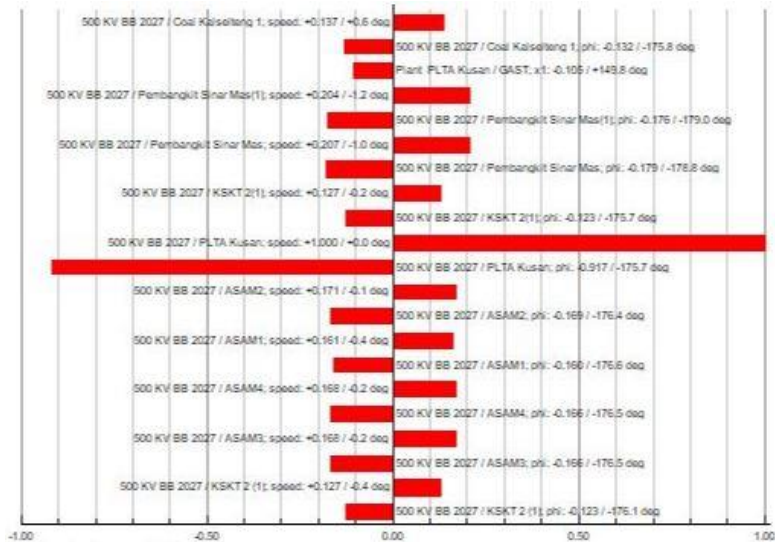
Participation Factor δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
Pembangkit Sinar Mas	Kaltimra	0.18	-179
Asam	Kalselteng	0.17	-176.5
KSKT	Kalselteng	0.12	-176.1
Coal Kalselteng	Kalselteng	0.13	-175.8
PLTA Kusan	Kalselteng	0.92	-175.7

Tabel 4.21 *Participation Factor* ω Mode 334

Participation Factor ω			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
Coal Kalselteng	Kalselteng	0.14	0.6
PLTA Kusan	Kalselteng	1	0
Asam	Kalselteng	0.17	-0.1
KSKT	Kalselteng	0.13	-0.2
Pembangkit Sinar Mas	Kaltimra	0.21	-1

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah yang berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 334 lebih sensitive terhadap pembangkit area Kalselteng terutama pada pembangkit PLTA Kusan. PLTA Kusan juga merupakan pembangkit yang paling *observeable* dilihat dari data tabel 4.19 oleh karena itu pembangkit PLTA Kusan merupakan pembangkit yang paling rentan terhadap gangguan jika dibandingkan pembangkit lainya di mode 334.

Selain dari kedua tabel diatas, pembangkit dengan *participation factor* terbesar juga dapat dilihat dari bar plot *participation factor* mode 334 berikut ini.



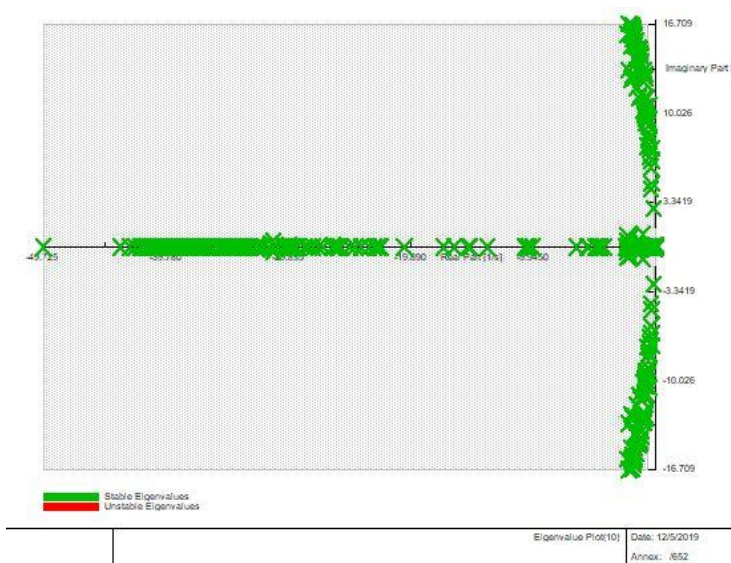
Gambar 4.14 Plot Bar *Participation Factor* Mode 334

6. *Modal Analysis* Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2050

Pada tahun 2050 sistem kelistrikan Kalimantan sudah saling terhubung atau terinterkoneksi dengan sistem *backbone* 500 kV. Pada tahun 2050 terdapat penambahan pembangkit dengan total 21560 MW jika dibandingkan dengan tahun 2027 yang datanya akan dilampirkan. Pembangkit dan beban yang digunakan sesuai dengan data pada bab 3.

1. *Eigenvalue* Sistem Kelistrikan Kalimantan Tahun 2050

Modal analysis pada sistem kelistrikan Kalimantan pada tahun 2050 menghasilkan 1231 nilai *eigenvalue* dimana seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif. Bagian *real* dari *eigenvalue* bernilai negatif menunjukkan bahwa sistem stabil. Berikut ini adalah plot seluruh nilai *eigenvalue*.



