

PENENTUAN BATAS KESTABILAN STEADY STATE GENERATOR DENGAN KONSEP REI-DIMO

Rusilawati^{1,2} dan Adi Soeprijanto¹

¹Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

²Teknik Elektro Akademi Teknik Pembangunan Nasional Banjarbaru
habsyi.sila@gmail.com dan adisup@elect-eng.its.ac.id

ABSTRAK

Pada paper ini konsep *Radial Equivalent Independent (REI) - Dimo* digunakan untuk menentukan batas kestabilan *steady state* generator, yaitu batas pembangkitan dimana generator masih dalam kondisi stabil pada saat terjadi penambahan beban. Konsep *REI - Dimo* digunakan untuk menentukan Z ekuivalen masing-masing generator sehingga batas pembangkitan maksimum yang merupakan batas kestabilan *steady state* generator dapat ditentukan. Dengan ditentukannya batas kestabilan *steady state* generator, maka pengoperasian generator dapat dioptimalkan dan masih dalam batas pengoperasian yang aman. Penentuan batas kestabilan *steady state* generator dilakukan pada sistem Jawa-Bali 500 kV.

Kata kunci: *kestabilan steady state, pembangkitan maksimum generator, konsep REI-Dimo*

ABSTRACT

In this paper, Radial Equivalent Independent (REI) - Dimo concept is used to determined a steady state stability limit of generator, a steady-state operating condition for which the generator is steady-state stable when the load increased. REI - Dimo concept is used to determine the equivalent impedance of each units of generator, so the maximum generation limit as a steady state stability limit of generator can be determined. With the steady state stability limit of the generator, then the operation of the generator can be optimized and still within the limits of safe operation. Determination of steady state stability limit of generator were carried out on Java-Bali 500 kV system.

Keywords: steady state stability, maximum generation, REI Dimo concept

I. PENDAHULUAN

Batas *steady-state stability* dari sistem tenaga adalah kondisi operasi *steady state* dimana sistem tenaga masih dalam kondisi stabil akan tetapi untuk perubahan kecil dari parameter operasi akan membawa sistem kehilangan kestabilannya [1]. Definisi awal merujuk kepada konsep bahwa "Kestabilan sistem untuk kondisi perubahan beban secara bertahap dan berubah secara perlahan" [2]. *Voltage Collapse*, menyebabkan

sistem kehilangan kesinkronan dan ketidakstabilan yang diakibatkan oleh penguatan osilasi kecil dari semua bentuk ketidakstabilan *steady state* [3].

Metode *load flow* telah digunakan untuk menghitung total pembebanan dengan cara menambah pembebanan sampai proses *load flow* menjadi tidak konvergen. Metode *continuation power flow* (CPF) juga telah sering digunakan dengan menentukan hubungan antara loading parameter terhadap tegangan pada setiap bus. Kedua metode konvensional ini memiliki kelemahan karena tidak memasukkan nilai internal reaktansi generator dalam pemodelan dan analisa. Kajian praktis untuk menentukan batas *steady state* telah dikembangkan di Rusia dengan menurunkan persamaan matematik dari Dinamyc Jacobian tetapi metode ini membutuhkan waktu komputasi yang jauh lebih lama jika dibandingkan dengan metode yang dikembangkan oleh Paul Dimo. Metode Dimo telah sukses diterapkan untuk menghitung batas pembebanan secara real time [4].

Kesederhanaan model sistem tenaga REI net memungkinkan untuk memeriksa setiap generator dari titik pandang setiap bus pada sistem tenaga. Radial net dari admitansi hubung singkat (REI net) dibangun untuk referensi awal keadaan sistem tenaga. Bus generator dapat mewakili mesin sinkron nyata pada analisa sistem tenaga atau generator sebenarnya, ekuivalen dari batasan lain sistem transmisi [5].

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan analisis tentang batas stabilitas *steady state* dan stabilitas transient, sehingga dapat ditentukan batas stabilitas yang masih aman untuk stabilitas *steady state* dan transient pada penyaluran daya [4, 6, 7]. Pada penelitian tersebut batas stabilitas *steady state* dan transient diperoleh dengan metoda *REI - Dimo*, tetapi penelitian tersebut hanya melihat stabilitas sistem secara keseluruhan, sehingga sulit menganalisis stabilitas pada masing-masing bus.

Pada penelitian ini dilakukan penghitungan batas pembangkitan maksimum masing-masing unit pembangkit, yaitu batas kestabilan *steady state* generator menggunakan konsep *Radial Equivalent Independent (REI) - Dimo* untuk sistem multimesin.

