

Studi Kestabilan Tegangan Jaringan IEEE 9 Bus Menggunakan Indeks Kestabilan Tegangan

Avrin Nur Widiastuti, Lesnanto Multa Putranto, Randhy Ramono Syamri
Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Fakultas Teknik UGM
Yogyakarta, Indonesia
avrin@ugm.ac.id

Intisari — Sistem tenaga yang sangat terbebani sering terkendala oleh ketidakstabilan tegangan. Ketidakstabilan tegangan dapat menimbulkan banyak masalah, seperti jatuhnya tegangan pada sebagian besar sistem, keruntuhan tegangan (voltage collapse), bahkan potensi terjadinya blackout pada sistem. Pada penelitian ini simulasi berbasis waktu digunakan untuk mempelajari kestabilan tegangan sistem IEEE 9 bus. Penelitian ini menggunakan Indeks Kestabilan Tegangan (Voltage Stability Indeks, VSI) yang bertujuan untuk mengetahui tingkat kestabilan tegangan, memprediksi kapan terjadinya ketidakstabilan tegangan, dan mengetahui bagian sistem yang paling berpartisipasi atau rawan terhadap ketidakstabilan tegangan. Pada penelitian ini akan digunakan dua jenis indeks yaitu analisis modal dan PQVSI. Analisis modal menilai kestabilan tegangan dari eigenvalue matriks Jacobian tereduksi. Informasi dari eigenvektor matriks Jacobian tereduksi digunakan untuk mencari bus yang paling berpartisipasi terhadap kondisi ketidakstabilan tegangan yang dikenal dengan metode Faktor Partisipasi Bus (FPB). Sedangkan PQVSI menilai kestabilan tegangan dengan membandingkan aliran daya suatu saluran pada waktu tertentu dengan batas aliran daya maksimalnya. Simulasi dilakukan dengan menggunakan 2 skenario. Skenario 1 dengan pemberian kenaikan beban sebesar 0,3 pu/detik pada bus 5. Hasil yang didapatkan system mulai menuju ketidakstabilan pada detik ke 12,83 yang ditandai dengan nilai eigenvalue mendekati nol (0,0121). Dengan FPB diketahui bahwa partisipasi terbesar adalah pada bus 5 dengan nilai 0,693. Dari analisis PQVSI didapatkan bahwa saluran dari bus 4 ke bus 5 merupakan saluran yang paling rawan menuju ketidakstabilan. Skenario 2 dengan pemberian kenaikan beban sebesar 2 pu pada bus 7. Hasil yang didapatkan system mulai menuju ketidakstabilan pada detik ke 23,92 yang ditandai dengan nilai eigenvalue mendekati nol (0,0013). Dengan FPB diketahui bahwa partisipasi terbesar adalah pada bus 7 dengan nilai 0,598. Dari analisis PQVSI diketahui bahwa saluran dari bus 7 ke bus 8 merupakan saluran yang paling rawan menuju ketidakstabilan.

Kata kunci— Kestabilan tegangan, ketidakstabilan tegangan, indeks kestabilan tegangan, analisis modal, faktor partisipasi bus, PQVSI.

I. PENDAHULUAN

Kestabilan tegangan kini memperoleh perhatian lebih karena pesatnya perkembangan beban membuat sistem semakinterbebani [1]. Kestabilan tegangan adalah

kemampuan sistem untuk menjaga tegangan sistem pada seluruh bus tetap berada dalam batas kestabilan saat kondisi normal atau setelah terjadi gangguan.[2]

Ketidakstabilan tegangan dapat terjadi karena adanya gangguan, baik gangguan kecil berupa peningkatan pembebanan ataupun gangguan besar seperti lepasnya unit pembangkit besar atau perubahan permintaan daya dalam jumlah yang besar. Ketidakstabilan tegangan dapat mengakibatkan keruntuhan tegangan, profil tegangan yang sangat rendah disebagian besar sistem yang berpotensi menimbulkan *blackout* pada sistem.