Gambar 4.15 Plot *Eigenvalue* Kelistrikan Kalimantan Tahun 2050

Dari 1231 nilai *eigenvalue* akan ditampilkan nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis 2 nilai *eigenvalue* terendah dibawah *damping ratio* 5%. Hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5%, waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada waktu tersebut akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.

Tabel 4.22 *Eigenvalue* dengan Damping dibawah 10% Tahun 2050

mode	real	imaginer	frekuensi (Hz)	damping ratio (%)
335	-0.2739	7.415845	1.18027	3.69128
336	-0.2739	-7.415845	1.18027	3.69128
472	-0.13	2.8350264	0.45121	4.57974
473	-0.13	-2.835026	0.45121	4.57974
278	-0.5074	10.604898	1.68782	4.77942
279	-0.5074	-10.6049	1.68782	4.77942
352	-0.3118	6.4949912	1.03371	4.79535

Tabel 4.22 (Lanjutan) *Eigenvalue* dengan Damping dibawah 10% Tahun 2050

mode	real	imaginer	frekuensi (Hz)	damping ratio (%)
353	-0.3118	-6.494991	1.03371	4.79535
271	-0.688	11.113176	1.76872	6.17873
272	-0.688	-11.11318	1.76872	6.17873
367	-0.3814	5.984298	0.95243	6.36036
268	-0.3814	-5.984298	0.95243	6.36036
337	-0.4692	7.2673003	1.15663	6.44349
338	-0.4692	-7.2673	1.15663	6.44349
289	-0.6196	9.5009735	1.51213	6.50735
290	-0.6196	-9.500973	1.51213	6.50735
334	-0.4483	6.7889716	1.08050	6.58879
345	-0.4483	-6.788972	1.08050	6.58879
94	-0.8349	12.63218	2.01047	6.59507
95	-0.8349	-12.63218	2.01047	6.59507
90	-0.8539	12.90959	2.05463	6.59999
91	-0.8539	-12.90959	2.05463	6.59999
327	-0.534	7.9963918	1.27267	6.66318
328	-0.534	-7.996392	1.27267	6.66318
325	-0.5466	8.1804771	1.30196	6.66634
326	-0.5466	-8.180477	1.30196	6.66634
285	-0.6514	9.7213857	1.54721	6.68532
286	-0.6514	-9.721386	1.54721	6.68532
466	-0.3197	4.7589516	0.75741	6.70216
467	-0.3197	-4.758952	0.75741	6.70216
305	-0.6127	9.1192391	1.45137	6.70416
306	-0.6127	-9.119239	1.45137	6.70416
317	-0.5929	8.5702201	1.36399	6.90221
318	-0.5929	-8.57022	1.36399	6.90221
84	-0.9295	13.233019	2.10610	7.00654
85	-0.9295	-13.23302	2.10610	7.00654
92	-0.9462	12.835288	2.04280	7.35226
93	-0.9462	-12.83529	2.04280	7.35226

Tabel 4.22 (Lanjutan) *Eigenvalue* dengan Damping dibawah 10% Tahun 2050

mode	real	imaginer	frekuensi (Hz)	damping ratio (%)
280	-0.7727	10.464232	1.66543	7.36455
281	-0.7727	-10.46423	1.66543	7.36455
269	-0.8516	11.251025	1.79066	7.54711
270	-0.8516	-11.25103	1.79066	7.54711
303	-0.7345	9.3261699	1.48431	7.85160
304	-0.7345	-9.32617	1.48431	7.85160
86	-1.0513	13.160939	2.09463	7.96301
87	-1.0513	-13.16094	2.09463	7.96301
307	-0.8256	10.159862	1.61699	8.09918
308	-0.8256	-10.15986	1.61699	8.09918
78	-1.1234	13.819001	2.19936	8.10263
79	-1.1234	-13.819	2.19936	8.10263
100	-1.0204	12.493321	1.98837	8.14066
101	-1.0204	-12.49332	1.98837	8.14066
66	-1.1745	14.272817	2.27159	8.20104
67	-1.1745	-14.27282	2.27159	8.20104
291	-0.7925	9.587726	1.52593	8.23809
292	-0.7925	-9.587726	1.52593	8.23809
295	-0.8258	9.9712513	1.58697	8.25394
296	-0.8258	-9.971251	1.58697	8.25394
297	-0.807	9.7124829	1.54579	8.28076
298	-0.807	-9.712483	1.54579	8.28076
301	-0.8187	9.8374767	1.56568	8.29343
302	-0.8187	-9.837477	1.56568	8.29343
63	-1.2102	14.538629	2.31389	8.29540
64	-1.2102	-14.53863	2.31389	8.29540
313	-0.8224	9.795345	1.55898	8.36620
314	-0.8224	-9.795345	1.55898	8.36620
57	-1.2534	14.783851	2.35292	8.44798
58	-1.2534	-14.78385	2.35292	8.44798
293	-0.8553	9.9526023	1.58401	8.56212
294	-0.8553	-9.952602	1.58401	8.56212
309	-0.8718	10.14358	1.61440	8.56349