II. STABILITAS *STEADY STATE* SISTEM TENAGA

Sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kumpulan dari beberapa pusat pembangkit listrik dan Gardu Induk (GI), yang satu sama lain saling dihubungkan oleh jaring transmisi. Jaring transmisi membentuk kesatuan sistem yang dikenal dengan sistem interkoneksi.

Apabila sistem dianggap tidak memiliki rugi-rugi daya, maka daya yang dibangkitkan sama dengan daya yang dikirimkan ke bus tak berhingga. Persamaan untuk P_G ditulis sebagai

$$P_G = \frac{|E||V|}{X} \sin \delta \dots\dots\dots (1)$$

Tegangan bus $|V|$ adalah besaran yang tetap jika jaring sangat besar (tak berhingga). Dengan asumsi generator beroperasi pada eksitasi tetap dan menjaga $|E|$ tetap, dan X tetap, maka P_G adalah fungsi dari sudut daya δ . Daya maksimum yang

dikirimkan ke bus tak berhingga terjadi pada $\delta = 90^0$. Persamaan (1) dapat ditulis sebagai

$$P_G = P = P_{maks} \sin \dots \dots \dots (2)$$

Sistem stabil terjadi pada nilai daya kurang dari P_{maks} , yaitu terjadi pada $\delta < 90^0$.

Jika sudut daya dinaikkan melebihi 90^0 , maka sinkronisme akan hilang. P_{maks} adalah *steady-state stability limit* dari sistem yang merupakan daya maksimum yang dapat dikirimkan di bawah gangguan perlahan. Jika sebuah usaha dilakukan untuk mengirimkan daya lebih dari batas daya ini, maka sinkronisme akan hilang. Daya maksimum ini sering juga disebut sebagai *pull-out power*.

$$P_{max} = \frac{|E||V|}{X} \dots \dots \dots (3)$$

dengan X adalah reaktansi transfer antara E dan V

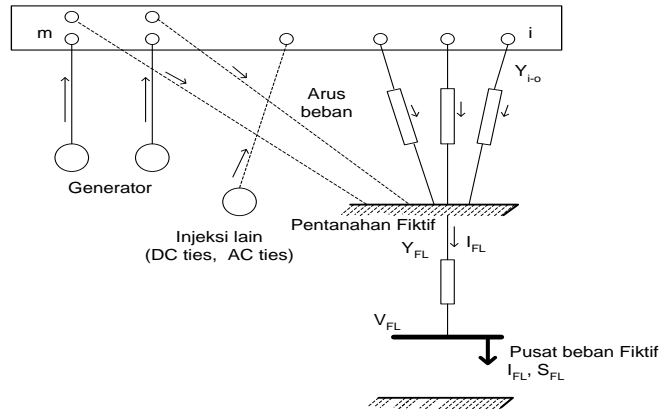
$$E = V + IX \dots \dots \dots (4)$$

dengan E adalah tegangan pada terminal generator, I adalah arus yang dibangkitkan dan V adalah tegangan pada bus generator.

Stabilitas *steady-state* dapat didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap menjaga sinkronisasi diantara mesin dalam sistem dan saluran external apabila terjadi perubahan beban baik secara normal ataupun lambat. Stabilitas *steady state* bergantung kepada batas-batas transmisi dan kapasitas pembangkitan dan efektifitas perangkat kontrol otomatis, terutama untuk regulasi tegangan otomatis (AVR) pada generator. Berdasarkan kenyataan di lapangan, *steady state stability* sangat berhubungan dengan rendahnya ketersediaan daya aktif dan reaktif, level tegangan yang rendah, dan besarnya perubahan tegangan untuk perubahan beban atau daya pembangkit [8, 9].

III. PERSAMAAN REI-DIMO

Metodologi REI-Dimo menonjol karena konsep yang sangat unik dari injeksi linearizing jenis yang sama dengan menggantikan jaring transmisi dengan admintansi konstan, kemudian mengelompokkan jaring transmisi ke dalam single injeksi non linier diterapkan ke bus fiktif yang disebut REI bus. Proses ini dimungkinkan untuk memperkenalkan jaring fiktif, antara bus yang akan dihilangkan dan bus REI fiktif, yang linier, tidak memiliki rugi-rugi dan dapat dihilangkan dengan reduksi Gaussian. Jaringan ini disebut zero power balance network dan mewakili konsep utama dalam REI-Dimo [10].



