

Evaluasi Penempatan *Distributed Generation* untuk Meningkatkan Keamanan dan Stabilitas Tegangan Sistem Tenaga Menggunakan *Nose Curve Method*

Leily W. Johar*, Syafii
Universitas Andalas, Padang
E-mail: leily_johar@yahoo.com

ABSTRACT

Unstable voltage in an electrical power system could cause interruptions in service. It required the planning of power system voltage stability. One of methods that can be used to analyze a voltage is by using nose curve (curve P-V). This curve describes relationship between voltage and active power on a bus. By increasing load, the critical voltage at maximum loading can be defined. To improve voltage stability, placed several units of *Distributed Generation* (DG) on distribution bus. This paper can be used to perform voltage security assessments and improvement of power system voltage stability. The result show that votage profile improvement can be done by installing a DG on a bus that has a large load that is by adding the load reaches 65% of the base load. This research can show voltage security conditions at any power system bus so as to reduce the breakdown of service due to voltage instability occurs.

Keywords: Voltage stability, continuation power flow, nose curve, distribution generation.

ABSTRAK

Tegangan yang tidak stabil dalam suatu sistem tenaga listrik dapat menyebabkan terjadinya gangguan dalam pelayanan. Untuk itu diperlukan perencanaan sistem tenaga listrik yang mempertimbangkan stabilitas tegangan. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menganalisa tegangan adalah dengan menggunakan *nose curve* (kurva P-V). Kurva ini dapat menjelaskan hubungan antara tegangan dan daya aktif pada suatu bus. Perubahan beban akan mempengaruhi nilai tegangan, sehingga dapat diperoleh nilai tegangan kritis untuk pembebanan maksimum. Untuk meningkatkan stabilitas tegangan ditempatkan beberapa unit *Distributed Generation* (DG) pada bus distribusi atau bus beban. Makalah ini dapat digunakan untuk melakukan penilaian keamanan (*voltage security assessment*) dan perbaikan stabilitas tegangan sistem tenaga. Hasil simulasi menunjukkan bahwa profil tegangan yang baik dapat dipertahankan dengan penempatan DG pada bus yang memiliki beban yang besar yaitu dengan penambahan beban mencapai 65% dari beban dasar. Penelitian ini dapat menunjukkan kondisi keamanan tegangan pada setiap bus suatu sistem tenaga sehingga dapat mengurangi putusnya pelayanan akibat ketidak stabilan tegangan yang terjadi.

Kata kunci: Stabilitas tegangan, aliran daya kontinuitas, nose curve, distributed generation.

1. PENDAHULUAN

Studi stabilitas tegangan pada sistem tenaga listrik menjadi perhatian utama dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga listrik untuk mencapai sistem yang berkualitas, kontinu dan handal, karena apabila batas stabilitas tegangan dilewati maka akan berkorelasi terhadap jeleknya kualitas dan kontinuitas sistem tenaga.

Pertumbuhan kebutuhan akan energi listrik bertambah setiap tahunnya, rata-rata sekitar 9.9 % (RUKN 2015 – 2034, Dirjen Ketenagalistrikan Kementrian ESDM). Untuk mengantisipasi hal tersebut dilakukan penambahan kapasitas pembangkit. Namun penambahan pembangkit tersebut tidak diikuti dengan analisis kestabilan tegangan sistem transmisi sehingga dapat mengakibatkan ketidak stabilan tegangan pada sistem kelistrikan.

Analisis stabilitas tegangan ini sangat berguna untuk perencanaan maupun pada saat operasi sistem tenaga listrik. Salah satu di antaranya adalah dengan menggunakan *nose curve* atau kurva P-V. Kurva ini

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.

Penelitian ini menganalisa stabilitas tegangan pada sistem 14 bus IEEE dengan mensimulasikan penambahan beban dan pemasangan pembangkit tersebar (*Distributed Generator*) untuk memperbaiki stabilitas tegangan pada sistem dengan metode aliran daya kontinuitas (Continuation Power Flow/CPF) menggunakan kurva P-V. Untuk mendapatkan hasil yang optimal digunakan simulasi *Power System Analysis Toolbox* pada *Software Matlab*

2. DASAR TEORI

Sistem transmisi daya listrik 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 (*voltage collapse*) [1].

2.1 Stabilitas Tegangan

Stabilitas Tegangan adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk menjaga keseimbangan tegangan pada semua bus dalam sistem yang berada dibawah kondisi operasi normal dan setelah mengalami gangguan [1]. Ketidakstabilan mungkin terjadi dalam bentuk kenaikan atau penurunan tegangan pada beberapa bus secara progresif. Akibat dari ketidakstabilan tegangan adalah lepasnya beban pada area dimana tegangan mencapai nilai rendah yang tidak dapat diterima atau kehilangan integritas sistem tenaga listrik. 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 [2].

Masalah stabilitas tegangan biasanya terjadi pada sistem dengan pembebanan yang besar. Ketidakstabilan tegangan dapat menginisiasi terjadinya jatuh tegangan. Gangguan yang menyebabkan jatuh tegangan dapat dipicu oleh beberapa hal, seperti naiknya beban atau gangguan besar yang muncul secara tiba-tiba. Setiap komponen dalam sistem tenaga listrik memberikan pengaruh terhadap stabilitas tegangan sistem tersebut, termasuk sistem pembangkitan, sistem transmisi, karakteristik beban, dan kompensator daya reaktif.

