

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan pesatnya perkembangan global, energi listrik telah menjadi kebutuhan dasar yang sangat penting bagi manusia. Oleh karena itu, aspek keandalan serta kestabilan dalam pendistribusian energi listrik menjadi syarat penting untuk menjamin ketersediaan energi tersebut (Syamsy, Tohir, & Supriyanto, 2024). Berdasarkan Undang-Undang No. 30 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan, pemegang izin usaha penyediaan tenaga listrik wajib menyediakan tenaga listrik yang memenuhi standar mutu dan keandalan yang berlaku. Salah satu aspek krusial dalam menjaga kontinuitas pelayanan listrik adalah menjaga kestabilan sistem (*power system stability*). Kestabilan sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai sebuah karakteristik sistem tenaga listrik yang memungkinkan mesin-mesin di dalamnya tetap beroperasi secara sinkron pada kondisi normal, serta mampu memulihkan keseimbangan sistem setelah terjadi suatu gangguan (Buang & Patandung, 2024).

Dalam operasi sistem interkoneksi yang luas, salah satu ancaman stabilitas yang sering muncul namun sulit dideteksi secara visual adalah Kestabilan Sinyal Kecil (*Small Signal Stability*). *Small signal stability* merujuk pada ketahanan sistem dalam menghadapi gangguan-gangguan kecil dalam bentuk osilasi elektromekanik yang tak teredam (Buang & Patandung, 2024). Fenomena ini diakibatkan perubahan beban dan adanya variasi parameter sistem yang menyimpang dari titik operasi sistem. Ketidakstabilan ini ditandai dengan munculnya Osilasi Frekuensi Rendah (*Low Frequency Oscillation / LFO*) pada rentang frekuensi 0,1 Hz hingga 2,0 Hz.

Permasalahan stabilitas sinyal kecil ini menjadi sangat krusial, khususnya pada sistem yang saling terinterkoneksi (*interconnected power systems*) dengan beban yang dinamis. Dalam situasi operasional tertentu, interaksi antar generator dalam sistem sering kali memicu fenomena osilasi elektromekanikal, di mana rotor generator berayun terhadap satu sama lain dengan frekuensi yang rendah (Kundur, 1994). Kegagalan sistem dalam menyediakan redaman yang memadai terhadap osilasi ini dapat menyebabkan amplitudo ayunan daya (*power swing*) semakin membesar secara tidak terkendali. Kondisi ketidakstabilan ini berpotensi memicu bekerjanya sistem proteksi yang tidak diinginkan (*misoperation*), yang berujung pada lepasnya sinkronisasi generator, terpisahnya sistem (*islanding*), hingga kejadian pemadaman total (*blackout*).

Untuk mengevaluasi jenis kestabilan ini, metode Analisis Modal (*Eigenvalue Analysis*) merupakan pendekatan standar yang bekerja dengan melinearisasi sistem di sekitar titik operasinya. Secara teknis, metode ini bekerja dengan melinearisasi persamaan diferensial non-linear sistem di sekitar titik operasi tertentu untuk mendapatkan nilai eigen sebagai akar-akar persamaan karakteristiknya. Dari nilai eigen inilah kemudian diturunkan parameter rasio redaman (*damping ratio*). Namun,

dalam operasi nyata, kapasitas beban pada sistem tenaga listrik senantiasa bersifat dinamis dan dapat berubah sewaktu-waktu. Perubahan beban ini secara langsung mengakibatkan pergeseran titik operasi (*operating point*) pada sistem secara berkesinambungan. Masalah utamanya adalah pada titik operasi baru tersebut, karakteristik sistem bisa berubah. Sebuah sistem yang memiliki redaman yang baik pada beban normal bisa tiba-tiba mengalami pergeseran margin kestabilan diakibatkan adanya perubahan pada beban tersebut. Oleh karena itu, diperlukan analisis lanjutan pada berbagai skenario pembebanan untuk memetakan profil kestabilan sistem dalam rentang operasi yang lebih luas.

Guna menjawab kebutuhan analisis pada rentang operasi yang lebih luas tersebut, penelitian ini akan menerapkan metode simulasi sensitivitas beban. Penelitian ini berfokus pada analisis dampak variasi pembebanan yang dilakukan secara bertahap dalam skala kecil (*incremental steps*). Melalui simulasi ini, pola pergerakan dari nilai eigen dan perubahan rasio redaman dapat dipantau secara detail seiring dengan penambahan beban. Tujuannya bukan untuk melihat respon terhadap gangguan besar, melainkan untuk mengidentifikasi kecenderungan pergeseran margin kestabilan akibat perubahan beban yang kecil. Berdasarkan urgensi untuk memahami karakteristik dinamis sistem pada berbagai kondisi operasi ini, penulis mengangkat judul penelitian "PENGARUH VARIASI PEMBEBANAN TERHADAP NILAI EIGEN DAN *DAMPING RATIO* PADA KESTABILAN SINYAL KECIL SISTEM TENAGA LISTRIK".

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka dapat dirumuskan permasalahan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana nilai eigen dan rasio redaman sistem tenaga listrik pada kondisi operasi normal (*base case*) sebelum dilakukan variasi pembebanan?
2. Bagaimana pola pergerakan nilai eigen saat terjadi pergeseran titik operasi akibat perubahan beban?
3. Bagaimana sensitivitas perubahan nilai rasio redaman (*damping ratio*) terhadap perubahan beban?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan nilai eigen dan rasio redaman sistem tenaga listrik pada kondisi operasi normal (*base case*) sebagai data acuan awal sebelum dilakukan variasi pembebanan.
2. Menganalisis pola pergerakan nilai eigen pada bidang kompleks untuk melihat arah pergeseran kestabilan saat beban berubah.

3. Mengidentifikasi tingkat sensitivitas perubahan nilai rasio redaman terhadap perubahan beban guna memahami kecenderungan sistem dalam mempertahankan kestabilannya.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi perkembangan ilmu pengetahuan: memberikan referensi akademis mengenai karakteristik dinamis sistem tenaga listrik, khususnya analisis sensitivitas nilai eigen dan rasio redaman terhadap variasi pembebanan skala kecil.
2. Bagi operasi sistem tenaga: sebagai bahan masukan teknis mengenai pola perubahan margin kestabilan pada berbagai titik operasi, yang berguna untuk memantau kinerja sistem dalam meredam osilasi secara optimal.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus pada tujuan yang ingin dicapai, penulis menetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Sistem yang dianalisis adalah Sistem Uji Dua Area Empat Mesin (*Two-Area Four-Machine Test System*) sebagai representasi model sistem tenaga listrik multimesin.
2. Analisis dan simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory dengan *tools Modal/Eigenvalue Analysis*.
3. Variasi pembebanan dilakukan melalui skenario aliran daya (*load flow*) untuk mendapatkan titik operasi baru (*steady state*), bukan disimulasikan sebagai gangguan mendadak dalam domain waktu.
4. Analisis difokuskan pada kestabilan sinyal kecil (*small signal stability*), khususnya untuk mengamati pergeseran mode osilasi elektromekanikal akibat perubahan beban.
5. Parameter keluaran utama yang dianalisis adalah pergeseran nilai eigen dan perubahan rasio redaman (*damping ratio*).
6. Penelitian ini hanya berupa simulasi perangkat lunak (*software simulation*) dan tidak membahas implementasi perangkat keras (*hardware*).

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan untuk penelitian ini disusun sebagai berikut untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai isi skripsi:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai latar belakang pemilihan topik, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, sistematika penulisan, dan kajian pustaka.