Tabel 4.22 (Lanjutan) *Eigenvalue* dengan Damping dibawah 10% Tahun 2050

mode	real	imaginer	frekuensi (Hz)	damping ratio (%)
310	-0.8718	-10.14358	1.61440	8.56349
311	-0.878	10.140793	1.61396	8.62561
312	-0.878	-10.14079	1.61396	8.62561
333	-0.652	7.5138571	1.19587	8.64433
334	-0.652	-7.513857	1.19587	8.64433
319	-0.8833	10.138334	1.61357	8.67943
320	-0.8833	-10.13833	1.61357	8.67943
321	-0.8833	10.138334	1.61357	8.67943
322	-0.8833	-10.13833	1.61357	8.67943
61	-1.2841	14.621004	2.32701	8.74910
62	-1.2841	-14.621	2.32701	8.74910
468	-0.3823	4.2927021	0.68320	8.87023
469	-0.3823	-4.292702	0.68320	8.87023
287	-0.9044	10.06569	1.60200	8.94870
288	-0.9044	-10.06569	1.60200	8.94870
59	-1.3252	14.748923	2.34736	8.94914
60	-1.3252	-14.74892	2.34736	8.94914
299	-0.8918	9.8581618	1.56898	9.00953
300	-0.8918	-9.858162	1.56898	9.00953
55	-1.3625	14.895336	2.37067	9.10946
56	-1.3625	-14.89534	2.37067	9.10946
283	-0.9688	10.223111	1.62706	9.43409
284	-0.9688	-10.22311	1.62706	9.43409
80	-1.304	13.518674	2.15156	9.60124
81	-1.304	-13.51867	2.15156	9.60124

Dari tabel diatas dapat dilihat dua nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* terkecil dibawah 5% yaitu mode 335 dan mode 336 yang selanjutnya akan dianalisis untuk mengetahui pembangkit mana saja yang berpengaruh pada masing-masing mode tersebut.

2. Mode Shape Eigenvalue (Mode 335)

Pada subbab ini akan ditampilkan *mode shape* atau *observeability* pada mode 335 yang memiliki *damping ratio* sebesar 3.69128% dengan frekuensi 1.18027Hz.

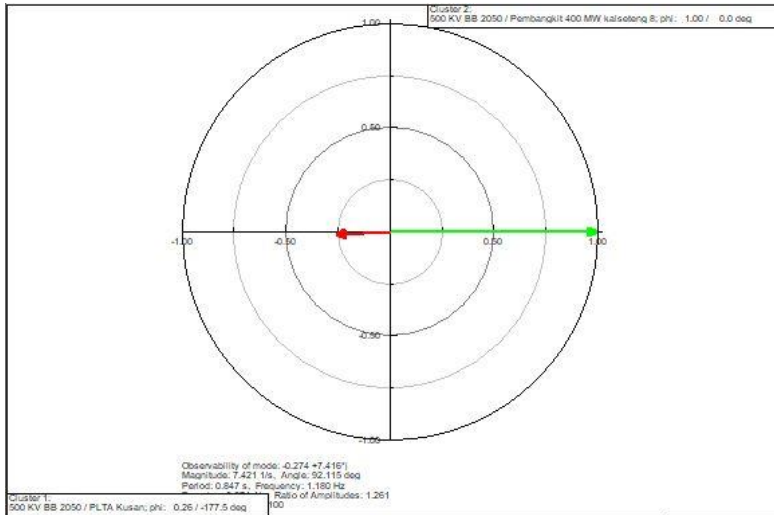
Mode shape atau *observeability* dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor (δ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor (ω). Mode 335 hanya menghasilkan *observeability* sudut rotor (δ) yang dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.23 *Observeability* δ Mode 335

Observeability δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
PLTA Kusan	Kalselteng	0.26	-177.5
Pembkt 400 MW Kalselteng	Kalselteng	1	0

Dari data *observeability* δ dapat dilihat bahwa pembangkit 400 MW Kalselteng memiliki magnitude lebih besar dari PLTA Kusan yang sama-sama berada di area Kalselteng dengan frekuensi 1.18027Hz dimana dapat ditentukan bahwa mode 335 merupakan mode *local-area* berdasarkan sudutnya yang berlawanan atau *counter phase*.

Berikut ini akan ditampilkan *observeability* mode 335 dalam bentuk fasor.



Gambar 4.16 Phasor Plot *Observability* δ Mode 335

3. *Participation Factor (Mode 335)*

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 335 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 335. Mode 335 memiliki *participation factor* sudut rotor (δ) dan *participation factor* kecepatan sudut rotor (ω) karena pada mode elektromekanikal erat kaitannya dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari δ dan ω .