2.2 Upaya Mengatasi Stabilitas Tegangan

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengatasi masalah stabilitas tegangan yaitu [1];

A. Pengatur Tegangan Otomatis (AVR)

Pengoperasian Unit AVR berfungsi untuk menjaga agar tegangan generator tetap konstan dengan kata lain generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil tidak terpengaruh pada perubahan beban yang selalu berubah-ubah, dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan output generator.

B. Transformator Pengubah Tap (*Tap Changers Transformer*)

Transformator Tap dapat digunakan untuk mengontrol tegangan dan daya reaktif. Transformator ini dapat diatur rasio belitan primer dan sekundernya, dengan demikian dapat diatur tegangan keluarannya. Perubahan rasio belitan transformator diperlukan untuk mengkompensasi variasi tegangan sistem.

C. Perangkat Kompensasi

Perangkat kompensasi reaktif biasanya ditambahkan untuk memasok atau menyerap daya reaktif sehingga dapat mengontrol keseimbangan daya reaktif, peralatan yang bias digunakan adalah kapasitor shunt, reaktor shunt, kondensor sinkron dan kompensator var statis.

D. Pelepasan Beban (*Load Shedding*)

Pelepasan beban adalah metode lain untuk menjaga tegangan sistem tenaga tetap stabil. Pengurangan beban walaupun sebesar 5% hingga 10% dapat membuat perbedaan yang signifikan antara *collapse* atau bertahan. Hal ini dapat dilakukan secara manual atau otomatis.

E. Pembangkitan Tersebar (DG)

Pemasangan pembangkit skala kecil atau pembangkit tersebar (DG) pada sistem distribusi eksisting juga memiliki efek terhadap kestabilan sistem, keandalan sistem, kualitas daya dan sistem proteksi. Secara teknis, DG memiliki beberapa aspek definisi yang meliputi kapasitas, tujuan pemasangan, lokasi penempatan, dan teknologi yang digunakan. Beberapa definisi kapasitas DG yang dimiliki oleh lembaga riset internasional adalah sebagai berikut [3]:

- 1) The Electric Power Research Institute mendefinisikan batas kapasitas DG sampai dengan 50 MW.
- 2) Gas Research Institute mendefinisikan DG sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 25 kW – 25 MW.
- 3) Preston dan Rastler menentukan ukuran mulai dari beberapa kilowatt hingga lebih dari 100 MW.
- 4) Cardell mendefinisikan DG sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 500 kW dan 1 MW.
- 5) International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE) mendefinisikan DG sebagai pembangkit dengan kapasitas lebih kecil dari 50 - 100 MW.

Berdasarkan tujuan instalasinya, DG dibangun untuk menyediakan sumber daya aktif pada sistem tenaga listrik. Sehingga berdasarkan definisi secara internasional ini, DG tidak diharuskan untuk mampu menyediakan daya reaktif [3].

Definisi lokasi penempatan DG, masih mengundang kontroversi diantara banyak peneliti. Kebanyakan peneliti mendefinisikan lokasi DG pada sistem distribusi, namun dalam beberapa literatur penempatan DG juga dapat dilakukan pada sisi sistem transmisi [3].

2.3 Perhitungan Stabilitas Tegangan

Aliran daya di saluran listrik dapat dihitung apabila tegangan di masing-masing bus saluran telah diketahui. Salah satu metode menilai seberapa dekat ke ketidakstabilan tegangan adalah penentuan batas level tegangan dan daya dengan menggunakan *nose curve* atau kurva P-V yang 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 berupa hidung (*nose*).

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 [4]. Pada saat nilai pembebanan maksimum, P_{max} , akan didapatkan nilai tegangan kritis, kondisi ini ditunjukkan pada gambar 1. Titik balik pada kurva P-V ini merupakan titik kritis pembebanan maksimum, daerah diatas titik kritis merupakan daerah operasi yang masih stabil dan daerah dibawah titik kritis merupakan daerah operasi yang tidak stabil.

Daya listrik yang diinjeksikan oleh generator kepada salah satu bus, bukan hanya dapat diserap oleh beban bus tersebut, melainkan dapat juga diserap oleh beban di bus yang lain. Kelebihan daya pada bus akan dikirimkan melalui saluran transmisi ke bus-bus lain yang kekurangan daya. Bentuk umum dari persamaan aliran daya adalah;

$$P_i = \sum_{k=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij}) \quad (1)$$

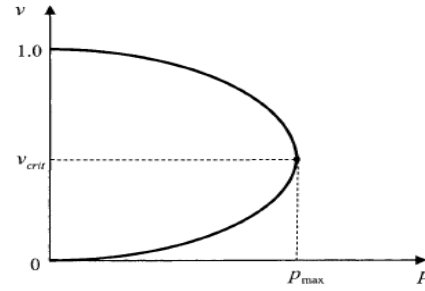
$$Q_i = \sum_{k=1}^n V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij}) \quad (2)$$

dimana P_i dan Q_i masing-masing adalah daya aktif dan daya reaktif yang diinjeksikan pada bus i dari sistem, yang dapat ditentukan dengan,