BAB II METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan (perangkat lunak) yang digunakan, pengambilan data, diagram alir penelitian, serta tahapan penelitian.

BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan analisis nilai eigen dan rasio redaman pada kondisi normal (*base case*), pola pergerakan nilai eigen akibat variasi beban, serta identifikasi sensitivitas margin kestabilan sistem.

BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN

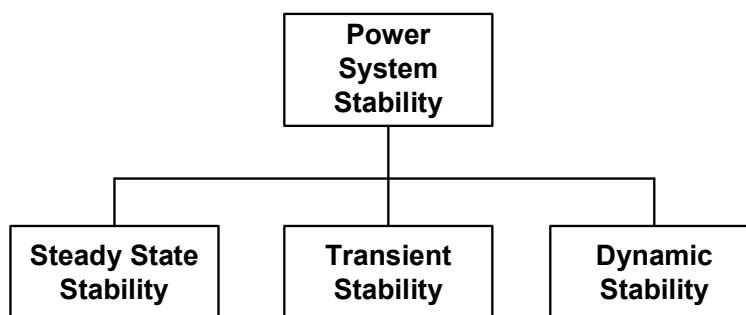
Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari seluruh rangkaian penelitian serta saran-saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

1.7 Kajian Pustaka

1.7.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Salah satu indikator utama dari sistem tenaga listrik yang ideal adalah aspek kestabilan, yaitu kemampuan jaringan untuk segera memulihkan diri menuju kondisi operasional normal sesaat setelah terkena dampak gangguan (Muslimin, Gunadin, & Kamil, 2023). Stabilitas sistem tenaga listrik diartikan sebagai kemampuan sistem tenaga listrik dalam menjaga sinkronisasi serta keseimbangan operasional saat menghadapi gangguan (Buang & Patandung, 2024). Berdasarkan penjelasan Saadat (1999), stabilitas dipahami sebagai kecenderungan sistem tenaga untuk menghasilkan gaya pemulihan yang setara atau melebihi kekuatan pengganggu demi mempertahankan kondisi setimbang. Selama gaya yang menjaga sinkronisasi antarmesin mampu meredam pengaruh pengganggu tersebut, maka sistem dinilai tetap stabil (tetap sinkron). Selain itu, Kundur et al. (2004) mendefinisikan stabilitas sistem tenaga sebagai kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk kembali mencapai titik keseimbangan operasi setelah mengalami gangguan fisik dari kondisi awal tertentu, dengan tetap menjaga sebagian besar variabel operasional pada batas yang diperbolehkan sehingga secara praktis keseluruhan sistem tetap utuh.

Kestabilan adalah aspek yang sangat penting dan harus diperhatikan dalam sistem tenaga listrik, karena kondisi kestabilan ini dapat dipengaruhi oleh adanya gangguan pada sistem. Klasifikasi gangguan dalam sistem tenaga terbagi menjadi gangguan kecil dan gangguan besar (Gunadin, et al., 2023). Gangguan kecil umumnya terjadi dalam bentuk perubahan beban yang terjadi secara terus-menerus, di mana sistem harus mampu menyesuaikan diri dengan perubahan kondisi tersebut. Sebaliknya, gangguan besar dapat terjadi dalam bentuk adanya hubung singkat pada saluran transmisi, hilangnya unit pembangkit atau beban besar, atau hilangnya *tie-link* antara dua subsistem. Ketidakstabilan sistem terjadi ketika gangguan tersebut memicu ketidakseimbangan sistem yang berkelanjutan. Kestabilan sistem daya harus dapat mempertahankan kondisi sinkron dari mesin-mesin sinkron yang beroperasi di dalam sistem tersebut (Kundur, 1994).



Gambar 1. Stabilitas Sistem Tenaga (Anuar, Wahab, Arshad, Romli, & Bakar, 2020)

Klasifikasi visual mengenai pembagian stabilitas dapat dilihat pada Gambar

1. Secara umum, analisis kestabilan ini dibagi menjadi tiga kategori utama berdasarkan jenis dan besarnya dampak gangguan, yakni:

1. Kestabilan keadaan tunak (*steady state stability*)

Stabilitas keadaan tunak adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap menjaga sinkronisasi antar mesin saat menghadapi gangguan kecil, seperti fluktuasi beban (Syahbuan, Zulfadli, & Hasibuan, 2018). Secara spesifik, kestabilan keadaan tetap berkaitan dengan respon sistem terhadap gangguan kecil yang muncul secara bertahap di sekitar titik keseimbangan pada kondisi operasional yang stabil. Kestabilan ini dipengaruhi oleh karakteristik dari berbagai komponen dalam sistem, seperti pembangkit, beban, jaringan transmisi, hingga sistem kendali yang diterapkan. Model pembangkit yang digunakan direpresentasikan dalam model sederhana karena gangguan yang dihadapi hanya berskala kecil di sekitar titik keseimbangan.

2. Kestabilan dinamis (*dynamic stability*)

Stabilitas dinamis adalah kondisi di mana sistem tetap mampu menjaga sinkronisasinya setelah melewati fase ayunan pertama atau periode stabilitas transien, hingga sistem mencapai titik keseimbangan baru (Syahbuan, Zulfadli, & Hasibuan, 2018). Kestabilan dinamis ialah kemampuan sistem untuk kembali pulih ke titik keseimbangan setelah terjadi gangguan kecil namun berlangsung dalam durasi waktu yang lama. Analisis pada kategori ini cenderung memiliki tingkat kompleksitas yang lebih tinggi karena mengharuskan keterlibatan berbagai komponen kontrol otomatis dalam setiap perhitungan simulasinya.

3. Kestabilan transien (*transient stability*)

Stabilitas transien merupakan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak sekitar satu ayunan (*swing*) pertama, dengan asumsi bahwa sistem pengatur tegangan otomatis pada pembangkit belum sempat bekerja merespons gangguan tersebut (Syahbuan, Zulfadli, & Hasibuan, 2018). Kestabilan ini juga sering disebut sebagai kestabilan peralihan, yang menunjukkan kapabilitas sistem untuk kembali ke kondisi setimbang atau sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang mengakibatkan sistem kehilangan kestabilan akibat gangguan yang melampaui kemampuan sistem untuk mengatasinya. Analisis

kestabilan ini menjadi metode utama dalam mengevaluasi perilaku dinamis sistem tenaga listrik, khususnya pada skenario gangguan seperti:

- a. Perubahan beban secara mendadak karena terlepasnya unit pembangkit.
- b. Perubahan parameter pada jaringan transmisi, misalnya akibat hubung singkat atau aktivitas pengoperasian saklar (*Switching*) (Orytuasikal, 2025).

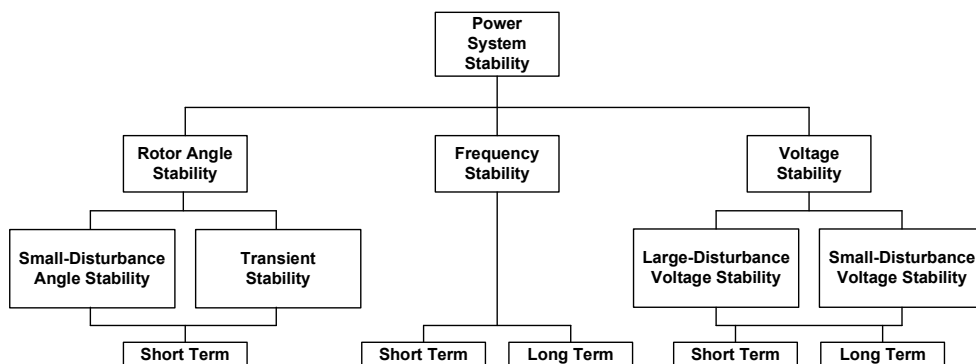
Penentuan klasifikasi stabilitas sistem tenaga didasarkan pada beberapa aspek pertimbangan berikut:

1. Karakteristik fisik dari mode ketidakstabilan yang muncul, yang dapat diidentifikasi melalui variabel sistem utama tempat ketidakstabilan dapat diamati.
2. Skala gangguan yang dianalisis, yang memengaruhi metode perhitungan dan tingkat akurasi dalam memprediksi kestabilan sistem.
3. Perangkat, proses, dan rentang waktu yang harus dipertimbangkan untuk mengevaluasi dan menilai kondisi stabilitas sistem.