Tabel 4.24 *Participation Factor* δ Mode 335

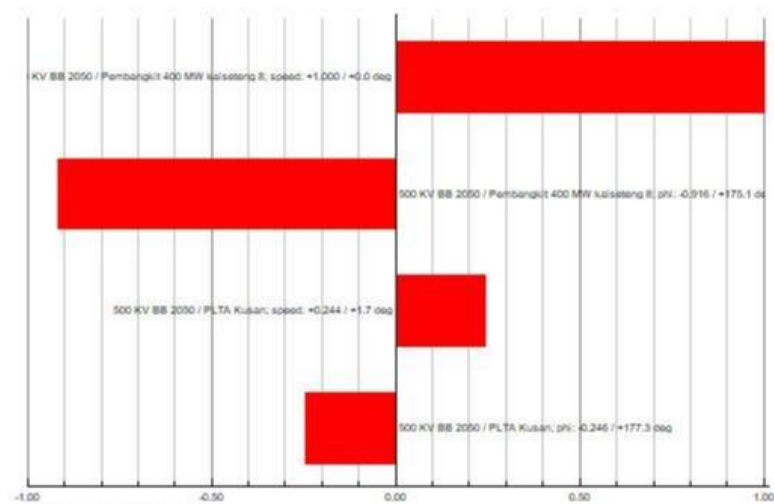
Participation Factor δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
Pembkt 400 MW Kalselteng	Kalselteng	0.92	175.1
PLTA Kusan	Kalselteng	0.25	177.3

Tabel 4.25 *Participation Factor* ω Mode 335

Participation Factor ω			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
PLTA Kusan	Kalselteng	0.24	1.7
Pembkt 400 MW Kalselteng	Kalselteng	1	0

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah yang berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 335 lebih sensitive terhadap pembangkit area Kalselteng terutama pada pembangkit 400 MW Kalselteng. Pembangkit 400 MW Kalselteng juga merupakan pembangkit yang paling *observable* dilihat dari data tabel 4.23 oleh karena itu pembangkit 400 MW Kalselteng merupakan pembangkit yang paling rentan terhadap gangguan jika dibandingkan PLTA Kusan di mode 335.

Selain dari kedua tabel diatas, pembangkit dengan *participation factor* terbesar juga dapat dilihat dari bar plot *participation factor* mode 335 berikut ini.



Gambar 4.17 Plot Bar *Participation Factor* Mode 335

4. Mode Shape Eigenvalue (Mode 336)

Pada subbab ini akan ditampilkan *mode shape* atau *observeability* pada mode 336 yang memiliki *damping ratio* sebesar 3.69128% dengan frekuensi 1.18027Hz.

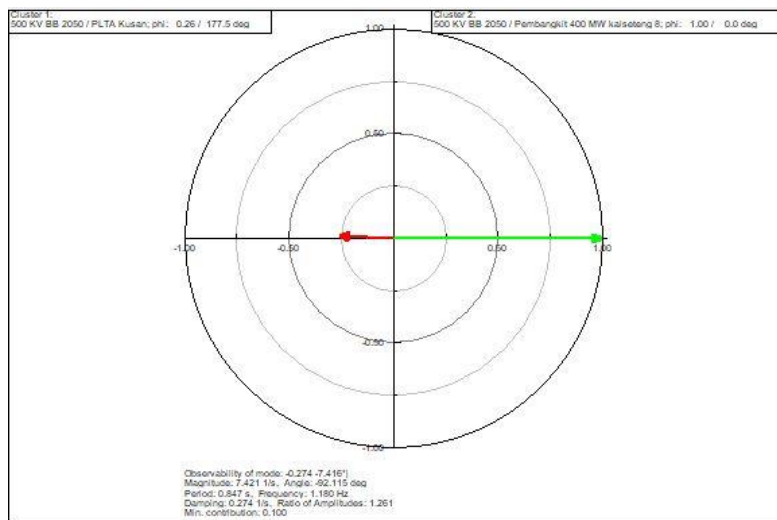
Mode shape atau *observeability* dapat dilihat berdasarkan *observeability* sudut rotor (δ) dan *observeability* kecepatan sudut rotor (ω). Mode 336 hanya menghasilkan *observeability* sudut rotor (δ) yang dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.26 *Observeability* δ Mode 336

Observeability			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
PLTA Kusan	Kalselteng	0.26	177.5
Pembkt 400 MW Kalselteng	Kalselteng	1	0

Dari data *observeability* δ dapat dilihat bahwa pembangkit 400 MW Kalselteng memiliki magnitude lebih besar dari PLTA Kusan yang sama-sama berada di area Kalselteng dengan frekuensi 1.18027Hz dimana dapat ditentukan bahwa mode 336 merupakan mode *local-area* berdasarkan sudutnya yang berlawanan atau *counter phase*.

Berikut ini akan ditampilkan *observeability* mode 336 dalam bentuk fasor.