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} \quad (3)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} \quad (4)$$

dimana variable P_{Gi} dan Q_{Gi} adalah daya aktif dan daya reaktif yang diinjeksikan pada bus i pada generator dan variabel P_{Li} dan Q_{Li} masing-masing menyatakan beban daya aktif dan beban daya reaktif yang terhubung pada bus i . Persamaan aliran daya dapat diselesaikan dengan metode *Newton Raphson*, dan penyelesaian persamaan nonlinier dapat dinyatakan dalam bentuk vektor yaitu;



Gambar 1 Kurva PV

$$f(x) = \begin{bmatrix} \Delta P(x) \\ \Delta Q(x) \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

dimana $\Delta P(x)$ menyatakan persamaan (1) dan $\Delta Q(x)$ menyatakan persamaan (2) dan x adalah variabel keadaan V dan θ , yang dinyatakan dengan notasi vektor;

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (6)$$

sehingga,

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

Matriks Jacobian

Namun pada titik kritis, matriks Jacobian dapat menjadi singular, sehingga penyelesaian persamaan aliran daya dekat titik kritis tersebut cenderung menjadi divergen [1]. Hal ini dapat dihindari dengan menggunakan metode penyelesaian aliran daya kontinuitas (*Continuation Power Flow*).

Prinsip umum aliran daya kontinuitas menggunakan skema *predictor-corrector* untuk mencari penyelesaian persamaan aliran daya yang dirumuskan dengan mengikutsertakan parameter beban (λ). Untuk mensimulasikan perubahan beban, parameter beban (λ) dimasukkan ke dalam persamaan (3) dan (4) sehingga;

$$\Delta P_i = \lambda(P_{Gi} - P_{Li}) - P_i = 0 \quad (8)$$

$$\Delta Q_i = \lambda(Q_{Gi} - Q_{Li}) - Q_i = 0 \quad (9)$$

dan

$$0 \leq \lambda \leq \lambda_{kritis} \quad (10)$$

Dimana $\lambda = 0$ adalah *base case* dan $\lambda = \lambda_{kritis}$ adalah *critical case*. Dengan mensubstitusi persamaan (8) dan (9) ke persamaan (3) dan (4) diperoleh persamaan berikut;

$$F(\theta, V, \lambda) = 0 \quad (11)$$

dimana θ menunjukkan vektor dari sudut tegangan bus dan V adalah besaran vektor dari magnitude tegangan. Solusi dasar untuk $\lambda = 0$ didapat melalui aliran daya, dilanjutkan dengan proses parameterisasi dan kontinuitas [5].

Setelah solusi dasar ditetapkan untuk $\lambda = 0$, langkah prediksi digunakan untuk memberikan titik perkiraan pada solusi berikutnya. Sebuah prediksi pada solusi berikutnya diambil dari langkah yang tepat pada arah tangen sehingga persamaan (11) dapat diselesaikan dengan langkah prediksi dan koreksi yaitu;

$$dF(\theta, V, \lambda) = F_\theta d\theta + F_V dV + F_\lambda d\lambda = 0$$

$$[F_\theta F_V F_\lambda] \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

Untuk menyelesaikan persamaan (12) diperlukan satu persamaan lanjutan. Jika memilih nilai bukan nol dari salah satu tangen vektor dan menjaga perubahannya pada +1 atau -1, yang mana elemen bukan nol ini disebut juga parameter kontinuitas, maka diperoleh;

$$\begin{bmatrix} F_\theta & F_V & F_\lambda \\ \cdot & e_k & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

dimana e_k adalah vektor baris dengan semua elemen nol kecuali untuk elemen ke k yang bernilai 1. Pada persamaan (14) nilai +1 atau -1 digunakan tergantung pada bagaimana perubahan variabel ke k sebagai solusi yang sedang ditelusuri. Suatu prediksi solusi berikutnya ditunjukkan pada persamaan;

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}^{p+1} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}^p + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (14)$$

dimana $p+1$ menunjukkan solusi prediksi untuk langkah selanjutnya pada saat nilai σ adalah skalar yang merupakan ukuran tahapan. Langkah koreksi bertujuan untuk menyelesaikan penambahan aliran daya *Newton-Raphson* dengan solusi prediksi pada persamaan (15) sebagai titik awal (*initial point*). Persamaan aliran daya *Newton-Raphson* ditunjukkan pada;

$$\begin{bmatrix} F(\theta, V, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = [0] \quad (15)$$

dimana η merupakan nilai yang sesuai untuk elemen ke k pada elemen x . Persamaan (2.15) ini dapat diselesaikan dengan menggunakan *Newton-Raphson* pada metoda aliran daya.

