

Penilaian Keamanan Tegangan Sistem Kelistrikan Wilayah Lampung Dengan Menggunakan Kurva P-V

Osea Zebua

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
osea@unila.ac.id

Intisari---Tegangan yang stabil merupakan salah satu syarat operasi sistem tenaga listrik yang ideal. Akibat pembebanan dan gangguan yang terjadi, tegangan dapat bervariasi dan dapat mendekati batas operasi yang diijinkan. Pembebanan yang semakin bertambah menyebabkan nilai tegangan dapat jatuh melewati batas operasi. Perencanaan operasi sistem tenaga listrik membutuhkan penilaian keadaan keamanan tegangan untuk mengurangi resiko putusnya pelayanan akibat gangguan yang diakibatkan oleh jatuh tegangan. Salah satu metode yang sering dipakai adalah dengan menggunakan kurva P-V. Kurva ini menjelaskan hubungan antara daya aktif dan tegangan pada suatu bus. Dengan menaikkan beban, maka nilai tegangan kritis pada pembebanan maksimum dapat diperoleh. Makalah ini bertujuan melakukan penilaian keamanan (*voltage security assessment*) sistem kelistrikan wilayah Lampung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi keamanan tegangan pada bus-bus di daerah yang berdekatan dengan PLTU Bukit Asam agak sedikit kritis dengan adanya sedikit kenaikan beban pada bus-bus tersebut. Kenaikan beban sebesar 0,7 pu pada bus Gumawang dapat menyebabkan tegangan pada bus tersebut jatuh mendekati batas tegangan operasi minimumnya.

Kata kunci---penilaian keamanan tegangan, stabilitas tegangan, jatuh tegangan, kurva P-V, aliran daya kontinuitas

Abstract---Stable voltage is one condition of ideal electrical power system operation. Due to load increasing and disturbances, voltage may vary and can reach the value near to permissible operation limit. Further load increasing can cause voltage collapse over operation limit. Electrical power system planning needs voltage security assessment to reduce the risks of out of service due to voltage collapse. One of methods which often used is by using P-V curve. This curve describes relationship between real power and voltage at a bus. By increasing load, the critical voltage at maximum loading can be defined. This paper aims to do voltage security assessment on electrical power system of Lampung province. The results show that voltage security condition at bus near the Bukit Asam power plant bus tends to be critical if there is a little load increasing. By increasing load of 0.7 p.u. at Gumawang bus can cause voltage at that bus collapse near to minimum operation limit.

Keywords---voltage security assessment, voltage stability, voltage collapse, P-V curve, continuation power flow

I. PENDAHULUAN

Semakin meningkatnya pertumbuhan beban listrik membuat sistem tenaga listrik beroperasi mendekati batas-batas operasi yang ideal. Pertumbuhan beban listrik yang tidak diikuti oleh penambahan kapasitas pembangkitan daya listrik dan penambahan jaringan transmisi yang baru, dapat menyebabkan nilai tegangan pada saat operasi menjadi tidak stabil. Tegangan yang tidak stabil ini dapat menyebabkan berhentinya operasi sistem tenaga listrik akibat bekerjanya sistem proteksi tegangan pada gardu induk di tempat-tempat tertentu. Jika penurunan tegangan terlalu cepat dan tidak terkontrol, kondisi ini disebut jatuh tegangan, dapat

memicu pemadaman listrik pada keseluruhan sistem tenaga listrik [1].

Berbagai indeks atau indikator stabilitas tegangan, baik analisis dinamis maupun analisis statis, telah diusulkan untuk menilai seberapa dekat tegangan suatu sistem menuju ketidakstabilan [2-7]. Analisis stabilitas tegangan ini sangat berguna bagi perencanaan maupun pada saat operasi sistem tenaga listrik.