Gambar 4.18 Phasor Plot *Observeability* δ Mode 336

5. Participation Factor (Mode 336)

Pada subbab ini akan ditampilkan *participation factor* dari mode 336 untuk mengetahui *state variable* dan generator mana saja yang memiliki kontribusi terhadap nilai *eigenvalue* pada mode 336. Mode 336 memiliki *participation factor* sudut rotor (δ) dan *participation factor* kecepatan sudut rotor (ω) karena pada mode elektromekanikal erat kaitannya dengan rotor sehingga *participation factor* terbesar berasal dari δ dan ω .

Tabel 4.27 Participation Factor δ Mode 336

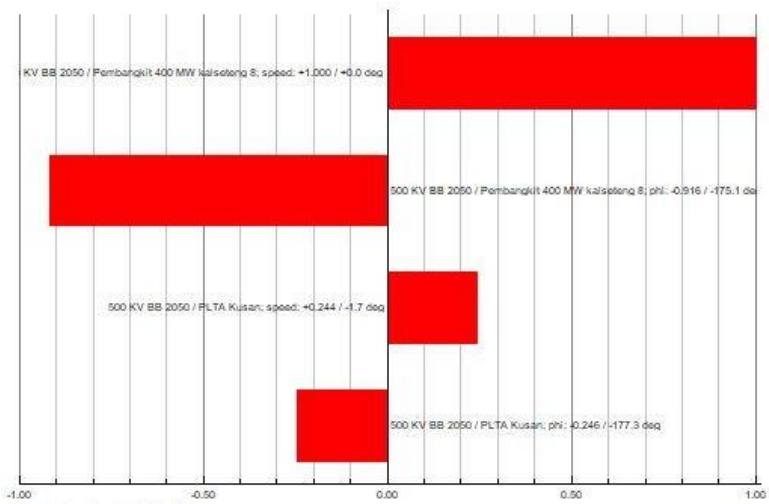
Participation Factor δ			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
PLTA Kusan	Kalselteng	0.25	-177.3
Pembkt 400 MW Kalselteng	Kalselteng	0.92	-175.1

Tabel 4.28 Participation Factor ω Mode 336

Participation Factor			
Nama pembangkit	Area	Magnitude	Angel
Pembkt 400 MW Kalselteng	Kalselteng	1	0
PLTA Kusan	Kalselteng	0.24	-1.7

Tabel diatas menampilkan *participation factor* dari mode yang bersangkutan, dapat dilihat *participation factor* terbesar adalah yang berasal dari state yang berhubungan erat dengan rotor dikarenakan merupakan mode elektromekanikal, berdasarkan *participation factornya* dapat dilihat bahwa *eigenvalue* untuk mode 336 lebih sensitive terhadap pembangkit area Kalselteng terutama pada pembangkit 400 MW Kalselteng. Pembangkit 400 MW Kalselteng juga merupakan pembangkit yang paling *observeable* dilihat dari data tabel 4.26 oleh karena itu pembangkit 400 MW Kalselteng merupakan pembangkit yang paling rentan terhadap gangguan jika dibandingkan PLTA Kusan di mode 336.

Selain dari kedua tabel diatas, pembangkit dengan *participation factor* terbesar juga dapat dilihat dari bar plot *participation factor* mode 336 berikut ini.



Gambar 4.19 Plot Bar *Participation Factor Mode 336*

BAB 5

PENUTUP

7. Kesimpulan

Berdasarkan studi kestabilan sistem kelistrikan Kalimantan yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

32. Sistem kelistrikan Kalimantan yang terkoneksi dengan mempertimbangkan beban sabah stabil dari sisi *small-signal stability* pada tahun 2022, 2025, 2026 dan 2050.
33. Pada tahun 2022 memiliki nilai *eigenvalue* dengan *damping* terendah yaitu 2.134%.
34. Skenario interkoneksi pada kelistrikan Kalimantan menimbulkan mode osilasi *inter-area* pada tahun 2025 dan 2027.
35. Skenario interkoneksi pada kelistrikan Kalimantan menimbulkan mode osilasi *local-area* pada tahun 2022 dan 2050.
36. *Eigenvalue*, *damping ratio*, dan frekuensi osilasi dari suatu mode dipengaruhi oleh topologi dari sistem, kondisi operasi pembangkit, dan kondisi pembebanan.