Pemilihan parameter beban penting dalam aliran daya kontinuitas. Parameter beban adalah variabel dengan tingkat terbesar dari perubahan. Awalnya, (λ) dipilih sebagai parameter kelanjutan karena pada langkah pertama ada perubahan kecil dalam tegangan bus dan sudut karena beban ringan. Ketika beban meningkat setelah beberapa langkah solusi mendekati titik kritis dan laju perubahan tegangan bus dan sudut meningkat. Oleh karena itu, pemilihan parameter kontinuitas (λ) diperiksa setelah setiap langkah korektor [6].

2.4 Power System Analysis Toolbox (PSAT)

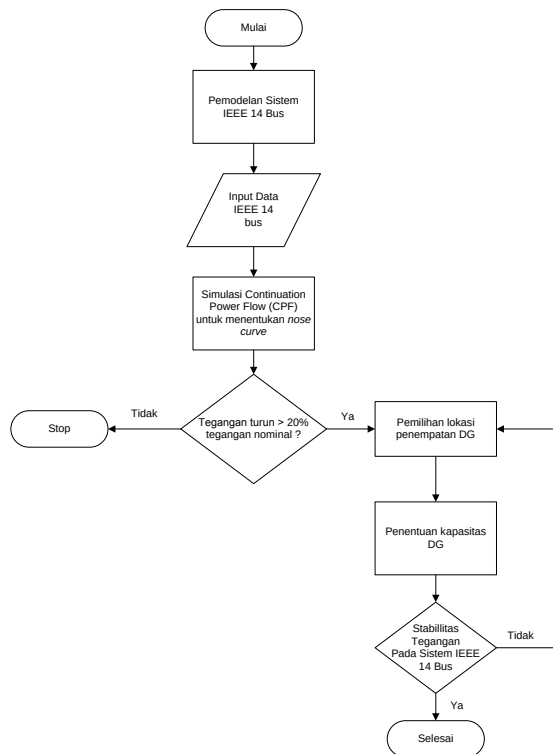
PSAT merupakan sebuah toolbox pada MATLAB yang ditujukan untuk analisis statis dan dinamis serta kendali pada sistem tenaga listrik. PSAT dikembangkan oleh Federico Milano sejak 2001 dan mulai dipublikasikan pada tahun 2002 yang dapat diunduh secara gratis. PSAT sejauh ini merupakan toolbox yang paling lengkap untuk menganalisis permasalahan sistem tenaga listrik. PSAT dapat digunakan untuk analisis *power flow* (PF), *continuation power flow* (CPF) atau *voltage stability* (VS), *optimal power flow* (OPF), *small signal stability analysis* (SSSA) dan *time domain simulation* (TDS) yang disertakan dengan beberapa fitur tampilan, misalnya *graphical user interface* (GUI) dan *graphical network construction* (CAD).

3. METODOLOGI

Penelitian keamanan jaringan ini menggunakan kurva P-V dengan metode penyelesaian aliran daya kontinuitas. Program komputer yang digunakan untuk analisis stabilitas tegangan pada penelitian ini adalah *Power System Analysis Toolbox (PSAT)* pada *Matlab*. Data diolah untuk perhitungan dengan penyelesaian aliran daya kontinuitas, data jaringan diubah menjadi data bus dan data saluran yang dibutuhkan sesuai dengan format perhitungan aliran daya. Penelitian dilakukan dengan langkah-langkah seperti pada gambar 2 yang merupakan diagram alir pelaksanaan penelitian.

1. Pemodelan dan Input Data sistem IEEE 14 bus

Pemodelan dilakukan dengan membuat *single line diagram* pada simulink dan memasukan data sistem pada PSAT yang mencakup data bus, data saluran, data pembangkitan dan data beban yang nilainya ada pada data sheet sistem IEEE 14 bus. Pemodelan dibuat dengan fitur-fitur yang sudah ada pada library PSAT.



Gambar 2 Diagram alir penelitian

2. Menjalankan simulasi

Setelah selesai desain sistem IEEE 14 bus dan *input data*, dijalankan simulasi aliran daya, maka PSAT akan melakukan kalkulasi aliran daya. Selanjutnya dijalankan simulasi aliran daya kontinuitas (CPF) untuk melihat kurva PV dan hasil yang diperoleh berupa profil tegangan pada setiap bus.

3. Pemilihan lokasi penempatan DG

Setelah diketahui bus yang paling rentan terhadap penambahan beban, maka dipilih lokasi penempatan DG. Pemasangan DG dilakukan pada model sistem IEEE yang sudah didesain.

4. Penentuan kapasitas DG

Kapasitas DG ditentukan sampai batas profil tegangan yang diharapkan dengan menjalankan simulasi CPF seperti semula dan hasilnya dapat dilihat pada kurva PV

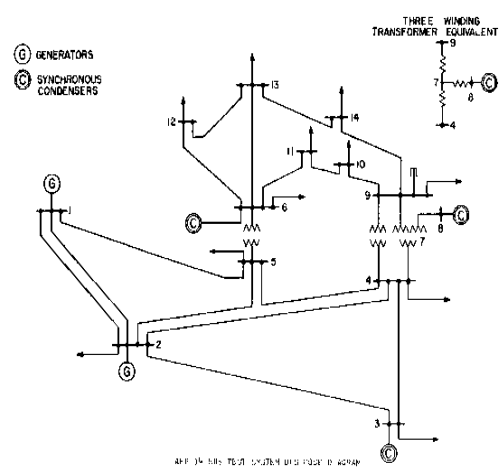
6. Hasil Akhir

Hasil akhir berupa perbaikan profil tegangan dengan pemasangan DG berdasarkan lokasi dan kapasitas DG yang di pasang pada sistem