Salah satu di antaranya adalah dengan menggunakan kurva P-V [8]. Kurva P-V menggambarkan hubungan antara daya listrik, P dengan tegangan V pada suatu titik atau bus tertentu. Jika daya pada satu bus dinaikkan, maka tegangan pada bus tersebut akan menurun. Kenaikan daya lebih lanjut dapat

mengakibatkan nilai tegangan akan mencapai nilai kritis. Nilai kritis ini merupakan batas kestabilan tegangan pada bus tersebut. Besar daya listrik yang menyebabkan nilai kritis tegangan ini disebut dengan batas pembebanan maksimum.

Kebutuhan akan energi listrik di wilayah Lampung semakin bertambah pesat. Provinsi yang kepadatan penduduknya tertinggi di pulau Sumatera ini, sudah menambah kapasitas pembangkitnya selama sepuluh tahun terakhir ini, yang selama ini disuplai dari Provinsi Sumatera Selatan. Namun demikian analisis kestabilan tegangan sistem transmisi wilayah Lampung perlu dilakukan dengan menggunakan kurva P-V. Hal ini diperlukan untuk melihat potensi timbulnya ketidakstabilan tegangan pada sistem kelistrikan wilayah Lampung.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem transmisi daya listrik yang dipenuhi oleh beban-beban listrik akan mengalami tekanan akibat kenaikan beban dan transfer daya antar bus. Sejumlah masalah keamanan tegangan mulai timbul dalam sistem tenaga listrik. Operasi sistem tenaga yang efisien menjadi terganggu karena masalah ketidakstabilan tegangan dan jatuh tegangan [9].

Keamanan tegangan berarti kemampuan suatu sistem tenaga listrik, tidak hanya beroperasi pada tegangan yang stabil, tetapi juga mempunyai tegangan operasi yang tetap stabil setelah terjadi pelepasan beban atau kenaikan beban [10]. Pengalaman pada industri menunjukkan analisis stabilitas tegangan lebih sesuai dengan menggunakan analisis statis [10,11].

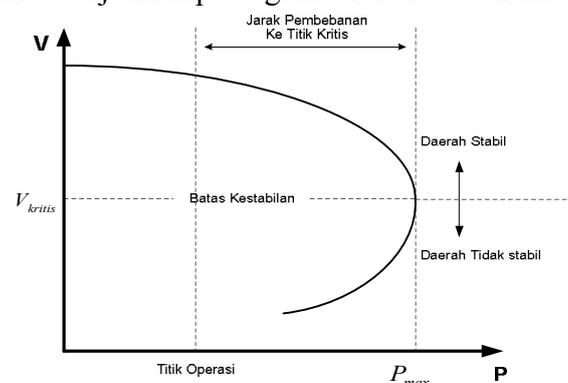
Ketidastabilan tegangan digunakan untuk menggambarkan situasi pada saat gangguan, saat kenaikan beban, atau perubahan sistem yang lain yang menyebabkan tegangan bus berubah secara signifikan dari batas operasi yang diinginkan. Pada kondisi ini kadang-kadang operator atau sistem kontrol otomatis gagal untuk menghentikan perubahan ini. Jika tegangan bus jatuh lebih cepat, hal ini akan mengakibatkan sebagian jaringan akan padam dan istilah jatuh tegangan digunakan dalam hal ini.

Untuk mengurangi kemungkinan jatuh tegangan pada sistem tenaga, perencanaan sistem tenaga listrik harus dilakukan. Pertama-tama, model matematis dari elemen dasar dari sistem tenaga, dan interkoneksinya harus dibangun. Elemen dasar ini terdiri dari stasiun pembangkit, saluran transmisi, sumber daya reaktif dan beban-beban yang terhubung pada sistem.

Dalam istilah matematika, jatuh tegangan terjadi jika persamaan keseimbangan yang berhubungan dengan model matematis sistem transmisi kelistrikan tidak mempunyai penyelesaian lokal yang unik. Titik dimana persamaan keseimbangan tidak lagi mempunyai penyelesaian atau penyelesaian yang unik berhubungan dengan batas kemampuan sistem tenaga listrik untuk mengontrol. Titik ini disebut dengan titik kritis; deteksinya memainkan peranan penting dalam penentuan keamanan tegangan [12].