Pendekatan statis lebih dipilih karena memiliki kelebihan-kelebihan seperti mampu memberikan informasi tentang tingkat kestabilan tegangan sistem, jarak kondisi sistem dengan batas wilayah ketidakstabilan tegangan, serta mampu menginformasikan bus atau saluran yang menjadi penyebab sistem memasuki wilayah ketidakstabilan tegangan. Salah satu metode yang digunakan pada pendekatan statis adalah menggunakan indeks kestabilan tegangan (VSI). Indeks kestabilan tegangan terdiri atas dua jenis, yaitu berbasis bus dan berbasis saluran.

II. KRITERIA KESTABILAN TEGANGAN

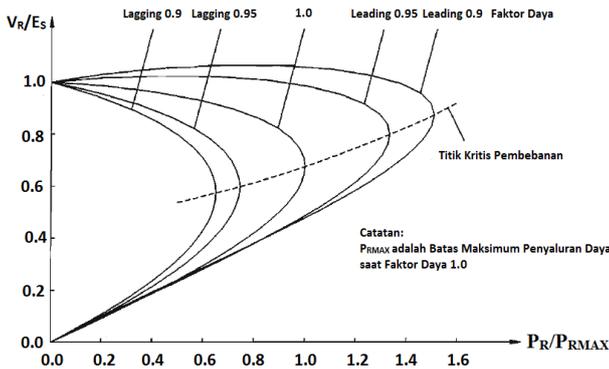
i. Kurva P-V

Kurva P-V diperoleh dengan cara melakukan simulasi aliran daya dimana beban mengalami perubahan. Simulasi ini akan menghasilkan nilai-nilai *magnitude* tegangan dan daya aktif pada suatu bus yang senantiasa berubah membentuk sebuah kurva yang berbentuk ‘hidung (*nose*)’. Titik balik dari kurva P-V merupakan titik kritis pembebanan atau titik pembebanan maksimum seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1. Wilayah di atas titik kritis merupakan wilayah operasi yang masih stabil dan wilayah di bawah titik kritis merupakan wilayah operasi yang tidak stabil.

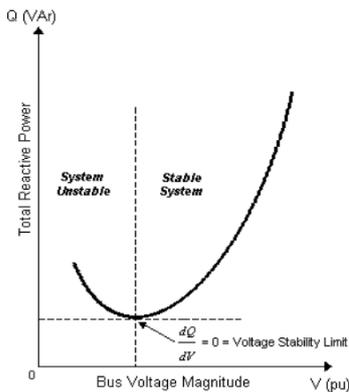
ii. Kurva Q-V [3]

Kurva Q-V masih banyak digunakan perancang sistem tenaga dalam menganalisa kriteria kinerja system, karena kurva ini mampu meminformasikan sensitivitas dan variasi pengaruh injeksi daya reaktif terhadap tegangan bus. Kestabilan tegangan sistem dapat diketahui dari

hubungan antara injeksi daya reaktif dan tegangan pada suatu bus. Sistem tidak stabil, saat tegangan (V) suatu bus menurun saat injeksi daya reaktif (Q) ke bus tersebut ditingkatkan. Jadi, kestabilan tegangan tercipta saat sensitivitas V-Q bernilai positif dan ketidakstabilan tegangan ditandai dengan sensitivitas V-Q bernilai negatif minimal pada salah satu bus (Gambar 2). Pada sistem yang relatif besar, untuk mencari bus yang kritis harus dilakukan perhitungan kurva Q-V dalam jumlah yang besar.



Gbr. 2. Kurva P-V [2]



Gbr. 1. Kurva Q-V

III. ANALISIS SENSITIVITAS V-Q

Dari persamaan aliran daya metode Newton-Raphson dapat diperoleh matriks Jacobian. Persamaan (1) merepresentasikan model linierisasi dari sistem tenaga pada kondisi operasi tertentu.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

dengan $\Delta P = 0$ akan diperoleh persamaan (2)

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (2)$$

$$J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}] \quad (3)$$

dengan J_R adalah matriks Jacobian tereduksi. Matriks J_R^{-1} adalah sensitivitas V-Q memperlihatkan hubungan ΔQ dan ΔV . Bila $\Delta V_i / \Delta Q_i$ bernilai positif maka sistem stabil dan

sebaliknya bila $\Delta V_i / \Delta Q_i$ bernilai negatif atau nol, sistem berada dalam kondisi ketidakstabilan tegangan.