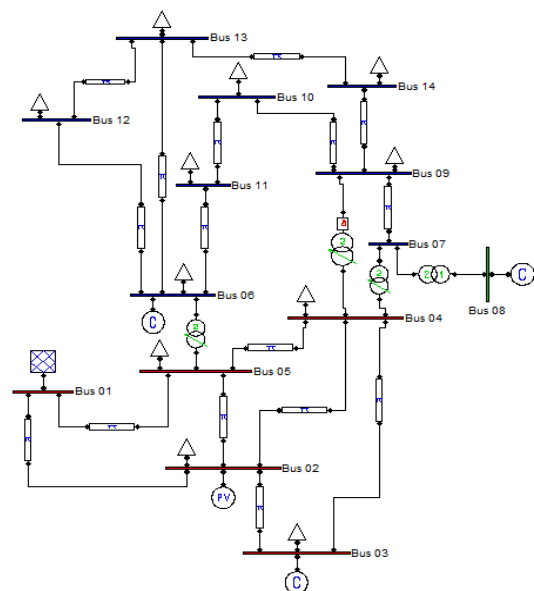
4. HASIL DAN ANALISIS

4.1 Aplikasi Metode Aliran Daya Kontinuasi Menggunakan Kurva P-V

Sistem 14 bus IEEE terdiri dari 2 generator, 20 line transmisi dan 11 beban. Bus nomor 1 adalah slack bus. Sistem 14 bus IEEE diperlihatkan pada gambar 3.



Gambar 3 Single line diagram sistem 14 bus IEEE



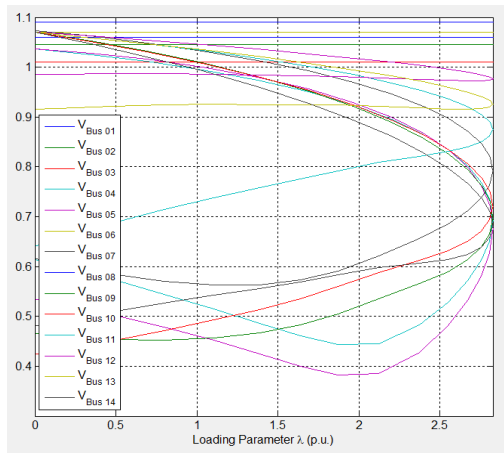
Gambar 4 Simulasi sistem menggunakan PSAT

4.2 Pemodelan Sistem

Pemodelan dilakukan dengan membuat *single line diagram* sistem IEEE 14 bus dilanjutkan dengan memasukkan data bus, data pembangkitan, data beban dan data saluran dari sistem ke dalam software. Pemodelan yang diperlihatkan pada gambar 4 digunakan sebagai objek penelitian.

Proses dimulai dari titik stabil yaitu dengan faktor beban $\lambda = 0$, setiap bus beban dianalisis dengan menaikkan beban aktif secara bertahap, hasilnya dapat dilihat dengan menjalankan simulasi *Continuation Power Flow* (CPF). Hasil simulasi dapat dilihat pada tabel 1 berikut yang memperlihatkan tegangan dan daya aktif setiap bus sistem.

Kurva P-V hasil simulasi terlihat pada gambar 5. Kurva ini menunjukkan ketika beban dinaikan terus menerus, maka tegangan bus sistem menurun secara



Gambar 5 Kurva P-V sistem IEEE 14 bus dengan maximum loading parameter λ 2.827

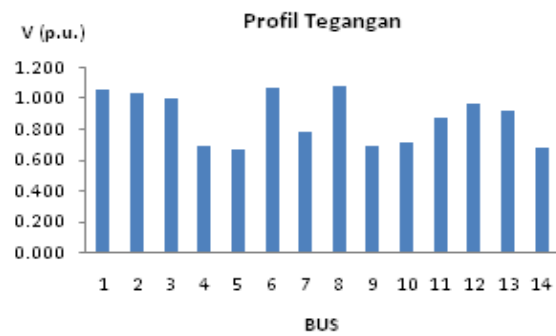
Tabel 1 Hasil simulasi CPF

No Bus	Voltage Magnitude (p.u.)	Daya Aktif P (p.u.)
1	1.06000	0
2	1.04500	0.85883
3	1.01000	3.72820
4	0.69217	1.89180
5	0.67475	0.30079
6	1.07000	0.44327
7	0.79107	0
8	1.09000	0
9	0.69701	1.16750
10	0.72046	0.35620
11	0.87501	0.13852
12	0.97630	0.24142
13	0.92591	0.53430
14	0.68139	0.58971

perlahan sampai pada titik kritis. Tegangan yang masih stabil dapat dilihat pada bagian atas titik pembebanan maksimum. Indikasi tegangan kritis dilihat dari kemiringan kurva yang turunnya paling tajam, dimana untuk parameter beban (λ) yang sama didapat nilai tegangan yang lebih kecil.