A. Kurva P-V

Salah satu metode menilai seberapa dekat ke ketidakstabilan tegangan adalah penentuan batas level tegangan dan daya dengan menggunakan kurva P-V. Kurva P-V menyatakan variasi tegangan terhadap variasi daya aktif. Kurva ini dihasilkan dengan menaikkan nilai daya aktif secara bertahap. Dengan menggunakan penyelesaian aliran daya, diperoleh nilai tegangan pada setiap tahap kenaikan beban dengan mempertahankan faktor daya tetap konstan. Pada saat nilai pembebanan maksimum, P_{max} , akan didapatkan nilai tegangan kritis, kondisi ini ditunjukkan pada gambar 1 di bawah ini.



Gbr 1. Kurva P-V

B. Penyelesaian Persamaan Aliran Daya

Sistem tenaga listrik dibentuk dari elemen-elemen yang dapat dinyatakan dengan rangkaian ekuivalen RLC dengan komponen beban dan unit pembangkit yang direpresentasikan sebagai elemen nonlinier. Analisis sistem tenaga listrik dimulai dengan rumusan sistem node referensi yang menggambarkan hubungan antar variabel (tegangan dan arus) dan dinyatakan dengan hukum Kirchoff kedua atau hukum node [13],

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \quad (1)$$

dimana I_{bus} adalah vektor ukuran $n \times 1$ dengan komponennya adalah injeksi arus listrik pada n node (bus) jaringan, V_{bus} adalah vektor ukuran $n \times 1$ dari tegangan yang diukur terhadap node referensi dan Y_{bus} adalah matrik admitansi berukuran $n \times n$ yang simetri dan bujursangkar dan menggambarkan topologi jaringan. Pada jaringan sistem tenaga listrik yang sebenarnya, arus yang diinjeksikan pada jaringan tidak diketahui, yang diketahui adalah daya semu yang diinjeksikan pada jaringan, S_k . S_k ditentukan dengan perkalian antara tegangan pada bus k , V_k , dan konjugate arus pada bus k , I_k^* ,

$$S_k = V_k \cdot I_k^* = \sum_{m=1}^n Y_{k,m} V_m \quad \text{untuk } k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

dimana $Y_{k,m}$ adalah elemen (k,m) dari matriks Y_{bus} pada persamaan (1). S_k juga dapat dinyatakan sebagai komponen real dan imajiner yang dinyatakan sebagai berikut,

$$S_k = P_k + jQ_k, \quad \text{untuk } k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

dimana P_k dan Q_k masing-masing adalah daya aktif dan daya reaktif yang diinjeksikan pada bus k dari sistem, yang dapat ditentukan dengan,

$$P_k = P_k^G - P_k^L \quad (4)$$

$$Q_k = Q_k^G - Q_k^L \quad (5)$$

dimana variable P_k^G dan Q_k^G masing-masing adalah daya aktif dan daya reaktif yang diinjeksikan pada bus k pada generator dan variabel P_k^L dan Q_k^L masing-masing menyatakan beban daya aktif dan beban daya reaktif yang terhubung pada bus k .

Dengan menyatakan tegangan bus dalam bentuk polar,

$$V_k = V_k e^{j\theta_k} = V_k (\cos \theta_k + j \sin \theta_k) \quad (6)$$

dan setiap elemen matriks admitansi bus Y_{bus} sebagai,

$$Y_{km} = G_{km} + jB_{km} \quad (7)$$

dengan memasukkan pada persamaan (2), menghasilkan,

$$\begin{aligned} S_k &= V_k e^{j\theta_k} \cdot \left(\sum_{m=1}^n (G_{km} + jB_{km}) V_m e^{j\theta_m} \right) \\ &= V_k \cdot \left(\sum_{m=1}^n V_m (G_{km} + jB_{km}) (\cos \theta_{km} + j \sin \theta_{km}) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

