

# Menentukan Batas Kestabilan *Steady State* Sistem Jawa Bali 500 kV menggunakan Pendekatan Model *Single Machine to Infinite Bus*

Rusilawati \*

Akademi Teknik Pembangunan Nasional Banjarbaru, Jl. Taman Gembira Barat No. 14, Banjarbaru 70713, Indonesia

## INFORMASI

### Kata kunci:

Batas kestabilan *steady state* generator  
Radial Basis Function Neural  
Network (RBFNN)  
Sistem *multimachine* Jawa Bali 500  
kV  
Sistem *Single Machine to Infinite Bus*  
(SMIB)

## ABSTRACT

The indicator of the power system operation stability can be seen from the power balance between the load demand and the generator output power. The Single Machine to Infinite Bus (SMIB) system that can actually represent the operation of a single machine system in a multimachine system can be used to analyze each generator unit stability. This paper present a fairly simple method to determine the generator steady state stability limit on the Jawa Bali 500 kV system using an SMIB system approach consider the load configuration changes in the system. The Radial Basis Function Neural Network (RBFNN) is applied to simplify the determination of the generator steady state stability limit that changes every time a load configuration changes. The simulation results carried out on the Java Bali system 500 kV 29 bus 10 generators can be seen that the steady state stability limit of each generator unit tends to decrease with the increasing of loading value and the further of load distance from the generator.

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan pembangkitan generator merupakan salah satu ukuran kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Untuk menganalisis kestabilan setiap unit generator dalam sistem *multimachine* harus dilakukan pada sistem *Single Machine to Infinite Bus* (SMIB) yang secara aktual dapat mewakili keadaan sistem *single machine* tersebut dalam sebuah sistem *multimachine*. Dalam paper ini digunakan suatu metode sederhana untuk menentukan batas kestabilan *steady state* setiap unit generator pada sistem *multimachine* Jawa Bali 500 kV menggunakan pendekatan model sistem SMIB dengan memperhatikan perubahan konfigurasi peletakan beban dalam sistem. Untuk memudahkan penentuan batas kestabilan *steady state* generator yang selalu berubah setiap saat terjadi perubahan peletakan beban, diaplikasikan salah satu model jaring syaraf tiruan yaitu *Radial Basis Function Neural Network* (RBFNN). Dari hasil simulasi yang dilakukan pada sistem Jawa Bali 500 kV 29 bus 10 generator dapat diketahui bahwa batas kestabilan *steady state* setiap unit generator cenderung menurun dengan semakin meningkatnya nilai pembebanan dan semakin jauhnya jarak beban dari pembangkit.

## 1. Pendahuluan

Sistem tenaga listrik yang memiliki banyak mesin biasanya menyalurkan daya ke beban melalui saluran interkoneksi yang bertujuan untuk menjaga kontinuitas dan ketersediaan tenaga listrik terhadap kebutuhan beban yang terus meningkat. Keseimbangan antara pembangkitan tenaga listrik dan permintaan beban adalah hal yang sangat penting bagi keandalan sistem tenaga (Savulescu, 2009).

Untuk menentukan batas kestabilan *steady state* setiap unit generator dapat dilakukan dengan terlebih dahulu mengubah sistem *multimachine* menjadi sistem *Single Machine to Infinite Bus* (SMIB). Dalam penelitian sebelumnya disajikan metode baru yang sederhana untuk membentuk sistem *Modified Single Machine to Infinite Bus* (M-SMIB) yang memiliki sebuah impedansi ekuivalen dan sebuah beban ekuivalen dari sistem *multimachine* (Savulescu, 2009). Sistem *multimachine* dapat diubah menjadi sistem M-SMIB dengan menentukan kontribusi masing-masing generator pada suatu nilai pembebanan (Gubina, Grgić dan Banić, 2000). Sistem M-SMIB yang dibentuk dapat digunakan untuk mewakili operasi sebuah generator dalam sistem *multimachine*. Setelah itu ditentukan batas kestabilan *steady state* generator dengan cara menentukan pembangkitan maksimum setiap generator.

Pembangkitan maksimum generator dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu tegangan sumber, sudut fasa dan nilai impedansi jaringan. Impedansi jaringan dapat ditentukan dengan mengetahui *losses* di jaringan (Baran and Wu, 1989). Penentuan pembangkitan maksimum setiap unit generator dapat dilakukan setelah impedansi jaringan diperoleh dan sistem M-SMIB dibentuk.