Dari simulasi menggunakan PSAT ini dapat dilihat keadaan pada lima buah bus yang tegangannya turun lebih 30% dari tegangan nominalnya yaitu pada bus 4, bus 5, bus 9, bus 10 dan bus 14. Beberapa bus yang tegangannya tidak dipengaruhi oleh kenaikan beban adalah bus 1, bus 2, bus 3, bus 6 dan bus 8 karena pada bus-bus tersebut terdapat generator dan kompensator yang membuat nilai tegangan tetap stabil walaupun semakin besar beban yang diberikan.

Untuk memperbaiki stabilitas tegangan pada sistem ini dilakukan pemasangan Pembangkit Tersebar (DG) yang ditempatkan pada bus distribusi dan bus yang sensitif terhadap perubahan beban.



Gambar 6 Profil tegangan sistem 14 bus setelah simulasi CPF

4.3 Pemasangan DG

Jenis DG yang digunakan tidak dibahas secara detail karena hanya menentukan pengaruh dari penambahan DG terhadap profil tegangan. Data pembangkit yang digunakan adalah data pembangkit rata-rata yang mampu dihasilkan oleh DG itu sendiri. Pemilihan lokasi penempatan DG ini difokuskan pada bus yang sensitif terhadap perubahan beban. Pemasangan DG hanya dilakukan pada bus distribusi, untuk bus transmisi yang sensitif terhadap perubahan beban, DG di pasang pada bus distribusi yang terhubung ke bus transmisi atau bus distribusi yang paling dekat dengan bus transmisi tersebut.

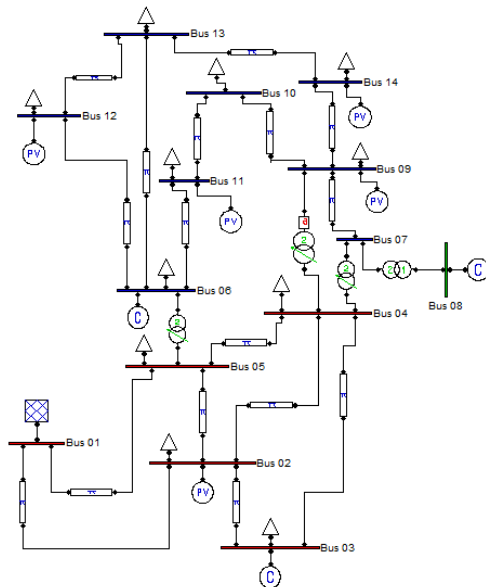
Proses penentuan kapasitas DG yang dimulai dari kapasitas 10 MW dan dilakukan penambahan kapasitas secara bertahap sampai diperoleh nilai optimal, yaitu nilai tegangan bus yang berada pada batas operasi normal. Penentuan lokasi dan kapasitas DG dibuat dalam 2 skenario yaitu;

A. Skenario (1), Pemasangan pada bus yang sensitif terhadap perubahan beban

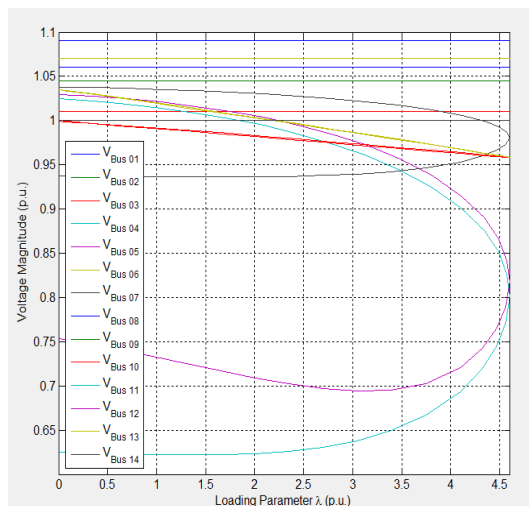
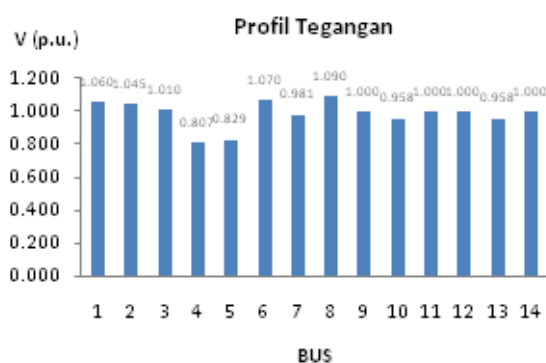
Untuk skenario (1) dipasang DG pada bus yang sensitif terhadap perubahan beban. Untuk bus transmisi yang sensitif dipasang pada bus distribusi yang paling dekat dengan bus transmisi tersebut. Pada skenario ini dipasang DG pada 4 lokasi yaitu pada bus 9, bus 11, bus 12 dan bus 14 seperti yang ditunjukkan pada gambar 7. Total daya yang terpasang adalah 150 MW dan lokasi penempatan DG masing-masing 1 (satu) unit pada:

- 1) Bus 9 dengan kapasitas 50 MW
- 2) Bus 11 dengan kapasitas 30 MW
- 3) Bus 12 dengan kapasitas 30 MW
- 4) Bus 14 dengan kapasitas 40 MW.