dimana . Dengan memisahkan bagian real dan imajiner seperti pada persamaan (3), diperoleh hasil sebagai berikut:

$$P_k = V_k^2 G_{kk} + \left(V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^n V_m (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) + (B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) \right) \quad (9)$$

untuk $k = 1, 2, \dots, n$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} + \left(V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^n V_m (G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) - (B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) \right) \quad (10)$$

untuk $k = 1, 2, \dots, n$

Persamaan (9) dan (10) secara umum diketahui sebagai persamaan aliran daya dan dengan menganalisis persamaan-persamaan ini dapat jelas terlihat bahwa terdapat empat variabel yakni daya aktif, daya reaktif, magnitude tegangan dan sudut. Oleh karena itu, perlu menspesifikasikan dua dari variabel-variabel tersebut untuk mendapatkan penyelesaian kedua persamaan.

Persamaan aliran daya dapat diselesaikan dengan metode Newton-Raphson, dengan merepresentasikan persamaan

$$P_k^{esp} - \left[V_k^2 G_{kk} + \left(V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^n V_m (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) + (B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) \right) \right] \quad (11)$$

untuk $k = 1, 2, \dots, n$

$$Q_k^{esp} - \left[-V_k^2 B_{km} + \left(V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n V_m (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) \right) \right] \quad (12)$$

untuk $k = 1, 2, \dots, n$

Penyelesaian persamaan nonlinier dengan metode Newton-Raphson dapat dinyatakan dalam bentuk vektor,

$$f(x) = \begin{bmatrix} \Delta P(x) \\ \Delta Q(x) \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

dimana $\Delta P(x)$ menyatakan persamaan (11) dan $\Delta Q(x)$ menyatakan persamaan (12) dan x menyatakan variabel keadaan V dan θ , yang dinyatakan dengan notasi vektor:

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (14)$$

sehingga,

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (15)$$

matriks Jacobian

Namun pada titik kritis, matriks Jacobian dapat menjadi singular, sehingga penyelesaian persamaan aliran daya dekat titik kritis tersebut cenderung menjadi divergen [14]. Hal ini dapat dihindari dengan menggunakan metode penyelesaian aliran daya kontinuitas [15]. Prinsip umum aliran daya kontinuitas menggunakan skema *predictor-corrector* untuk mencari penyelesaian persamaan aliran daya yang dirumuskan kembali dengan mengikutsertakan parameter beban λ . Perubahan daya, ΔP_i dan ΔQ_i , dirumuskan kembali dari persamaan (11 dan (12) sebagai,

$$\Delta P_i = \lambda(P_{Gi} - P_{Li}) - P_i = \lambda P_i^{esp} - P_i = 0 \quad (16)$$

$$\Delta Q_i = \lambda(Q_{Gi} - Q_{Li}) - Q_i = \lambda Q_i^{esp} - Q_i = 0 \quad (17)$$

$$1 \leq \lambda \leq \lambda_{kritis} \quad (18)$$

dimana P_i^{esp} dan Q_i^{esp} adalah variabel keadaan (*state variable*) pada bus i .

Proses diawali dengan nilai awal yang sudah diketahui dan suatu vektor *predictor* yang merupakan tangen penyelesaian yang dikoreksi yang digunakan untuk mengestimasi penyelesaian selanjutnya dengan nilai parameter beban yang berbeda. Estimasi kemudian dikoreksi dengan menggunakan teknik yang sama pada metode Newton-Raphson dari aliran daya konvensional dengan menambah parameter aliran daya, sehingga,

$$f(\theta, V, \lambda) = 0 \quad (19)$$

Parameterisasi sangat diperlukan untuk menghilangkan ketidaksingularan matriks Jacobian.