\* Corresponding author. Tel.: +62 818-3028-97

E-mail address: habsyi.sila@yahoo.com

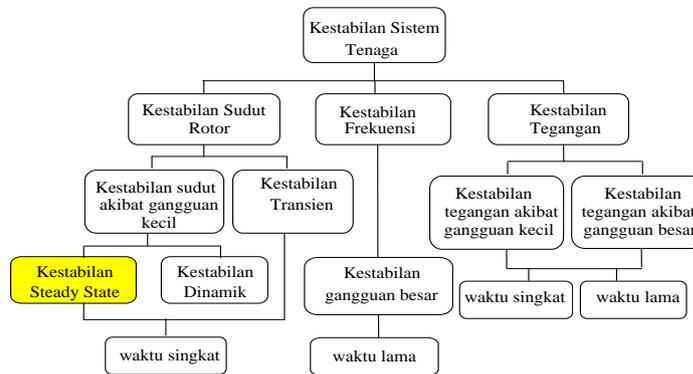
Untuk memudahkan penentuan batas kestabilan *steady state* generator dengan nilai beban dan letak beban yang bervariasi yang akan sangat sulit bila dilakukan dengan metode analitik, diaplikasikan salah satu model jaringan syaraf tiruan yaitu *Radial Basis Function Neural Network (RBFNN)* (Fausett, Laurence, 1994; Wei, Xiaopen, Chao and Desheng, 2011). Untuk data training pada RBFNN digunakan data-data nilai kestabilan *steady state* generator yang sudah dihitung. Selanjutnya dilakukan testing untuk mengetahui keakuratan hasil RBFNN. Dengan demikian, RBFNN dapat digunakan untuk menentukan batas kestabilan *steady state* unit generator sehingga nilainya dapat ditentukan secara langsung setiap saat terjadi perubahan nilai pembebanan dan perubahan letak beban.

Penentuan nilai batas kestabilan *steady state* setiap unit generator pada sistem IEEE 4 bus 2 generator dengan memperhatikan kenaikan nilai pembebanan yang bervariasi telah dilakukan pada penelitian sebelumnya (Rusilawati, Soeprijanto and Wibowo, 2017). Dalam paper ini dilakukan penentuan batas kestabilan *steady state* setiap unit generator pada sistem Jawa Bali 500 kV 29 bus 10 generator dengan memperhatikan konfigurasi perubahan peletakan beban pada sistem.

## 2. Kestabilan Steady State Sistem Tenaga Listrik

### 2.1. Kestabilan Steady State Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan steady state dapat diklasifikasikan ke dalam jenis kestabilan sudut rotor yaitu kestabilan sudut akibat gangguan kecil. Pada Gambar 1 dapat dilihat klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik (Kundur, 1994).



Gambar.1- Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Definisi kestabilan steady state adalah apabila terjadi perubahan beban baik secara normal ataupun lambat, sinkronisasi diantara mesin dalam sistem tenaga listrik dan saluran external tetap terjaga. Batas-batas transmisi dan kapasitas pembangkitan dan efektifitas perangkat kontrol otomatis merupakan hal-hal yang mempengaruhi kestabilan steady state, terutama untuk regulasi tegangan otomatis (AVR) pada generator. Menurut keadaan di lapangan, ketersediaan daya aktif dan daya reaktif yang rendah, rendahnya level tegangan dan perubahan tegangan untuk perubahan beban atau daya pembangkit yang besar sangat berhubungan dengan kestabilan steady state (Chowdhury and Taylor, 2000; Jasron and Lee., 1993). Untuk itu diperlukan satu penelaahan kestabilan agar pembangkit yang terganggu tidak terlepas dari sistem.

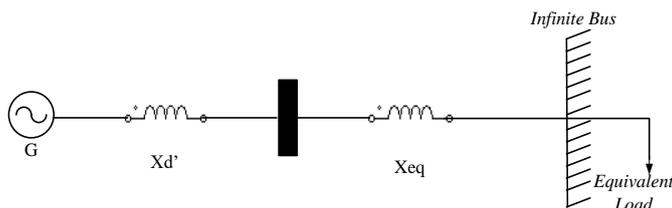
Kestabilan sistem tenaga listrik adalah dapat bekerjanya kembali sistem secara normal setelah mengalami gangguan. Sedangkan kemampuan sistem tenaga listrik untuk menerima gangguan kecil disekitar titik keseimbangan pada kondisi tetap yang bersifat gradual merupakan definisi kestabilan *steady state*. Karakteristik komponen yang terdapat pada sistem tenaga listrik yaitu : pembangkit, beban, jaring transmisi, dan kontrol sistem sangat mempengaruhi kestabilan sistem. Karena hanya menyangkut gangguan kecil disekitar titik keseimbangan, maka dapat digunakan model pembangkit yang sederhana (sumber tegangan konstan). Sistem dikatakan tidak stabil apabila terjadi perubahan pada sistem.

Kestabilan *steady state* adalah kemampuan sistem untuk mengembalikan ke keadaan awal setelah adanya gangguan kecil atau mencapai kondisi yang sangat dekat dengan keadaan awal ketika gangguan masih ada.

Batas kestabilan *steady state* adalah aliran daya maksimum yang masih dimungkinkan melewati titik tertentu tanpa kehilangan kestabilan saat daya dinaikkan secara berangsur-angsur. Sistem tenaga listrik selalu dikenai gangguan kecil, maka keperluan kestabilan *steady state* menjadi esensial bagi sistem agar beroperasi dengan baik (Savulescu, 2009). