

II. TINJAUAN PUSTAKA

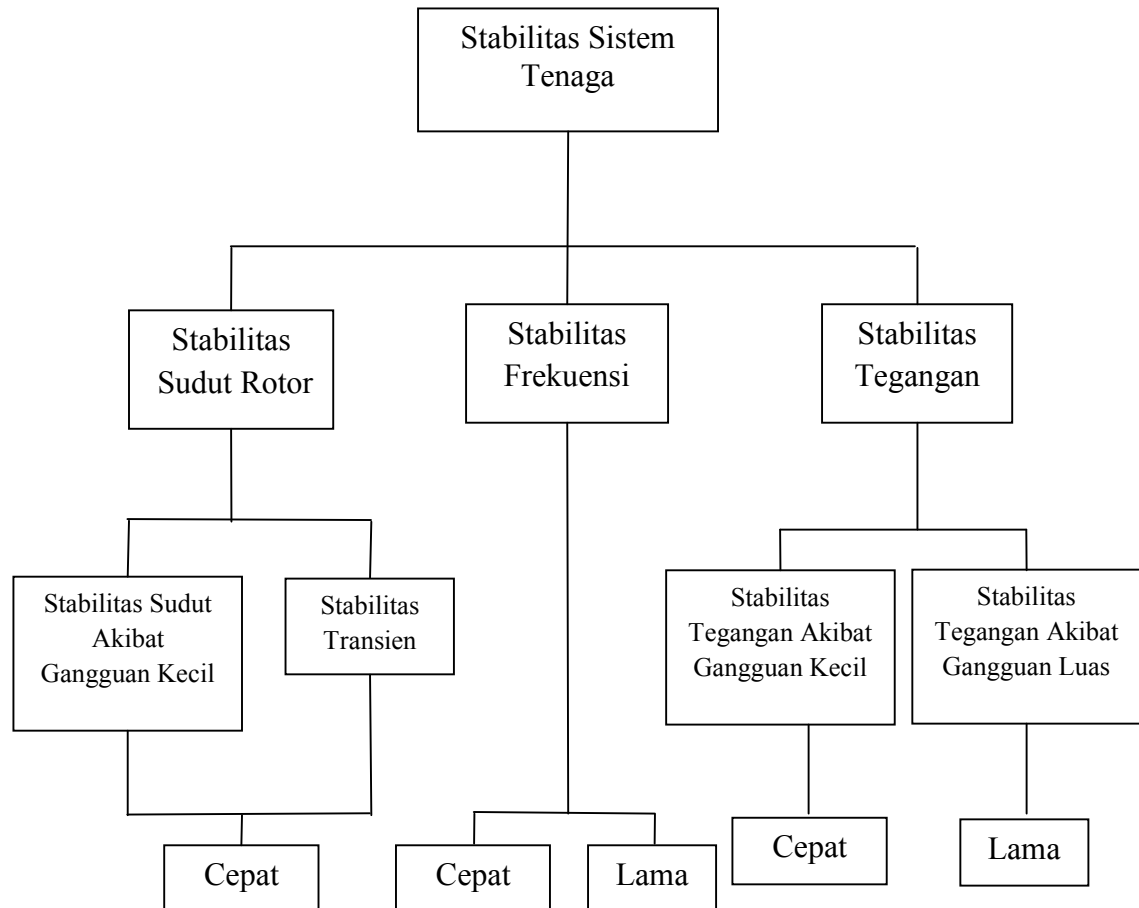
2.1. Stabilitas Sistem Tenaga

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

Kestabilan sistem merupakan bagian yang perlu untuk dijaga dalam operasi sistem tenaga. Stabilitas sistem tenaga didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga yang memungkinkan sistem tersebut untuk tetap berada pada kondisi dalam batas operasi yang diinginkan pada keadaan normal atau abnormal di sistem tenaga.

Sistem tenaga merupakan sistem yang sangat kompleks dan terdiri dari banyak peralatan listrik yang memiliki karakteristik serta tanggapan masing –

masing terhadap perubahan kondisi. Oleh karena itu, perlu pengklasifikasian kestabilan sistem tenaga berdasarkan faktor kontribusi yang menyebabkan ketidakstabilan. Klasifikasi tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga^[1]

Tujuan dari studi kestabilan pada sistem tenaga adalah untuk menentukan rotor mesin yang terganggu dapat kembali ke keadaan normal dengan kecepatan konstan. Kondisi ini berarti kecepatan rotor harus menyimpang dari kecepatan sinkron, paling tidak untuk beberapa waktu. Penyimbangan kecepatan rotor yang terlalu lama juga dapat membuat mesin menjadi rusak. Dalam studi stabilitas dibuat asumsi, yaitu :^[2]

1. Dalam analisis stabilitas sistem tenaga, hanya diperhitungkan arus dan tegangan frekuensi serempak. Oleh karena, itu semua komponen harmonis akan diabaikan.
2. Komponen simetris digunakan untuk representasi gangguan tidak seimbang.
3. Tegangan yang dibangkitkan dianggap tidak dipengaruhi oleh perubahan kecepatan mesin.

2.2. Stabilitas Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik

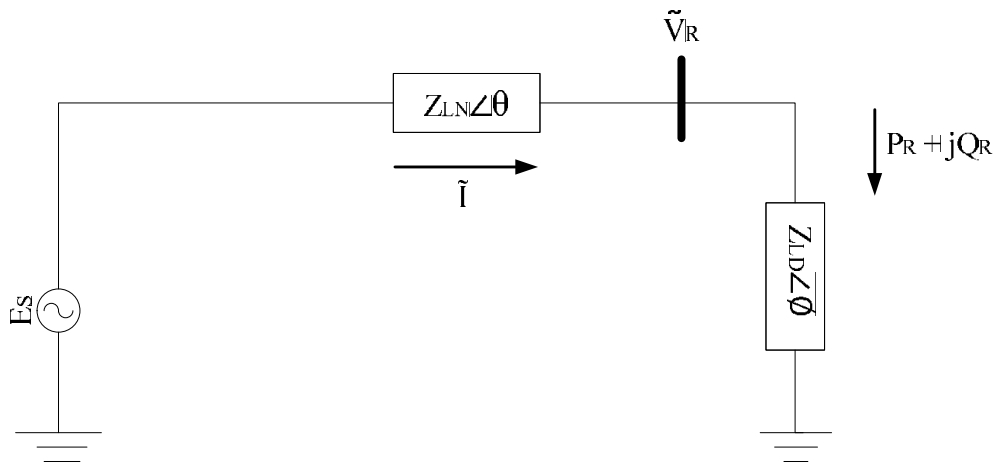
Salah satu faktor pada kestabilan sistem tenaga adalah stabilitas tegangan. Stabilitas tegangan ialah kemampuan sistem tenaga untuk menjaga nilai tegangan pada batas operasi yang ditentukan di semua bus pada sistem tenaga, saat sistem berada pada kondisi normal dan tidak normal akibat terjadi gangguan. Sistem mengalami kondisi tidak stabil ketika terjadi gangguan, perubahan beban, dan perubahan kondisi pada sistem

Berdasarkan Gambar 2.1 stabilitas tegangan terbagi menjadi dua, yaitu stabilitas tegangan akibat gangguan yang kecil dan akibat gangguan yang luas. Stabilitas tegangan akibat gangguan kecil ini terjadi akibat gangguan yang kecil atau bersifat lokal, seperti perubahan kenaikan beban di sistem. Sedangkan, stabilitas akibat gangguan besar adalah kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan pada batas operasi yang ditentukan akibat terjadi gangguan yang bersifat luas, seperti kesalahan sistem, pelepasan generator, atau kontingensi pada jaringan. Keadaan tersebut membuat sistem harus mendapatkan

kembali kestabilannya. Berdasarkan waktu kestabilan tegangan sistem akan kembali dalam waktu cepat atau lama tergantung dari jenis gangguannya. Klasifikasi stabilitas tegangan berdasarkan periode kestabilan dapat dibagi menjadi tiga macam, yaitu stabilitas tegangan jangka pendek, jangka menengah, dan jangka panjang. Rentang waktu stabilitas tegangan jangka pendek adalah 0 sampai 10 detik, jangka menengah adalah antara 10 detik sampai 10 menit, sedangkan jangka panjang lebih dari 10 menit.^[1]

Kriteria yang menyatakan sistem tenaga memiliki kestabilan tegangan adalah pada kondisi operasi tertentu dalam sistem, tegangan di bus tertentu akan mengalami kenaikan tegangan ketika disuntikan daya reaktif pada bus yang sama. Sedangkan, tegangan sistem tidak stabil jika paling tidak salah satu bus di sistem tenaga mengalami penurunan tegangan saat disuntikkan daya reaktif pada bus yang sama. Dengan demikian, maka sistem tenaga listrik memiliki hubungan yang sebanding antara daya reaktif (Q) dengan tegangan (V) bus saat sistem memiliki kestabilan tegangan.

Gambar 2.2 menggambarkan sistem tenaga yang sederhana yang terdiri dari dua terminal (bus). Sistem tersebut terdiri dari tegangan sumber (E_s), impedansi (Z_{LN}), dan impedansi beban (Z_{LD}). Ini merepresentasikan sistem radial di sistem tenaga yang menyalurkan daya dari pembangkit ke sisi beban melalui suatu penghantar.



Gambar 2.2. Representasi Sistem Tenaga Listrik Radial^[1]

Arus (I) yang mengalir dalam sistem dirumuskan dengan persamaan

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{E}_s}{\tilde{Z}_{LN} + \tilde{Z}_{LD}} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan menyatakan bahwa

$$\tilde{Z}_{LN} = Z_{LN} \angle \theta \text{ dan } \tilde{Z}_{LD} = Z_{LD} \angle \phi$$

Maka magnitudo arus dinyatakan dengan

$$I = \frac{E_s}{\sqrt{(Z_{LN} \cos \theta + Z_{LD} \cos \phi)^2 + (Z_{LN} \sin \theta + Z_{LD} \sin \phi)^2}} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

atau

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_s}{Z_{LN}} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right) \cos(\theta - \phi)$$

Magnitudo tegangan di sisi penerima adalah

$$\begin{aligned}
 V_R &= Z_{LD} I \\
 &= \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_s \quad \dots\dots\dots (2.4)
 \end{aligned}$$

Daya yang disuplai ke beban adalah

$$\begin{aligned}
 P_R &= V_R I \cos \phi \\
 &= \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_s}{Z_{LN}} \right)^2 \cos \phi \quad \dots\dots\dots (2.5)
 \end{aligned}$$

2.3. Solusi Aliran Daya ^[3]

Sistem tenaga listrik pada umumnya terdiri dari banyak bus. Untuk menyelesaikan aliran daya di sistem tenaga listrik salah satunya menggunakan metode Newton Rhapson. Pada metode ini sistem dibagi sehingga memiliki tiga kelompok bus, yaitu bus generator, referensi, dan beban.

Perhitungan dengan metode Newton Rhapson merupakan cara yang relevan untuk penghitungan aliran daya pada sistem yang terdiri dari banyak bus karena memiliki kecepatan dalam mengkalkulasi. Perhitungan persamaan ini menggunakan matriks admitansi bus yang dirumuskan sebagai

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

Arus yang mengalir pada sistem berbentuk bilangan kompleks sehingga persamaan di atas dapat dinyatakan dalam bentuk polar, yaitu

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Daya nyata di bus i adalah

$$P_i + jQ_i = V_i I^* \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan (2.7) ke persamaan (2.8) didapatkan

$$P_i + jQ_i = |V_i| \angle - \delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots (2.9)$$

Pemisahan antara nilai riil dan imajiner dilakukan sehingga hasilnya

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2.10)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2.11)$$

Dengan menggunakan metode iterasi dan menyelesaikan dengan matriks, maka kedua persamaan di atas dapat ditulis

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.12)$$

Pada persamaan tersebut bus pertama dianggap sebagai bus referensi. Penggunaan matriks Jacobian dapat digunakan untuk merepresentasikan persamaan (2.12) sehingga dihasilkan

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta |V|^{(k)} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.13)$$

Elemen matriks Jacobian dapat dicari dengan

Elemen J_1

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i^{(k)}| |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial \delta_j} = -|V_i^{(k)}| |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

Elemen J₂

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial |V_i|} = 2|V_i^{(k)}| |Y_{ii}| \cos \theta_{ij} + \sum_{j \neq i} |V_i^{(k)}| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad \dots\dots (2.16)$$

$$\frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial |V_j|} = |V_i^{(k)}| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

Elemen J₃

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i^{(k)}| |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial \delta_j} = -|V_i^{(k)}| |Y_{ij}| |V_j^{(k)}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

Elemen J₄

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial |V_i|} = -2|V_i^{(k)}| |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} - \sum_{j \neq i} |V_j^{(k)}| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad \dots\dots (2.20)$$

$$\frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial |V_j|} = -|V_i^{(k)}| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)}) \quad j \neq i \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

Perhitungan akan selesai ketika hasil perhitungan $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ antara nilai spesifikasi dan perhitungan memiliki selisih yang sangat kecil.

$$\Delta P_i^{(k)} = P_{i,spec} - P_{i,calc}^{(k)}$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_{i,spec} - Q_{i,calc}^{(k)} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

Selanjutnya, nilai $\Delta\delta_j^{(k)}$ dan $|V|_i^{(k)}$ dapat dicari dengan persamaan

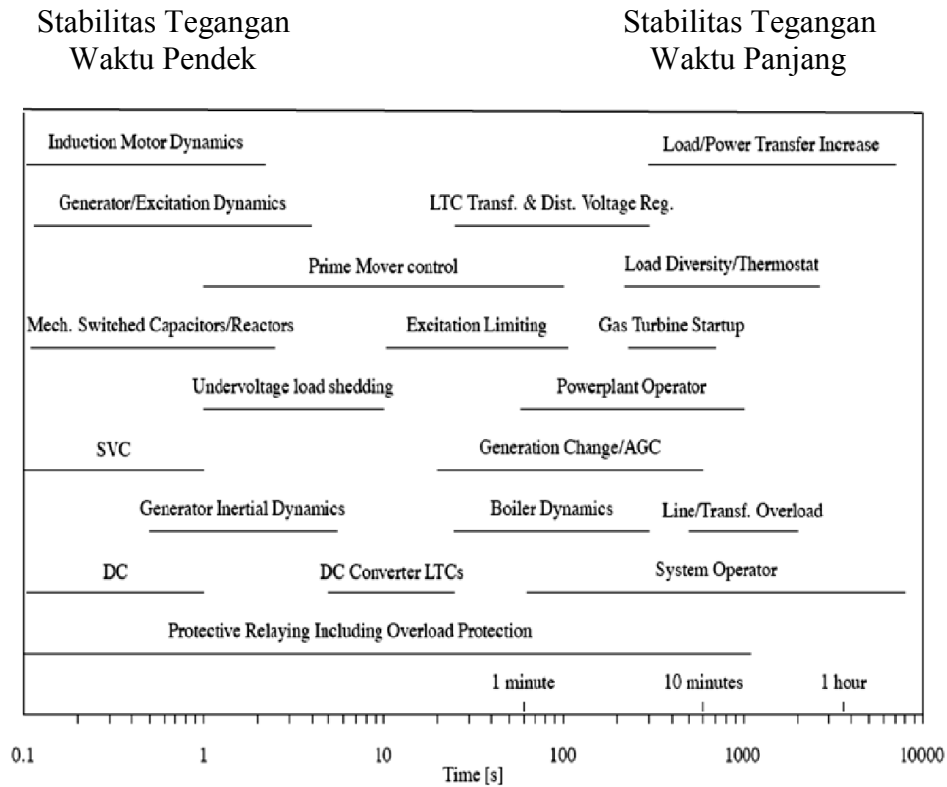
$$\begin{bmatrix} \Delta\delta^{(k)} \\ \Delta|V|^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