Gambar 1. Zero Power Balance Network

Paul Dimo memperkenalkan zero power balance network bertujuan untuk menggabungkan sistem beban ke pusat beban tunggal fiktif sambil mempertahankan sifat dan keseimbangan daya dasar. Gambar 1 memperlihatkan sebuah contoh langkah demi langkah numerik yang menggambarkan proses membangun zero power balance network. Sifat radial dari REI memenuhi salah satu aturan penerapan daya reaktif stabilitas *steady state* (stabilitas tegangan). Untuk sistem dari 1, ..., i, ..., G generator, kondensator sinkron dan injektif aktif seperti DC ties atau AC ties, terhubung radial kesalahsatu bus beban fiktif atau aktual melalui admintansi $Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_G$, Dimo mengembangkan rumus sebagai berikut:

$$\frac{d\Delta Q}{dV} = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos \delta_m} - 2 \left(\sum_m Y_m + Y_{load} \right) V \dots \dots \dots (5)$$

dengan:

E_m = Tegangan internal dari mesin (diasumsikan konstan, tidak terpengaruhi oleh perubahan kecil yang dilakukan dalam kondisi stabilitas *steady state*)

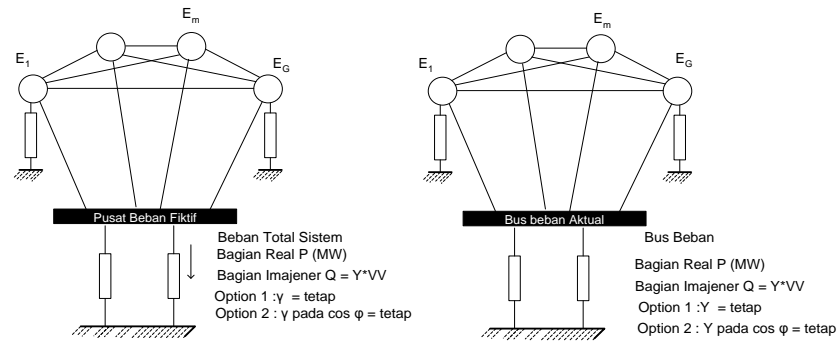
δ_m = sudut internal dari mesin dengan mengacu pada tegangan V pada bus beban (baik fiktif maupun aktual)

Dalam pendekatan ini, bagian yang nyata diwakili oleh nilai MW, sedangkan bagian reaktif bervariasi dengan kuadrat tegangan sesuai dengan

$$Y_{load} = \frac{Q_{load}}{V^2} \dots \dots \dots (6)$$

Dengan nilai Q_{load} yang dihitung ulang di setiap langkah dengan mempertimbangkan struktur beban konstan, $\cos \theta$ tetap, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Perumusan umum kriteria ini telah dikembangkan dan diberikan dalam persamaan 6.

$$\frac{d\Delta Q}{dV} = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos(\delta_m + \gamma_m)} - 2 \left(\sum_m Y_m \cos \gamma_m + Y_{load} + Y^\gamma \right) V \dots \dots \dots (7)$$



Gambar 2. REI untuk pusat beban fiktif (kiri) dan untuk bus beban aktual (kanan)

Eliminasi Gauss-Seidel merupakan algoritma aljabar linear yang dapat diterapkan tanpa memperkenalkan kesalahan karena simpul yang dihilangkan tidak memiliki injeksi (tidak ada arus), algoritma adalah sebagai berikut:

$$y_{ij}^{new} = y_{ij}^{old} - \frac{y_{ik}^{old} y_{jk}^{old}}{y_{kk}^{old}} \dots \dots \dots (8)$$

dengan :

- y_{ij}^{old} = nilai *i-j* dari matrik *Y*
- y_{kk}^{old} = elemen diagonal *k-k* yang dieleminasikan step *k*
- y_{ij}^{new} = nilai baru dari *i-j* setelah simpul *k* dieleminasikan

Prosedur reduksi jaring sistem tenaga yang diterapkan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Menyiapkan data sistem tenaga listrik.
2. Menjalankan load flow untuk mendapatkan tegangan dan sudut tegangan.
3. Menentukan bus beban.
4. Menentukan bus netral fiktif.
5. Menghubungkan bus beban ke bus netral fiktif dengan admintansi *Y* bus konstan.

Persamaan Y_{bus} konstan adalah

$$Y_{bus} = \frac{P + jQ}{V^2} \dots \dots \dots (9)$$

dengan :

- P* = daya aktif
- Q* = daya reaktif
- V* = tegangan bus

6. Menentukan arus *I* dari bus beban ke bus netral fiktif dengan persamaan

$$I = \left(\frac{S_{in}^*}{E_i - jF_i} \right) \dots \dots \dots (10)$$

dengan :

- S_{in}^* = Daya nyata konjuktif dari bus *I* ke bus netral fiktif
- E_i = Tegangan aktif bus *i* ($E_i = V \cos \alpha$)
- F_i = Tegangan reaktif bus *i* ($E_i = V \sin \alpha$)

7. Menentukan bus *load center*.
8. Menentukan arus yang mengalir ke bus *load center* menggunakan hukum Kirchhoff.
9. Menghitung daya yang menuju bus netral fiktif.
10. Menentukan nilai impedansi Z_{lc} dari bus netral fiktif ke bus *load center* menggunakan persamaan.

$$R_{lc} + jX_{lc} = \left(\frac{P + jQ}{I \times I^*} \right) \dots\dots\dots (11)$$

dengan :

Z_{lc} = impedansi *load center*

R_{lc} = resistansi *load center*

X_{lc} = reaktansi *load center*

I_{lc} = arus *load center*

11. Mengubah impedansi Z_{lc} ke dalam bentuk admintansi Y_{lc}
12. Menentukan tegangan di *load center* dengan persamaan

$$V_{lc} = \frac{S_{lc}}{I_{lc}^*} \dots\dots\dots (12)$$

dengan :

V_{lc} = tegangan *load center*

S_{lc} = daya nyata *load center*

I_{lc} = arus *load center*

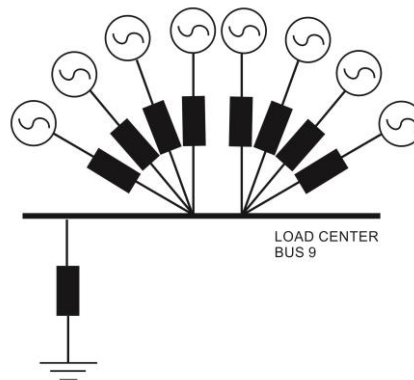
13. Menjalankan load flow untuk menghasilkan admintansi Y bus baru.
14. Mereduksi matrik Y dengan Gaussian
15. Mengubah nilai admintansi Y menjadi impedansi ekivalen Z .
16. Menghitung nilai E menggunakan persamaan (4) dengan X yang diperoleh dari nilai impedansi ekivalen Z .
17. Menghitung daya maksimum yang dapat dibangkitkan generator yang merupakan batas stabilitas *steady state* generator dengan persamaan (3).

IV. SIMULASI PERHITUNGAN P MAKSIMUM DIAPLIKASIKAN PADA SISTEM JAWA BALI

Plant yang digunakan adalah sistem transmisi 500 kV Jawa-Bali yang terdiri dari 1 buah swing bus, 7 buah generator bus dan 17 buah load bus.

Pada sistem 500 kV Jawa-Bali terdapat 8 pembangkit. Pembangkit tersebut terhubung ke bus beban melalui saluran dengan jenis konduktor yang berbeda-beda.

Data saluran baru terdiri dari 33 bus, bus 1 - 8 adalah bus generator, bus 9 dan 10 bus load centre, bus 11 - bus 25 adalah bus beban, bus 26 - bus 33 adalah bus reaktansi generator (X_d'). Selanjutnya data saluran baru direduksi menggunakan eliminasi *gaussian*. Tabel 1 merupakan hasil REI dari 33 bus menjadi 8 bus generator dan 1 bus beban. Hasil reduksi menggunakan REI – Dimo ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Sistem Jawa bali 500 kV Setelah Direduksi

Tabel 1. Hasil Matrik Y Setelah Direduksi

No Bus	Y
1	0.0142 - 0.2466i
8	0.0170 - 0.8155i
10	0.0220 - 0.4285i
11	0.0106 - 0.1487i
15	0.0146 - 0.0712i
17	0.0202 - 0.1171i
22	0.0382 - 0.2189i
23	0.0178 - 0.1056i
9	-2.4599 + 1.0071i

Matriks Y setelah direduksi yang diubah menjadi matriks Z dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Admitansi Y diubah menjadi impedansi Z

No Bus	Z
1	0,0002 + 0,0040i
8	0.0001 + 0.0012i
10	0.0001 + 0.0023i
11	0.0005 + 0.0067i
15	0.0028 + 0.0135i
17	0.0014 + 0.0083i