III. PEMODELAN SISTEM KELISTRIKAN

Pemodelan sistem transmisi 150kV wilayah Lampung dilakukan untuk perhitungan dengan penyelesaian aliran daya. Model sistem transmisi menggunakan model ekuivalen phi untuk saluran transmisi menengah dan panjang. Data jaringan transmisi 150kV diubah menjadi data bus dan data saluran yang dibutuhkan sesuai dengan format perhitungan aliran daya [16]. Data pengukuran beban tertinggi dimasukkan pada data bus sebagai data beban. Data bus dengan pembebanan dan data saluran (*line*) hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 1 Data Bus Sistem Transmisi Wilayah Lampung

No.	Nama	Pembangkitan		Beban	
		Daya aktif P (MW)	Daya reaktif Q (MVAR)	Daya aktif P (MW)	Daya reaktif Q (MVAR)
1	Bukit Asam				
2	Baturaja			64,8	25,52
3	Blambangan Umpu			6,2	3,05
4	Bukit Kemuning			23,3	11,36
5	Besai	88,84			
6	Kotabumi			36	10,86
7	Menggala			35,2	16,15
8	Gumawang			35,1	18,22
9	Tap Adijaya			29,9	8,74
10	Tegineneng	19		38,7	25,19

11	Pagelaran		36,81	12,1
12	Batutege	28,28		
13	Natar		44,98	14,79
14	Sukarame		24,2	11,28
15	Teluk Betung	10	67,3	44,39
16	Seputih Banyak		22,28	7,32
17	Metro		30,1	17,26
18	Sutami		42,9	21,46
19	Tarahan	55,8	27,7	13,78
20	Sribawono		35,3	13,58
21	New Tarahan	200	28,2	14,05
22	Sebalang	200		
23	Kalianda		44,6	13,21

Data saluran dalam per unit dengan base 100MVA ditunjukkan pada tabel 2 di bawah ini:

Tabel 2 Data Saluran Sistem Transmisi Wilayah Lampung

Dari bus no.	Ke bus no.	Resistansi (R)	Reaktansi (X)	Suseptansi (B)
1	2	0,02144	0,06730	0,47091
2	3	0,03673	0,11528	0,80659
2	4	0,05498	0,17256	1,20736
3	4	0,01825	0,05730	0,40090
4	5	0,00433	0,01359	0,09506
4	6	0,00969	0,03041	0,21279
6	7	0,03297	0,10347	0,72399
6	9	0,02580	0,08098	0,56660
6	10	0,00791	0,02483	0,17376
7	8	0,02995	0,08936	0,58418
10	11	0,01104	0,03464	0,24238
10	13	0,00519	0,01629	0,11395
10	17	0,01205	0,03594	0,23496
10	20	0,01864	0,08065	1,16860
11	12	0,00814	0,03522	0,51028
13	14	0,00694	0,02177	0,15235
13	15	0,00476	0,01494	0,10451
13	18	0,01731	0,05435	0,38025
14	18	0,01038	0,03257	0,22790
16	20	0,02304	0,06874	0,44937
17	20	0,03061	0,09135	0,59715
18	19	0,00456	0,01432	0,10016
18	21	0,00150	0,01025	0,15728
20	21	0,00449	0,03077	0,47201
21	22	0,00097	0,00665	0,10201
22	23	0,00326	0,02236	0,34311

IV. HASIL PERHITUNGAN DAN ANALISIS

Penelitian keadaan keamanan tegangan sistem kelistrikan wilayah Lampung dengan menggunakan kurva P-V ini dilakukan menggunakan metode penyelesaian aliran daya kontinuitas. Program komputer ditulis dengan menggunakan bahasa pemrograman MATLAB [17].

Setiap bus beban (bus yang tidak terdapat pembangkit) dianalisis dengan menaikkan beban aktif secara bertahap. Setiap tahap kenaikan beban pada bus tersebut, nilai tegangan yang diperoleh dari penyelesaian aliran daya dicatat. Setiap kenaikan beban yang hampir melampaui batas nilai tegangan yang ideal juga dicatat.