8. Saran

37. Perlu dilakukan studi lanjutan untuk meningkatkan *damping ratio* pada nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* yang rendah.
38. Dalam penelitian selanjutnya dilakukan studi kestabilan transient untuk mengetahui kestabilan sistem dari sisi kestabilan transient.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

39. P. Kundur, *Power System Stability and Control*: McGraw-Hill Education, 1994.
40. P. Kundur and e. al, "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Term and Definitions," *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 19, May 2004.
41. P. P. (Persero). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2018-2027*.
42. P. P. (Persero). *Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional 2018-2037*.
43. D. P. GmbH. *DigSILENT PowerFactory 15.1.2 User's Manual*.
44. A. Prakasha, "Fundamental Study of Small-Signal Stability of Hybrid Power Systems," Master, Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science Delft University of Technology, Netherlands, 2017.
45. F. Dussaud, "An Application of Modal Analysis in Electric Power Systems to Study Inter-area Oscillations," Electrical Engineering, KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Stockholm, Sweden, 2015.
46. D.V.Nair and M. S. R. Murty, "Modal analysis of Power System and study of oscillatory instability," in *2016 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)*, 2016, pp. 1-6.
47. G. A and P. Monzón, "Modal analysis of the Uruguayan electrical power system," in *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 1-6.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Pembangkit Kalbar Tahun 2022

GI	Nama Pembangkit	Daya (MW)	Kapasitas (MVA)
Parit Baru	Kalbar Peaker 1-1	20	31.25
	Kalbar Peaker 1-2	20	31.25
	Kalbar Peaker 1-3	20	31.25
	Kalbar Peaker 1-4	20	31.25
	MPP Kalbar-1	20	31.25
	MPP Kalbar-2	20	31.25
	MPP Kalbar-3	20	31.25
	MPP Kalbar-4	20	31.25
	PLTU Parit Baru-1	30	62.5
	PLTU Parit Baru-1(1)	30	62.5
Singkawan dan senggiring	PLTU Kalbar 1-(2)	80	125
	PLTU Kalbar 1-1	80	125
	PLTU Kura2 (1)	27.5	35
	PLTU Kura2 (FTP1)	27.5	35
	PLTU Parit Baru(2)	40	62.5
	PLTU Parit Baru(3)	40	62.5
Kota baru	PLTU Kalbar 2-2	90	125
	PLTU Kalbar 2-2(1)	90	125
Tayan	PLTU Kalbar 3	80	125
	PLTU Kalbar 3 (2)	80	125
Bengkayang	Serawak	90	125
	Grid	230	
Total		1175	1445

Lampiran 2. Data Pembangkit Kalselteng Tahun 2022

GI	Nama Pembangkit	Daya (MW)	Kapasitas (MVA)
Asam	ASAM1	50	85.312
	ASAM2	50	85.312
Satui, Mantuil	ASAM3	50	85.312
	ASAM4	50	85.312
	KSKT 2 (1)	80	125
Taweh	KSKT 2(1)	80	125
	Bangkanai-1	40	62.5
	Bangkanai-1(1)	40	62.5
	Bangkanai-1(2)	40	62.5
	Bangkanai-1(3)	40	62.5
	Bangkanai-1(4)	40	62.5
Tanjung	bangkanai 6	40	62.5
	KS FTP 1	80	125
Kasongan	KS FTP 2	80	125
	KSKT 1	80	125
Cempaka, Rantau	KSKT 1(1)	80	125
	PLTA Kusan	54	250
Sebar	PLTG KALSEL	80	125
	PLTG KALSEL(1)	80	125
Sampit	PLTU Sampit(1)	24	31.25
	PLTU Sampit(2)	23	31.25
Selat, Palangka, Palngkaraya	PULPIS1	50	85.312
	PULPIS2	50	85.312
Cempaka	riam kanan	20	62.5
Total		1301	2261.872

Lampiran 3 Data pembangkit Kaltimra Tahun 2022

GI	Nama Pembangkit	Daya (MW)	Kapasitas (MVA)
Embalut	COGINDO	22.5	60
	GT 1	20	62.5
	GT 2	20	62.5
	KALTIM 4	15	125
	KALTIM 4(1)	80	125
	PLTG KALTIM PEAKING	80	125
	PLTG Kaltim	80	250
	ST	20	62.5
Senipah	GT SNP	35	65.882
	GT SNP(2)	35	65.882
Muara wahau	KALTIM 5 (1)	80	125
	KALTIM 5 (MT)	50	125
Bontang koala	KALTIM PEAKING 1	90	125
	KALTIM PEAKING 2	90	125
Bontang	MPP	20	30
	MPP(1)	20	30
	PLTU KALTIM FTP (1)	50	250
	PLTU KALTIM FTP (2)	50	250
Malinau	PLTA KALTIMRA	100	250
	PLTA KALTIMRA(1)	100	250
	PLTA KALTIMRA(2)	100	250
	PLTA KALTIMRA(3)	100	250

Lampiran 3 (lanjutan) Data pembangkit Kaltimra Tahun 2022

GI	Nama Pembangkit	Daya (MW)	Kapasitas (MVA)
Talisayan	PLTA KELAI	40	62.5
Kembang janggut	PLTA TABANG	80	125
	PLTA TABANG(1)	80	125
	PLTA TABANG(2)	80	125
	PLTA TABANG(3)	70	125
Bukuan, Senipah	PLTU KALTIM MT	15	62.5
	PLTU KALTIM MT(1)	15	62.5
Tanjung batu	Pembangkit Sinar Mas	50	250
	Pembangkit Sinar Mas(1)	100	250
Samberah	SMB 1	17	30
	SMB 2	17	30
TLK BPP	TBPP 1	50	125
	TBPP 2	50	125
Total		1921.5	4561.764