22	$0.0008 + 0.0044i$
23	$0.0016 + 0.0092i$
9	$-0.0003 - 0.00014i$

Dari hasil simulasi didapatkan batas maksimum pembangkitan dari setiap unit pembangkit. Batas pembangkitan maksimum generator ini menunjukkan bahwa pada saat keadaan generator beroperasi secara normal memiliki batasan pembangkitan kritis pada nilai daya tertentu. Adapun batas kestabilan daya maksimal yang dapat diberikan oleh setiap unit pembangkit dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai batas kestabilan dari setiap unit pembangkit

Generator	P Max	Batas Kestabilan
Suralaya	3803	3690
Muara Tawar	2096	2020
Cirata	948	930
Saguling	700	660
Tanjungjati	2808	2645
Gresik	828	810
Paiton	4710	4600
Grati	850	750

Dari Tabel 1 dapat diketahui bahwa batas kestabilan *steady state* pembangkit Suralaya hanya 97,1% dari kapasitas pembangkitan maksimumnya. Pembangkit Muaratawar 96,4% dari kapasitas pembangkitan maksimumnya. Pembangkit Cirata 98,1% dari kapasitas pembangkitan maksimumnya. Pembangkit Saguling 94,3% dari kapasitas pembangkitan maksimumnya. Pembangkit Tanjung Jati 94,2% dari kapasitas pembangkitan maksimumnya. Pembangkit Gresik 97,8% dari kapasitas pembangkitan maksimumnya. Pembangkit Paiton 97,6% dari kapasitas pembangkitan maksimumnya. Pembangkit Grati 88,2% dari kapasitas pembangkitan maksimumnya.

V. PENUTUP

REI DIMO dapat digunakan untuk mempermudah perhitungan dalam analisis batas kestabilan dengan cara reduksi jaringan transmisi menjadi Jaringan REI (*Radial Equivalent and Independent*) *Equivalent* – Net. Analisa batas kestabilan untuk setiap unit generator dapat dihitung menggunakan nilai impedansi konstan yang diperoleh dari proses reduksi Jaringan REI DIMO.

Dari hasil simulasi pada sistem Jawa Bali 500 kV dapat dilihat bahwa batas kestabilan *steady state* generator memiliki nilai yang lebih rendah dari nilai pembangkitan maksimumnya, sehingga pembangkit tidak dapat dibebani 100%.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jan Veleba. *Possible Steady-State Voltage Stability Analyses Of Electric Power Systems*. Intensive Programme "Renewable Energy Sources". Železná Ruda-Špičák, University of West Bohemia, Czech Republic, May. 2011.
- [2] K.Himaja, Dr T S Surendra, Dr.S. Tara Kalyani. *Steady State Stability Analysis Of A Single Machine Power System Using Matlab*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 1 Issue 7, September. 2012.
- [3] Energi Consulting International, Inc. *Quickstab Technical Background*
- [4] Indar Chaerah Gunadin, Muhammad Abdillah, Adi Soeprijanto, Ontoseno Penangsang. *Determination of Steady State Stability Margin Using Extreme Learning Machin*. WSEAS Transactions On Power Systems. Issue 3, Volume 7. July. 2012.
- [5] Žaneta Eleschová, Anton Beláň. *The Power System Steady-State Stability Analysis*. AT&P journal PLUS2. 2008.
- [6] Jefri Lianda, Ontoseno Penangsang, Adi Soeprijanto. *Stability Limit Analysis Of Steady State And Transient Method Using Radial Equivalent Independent (REI) DIMO*. ITS-Master. Surabaya. 2011.
- [7] Johny Custer, Indar Chaerah Gunadin, Ontoseno Penangsang, Adi Soeprijanto. *Optimisasi Operasi Sistem Tenaga Listrik Dengan Konstrain Kapabilitas Operasi Generator Dan Kestabilan Steady State Global*. 2011.
- [8] Hadi Saadat. *Power System*. McGraw-Hill Inc, USA. 1999.
- [9] Savu C.Savulescu. *Real-Time Stability Assessment in Modern Power System Control Center*, IEEE Press. Wiley. 2009.
- [10] Roberto D, Molina Mylius, Martín Cassano, and Savu C. Savulescu. *Dimo's Approach to Steady-State Stability Assessment: Methodology Overview, Numerical Example, and Algorithm Validation*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2009.