Oleh karena kenaikan beban pada salah satu bus juga mempengaruhi operasi transfer daya dan tegangan pada bus lain, maka pengaruh kenaikan beban pada satu bus terhadap tegangan bus lain juga dianalisis dengan kurva P-V. Hasil perhitungan untuk setiap kenaikan beban pada bus-bus beban ditunjukkan pada tabel 3 di bawah ini. Inkremen pertambahan parameter beban, λ , dan tegangan adalah 0,05 pu pada base daya semu 100 MVA dan base tegangan 150 kV. Batas-batas nilai tegangan operasi bus yang ideal pada penelitian ini adalah 0,95 pu sampai 1,05 pu.

Tabel 3 Pengaruh kenaikan beban pada salah satu bus beban terhadap bus-bus beban

Kenaikan Beban Pada Bus	Nilai Maksimal Pembebanan Pada Bus-Bus Beban (tidak melebihi batas operasi tegangan)		Nilai Maksimum λ yang dapat dihitung	
	Bus	P (MW)		
2	2	3,02	302	5,47
	3	5,00	500	5,47
3	2	2,75	275	3,16
	3	2,00	200	3,16
4	2	3,45	345	3,85
	3	3,75	375	3,85
6	2	3,55	355	3,75
	7	1,15	115	2,05
7	8	1,15	115	2,05
	7	0,99	99	1,29
8	8	0,7	70	1,29
	9	2,95	295	3,09
9	3	3,05	305	3,09
	6	3,06	306	3,09
7	7	2,96	296	3,09
	8	3,05	305	3,09
9	9	1,04	104	3,09
	11	-	-	3,35
13	-	-	3,6	
14	-	-	3,35	
16	2	2,90	290	3,16
	16	1,45	145	3,16
17	17	2,5	250	3,35
18	-	-	-	3,55
20	-	-	-	3,5
23	-	-	-	3,45

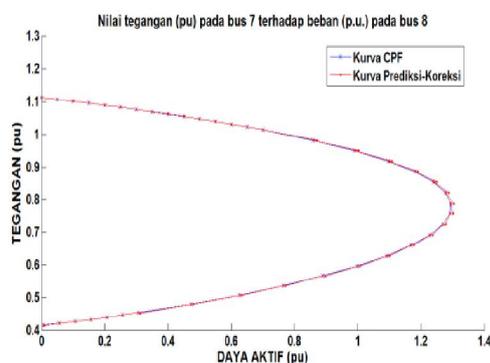
Tabel 3 menunjukkan bahwa kenaikan beban sedikit saja pada bus-bus 7, 8 dan 9

dapat membuat nilai tegangan pada bus-bus tersebut melewati nilai batas operasi tegangan idealnya. Kenaikan beban sebesar 0,7 pu yang dikenakan pada bus 8 dapat membuat tegangan bus tersebut jatuh mendekati nilai tegangan operasi minimumnya.

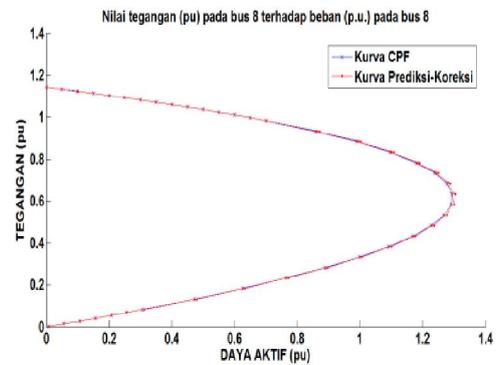
Sementara kenaikan beban pada bus-bus 11,13,14,18,20 dan 23 sampai pada nilai maksimum λ yang dapat dihitung oleh program komputer, tidak begitu mempengaruhi nilai tegangan, baik pada bus itu sendiri maupun pada bus-bus lainnya. Nilai maksimum λ yang dapat dihitung oleh program komputer adalah nilai λ yang sudah mencapai nilai maksimum kurva atau nilai λ maksimum yang dapat dihitung dan tidak dapat dihitung lebih lanjut akibat kondisi tertentu. Kenaikan beban tidak mempengaruhi nilai tegangan pada bus-bus yang terhubung dengan generator, karena pada bus-bus tersebut tegangan dianggap dapat dikontrol oleh peralatan pengatur tegangan.