Lampiran 4 Data Pembangkit Kalbar Tahun 2025

GI	Nama Pembangkit	Daya (MW)	Kapasitas (MVA)
Parit Baru	Kalbar Peaker 1-1	20	31.25
	Kalbar Peaker 1-2	20	31.25
	Kalbar Peaker 1-3	20	31.25
	Kalbar Peaker 1-4	20	31.25
	MPP Kalbar-1	20	31.25
	MPP Kalbar-2	20	31.25
	MPP Kalbar-3	20	31.25
	MPP Kalbar-4	20	31.25
	PLTU Parit Baru-1	30	62.5
	PLTU Parit Baru-1(1)	30	62.5
Singkawan dan senggiring	PLTU Kalbar 1-(2)	80	125
	PLTU Kalbar 1-1	80	125
	PLTU Kura2 (1)	27.5	35
	PLTU Kura2 (FTP1)	27.5	35
	PLTU Parit Baru(2)	40	62.5
	PLTU Parit Baru(3)	40	62.5
Kota baru	PLTU Kalbar 2-2	90	125
	PLTU Kalbar 2-2(1)	90	125
Tayan	PLTU Kalbar 3	80	125
	PLTU Kalbar 3 (2)	80	125
Bengkayang	Serawak	80	125
	Grid	230	
Total		1165	1445

Lampiran 5 Data Pembangkit Kalselteng Tahun 2025

GI	Nama Pembangkit	Daya (MW)	Kapasitas (MVA)
Asam	ASAM1	50	85.312
	ASAM2	50	85.312
Satui, Mantuil	ASAM3	50	85.312
	ASAM4	50	85.312
	KSKT 2 (1)	80	125
	KSKT 2(1)	80	125
Taweh	Bangkanai-1	40	62.5
	Bangkanai-1(1)	40	62.5
	Bangkanai-1(2)	40	62.5
	Bangkanai-1(3)	40	62.5
	Bangkanai-1(4)	40	62.5
	bangkanai 6	40	62.5
Tanjung	KS FTP 1	80	125
	KS FTP 2	80	125
Kasongan	KSKT 1	80	125
	KSKT 1(1)	80	125
Cempaka, Rantau	PLTA Kusan	54	250
Sebar	PLTG KALSEL	80	125
	PLTG KALSEL(1)	80	125
Sampit	PLTU Sampit(1)	24	31.25
	PLTU Sampit(2)	23	31.25
Selat, Palangka, Palngkaraya	PULPIS1	50	85.312
	PULPIS2	50	85.312
Cempaka	riam kanan	20	62.5
Total		1301	2261.872

Lampiran 6 Data pembangkit Kaltimra Tahun 2025

GI	Nama Pembangkit	Daya (MW)	Kapasitas (MVA)
Embalut	COGINDO	22.5	60
	GT 1	20	62.5
	GT 2	20	62.5
	KALTIM 4	15	125
	KALTIM 4(1)	80	125
	PLTG KALTIM PEAKING	80	125
	PLTG Kaltim	80	250
	ST	20	62.5
Senipah	GT SNP	35	65.882
	GT SNP(2)	35	65.882
Muara wahau	KALTIM 5 (1)	80	125
	KALTIM 5 (MT)	80	125
Bontang koala	KALTIM PEAKING 1	80	125
	KALTIM PEAKING 2	80	125
Bontang	MPP	20	30
	MPP(1)	20	30
	PLTU KALTIM FTP (1)	50	250
	PLTU KALTIM FTP (2)	50	250
Malinau	PLTA KALTIMRA	100	250
	PLTA KALTIMRA(1)	100	250
	PLTA KALTIMRA(2)	100	250
	PLTA KALTIMRA(3)	100	250

Lampiran 7 (Lanjutan) Data pembangkit Kaltimra Tahun 2025

GI	Nama Pembangkit	Daya (MW)	Kapasitas (MVA)
Talisayan	PLTA KELAI	40	62.5
Kembang janggut	PLTA TABANG	80	125
	PLTA TABANG(1)	80	125
	PLTA TABANG(2)	80	125
	PLTA TABANG(3)	70	125
Bukuan, Senipah	PLTU KALTIM MT	15	62.5
	PLTU KALTIM MT(1)	15	62.5
Tanjung batu	Pembangkit Sinar Mas	50	250
	Pembangkit Sinar Mas(1)	50	250
Samberah	SMB 1	17	30
	SMB 2	17	30
TLK BPP	TBPP 1	50	125
	TBPP 2	50	125
Kota bangun	PLTU KALTIM 3 MT	80	125
	PLTU KALTIM 3 MT (2)	80	125
Total		2041.5	4811.764