Berbagai aspek teknis menentukan stabilitas sistem tenaga listrik, seperti kekuatan jaringan transmisi pada sistem yang berdekatan, karakteristik pada generator, termasuk inersia pada komponen berputar, serta parameter listrik seperti reaktansi transien dan karakteristik saturasi magnetik pada inti stator dan rotor. Aspek krusial lainnya mencakup kecepatan isolasi gangguan pada peralatan terdampak serta efektivitas *reclosing* otomatis untuk mengoperasikan kembali saluran (Hasibuan, 2017). Faktor-faktor utama yang memengaruhi stabilitas adalah:

1. Faktor-faktor mekanis yang meliputi:
 - a. Torsi masukan pada penggerak mula beban.
 - b. Inersia dari *prime mover* dan generator.
 - c. Inersia motor dan sumbu beban.
 - d. Torsi masukan sumbu beban.
2. Variabel torsi listrik yang terdiri dari:
 - a. Besaran tegangan internal yang dihasilkan oleh generator sinkron.
 - b. Nilai reaktansi sistem.
 - c. Tegangan internal yang terdapat pada motor sinkron (Hasibuan, 2017).

Kestabilan sistem tenaga menurut IEEE/CIGRE *Joint Task Force* dapat diklasifikasikan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik (Kundur, et al., 2004)

1. Stabilitas sudut rotor (*rotor angle stability*)

Stabilitas sudut rotor mengacu pada kemampuan mesin-mesin sinkron dalam sistem tenaga yang saling terhubung untuk tetap sinkron setelah mengalami gangguan. Kestabilan ini bergantung pada kemampuan sistem untuk menjaga atau memulihkan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik pada setiap mesin sinkron. Ketidakstabilan yang muncul biasanya ditandai dengan ayunan sudut yang semakin membesar pada beberapa generator, yang mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dengan generator lainnya.

Kestabilan sudut rotor berkaitan erat dengan kemampuan mesin-mesin sinkron dalam suatu sistem tenaga terinterkoneksi untuk mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan fisik. Pada kondisi tunak, terdapat keseimbangan antara torsi mekanik dan torsi elektromagnetik yang menjaga kecepatan rotor tetap konstan. Namun, ketika gangguan terjadi, keseimbangan ini terganggu sehingga menyebabkan percepatan atau perlambatan rotor yang mengubah posisi sudut rotor relatif terhadap sistem. Berdasarkan hubungan daya-sudut yang non-linier, penyimpangan sudut ini akan memicu transfer beban antar mesin dalam upaya sistem memulihkan keseimbangan energi kinetiknya.

Secara spesifik, perubahan torsi elektromagnetik yang terjadi selama proses ini dapat diuraikan menjadi dua komponen vital, yaitu komponen torsi sinkronisasi yang sefasa dengan perubahan sudut rotor, dan komponen torsi redaman yang sefasa dengan perubahan kecepatan. Keberadaan kedua komponen ini mutlak diperlukan untuk menjamin kestabilan. Kekurangan torsi sinkronisasi akan mengakibatkan ketidakstabilan aperiodik (non-osilatorik), sedangkan kekurangan torsi redaman akan memicu ketidakstabilan osilatorik yang ditandai dengan ayunan daya yang semakin membesar (Kundur, et al., 2004). Untuk jenis Kestabilan pada sudut rotor dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

a. Stabilitas sudut rotor gangguan kecil (*small signal stability*)

Stabilitas sudut rotor gangguan kecil atau sinyal kecil berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi di bawah gangguan kecil. Gangguan tersebut dianggap cukup kecil sehingga linearisasi persamaan sistem diperbolehkan untuk keperluan analisis (Kundur, 1994).

b. Stabilitas sudut rotor gangguan besar (*transient stability*)

Stabilitas sudut rotor gangguan besar atau stabilitas transien, sebagaimana lazimnya disebut, berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika mengalami gangguan yang parah, seperti hubung singkat pada saluran transmisi. Respons sistem yang dihasilkan melibatkan penyimpangan sudut rotor generator yang besar dan dipengaruhi oleh hubungan daya-sudut nonlinier (Kundur, et al., 2004).

Kestabilan transien dipengaruhi oleh kondisi operasi awal sistem serta tingkat keparahan gangguan, yang umumnya bermanifestasi sebagai ketidakstabilan ayunan pertama (*first swing instability*) akibat kurangnya torsi sinkronisasi. Namun, pada sistem berskala besar, ketidakstabilan dapat terjadi setelah ayunan pertama akibat superposisi mode ayunan lokal dan

antar area, dengan rentang waktu analisis yang biasa digunakan berkisar antara 3 hingga 5 detik, atau meluas hingga 10-20 detik untuk sistem yang sangat besar dengan dominasi ayunan antar area (Kundur, 1994).

2. Stabilitas frekuensi (*frequency stability*)

Kestabilan frekuensi adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi tetap stabil setelah mengalami gangguan sistem yang berat, yang mengakibatkan ketidakseimbangan signifikan antara daya yang dibangkitkan dan beban. Kestabilan ini bergantung pada kemampuan sistem untuk menjaga atau memulihkan keseimbangan antara sisi pembangkitan dan beban, dengan meminimalkan terjadinya pelepasan beban yang tidak disengaja (*unintentional loss of load*). Ketidakstabilan yang timbul umumnya berupa ayunan frekuensi yang berkelanjutan, yang dapat memicu lepasnya (*tripping*) unit-unit pembangkit ataupun beban dari sistem (Kundur, et al., 2004).

3. Stabilitas tegangan (*voltage stability*)

Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan yang stabil pada seluruh bus di dalam sistem setelah mengalami gangguan dari kondisi operasi awal tertentu. Hal ini bergantung pada kemampuan sistem untuk menjaga atau memulihkan keseimbangan antara permintaan beban dan pasokan daya dari sistem. Ketidakstabilan yang terjadi umumnya bermanifestasi dalam bentuk penurunan atau kenaikan tegangan secara progresif pada beberapa bus. Dampak yang mungkin timbul akibat ketidakstabilan tegangan meliputi pelepasan beban di suatu area, atau lepasnya (*tripping*) saluran transmisi serta elemen lain akibat kerja sistem proteksi, yang dapat memicu pemadaman bertingkat (*cascading outages*) (Kundur, et al., 2004).

1.7.2 Kestabilan Sinyal Kecil (*Small Signal Stability*)

Stabilitas sinyal kecil adalah salah satu kategori stabilitas sistem tenaga dalam merespons gangguan-gangguan kecil dalam bentuk osilasi elektromekanik. Kemampuan sistem untuk meredam osilasi ini sangat penting, karena jika dibiarkan, fenomena tersebut dapat membatasi kapasitas aliran daya dan mengganggu kelancaran operasi sistem secara keseluruhan. (Putra, Krismanto, & Lomi, 2023). Dari sudut pandang matematis, evaluasi karakteristik kestabilan ini bertumpu pada perhitungan nilai eigen yang diekstraksi dari matriks sistem hasil linearisasi. Posisi nilai eigen ini bersifat dinamis dan sangat terikat pada kondisi titik operasi (*operating point*) sistem pada momen tersebut. Oleh karena sistem tenaga listrik pada dasarnya memiliki sifat non-linear, setiap variasi pada tingkat pembebanan akan memicu pergeseran titik operasi. Pergeseran ini membuat elemen-elemen parameter matriks sistem berubah sekaligus memindahkan letak nilai eigennya. Dalam konteks ini, gangguan kecil dapat berupa fluktuasi daya pada sisi beban atau pembangkit secara acak, pelan, dan bertahap (Danas, Laksono, & Syafii, 2013). Analisis kestabilan sinyal kecil memegang peranan penting dalam mengevaluasi perubahan sudut rotor generator ketika terdapat gangguan-gangguan kecil pada sistem. Evaluasi ini

menjadi syarat untuk memastikan sistem tenaga listrik dapat terus beroperasi secara efektif (Buang & Patandung, 2024).

Kestabilan gangguan kecil (*small-disturbance stability*) bergantung pada kondisi operasi awal sistem. Ketidakstabilan yang mungkin timbul dapat berupa dua bentuk:

1. Peningkatan sudut rotor melalui mode non-osilatorik atau aperiodik yang disebabkan oleh kurangnya torsi sinkronisasi.
2. Osilasi rotor dengan amplitudo yang semakin membesar yang disebabkan oleh kurangnya torsi redaman yang memadai.

Pada sistem tenaga listrik modern saat ini, permasalahan kestabilan sudut rotor gangguan kecil umumnya diasosiasikan dengan ketidakcukupan redaman osilasi. Permasalahan ketidakstabilan aperiodik sebagian besar telah teratasi melalui penggunaan regulator tegangan generator yang bekerja secara kontinu. Namun, permasalahan ini masih dapat muncul ketika generator beroperasi dengan eksitasi konstan akibat bekerjanya pembatas eksitasi (*excitation limiters*). Rentang waktu yang menjadi fokus dalam studi kestabilan gangguan kecil berkisar antara 10 hingga 20 detik setelah terjadinya gangguan (Kundur, et al., 2004).

Dalam sistem tenaga listrik, perubahan torsi listrik mesin sinkron setelah gangguan dapat dibagi menjadi dua komponen:

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (1)$$

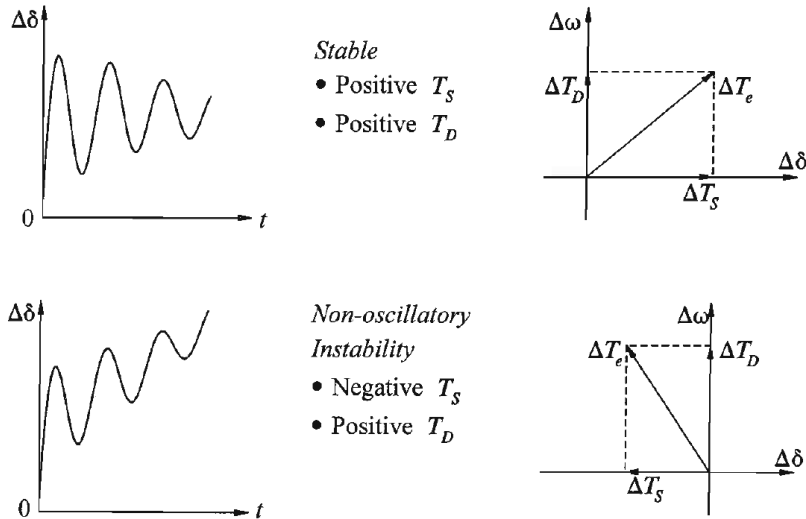
Keterangan:

T_e : koefisien torsi listrik

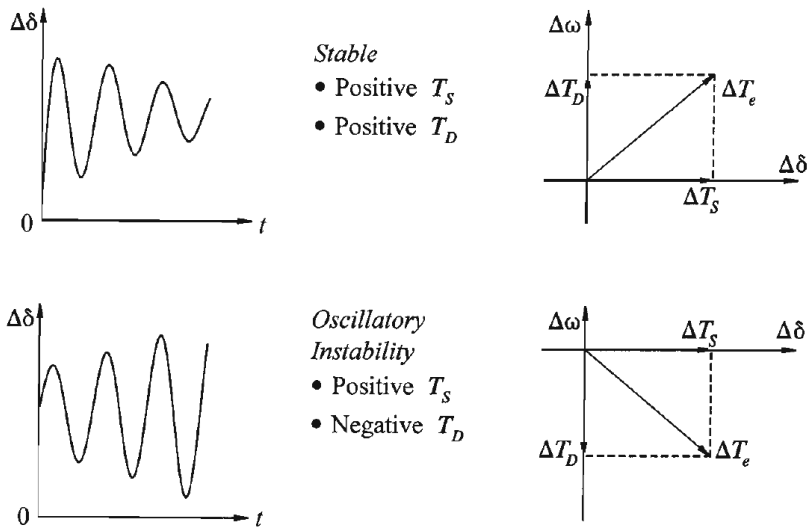
T_s : koefisien torsi sinkronisasi (komponen torsi yang sefase dengan perubahan sudut rotor $\Delta \delta$)

T_D : koefisien torsi redaman (komponen torsi yang sefase dengan deviasi kecepatan $\Delta \omega$)

Pada kondisi tunak (*steady-state*), terjadi keseimbangan antara torsi mekanis (T_m) dan torsi elektrik (T_e). Munculnya suatu gangguan akan merusak keseimbangan tersebut dan mengakibatkan perubahan pada nilai torsi elektrik (T_e). Dapat dilihat ada dua variabel yang mempengaruhinya. Kurangnya torsi sinkronisasi (T_s) akan mengakibatkan ketidakstabilan aperiodik (sudut rotor terus meningkat) sedangkan kurangnya torsi redaman (T_D) akan menimbulkan ketidakstabilan osilasi (peningkatan amplitudo ayunan rotor). Respons sistem terhadap gangguan sinyal kecil ini sangat dipengaruhi oleh titik operasi awal, kekuatan jaringan transmisi, dan sistem kontrol eksitasi. Secara spesifik, ketiadaan pengatur tegangan otomatis cenderung menimbulkan ketidakstabilan non-osilasi akibat rendahnya T_s , sedangkan penggunaan pengatur tegangan otomatis berpotensi memicu ketidakstabilan osilasi, yang digambarkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Respon Sistem saat Gangguan Kecil dengan Tegangan Konstan



Gambar 4. Respon Sistem saat Gangguan Kecil dengan Kontrol Eksitasi (Kundur, 1994)

Gambar 3 mengilustrasikan respons sistem yang stabil pada kondisi tegangan konstan, yang ditandai dengan nilai positif baik pada torsi redaman maupun torsi sinkronisasi. Sebaliknya, kondisi tidak stabil terjadi ketika torsi sinkronisasi bernilai negatif meskipun torsi redaman tetap positif. Sementara itu, Gambar 4 menunjukkan respons sistem dengan pengaturan eksitasi; stabilitas tercapai saat torsi redaman bernilai positif dan torsi sinkronisasi bernilai negatif, sedangkan kondisi tidak stabil ditandai oleh torsi redaman yang bernilai negatif dengan torsi sinkronisasi tetap positif (Orytuasikal, 2025).

1.7.3 Osilasi Frekuensi Rendah

Osilasi elektromekanis dipicu oleh adanya gangguan kecil, seperti fluktuasi beban atau penyimpangan parameter sistem dari titik operasinya, yang mengakibatkan ketimpangan antara torsi mekanis dan torsi elektromagnetik yang terdiri atas komponen sinkronisasi serta redaman (Kundur, 1994). Fenomena ini dapat mengakibatkan risiko serius jika tidak diredam dengan baik, karena dapat mendorong sistem keluar dari zona stabilnya dan memicu dampak yang lebih luas seperti pemadaman total atau *blackout* (Hasibuan, 2017).

Secara historis, osilasi frekuensi rendah dengan karakteristik gelombang sinusoidal ini mulai teridentifikasi pada periode 1960-an hingga 1970-an. Kemunculan gangguan sinyal kecil tersebut umumnya disebabkan oleh perubahan beban listrik yang mendadak atau adanya distribusi daya dalam skala besar melalui jaringan transmisi (Maity, 2019). Menurut Kundur (1994) dalam Lala, et al. (2025) mode osilasi elektromekanis diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Mode lokal

Osilasi lokal terjadi ketika unit-unit mesin sinkron di dalam area yang sama saling berayun satu sama lain, yang umumnya berada pada rentang frekuensi 1 hingga 2 Hz. Mengingat fenomena ini terkonsentrasi pada cakupan geografis yang terbatas, osilasi ini sering kali dapat dipantau secara efektif menggunakan instrumentasi pengukuran lokal. Kondisi ini dapat terjadi ketika gangguan di dekat area generator.

2. Mode antar area

Osilasi antar area muncul ketika kelompok mesin sinkron yang bergerak serempak di satu area berayun melawan kelompok mesin di area lainnya. Kondisi ini terjadi ketika ada gangguan pada koneksi antara dua wilayah pembangkit atau ketika saluran transmisi dinonaktifkan untuk tujuan pemeliharaan. Mode ini biasanya terjadi pada rentang frekuensi antara 0,1 hingga 1 Hz.

Beberapa pemadaman listrik yang disebabkan oleh osilasi frekuensi rendah antara lain:

1. Pada tahun 1980, akibat frekuensi osilasi 0,5 Hz, Inggris mengalami pemadaman listrik.
2. Taiwan mengalami serangkaian pemadaman listrik pada tahun 1984, 1989, 1990, 1991, dan 1992 akibat frekuensi antara 0,78 - 1,05 Hz.
3. Kanada mengalami pemisahan sistem akibat frekuensi 0,78 Hz pada tahun 1996.
4. Pada tahun 1997, akibat frekuensi osilasi 0,5 Hz, Skandinavia mengalami pemadaman listrik.
5. Untuk osilasi sekitar 0,4 Hz, Tiongkok mengalami pemadaman listrik pada tanggal 6 Maret 2003.
6. Pada tanggal 14 Agustus 2003, masalah pemadaman listrik serupa terjadi di Amerika Serikat untuk frekuensi osilasi sekitar 0,17 Hz.
7. Pada tanggal 28 September 2003, Italia mengalami pemadaman listrik untuk frekuensi sekitar 0,55 Hz (Maity, 2019).

1.7.4 Analisis Modal (*Modal Analysis*)

Menurut Rogers (2000) dalam Jason (2024), pemanfaatan analisis modal melalui linearisasi model sistem di sekitar titik operasi tunak memungkinkan evaluasi karakteristik osilasi dilakukan secara cepat dan akurat. Selain sebagai alat analisis, model linear ini juga berfungsi dalam perancangan strategi kendali untuk meredam osilasi sistem. Namun, mengingat sifat alami sistem tenaga listrik yang non-linear, setiap rancangan kontrol berbasis model linear wajib melalui tahap pengujian pada berbagai skenario operasional sebelum diimplementasikan.

Perilaku sistem dinamis, seperti sistem tenaga, dapat dijelaskan oleh sekumpulan n persamaan diferensial biasa nonlinier orde pertama dengan bentuk sebagai berikut (Kundur, 1994):

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

Dalam notasi vektor-matriks, persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (3)$$

Keterangan:

$\dot{x}$: laju perubahan variabel status terhadap waktu

x : vektor variabel status (*state variables*)

f : sekumpulan persamaan diferensial non-linear

u : vektor masukan (*input variables*)

n : orde sistem

r : jumlah masukan

t : waktu

i : indeks untuk setiap variabel status

Di mana

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

Untuk sistem otonom (*autonomous*), di mana turunan variabel status tidak secara eksplisit merupakan fungsi dari waktu, Persamaan 3 disederhanakan menjadi:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (5)$$

Variabel keluaran yang dapat diamati pada sistem dinyatakan dalam variabel status dan variabel masukan sebagai berikut:

$$y = g(x, u) \quad (6)$$

Dengan

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

Keterangan:

y : vektor variabel keluaran (*output vector*)

g : sekumpulan persamaan non-linear yang menghubungkan status dan masukan ke keluaran

m : jumlah variabel keluaran

Prosedur linearisasi dilakukan pada Persamaan 5 di sekitar titik kesetimbangan (x_0, u_0) . Pada kondisi ini, kinerja *small signal* diamati dengan asumsi sistem berada dalam kondisi tunak, sehingga berlaku:

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (8)$$

Saat sistem diberikan gangguan kecil (Δ) maka keadaan di atas menjadi:

$$x = x_0 + \Delta x \quad (9)$$

$$u = u_0 + \Delta u \quad (10)$$

Keterangan:

x_0 : vektor variabel status pada titik kesetimbangan (kondisi awal)

u_0 : vektor masukan pada titik kesetimbangan

Δ : *prefix* yang menunjukkan penyimpangan atau perubahan kecil dari titik kesetimbangan

Keadaan baru akibat gangguan tersebut harus tetap memenuhi Persamaan 5, sehingga dapat dituliskan:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} \\ &= f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \end{aligned} \quad (11)$$

Mengingat gangguan yang terjadi diasumsikan sangat kecil, fungsi non-linear $f(x, u)$ dapat diekspansi menggunakan deret Taylor. Dengan mengabaikan komponen orde kedua dan orde yang lebih tinggi, diperoleh pendekatan linear sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \dot{x}_{i0} + \Delta \dot{x}_i = f_i[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \\ &= f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n \\ &\quad + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \end{aligned} \quad (12)$$

Karena $x_{i0} = f_i(x_0, u_0)$, maka hubungan untuk perubahan variabel status ($\Delta \dot{x}_i$) dapat disederhanakan menjadi:

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (13)$$

Dengan $i = 1, 2, \dots, n$. Dengan cara yang sama, dari Persamaan 6, kita memperoleh

$$\Delta y_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (14)$$

Dengan $j = 1, 2, \dots, m$. Oleh karena itu, bentuk linier dari Persamaan 5 dan 6 adalah

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (15)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (16)$$

Di mana

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix}$$

Keterangan:

Δx : vektor keadaan dengan dimensi n

Δy : vektor keluaran dengan dimensi m

Δu : vektor masukan dengan dimensi r

A : matriks keadaan (*state matrix*) berukuran $n \times n$

B : matriks kontrol/masukan (*control/input matrix*) berukuran $n \times r$

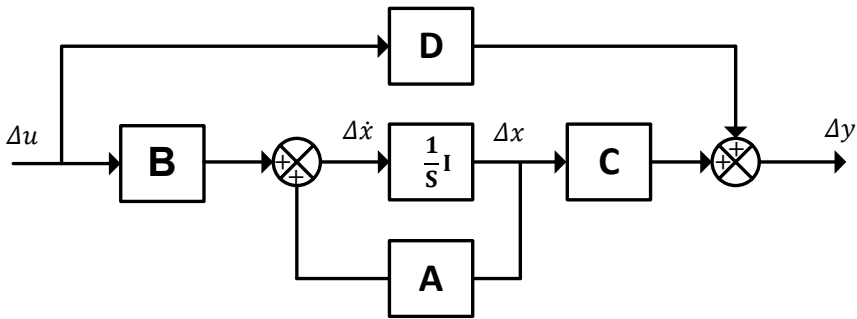
C : matriks keluaran (*output matrix*) berukuran $m \times n$

D : matriks umpan maju (*feedforward matrix*) berukuran $m \times r$

Seluruh turunan parsial yang telah diperoleh kemudian dievaluasi pada titik kesetimbangan guna menganalisis penyimpangan sinyal kecil. Untuk mendapatkan representasi sistem dalam domain frekuensi, transformasi Laplace diterapkan pada model ruang keadaan tersebut sehingga menghasilkan persamaan berikut:

$$s \Delta x(s) - \Delta x(0) = A \Delta x(s) + B \Delta u(s) \quad (18)$$

$$\Delta y(s) = C \Delta x(s) + D \Delta u(s) \quad (19)$$



Gambar 5. Diagram Blok Representasi Ruang Keadaan (*State Space*)

Hubungan antar variabel dalam model ruang keadaan ini secara visual direpresentasikan melalui diagram blok pada Gambar 5. Dalam perancangan fungsi transfer sistem, kondisi awal $\Delta x(0)$ umumnya diasumsikan bernilai nol. Solusi formal untuk variabel status dan variabel keluaran diperoleh dengan menyusun ulang Persamaan 18 sebagai berikut:

$$(sI - A)\Delta x(s) = \Delta x(0) + B\Delta u(s) \quad (20)$$

Karena itu,

$$\begin{aligned} \Delta x(s) &= (sI - A)^{-1}[\Delta x(0) + B\Delta u(s)] \\ &= \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)}[\Delta x(0) + B\Delta u(s)] \end{aligned} \quad (21)$$

Dengan demikian,

$$\Delta y(s) = C \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)}[\Delta x(0) + B\Delta u(s)] + D\Delta u(s) \quad (22)$$

Berdasarkan hasil transformasi tersebut, terlihat bahwa respons Δx dan Δy terdiri dari dua komponen utama: komponen yang bergantung pada kondisi awal (*zero-input response*) dan komponen yang dipengaruhi oleh masukan sistem (*zero-state response*). Karakteristik dinamika sistem ditentukan oleh kutub-kutub (*poles*) yang merupakan akar-akar dari persamaan karakteristik:

$$\det(sI - A) = 0 \quad (23)$$

Nilai s yang memenuhi Persamaan 23 dikenal sebagai nilai eigen matriks A . dan Persamaan 23 disebut sebagai persamaan karakteristik matriks A (Kundur, 1994). Berdasarkan metode pertama Lyapunov, kestabilan sinyal kecil dari sistem non-linear dievaluasi melalui posisi akar-akar persamaan sistem pendekatan pertama pada bidang kompleks.

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (24)$$

Keterangan:

σ : komponen riil yang menentukan laju redaman osilasi

ω : komponen imajiner yang menentukan frekuensi sudut osilasi (rad/s)

Bagian riil negatif mewakili osilasi teredam, sedangkan bagian riil positif mewakili osilasi dengan amplitudo yang meningkat. Frekuensi osilasi dalam satuan Hz dihitung menggunakan hubungan:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (25)$$

Selain frekuensi, parameter kunci untuk mengukur kecepatan peluruhan osilasi elektromekanis setelah gangguan adalah rasio redaman (*damping ratio*), dengan rumus:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (26)$$

Rasio redaman (ζ) menentukan laju peluruhan amplitudo osilasi. Redaman (ζ) merupakan parameter kunci dalam mengevaluasi kestabilan sinyal kecil karena secara spesifik mendefinisikan seberapa cepat osilasi elektromekanikal akan meluruh atau menghilang setelah sistem mengalami gangguan. Semakin besar nilai positif rasio redaman, semakin cepat osilasi mencapai kondisi tunak dan sistem menjadi kian stabil. Menurut Kundur (1994), kriteria stabilitas sistem dilihat dari posisi nilai eigen diuraikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Stabilitas berdasarkan Nilai Eigen

Kriteria Stabilitas	Bagian Riil (σ)	Karakteristik Respon Sinyal
Stabil asimtotik	Seluruh $\sigma < 0$	Sinyal gangguan meluruh seiring waktu; sistem kembali tenang ke kondisi tunak.
Tidak stabil	Minimal satu $\sigma > 0$	Amplitudo osilasi meningkat; sistem mengalami kegagalan.
Stabil marjinal	$\sigma = 0$	Sistem berada pada ambang batas osilasi kontinu; metode linear tidak cukup untuk menentukan stabilitas mutlak.

Kestabilan sistem sangat bergantung pada kemampuan redaman untuk menghilangkan ayunan osilasi dalam waktu singkat (Kundur, 1994). Sebaliknya, nilai redaman yang negatif atau mendekati nol berisiko meningkatkan amplitudo osilasi, sehingga dapat memicu sistem proteksi generator dan menyebabkan gangguan meluas. Berbagai literatur dan standar industri menetapkan batas minimum rasio redaman (ζ) yang berbeda-beda guna menjamin keamanan operasional, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Standar Rasio Redaman dalam Sistem Tenaga Listrik

Sumber	Standar Rasio Redaman (ζ)	Konteks Kestabilan
ISO New England (2013)	$\zeta \geq 3\%$	Batas minimum untuk operasional sistem.
Khest, Davari, Wu, & Blaabjerg (2022)	5% hingga 20%	Rentang ideal yang diinginkan pada standar industri.
Oscullo & Gallado (2020)	$\zeta \geq 5\%$	Batas minimum untuk seluruh nilai eigen agar sistem dianggap stabil.
Mbaabu, Kaberere, & Hinga (2019)	$\zeta \geq 15\%$	Batas untuk menjamin margin stabilitas yang cukup.

Penentuan status kestabilan suatu sistem sangat bergantung pada sifat dari nilai-nilai eigennya. Klasifikasi dan pembagian jenis nilai eigen ini dijelaskan secara rinci pada Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Klasifikasi Nilai Eigen

Jenis Nilai Eigen	Kondisi Nilai	Karakteristik Respons Sistem (Mode)
Riil (<i>Real</i>)	Bernilai Negatif	Bersifat non-osilatorik (tidak berayun) dan merupakan mode meluruh (<i>decaying mode</i>). Laju peluruhan semakin cepat seiring membesarnya nilai negatif.
	Bernilai Positif	Bersifat non-osilatorik (tidak berayun) dan memicu ketidakstabilan aperiodik (<i>aperiodic instability</i>). Sistem kehilangan kestabilan secara searah tanpa ayunan.
Kompleks (<i>Complex</i>)	Pasangan Konjugat	Bersifat osilatorik (respons sistem mengalami kondisi yang berayun) (Kundur, 1994).

Dalam analisis kestabilan sinyal kecil, karakteristik suatu osilasi tidak hanya diidentifikasi melalui nilai eigen, tetapi juga melalui vektor eigen yang berasosiasi dengannya. Secara konsep, terdapat dua jenis vektor eigen yang digunakan, yaitu vektor eigen kanan dan vektor eigen kiri. Vektor eigen kanan merepresentasikan bentuk mode (*mode shape*), yang menunjukkan tingkat aktivitas dari masing-masing variabel sistem ketika suatu mode osilasi tertentu sedang aktif. Sementara itu, vektor eigen kiri berfungsi untuk mengidentifikasi kombinasi variabel keadaan mana yang membentuk suatu mode, serta menimbang seberapa besar kontribusi dari aktivitas variabel tersebut terhadap mode yang bersangkutan.

Meskipun kedua vektor eigen tersebut dapat menunjukkan hubungan antara variabel sistem dan mode osilasi, penggunaannya secara terpisah memiliki sebuah kelemahan dasar. Nilainya sangat bergantung pada jenis satuan dan penskalaan yang digunakan pada masing-masing variabel sistem. Sebagai solusinya, digunakanlah Faktor Partisipasi (*Participation Factor*). Faktor partisipasi dibentuk dengan mengalikan elemen vektor eigen kanan dan vektor eigen kiri dari suatu mode. Perkalian ini menghasilkan nilai yang tidak berdimensi (bebas satuan), sehingga secara objektif dapat mengukur tingkat partisipasi bersih (*net participation*). Secara konsep, faktor partisipasi merupakan ukuran dari partisipasi relatif suatu variabel keadaan terhadap mode tertentu. Karena faktor partisipasi secara aktual bernilai sama dengan sensitivitas nilai eigen terhadap parameter diagonal matriks sistemnya, maka parameter ini secara umum digunakan sebagai indikator yang andal untuk merepresentasikan partisipasi relatif dari setiap variabel keadaan di dalam mode yang bersesuaian (Kundur, 1994).

1.7.5 Perangkat Lunak Simulasi

Dalam penelitian ini perangkat lunak utama digunakan untuk menjalankan alur kerja penelitian adalah DIgSILENT PowerFactory. DIgSILENT merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisis suatu sistem tenaga listrik. DIgSILENT PowerFactory telah banyak digunakan oleh para insinyur dan profesional untuk melakukan analisis yang mendalam terhadap suatu sistem tenaga listrik. Keunggulan dari perangkat lunak ini terletak pada desain antarmuka pengguna yang intuitif dan kelengkapan fitur komputasi yang mempermudah analisis dan proses rancang bangun sistem tenaga listrik (Nani, 2024).

Bersumber dari website resmi DIgSILENT PowerFactory dalam (Herlian, Arsyad, & Abidin, 2025), DIgSILENT PowerFactory merupakan perangkat lunak yang dimanfaatkan untuk analisis industri, utilitas, dan analisis sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini telah dirancang sebagai sebuah paket peranti lunak mutakhir yang terintegrasi secara interaktif, khusus diperuntukkan bagi analisis kontrol dan sistem kelistrikan guna merealisasikan target perencanaan serta optimasi operasional. Secara etimologis, DIgSILENT merupakan akronim dari *Digital Simulation and Electrical NeTwork calculation program*. DIgSILENT merupakan perangkat lunak analisis sistem tenaga pertama di dunia yang terintegrasi dengan grafis antar muka satu baris, diagram satu baris interaktif, juga termasuk fungsi fungsi menggambar, kemampuan mengedit, serta semua fitur perhitungan statis dan dinamis yang relevan. Beberapa fungsi yang tersedia dalam DIgSILENT PowerFactory adalah analisis aliran beban/*loadflow analysis*, perhitungan arus pendek/*short-circuit calculation*, analisis harmonik/*harmonic analysis*, koordinasi proteksi/*protection coordination*, dan stabilitas/*stability calculation*.

Selain perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory, pada penelitian ini juga digunakan perangkat lunak Matlab (*Matrix Laboratory*) untuk meninjau matriks sistem. Langkah ini bertujuan untuk mengamati struktur elemen matriks secara lebih rinci sebagai data pendukung dalam pembahasan. *Matrix Laboratory* atau yang lebih

lazim dikenal sebagai Matlab, merupakan suatu program analisis yang mengandalkan operasi matematika berbasis matriks sebagai fondasi inti dalam setiap pengaplikasiannya (Atina, 2019). Secara umum, terdapat lima kegunaan dari perangkat lunak ini, yaitu untuk matematika dan komputasi, pengembangan dan algoritma, permodelan, simulasi, dan pembuatan *prototype*, analisis data, eksplorasi, dan visualisasi, serta pembuatan aplikasi (Tjolleng, 2017).

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

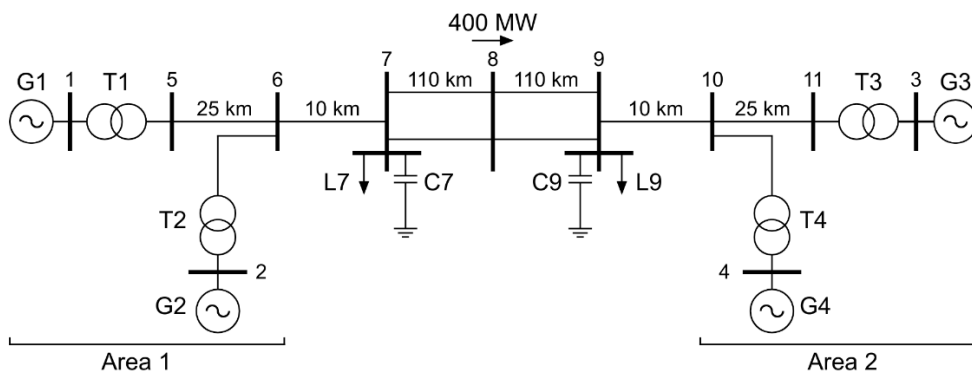
Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Relay Proteksi dan Pengukuran, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

2.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah satu unit laptop dengan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory dan Matlab. DIgSILENT PowerFactory digunakan di tahap awal untuk melakukan pemodelan jaringan sistem tenaga listrik, simulasi aliran daya (*load flow*), simulasi kenaikan beban secara bertahap pada Bus 9, dan perhitungan nilai eigen menggunakan fitur Analisis Modal (*Modal Analysis*). Sementara itu, MATLAB digunakan untuk meninjau hasil matriks dari DIgSILENT, menghitung kembali nilai eigen, dan membandingkan hasil perhitungan dari kedua program. Melalui kombinasi ini, perubahan angka pada matriks keadaan serta pergeseran nilai eigen dapat diamati setiap kali terjadi kenaikan beban jaringan.

Objek penelitian yang digunakan adalah Sistem Uji Dua Area Empat Mesin (*Two-Area Four-Machine Test System*) yang dapat dilihat pada Gambar 6. Sistem ini dikenal luas dalam studi kestabilan sistem tenaga listrik, khususnya untuk menganalisis osilasi antar area. Secara struktural, sistem ini terdiri atas 11 busbar dan 4 generator sinkron yang saling terhubung melalui saluran transmisi ganda (*tie-lines*) panjang. Hubungan elektrik antara kedua area melewati tiga titik jaringan, yaitu Bus 7, Bus 8, dan Bus 9, di mana penyaluran daya antar area diharuskan melalui Bus 8. Pembagian wilayah operasional pada sistem kelistrikan ini meliputi:

1. Area 1: Memuat unit pembangkit Generator 1 (G1) dan Generator 2 (G2), serta pusat pembebanan L7 pada Bus 7.
2. Area 2: Memuat unit pembangkit Generator 3 (G3) dan Generator 4 (G4), serta pusat pembebanan L9 pada Bus 9.