IV. ANALISIS MODAL EIGENVALUE [2,4]

Karakteristik kestabilan tegangan sistem bisa diidentifikasi dengan menghitung eigenvalue dan eigenvektor dari matriks Jacobian tereduksi sesuai persamaan (4)

$$J_R = \xi \Lambda \eta \leftrightarrow J_R^{-1} = \xi \Lambda^{-1} \eta \quad (4)$$

dengan ξ = Matrix Eigenvektor kanan J_R
 η = Matrix Eigenvektor kiri J_R
 Λ = Matrix Eigenvalue diagonal J_R

Substitusi persamaan (4) ke persamaan (2) akan dan karena $\xi^{-1} = \eta$ akan diperoleh (5)

$$V_i = \frac{1}{\lambda_i} Q_i \quad (5)$$

Kestabilan tegangan bisa diketahui dari mode eigenvalue λ_i . Eigenvalue minimum dari sistem merepresentasikan sensitivitas V-Q. Sistem stabil bila λ_i bernilai positif. Saat λ_i bernilai nol maka sistem berada di batas kestabilan tegangan. Sistem tidak stabil bila λ_i bernilai negatif.

V. FAKTOR PARTISIPASI BUS (FPB) [2]

Metode ini mampu memberikan informasi tentang seberapa efektif apa perubahan daya reaktif pada suatu bus dapat memberi perubahan pada tegangan pada bus tersebut. Hal ini diperoleh dari

$$P_{ki} = \xi_{ki} \eta_{ki} \quad (6)$$

Faktor partisipasi bus menjelaskan besar kontribusi perubahan pada sebuah bus terhadap kondisi kestabilan tegangan sistem. Oleh karena itu, faktor partisipasi bus dapat digunakan untuk mencari bus yang rawan menuju ketidakstabilan tegangan atau bus penyebab ketidakstabilan tegangan. Bus yang paling berpartisipasi akan memiliki nilai faktor partisipasi bus terbesar.

VI. PQVOLTAGE STABILITY INDEX (PQVSI) [5]

Indeks kestabilan tegangan berbasis saluran yang menilai kestabilan tegangan dari perbandingan besar aliran daya aktif pada suatu saluran pada suatu kondisi operasi dengan batas maksimal penyaluran daya pada saluran tersebut. Batas maksimal penyaluran daya sebuah saluran diperoleh dari persamaan berikut

$$P_{ji}^{NP} = \frac{|V_s|^2}{2\text{Im}(AB^*) \tan \theta_{ji} - 2\text{Re}(AB^*) + 2|A||B| \sec \theta_{ji}} \quad (7)$$

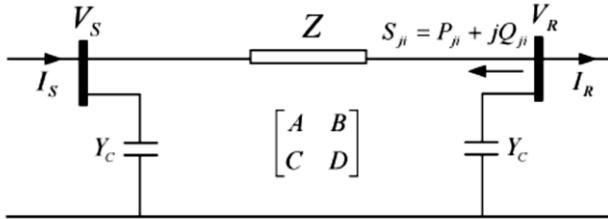
dengan

$$A = 1 + ZY_c$$

$$B = Z$$

θ = Sudut aliran daya

Sistem diasumsikan dengan menggunakan model saluran π seperti Gambar 3.



Gbr. 3. Model π saluran transmisi

Gambar 4 memperlihatkan hubungan penyaluran daya operasi tertentu dengan titik operasi saat keruntuhan kestabilan tegangan. Kestabilan sistem dapat diketahui dengan persamaan berikut :

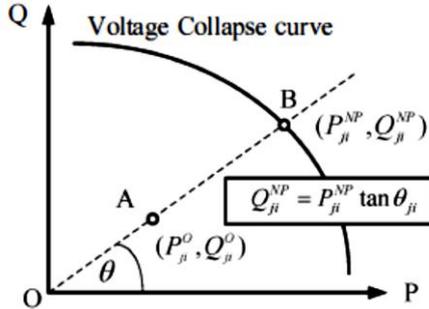
$$VSI_{ij} = \frac{OA}{OB} = \frac{P_{ji}^0}{P_{ji}^{NP}}, 0 \leq VSI_{ij} \leq 1 \quad (8)$$

$$PQVSI = \max_j(VSI_{ij}) \quad (9)$$

dengan

P_{ji}^0 adalah aliran daya aktif dari bus j ke bus i

P_{ji}^{NP} adalah aliran daya maksimal suatu saluran

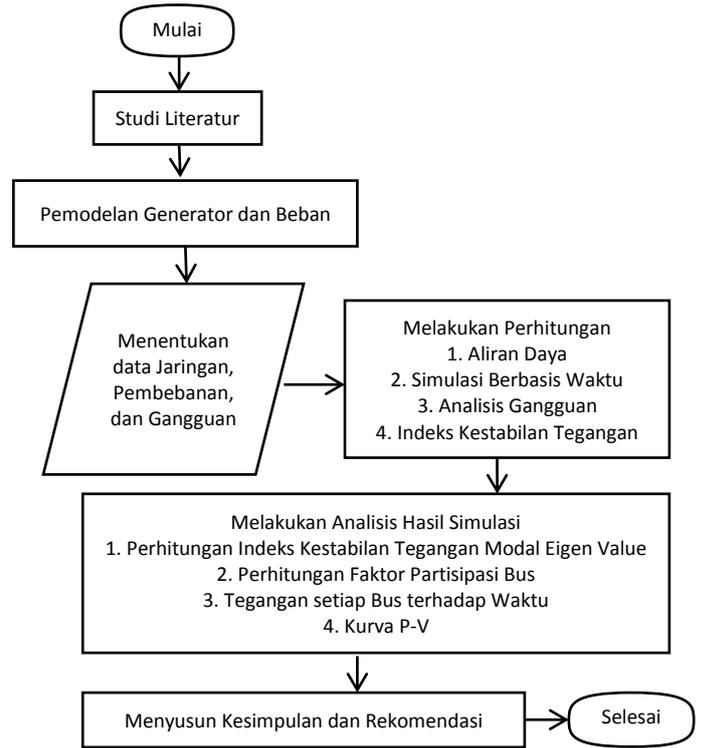


Gbr. 4. Kurva P-Q saat Titik Keruntuhan Kestabilan Tegangan

Indeks kestabilan tegangan PQVSI akan bernilai $0 \leq VSI \leq 1$. Sebuah saluran akan dikatakan rawan menuju ketidakstabilan tegangan saat nilai PQVSI bernilai mendekati 1.

VII. METODOLOGI PENELITIAN

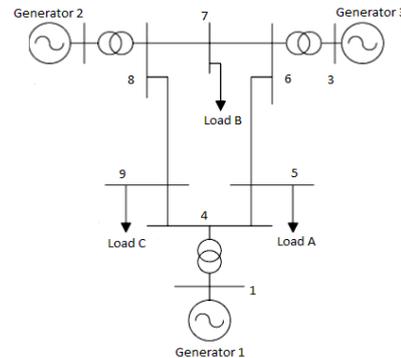
Penelitian ini menggunakan software MATLAB dengan toolbox Matpower dan Simulink. Objek penelitian ini adalah sistem IEEE 9 Bus. Gambar 5 di bawah ini menjelaskan tentang alur prosedur penelitian ini. Penelitian dilakukan dengan 2 skenario dan setiap skenario mengikuti alur seperti dalam Gambar 5.



Gbr. 5. Diagram Alir Penelitian

VIII. PEMODELAN

Penelitian ini menggunakan sistem IEEE 9 bus seperti dalam Gambar 6 sebagai berikut :



Gbr.6. Sistem IEEE 9 bus

Generator dimodelkan menggunakan *model 4 states* sebagai berikut :

$$E'_d = \frac{1}{T'_{d0}} (-E'_d + (L_q - L'_q)i_q) \quad (10)$$

$$E'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (-E'_q - (L_d - L'_d)i_d + E_{fd}) \quad (11)$$

$$\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} (T_{mech} - T_{em} - D \cdot \Delta\omega_r) \quad (12)$$

$$\dot{\delta} = \omega_{r,base} \cdot \Delta\omega_r \quad (13)$$

IX. HASIL DAN PEMBAHASAN

Adapun skenario gangguan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut

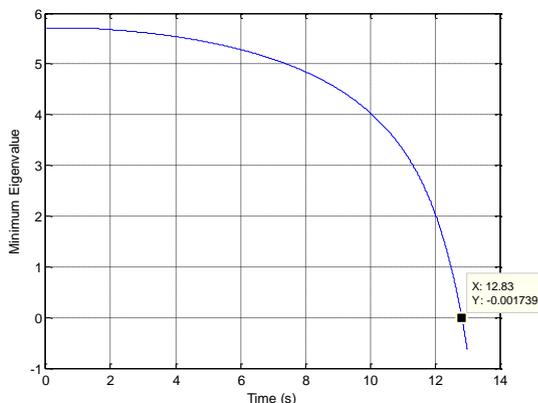
1. Gangguan kecil pada bus 5 dengan slope 0.3 pu per detik sejak detik ke 1
2. Terjadi gangguan besar pada bus7 dengan kenaikan beban 2 pu pada detik ke1

i. Hasil Skenario 1

Tabel 1 menginformasikan tingkat kestabilan tegangan sistem dari waktu ke waktu dan dapat kita lihat pada detik ke13 eigenvalue ke3 bernilai negatif. Hal ini menandakan sistem telah kehilangan kestabilan tegangannya. Gambar 7 memperlihatkan sistem menuju kondisi ketidakstabilan pada detik ke 12.83.

Tabel 1- Matriks Eigenvalue Skenario 1

| Eigen ke | Detik 4 | Detik 8 | Detik 12 | Detik 12.83 | Detik 13 |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| Eig ke-1 | 48.8066 | 46.7591 | 40.8642 | 38.0210 | 37.2841 |
| Eig ke-2 | 44.5434 | 42.5952 | 36.8481 | 34.1069 | 33.4186 |
| Eig ke-3 | 34.7625 | 33.1354 | 2.0638 | 0.0121 | -0.6217 |
| Eig ke-4 | 5.5394 | 4.8516 | 11.2573 | 25.8171 | 10.117 |
| Eig ke-5 | 12.2645 | 11.4246 | 8.9504 | 10.3466 | 7.5285 |
| Eig ke-6 | 14.0730 | 13.2794 | 28.3207 | 7.8100 | 25.1401 |



Gbr. 7 Kurva perubahan eigenvalue mode 3 skenario 1

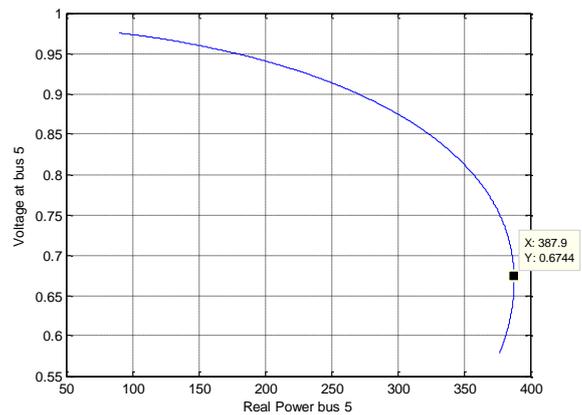
Tabel 2 - Faktor Partisipasi Bus Detik ke-12.83

| Bus ke | Eig 1 | Eig 2 | Eig 3 | Eig 4 | Eig 5 | Eig 6 |
|--------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
| Bus 4 | 0.186 | 0.598 | 0.141 | 0.074 | 0.001 | 0.000 |
| Bus 5 | 0.025 | 0.054 | 0.693 | 0.038 | 0.157 | 0.033 |
| Bus 6 | 0.067 | 0.020 | 0.042 | 0.111 | 0.035 | 0.724 |
| Bus 7 | 0.199 | 0.104 | 0.024 | 0.234 | 0.408 | 0.032 |
| Bus 8 | 0.436 | 0.161 | 0.012 | 0.009 | 0.198 | 0.184 |
| Bus 9 | 0.087 | 0.064 | 0.087 | 0.534 | 0.201 | 0.027 |

Eigenvalue terendah pada skenario 1 berada pada eigenvalue mode ke3. Faktor partisipasi bus dilakukan saat eigenvalue mendekati 0 yaitu pada detik ke 12.83 yang

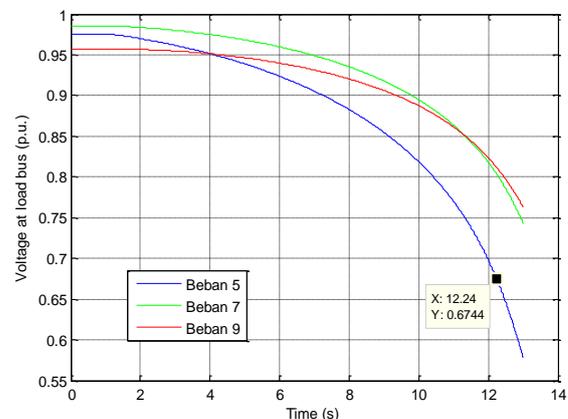
bernilai 0.0121. Bus yang memiliki nilai partisipasi terbesar pada mode eigenvalue ke3 adalah bus 5, bernilai 0.693. Hal ini menandakan bus yang paling berpartisipasi (mengalami gangguan) pada skenario 1 adalah bus 5.

Gambar 8 merupakan kurva P-V bus 5 skenario 1. Titik pembebanan maksimum atau titik kritis bus 5 skenario 1 terjadi pembebanan sebesar 387.9 MW dan jatuh tegangan ke 0.6744 pu yang terjadi pada detik ke 12.24 sesuai Gambar 9.



Gbr. 8 Kurva P-V Bus 5 Skenario 1

Gambar 9 juga memperlihatkan profil tegangan bus beban pada skenario 1. Dapat dilihat tegangan bus 5, bus yang mengalami gangguan, memiliki profil tegangan terendah.



Gbr. 9 Kurva profil tegangan bus beban skenario 1

Tabel 3 memperlihatkan perbandingan aliran daya suatu saluran pada detik tertentu terhadap batas maksimum penyalurannya. Saluran yang paling rawan pada skenario 1 adalah saluran dari bus 4 ke bus 5, dimana pada detik 13 PQVSI bernilai 0.976 yang merupakan nilai maksimal pembebanan. Indeks ini mampu memperlihatkan perkembangan tingkat kestabilan tegangan berbasis saluran sehingga dapat diprediksi batas penyaluran yang tidak mengganggu kestabilan tegangan sistem.

Tabel 3 - PQVSI Skenario 1

| Saluran | Detik ke4 | Detik ke8 | Detik ke12 | Detik ke13 |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 - 4 | 0.2162 | 0.4033 | 0.6849 | 0.7873 |
| 4 - 5 | 0.2614 | 0.5167 | 0.8699 | 0.9760 |
| 5 - 6 | 0.3633 | 0.4745 | 0.7199 | 0.8617 |
| 3 - 6 | 0.0962 | 0.1131 | 0.1762 | 0.2342 |
| 6 - 7 | 0.1009 | 0.0197 | 0.1323 | 0.2099 |
| 7 - 8 | 0.1631 | 0.2108 | 0.3202 | 0.3897 |
| 8 - 2 | 0.2073 | 0.2309 | 0.3128 | 0.3759 |
| 8 - 9 | 0.3471 | 0.3135 | 0.2991 | 0.3211 |
| 9 - 4 | 0.1765 | 0.2047 | 0.2664 | 0.2960 |

Tabel 5 – Faktor Partisipasi Bus Detik ke23.92

| Bus ke | Eig 1 | Eig 2 | Eig 3 | Eig 4 | Eig 5 | Eig 6 |
|--------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Bus 4 | 0.824 | 0.012 | 0.146 | 0.001 | 0.018 | 0.000 |
| Bus 5 | 0.080 | 0.030 | 0.386 | 0.339 | 0.012 | 0.152 |
| Bus 6 | 0.002 | 0.089 | 0.002 | 0.170 | 0.360 | 0.377 |
| Bus 7 | 0.000 | 0.598 | 0.125 | 0.010 | 0.260 | 0.007 |
| Bus 8 | 0.002 | 0.220 | 0.002 | 0.115 | 0.338 | 0.322 |
| Bus 9 | 0.092 | 0.052 | 0.339 | 0.365 | 0.011 | 0.141 |

Eigenvalue terendah skenario 2 berada pada mode eigenvalue ke3.FPB dilakukan saat eigenvalue mendekati nilai 0, yaitu pada detik ke23.92 bernilai 0.0013.Bus yang memiliki nilai partisipasi terbesar pada mode eigenvalue ke-2 adalah bus 7 sebesar 0.598.Hal ini menandakan bus yang paling berpartisipasi (mengalami gangguan) pada skenario 1 adalah bus 7.

Tabel 6 merupakan hasil dari analisis PQVSI yang menunjukkan perbandingan aliran daya suatu saluran pada detik tertentu terhadap batas maksimum penyalurannya.Saluran yang paling rawan pada skenario 2 adalah saluran dari bus 7 ke bus 8, pada detik ke 24 yang memiliki nilai PQVSI bernilai 0.9073.Indeks ini mampu memperlihatkan perkembangan tingkat kestabilan tegangan berbasis saluran sehingga dapat diprediksi batas penyaluran yang tidak mengganggu kestabilan tegangan sistem.

ii. Hasil Skenario 2

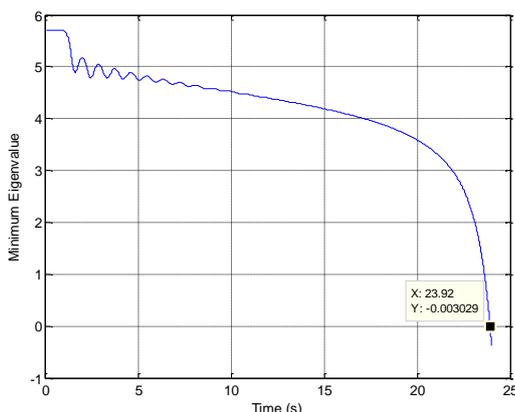
Tabel 4 merupakan nilai eigenvalue dari matriks Jacobian tereduksi sistem. Tabel ini memperlihatkan sistem dapat bertahan dari kenaikan sebesar 2 pu sampai detik ke23. Mode minimum saat ketidakstabilan muncul adalah mode eigenvalue ke2. Gambar 10 memperlihatkan sistem mulai tidak stabil sejak detik ke23.92

Tabel 4 - Matriks Eigenvalue Skenario 2

| Eigen ke | Detik 15 | Detik 20 | Detik 23 | Detik 23.92 | Detik 24 |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| Eig ke-1 | 43.2336 | 41.6711 | 39.4262 | 37.3881 | 36.9879 |
| Eig ke-2 | 36.2382 | 32.6271 | 26.0823 | 0.0013 | -0.3734 |
| Eig ke-3 | 27.9109 | 25.3057 | 20.8416 | 5.5579 | 5.378 |
| Eig ke-4 | 4.1893 | 3.5941 | 2.1409 | 8.7243 | 17.6144 |
| Eig ke-5 | 9.3047 | 8.2732 | 6.6876 | 18.8374 | 15.1841 |
| Eig ke-6 | 12.4048 | 11.6968 | 10.4473 | 16.0732 | 8.3128 |

Tabel 6 – PQVSI Skenario 2

| Saluran | detik ke15 | detik ke20 | detik ke23 | detik ke24 |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 - 4 | 0.4686 | 0.5216 | 0.5914 | 0.6591 |
| 4 - 5 | 0.4089 | 0.4659 | 0.5508 | 0.6369 |
| 5 - 6 | 0.385 | 0.4974 | 0.6892 | 0.0408 |
| 3 - 6 | 0.151 | 0.1791 | 0.2555 | 0.3984 |
| 6 - 7 | 0.4632 | 0.5493 | 0.7187 | 0.8915 |
| 7 - 8 | 0.4773 | 0.5653 | 0.7394 | 0.9073 |
| 8 - 2 | 0.3273 | 0.389 | 0.545 | 0.8163 |
| 8 - 9 | 0.3215 | 0.4494 | 0.0004 | 0.1742 |
| 9 - 4 | 0.4515 | 0.5081 | 0.5934 | 0.7019 |



Gbr. 10 Kurva perubahan eigenvalue mode 2 skenario 2

X. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dibahas kestabilan tegangan pada sistem tenaga dan metode analisis yang efektif dalam memperoleh informasi penting tentang kestabilan tegangan sebuah sistem tenaga listrik.Indeks kestabilan tegangan dengan modal eigenvalue dan PQVSI merupakan metode yang digunakan pada penelitian ini.Kedua metode ini mampu memberikan informasi penting tentang kestabilan tegangan, seperti tingkat kestabilan tegangan, jarak kondisi

operasi dengan batas operasi yang masih stabil, dan bagian dari sistem yang menjadi penyebab ketidakstabilan tegangan sistem.

Pada skenario 1 dapat diketahui bahwa sistem mampu menjaga kestabilannya hingga detik ke 12.83 dan mode eigenvalue terendah berada pada mode ke 3 dengan nilai 0.0121. Pada skenario 1, bus yang memiliki partipasi terbesar adalah bus ke 5 sebesar 0.693, sehingga metode faktor partisipasi bus mampu mengetahui bus yang mengalami masalah. Analisis PQVSI mampu memperlihatkan saluran paling rawan menuju kondisi ketidakstabilan adalah saluran dari bus ke 4 ke bus ke 5, dimana pada detik ke 13 nilai PQVSI bernilai 0.976.

Pada skenario 2 dapat diketahui bahwa sistem mampu menjaga kestabilannya hingga detik ke 23.92 dan mode eigenvalue terendah berada pada mode ke 2 dengan nilai 0.0013. Pada skenario 2, bus yang memiliki partipasi terbesar adalah bus ke 7 sebesar 0.598, sehingga metode faktor partisipasi bus mampu mengetahui bus yang mengalami masalah. Analisis PQVSI mampu memperlihatkan saluran yang paling rawan menuju kondisi ketidakstabilan adalah saluran dari bus ke 7 ke bus ke 8, dimana pada detik ke 24 nilai PQVSI bernilai 0.9073.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Sharma dan M. G. Ganes, "Determination of the Applicability of using Modal Analysis for the Prediction of Voltage Stability," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2008.
- [2] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [3] S. D. Naik, M. K. Khedkar, dan S. S. Bhat, "Correlation and Comparison between Bus Participation Factor and Voltage Sensitivity Factor for Simultaneous and Individual Bus Load Change in Multi Bus Power System," *IEEE*, 2011.
- [4] B. Gao, G. K. Morison, dan P. Kundur, "Voltage Stability Evaluation using Modal Analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 7(4):p.14, 1992.
- [5] Krit Yimchuen dan Kulyos Audomwongseree, "Transmission Expansion Planning with Consideration of Voltage Stability using Genetic Algorithm," in *ECTI-CON 2011*, Thailand, 2011, pp. 909-912.
- [6] Lesnanto M. P., Naebboon, dan Hoonchareon, "Real Time Voltage Stability Prediction based on Modal Analysis for Supporting Wide Area Monitoring System," *International Conference on Electrical, Electronics, and Civil Engineering (ICEECE 2011)*, pp. 208-212, December 2011.
- [7] Qingsheng Li, Dongfang Zhang, dan Tao Xu, "Study on the Key Buses to Power System Steady-State Voltage Stability," *2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012)*, 2012.