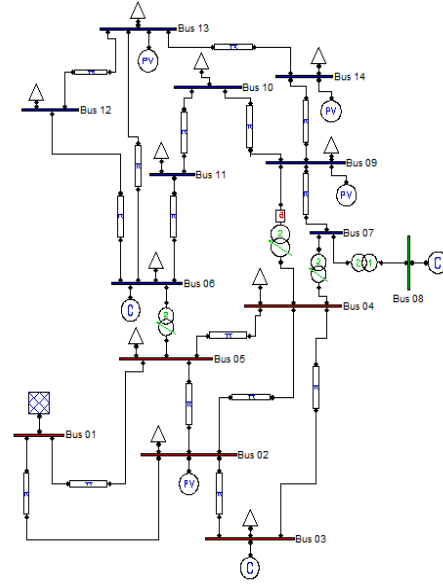
Hasil simulasi CPF pada skenario pertama ini seperti gambar 8 yang memperlihatkan kurva PV dengan parameter pembebanan maksimum 4.6651. Profil tegangan hasil simulasi setelah penambahan 4 unit DG ini ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 7 Simulasi scenario 1

Gambar 8 Kurva PV scenario 1 dengan maximum loading parameter (λ) 4.6651

Gambar 9 Profil tegangan scenario 1



Gambar 10 Simulasi scenario 2

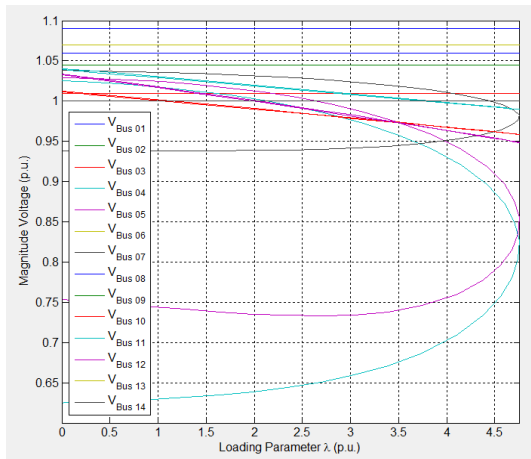
Dari gambar tersebut terlihat tegangan pada bus 4, bus 5, bus 9, bus 10 dan bus 14 yang semula berada pada tegangan kritis, setelah penambahan 4 unit DG dengan kapasitas total 150 MW sudah berada pada tegangan kerja. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa dengan pemasangan 4 unit DG pada sistem IEEE 14 bus, menjadikan sistem tetap dalam operasi yang stabil dengan penambahan beban sampai 65% dan tegangan sistem masih dalam batas tegangan yang diizinkan.

B. Skenario (2), Pemasangan pada bus dengan beban yang besar

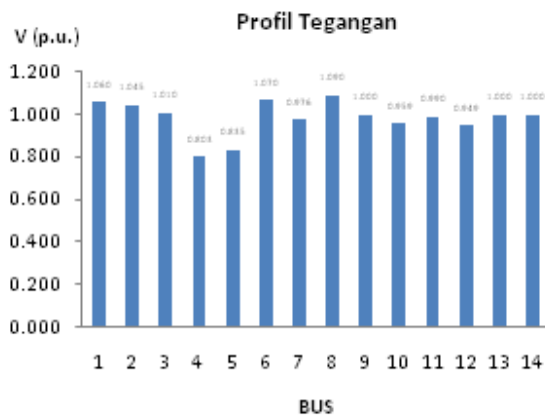
Untuk skenario (2) dipasang DG pada bus yang mempunyai beban yang besar di 3 (tiga) lokasi yaitu pada bus 9, bus 13 dan bus 14 yang ditunjukkan pada gambar 10. Total daya yang terpasang pada skenario (2) ini adalah 170 MW dan lokasi penempatan DG masing-masing 1 (satu) unit pada;

- 1) Bus 9 dengan kapasitas 60 MW
- 2) Bus 13 dengan kapasitas 60 MW
- 3) Bus 14 dengan kapasitas 50 MW

Kurva PV hasil simulasi pada skenario (2) ini dapat dilihat pada gambar 11 yang menunjukkan parameter pembebanan maksimum (λ) mencapai 4.7518. Profil tegangan hasil simulasi setelah penambahan 3 unit DG ini dapat dilihat pada gambar 12. Hasil simulasi pada skenario (2) ini menunjukkan bahwa dengan pemasangan 3 (tiga) unit DG pada sistem IEEE 14 bus, sistem tetap dalam operasi yang stabil dengan



Gambar 10 Kurva PV scenario 1 dengan maximum loading parameter (λ) 4.7518



Gambar 12 Profil tegangan scenario 2

penambahan beban mencapai 68% dan tegangan sistem masih dalam batas tegangan yang diizinkan

4.4 Perbandingan Hasil Simulasi Pemasangan DG

Dari kedua skenario pemasangan DG pada sistem IEEE 14 bus ini dapat dilihat data tegangan yang ditunjukkan pada tabel 2. Simulasi hasil penentuan lokasi dan kapasitas DG yang dipasang pada sistem menunjukkan bahwa profil tegangan akan semakin baik yang berarti kemungkinan jatuh tegangan yang terjadi akan semakin kecil. Hal ini disebabkan karena daya yang disuplai DG terhadap sistem tenaga listrik semakin besar. Semakin besar daya yang disuplai DG ini, maka akan menyebabkan daya pada sisi terima akan meningkat dan tegangan pun akan meningkat.