Gambar 6. Sistem Uji Dua Area Empat Mesin

Untuk memastikan akurasi hasil simulasi aliran daya dan analisis modal, seluruh parameter komponen jaringan dimodelkan menggunakan data standar sistem multimesin Dua Area Empat Mesin yang terdapat pada literatur Prabha Kundur. Data parameter generator menggunakan satuan *per unit* (pu) dengan basis 900 MVA dan 20 kV. Parameter konstanta inersia (H) untuk G1 dan G2 adalah sebesar 6,5, sedangkan untuk G3 dan G4 adalah sebesar 6,175. Parameter lengkap generator disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Generator

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
X_d	1,8	X_q	1,7
X'_d	0,3	X'_q	0,55
X''_d	0,25	X''_q	0,25
T'_{d0}	8,0 s	T'_{q0}	0,4 s
T''_{d0}	0,03 s	T''_{q0}	0,05 s
X_l	0,2	R_a	0,0025
A_{sat}	0,015	B_{sat}	9,6
ψ_{T1}	0,9	K_D	0

Sistem transmisi beroperasi pada tegangan nominal 230 kV. Transformator penaik tegangan (*step-up*) pada setiap pembangkit memiliki impedansi sebesar $0 + j0,15$ pu pada basis 900 MVA. Tabel 3 menunjukkan parameter saluran transmisi per kilometer (km) dengan basis 100 MVA, 230 kV.

Tabel 5. Data Saluran Transmisi

Parameter	Nilai (pu/km)
r	0,0001
x_L	0,001
b_C	0,00175

Sistem beroperasi dengan kondisi Area 1 mengeksport daya sebesar 400 MW ke Area 2. Kondisi pembangkitan pada masing-masing generator ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Data Kondisi Pembangkitan Generator

Unit	Daya Aktif (P)	Daya Reaktif (Q)	Tegangan Terminal (E_t)
G1	700 MW	185 MVar	$1,03 \angle 20,2^\circ$
G2	700 MW	235 MVar	$1,01 \angle 10,5^\circ$
G3	719 MW	176 MVar	$1,03 \angle -6,8^\circ$
G4	700 MW	202 MVar	$1,01 \angle -17,0^\circ$

Kemudian untuk pembebanan pada Bus 7 serta Bus 9 ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Data Beban

Bus	Daya Aktif (P)	Daya Reaktif (Q _L)	Tegangan Terminal (Q _c)
7	967 MW	100 MVar	200 MVar
9	1.767 MW	100 MVar	350 MVar

2.3 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Tahap ini meliputi pengumpulan dan pemahaman mendalam terhadap referensi terkait teori kestabilan sinyal kecil (*small signal stability*) dan pengaruh variasi pembebanan terhadap kestabilan, karakteristik osilasi sistem tenaga, konsep nilai eigen dan rasio redaman (*damping ratio*), serta penguasaan fitur Analisis Modal pada perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory.

2. Persiapan Model Sistem dan Validasi (DIgSILENT)

Pada tahap ini, dilakukan pemodelan sistem uji ke dalam perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory. Proses ini mencakup pembuatan diagram satu garis (*single line diagram*) dan memasukkan parameter dinamis generator. Selanjutnya, dilakukan simulasi aliran daya (*load flow*) untuk memverifikasi bahwa sistem berjalan normal tanpa *error* pada kondisi awal (*steady state*).

3. Simulasi Variasi Pembebanan dan Analisis Modal

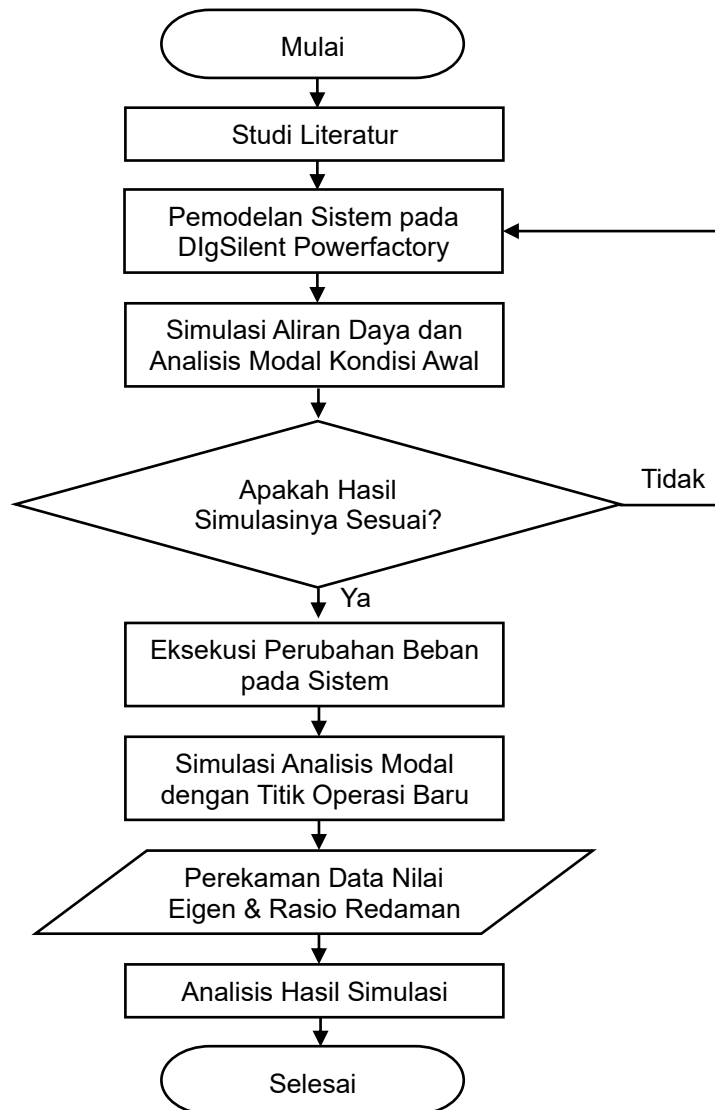
Skenario pengujian dilakukan dengan mengubah beban sistem secara bertahap untuk menggeser titik operasi sistem. Kenaikan beban difokuskan pada Bus 9 (Area 2). Perubahan beban dilakukan dengan langkah bertahap (*step size*) sebesar 5% dari total beban awal sistem nominal per iterasi. Pada setiap titik perubahan kapasitas beban, dijalankan fitur Modal Analysis untuk menghitung dan merekam nilai eigen serta rasio redaman dari mode-mode osilasi yang terbentuk. Simulasi diulang hingga terdapat rasio redaman di bawah 3% atau ketika simulasi *load flow* gagal konvergen.

4. Analisis dan Evaluasi Kestabilan

Tahap akhir meliputi pengolahan dan analisis data hasil simulasi. Analisis difokuskan pada pengamatan pola pergerakan nilai eigen pada bidang kompleks dan identifikasi penurunan rasio redaman seiring dengan perubahan beban. Hasil analisis ini kemudian dievaluasi untuk menentukan tingkat sensitivitas sistem dan memetakan batas margin kestabilan operasi yang aman berdasarkan standar yang berlaku.

2.4 Diagram Alir Penelitian

Untuk memberikan gambaran yang jelas dan terstruktur mengenai alur pelaksanaan penelitian, maka disusunlah sebuah diagram alir (*flowchart*). Gambar 7 menyajikan diagram alir yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 7. Diagram Alir Penelitian