2.4. Penyebab Ketidakstabilan Tegangan di Sistem Tenaga Listrik

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

Dalam studi kestabilan tegangan, akibat terjadinya gangguan kemampuan sistem untuk kembali stabil terbagi dua, yaitu stabilitas jangka pendek dan stabilitas jangka panjang. Stabilitas jangka pendek biasanya terjadi akibat adanya tanggapan cepat pengendali tegangan seperti *Automatic Voltage Regulator (AVR)* atau *Flexible AC Transmission Sistem (FACTS)*. Sedangkan, stabilitas waktu panjang melibatkan peralatan yang memiliki tanggapan lambat terhadap perubahan sistem, seperti *On-load Tap Charger (OLTP)* atau *Delayed Corrective Control Action*.

Komponen dan kendali sistem tenaga tenaga memperengaruhi kestabilan tegangan berdasarkan lamanya waktu memperoleh kesabilan kembali diperlihatkan pada Gambar 2.3



Gambar 2.3. Komponen Sistem Kendali yang Mempengaruhi Stabilitas Tegangan^[4]

2.5. Eksponensial Lyapunov

Suatu peristiwa yang terjadi dalam sebuah sistem akan membuat sistem tersebut mengalami perubahan kondisi. Pada studi kestabilan sistem, perubahan kondisi ini dapat mengakibatkan sistem mengalami ketidakstabilan ataupun sistem mempertahankan kestabilan. Sistem kendali dalam suatu peralatan bertujuan untuk mempertahankan kestabilan sistem di saat terjadi perubahan kondisi. Hal ini sangat penting karena sistem kendali yang tidak stabil dapat mengakibatkan peralatan menjadi rusak.

Stabilitas sistem dapat diamati dengan menggunakan suatu teori yang diperkenalkan oleh Alexandr Mikhailovich Lyapunov. Alexandr Mikhailovich Lyapunov mengembangkan sebuah teori yang disebut dengan teori eksponensial Lyapunov. Eksponen Lyapunov dapat diartikan sebagai perbedaan konvergensi atau divergensi eksponen antara dua buah lintasan vektor di sebuah bidang.

Eksponen Lyapunov berfungsi untuk menentukan ketergantungan sebuah sistem terhadap kondisi awalnya. Selain itu, dapat pula untuk memperlihatkan perilaku dinamis sebuah sistem. Oleh sebab itu, maka eksponensial Lyapunov dapat digunakan untuk menentukan kestabilan suatu sistem.

Dalam studi kestabilan dengan eksponensial Lyapunov terdapat dua buah lintasan di sebuah bidang. Kedua lintasan itu digambarkan dengan persamaan $x(t) = f^t(x_0)$ dan $x(t)+\delta x(t)=f^t(x_0+\delta x_0)$. Sensitivitas terhadap keadaan awal antara kedua lintasan tersebut memenuhi persamaan

$$\|\delta x(t)\| \approx e^{\lambda t} \|\delta x_0\| \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

dimana λ merupakan jarak anatarlintasan dalam sistem atau dikenal dengan Eksponensial Lyapunov.^[5]

Persamaan 2.24 di atas dapat ditulis menjadi

$$\lambda \cong \frac{1}{t} \ln \frac{\|\delta x(t)\|}{\|\delta x(0)\|} \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

dimana

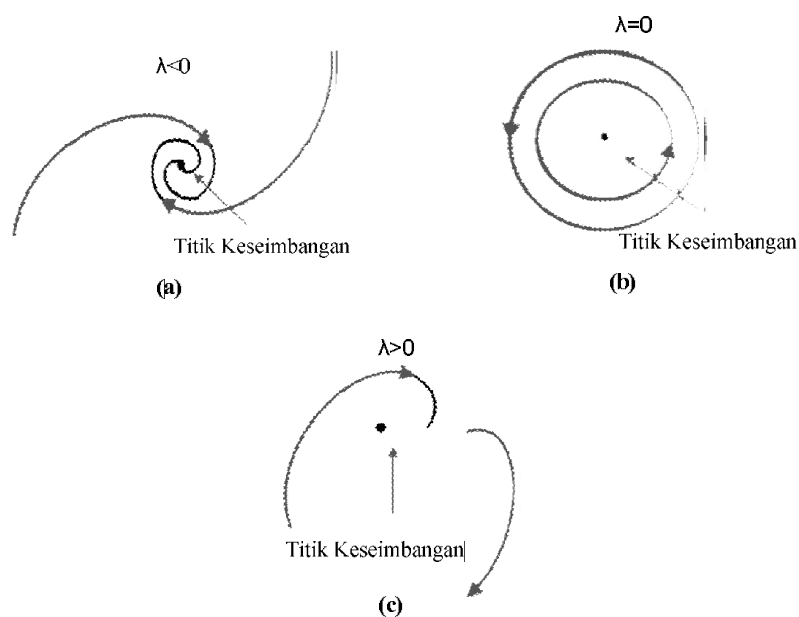
λ = Eksponensial Lyapunov

t = waktu uji

$\delta x(t)$ = perubahan jarak dalam waktu t

$\delta x(0)$ = jarak awal

Pengamatan kestabilan dengan eksponensial Lyapunov menghasilkan gambaran apakah sistem stabil asimtotik, stabil marjinal, atau tidak stabil.



Gambar 2.4. Grafik Kestabilan Lyapunov (a) Stabil

(b) Keadaan Tetap dan (c) Tidak Stabil

Stabil adalah sistem yang menuju titik keseimbangan ($\lambda < 0$). Sedangkan, keadaan tetap adalah sistem yang stabil netral, yaitu sistem yang konservatif atau tidak mengalami perubahan ($\lambda = 0$). Tidak stabil menurut eksponensial Lyapunov terjadi saat $\lambda > 0$, yaitu ketika salah satu lintasan mendekati titik kestabilan dan lintasan yang lainnya menjauhi titik kestabilan atau kedua lintasan sama – sama menjauhi titik kestabilan.

2.6. Eksponen Lyapunov untuk Data Urutan Waktu^{[6] [7]}

Perubahan stabilitas sistem dapat dianalisis dengan menggunakan eksponensial Lyapunov maksimum. Pada sistem dinamis yang selalu berubah – ubah dari waktu ke waktu digunakan metode eksponen Lyapunov untuk data urutan waktu. Eksponen Lyapunov maksimum untuk data urutan waktu didefinisikan sebagai berikut:

$$\lambda(k\Delta t) = \frac{1}{Nk\Delta t} \sum_{m=1}^N \ln \frac{|V_{(k+m+1)\Delta t} - V_{(k+m)\Delta t}|}{|V_{(m+1)\Delta t} - V_{m\Delta t}|} \dots\dots\dots (2.26)$$

Dimana

$\lambda(k\Delta t)$: nilai eksponen Lyapunov maksimum untuk data ke - $k\Delta t$

N : jumlah panjang sampel data

V : tegangan

Eksponen Lyapunov urutan waktu digunakan untuk analisis stabilitas tegangan dengan membandingkan antara tegangan pada waktu ke t terhadap tegangan sebelumnya. Hal ini sesuai fungsi eksponen Lyapunov untuk menentukan ketergantungan sistem terhadap kondisi awal. Dalam sistem tenaga listrik stabilitas tegangan dianalisis pada konteks perbandingan tegangan setelah gangguan dalam waktu tertentu terhadap tegangan sebelum gangguan.

Setelah terjadi gangguan akan menyebabkan tegangan pada sistem tenaga listrik mengalami ketidakstabilan. Suatu sistem yang memiliki stabilitas tegangan yang baik harus dapat kembali ke nilai tegangan nominalnya. Dengan

demikian, maka eksponen Lyapunov urutan waktu dapat digunakan untuk menentukan stabilitas sistem tenaga.