Data beban hasil simulasi setelah pemasangan DG dapat dilihat pada tabel 3. yang memperlihatkan beban pada setiap bus. Berdasarkan data dari 2 skenario yang dilakukan diperoleh profil tegangan

yang baik dapat terjadi apabila dilakukan peningkatan kapasitas DG atau penambahan jumlah DG yang dipasang. Pada saat jumlah DG yang digunakan meningkat maka daya yang akan disuplai pada sistem tenaga juga akan meningkat, dengan terjadinya peningkatan daya terima, juga berdampak terjadinya peningkatan tegangan sisi terima. Meningkatnya tegangan sisi terima, akan memperbaiki profil tegangan pada ujung saluran sistem tenaga listrik.

Tabel 2 Tegangan bus hasil simulasi pemasangan DG

No Bus	Skenario 1 (150 MW)	Skenario 2 (170 MW)
1	1.0600	1.0600
2	1.0450	1.0450
3	1.0100	1.0100
4	0.8073	0.8033
5	0.8289	0.8350
6	1.0700	1.0700
7	0.9806	0.9762
8	1.0900	1.0900
9	1	1
10	0.9581	0.9588
11	1	0.9898
12	1	0.9489
13	0.9577	1
14	1	1

Tabel 3 Beban pada bus hasil simulasi pemasangan DG

No Bus	Skenario 1 $\lambda = 4.6651$	Skenario 2 $\lambda = 4.7518$
1	0	0
2	1.4173	1.4408
3	6.1524	6.2545
4	3.1219	3.1737
5	0.4964	0.5046
6	0.7315	0.7436
7	0	0
8	0	0
9	1.9267	1.9587
10	0.5878	0.5976
11	0.2286	0.2324
12	0.3984	0.4050
13	0.8817	0.8963
14	0.9731	0.9893

5. KESIMPULAN

Metoda aliran daya kontinuitas dengan menggunakan kurva PV dapat menentukan kondisi keamanan dan stabilitas tegangan pada sistem jika dilakukan penambahan beban. Penentuan lokasi penempatan DG dan kapasitas DG yang optimal pada sistem dapat memperbaiki profil tegangan bus agar dapat tetap beroperasi pada batas tegangan normalnya dan mampu mengakomodasi adanya peningkatan nilai pembebanan sistem. Penempatan DG pada bus yang sensitif terhadap perubahan beban yaitu bus 9, bus 11, bus 12 dan bus 14 pada sistem IEEE 14 bus ini dapat meningkatkan beban sampai 65% dari beban dasar dimana sistem tetap dapat beroperasi stabil pada tegangan kerja. Penempatan DG pada bus beban yang besar yaitu bus 9, bus 13 dan bus 14 pada sistem IEEE 14 bus ini dapat meningkatkan beban sampai 68% dari beban dasar dimana sistem tetap dapat beroperasi stabil pada tegangan kerja.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, USA.
- [2] IEEE special Publication 90th. 1990. *Voltage Stability of Power System Concepts, analytical Tool and Industry Experience*.
- [3] Ackermann, Thomas dan Goran Andersson, and Lennart Soder. (2001), "Distributed Generation: a definition", ELSEVIER Electrical Power Sistem Research.
- [4] V. Ajarapu. (2006). *Computational Techniques for Voltage Stability Assesment and Control*. Iowa, USA.
- [5] WC Reinboldt dan JV Bulkardl dan JV Bukardl. (1983). *A Locally Parameterized Contibuation Proces*. ACM on Mathematical Software, Vol 9.
- [6] Keskin B Mehmet. (2007). *Continuation Power Flow and Voltage Stability in Power System*, Thesis of Middle East Technical University.
- [7] Anand, UP dan Dharmeshkumar, P. (2013). *Voltage Stability Assessment Using Continuation Power Flow*, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 2.
- [8] Zebua, O. (2013) Penilaian Keamanan Tegangan Sistem Kelistrikan Wilayah Lampung Dengan Menggunakan Kurva P-V, *Electrician – Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, Lampung.
- [9] Syafii, Syukri Yunus dan Asrizal. (2014). Analisa Pengaruh Integrasi Pembangkit Tersebar Dalam Sistem Komposit, *Jurnal Nasional Teknik Elektro* Vol 3 No 1.
- [10] Saadat, Hadi. (1999). *Power System Analysis*, McGraw-Hill, USA.
- [11] Stevenson, WD. (1984). Analisis Sistem Tenaga Listrik, Edisi ke 4, diterjemahkan oleh Ir. Kamal Idris, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [12] Data Sheets for IEEE 14 Bus System