Lampiran 8 Data Pembangkit Kalbar Tahun 2027

GI	Nama Pembangkit	Daya (MW)	Kapasitas (MVA)
Parit Baru	Kalbar Peaker 1-1	20	31.25
	Kalbar Peaker 1-2	20	31.25
	Kalbar Peaker 1-3	20	31.25
	Kalbar Peaker 1-4	20	31.25
	MPP Kalbar-1	20	31.25
	MPP Kalbar-2	20	31.25
	MPP Kalbar-3	20	31.25
	MPP Kalbar-4	20	31.25
	PLTU Parit Baru-1	30	62.5
	PLTU Parit Baru-1(1)	30	62.5
Singkawan dan senggiring	PLTU Kalbar 1-(2)	80	125
	PLTU Kalbar 1-1	80	125
	PLTU Kura2 (1)	27.5	35
	PLTU Kura2 (FTP1)	27.5	35
	PLTU Parit Baru(2)	40	62.5
	PLTU Parit Baru(3)	40	62.5
Kota baru	PLTU Kalbar 2-2	90	125
	PLTU Kalbar 2-2(1)	90	125
Tayan	PLTU Kalbar 3	80	125
	PLTU Kalbar 3 (2)	80	125
Bengkayang	Serawak	80	125
	Grid	230	
Total		1165	1445

Lampiran 9 Data Pembangkit Kalselteng Tahun 2027

GI	Nama Pembangkit	Daya (MW)	Kapasitas (MVA)
Asam	ASAM1	50	85.312
	ASAM2	50	85.312
Satui, Mantuil	ASAM3	50	85.312
	ASAM4	50	85.312
	KSKT 2 (1)	80	125
	KSKT 2(1)	80	125
Taweh	Bangkanai-1	40	62.5
	Bangkanai-1(1)	40	62.5
	Bangkanai-1(2)	40	62.5
	Bangkanai-1(3)	40	62.5
	Bangkanai-1(4)	40	62.5
	bangkanai 6	40	62.5
Tanjung	KS FTP 1	80	125
	KS FTP 2	80	125
Kasongan	KSKT 1	80	125
	KSKT 1(1)	80	125
Cempaka, Rantau	PLTA Kusan	54	250
Sebar	PLTG KALSEL	80	125
	PLTG KALSEL(1)	80	125
Sampit	PLTU Sampit(1)	24	31.25
	PLTU Sampit(2)	23	31.25
Selat, Palangka, Palngkaraya	PULPIS1	50	85.312
	PULPIS2	50	85.312
Cempaka	riam kanan	20	62.5
Batu licin	Coal Kalselteng 1	80	125
Amuntai	PLTU Kalselteng 4	80	125
	PLTU Kalselteng 4(1)	80	25
Total		1541	2536.872

Lampiran 10 Data pembangkit Kaltimra Tahun 2027

GI	Nama Pembangkit	Daya (MW)	Kapasitas (MVA)
Embalut	COGINDO	22.5	60
	GT 1	20	62.5
	GT 2	20	62.5
	KALTIM 4	15	125
	KALTIM 4(1)	80	125
	PLTG KALTIM PEAKING	80	125
	PLTG Kaltim	80	250
	ST	20	62.5
Senipah	GT SNP	35	65.882
	GT SNP(2)	35	65.882
Muara wahau	KALTIM 5 (1)	80	125
	KALTIM 5 (MT)	80	125
Bontang koala	KALTIM PEAKING 1	80	125
	KALTIM PEAKING 2	80	125
Bontang	MPP	20	30
	MPP(1)	20	30
	PLTU KALTIM FTP (1)	80	250
	PLTU KALTIM FTP (2)	80	250
Malinau	PLTA KALTIMRA	100	250
	PLTA KALTIMRA(1)	100	250
	PLTA KALTIMRA(2)	100	250
	PLTA KALTIMRA(3)	100	250

Lampiran 11 (Lanjutan) Data pembangkit Kaltimra Tahun 2027

GI	Nama Pembangkit	Daya (MW)	Kapasitas (MVA)
Talisayan	PLTA KELAI	40	62.5
Kembang janggut	PLTA TABANG	80	125
	PLTA TABANG(1)	80	125
	PLTA TABANG(2)	80	125
	PLTA TABANG(3)	70	125
Bukuan, Senipah	PLTU KALTIM MT	15	62.5
	PLTU KALTIM MT(1)	15	62.5
Tanjung batu	Pembangkit Sinar Mas	150	250
	Pembangkit Sinar Mas(1)	150	250
Samberah	SMB 1	17	30
	SMB 2	17	30
TLK BPP	TBPP 1	50	125
	TBPP 2	50	125
Kota bangun	PLTU KALTIM 3 MT	80	125
	PLTU KALTIM 3 MT (2)	80	125
Tanjung selor	MG Kaltara	80	125
Total		2381.5	4936.764