Kenaikan beban pada bus 4 sebesar 3,45 pu dan pada bus 6 sebesar 3,55 pu lebih dulu dapat memicu nilai tegangan pada bus 2 jatuh mendekati nilai tegangan operasi idealnya.

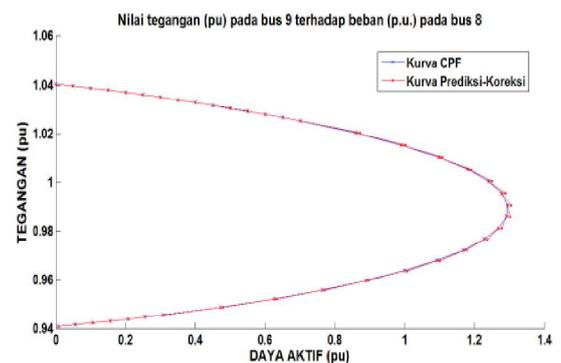
Kurva P-V yang terdiri dari dua kurva, yakni kurva yang dihasilkan dengan metode penyelesaian aliran daya kontinuitas, kurva CPF, dan kurva hasil skema *predictor-corrector* (kurva prediksi-koreksi). Kenaikan beban pada bus 8 dan pengaruhnya pada bus 7, bus 8 itu sendiri dan bus 9 ditunjukkan pada gambar 2,3 dan 4.



Gbr 2. Nilai tegangan pada bus 7 akibat kenaikan beban pada bus 8

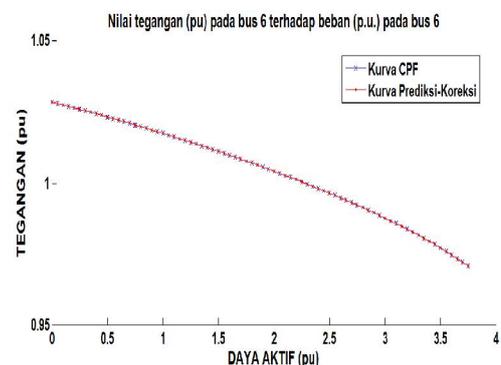


Gbr 3. Nilai tegangan pada bus 8 akibat kenaikan beban pada bus 8

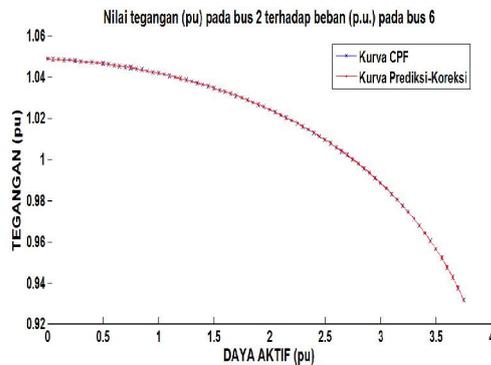


Gbr 4. Nilai tegangan pada bus 9 akibat kenaikan beban pada bus 8

Kenaikan beban pada bus 6 dan pengaruhnya pada bus 6 itu sendiri dan pada bus 2 ditunjukkan pada gambar 5 dan 6 di bawah ini.



Gbr 5. Nilai tegangan pada bus 6 akibat kenaikan beban pada bus 6



Gbr 6. Nilai tegangan pada bus 2 akibat kenaikan beban pada bus 6

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

- 1) Penilaian keamanan tegangan sistem kelistrikan wilayah Lampung dengan kurva P-V menunjukkan kondisi kritis dimana dengan kenaikan beban yang sedikit saja pada bus 8 dapat mengakibatkan tegangan pada bus tersebut dapat jatuh melewati batas tegangan operasi yang ideal.
- 2) Kenaikan beban pada bus-bus yang berdekatan dengan pembangkit listrik tenaga uap Bukit Asam (bus 1) sangat mempengaruhi nilai tegangan pada bus-bus tersebut yang cenderung melewati batas tegangan operasi ideal.

B. Saran

Perlunya dilakukan konfigurasi sistem kelistrikan wilayah Lampung dengan menambah saluran transmisi, pembangkit listrik ataupun memasang sumber-sumber daya reaktif untuk mengurangi rugi-rugi jaringan sistem kelistrikan dan menjaga kondisi tegangan, khususnya pada daerah-daerah yang berdekatan dengan PLTU Bukit Asam.

REFERENSI

- [1] I. Dobson, D.E. Newman, B.A. Carreras and V.E. Lynch, "An Initial Complex System Analysis of the Risks of Blackouts in Power Transmission System", Power System and Communications Infrastructures for the Future, Beijing, September 2002.
- [2] B. Gao, G.K. Morison, and P.Kundur, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, vol.7, no.4, pp.1529-1542, Nov. 1992.
- [3] P.A. Löf, G.A. Anderson, and D.J. Hill, "Voltage Stability Indices for Stressed Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, vol.8, no.1, pp.326-335, Feb. 1993.
- [4] S. Greene, I. Dobson, and F.L. Alvarado, "Contingency Ranking for Voltage Collapse via Sensitivities from a Single Nose Curve", IEEE Trans. on Power Systems, vol.14, no.1, pp.232-238, Feb. 1999.
- [5] A. Monticelli, S. Deckman, A. Garcia and B.Stott, "Real-time External Equivalents for Static Security Analysis", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, pp.498-508, March/April 1979.
- [6] Y. Yamura, K. Sakamoto, Y. Tayama, "Voltage Instability Proximity Index based on Multiple Load Flow Solutions in Ill-Conditioned Power Systems", Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control, Austin, Texas, Dec. 1998.
- [7] C.A. Canizares, F.L. Alvarado, C.L. de Marco, I. Dobson and W.F. Long, "Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, vol.7, no.2, pp.673-683, May 1992.
- [8] C.W. Taylor, "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill Inc., New York, 1994.
- [9] T.J. Overbye, I. Dobson, and C.L. DeMarco, "Q-V Curve Interpretations of Energy Measures for Voltage Security", IEEE Trans. on Power Systems, vol.9, no.1, pp.331-340, Feb. 1994.
- [10] IEEE Special Publication 90th 0358-2-PWR, "Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience", 1990.
- [11] A. Bose, K. Tomsovic, R. Stuart, B. Williams, M. Willis, L. Chen, and M. Vaziri, "Automated Operating Procedures for Transfer Limits", PSERC Publication 01-05, May 2001.
- [12] G.M. Huang and A. Abur, "Voltage Security Margin Assessment", PSERC Publication 02-49, Dec.2002.

- [13] J.J. Grainger and W.D. Stevenson, "*Power System Analysis*", McGraw-Hill International Editions, 1994.
- [14] P. Kundur, "*Power System Stability and Control*", McGraw-Hill, New York, 1994.
- [15] V. Ajjarapu and C. Christy, "*The Continuation Power Flow: A Tool for Steady-State Voltage Stability Analysis*", IEEE Trans. on Power Systems, vol.7. no.1, pp.416-423, Feb.1992.
- [16] "*Single Line Diagram Sistem 150/20 kV dan Laporan Beban Tertinggi Transformator Gardu Induk*", PT. PLN (Persero) P3B Sumatera UPT Tanjung Karang, Mei 2012.
- [17] "*MATLAB R2009b User Guide*", Mathworks Int. Ltd Co, 2009.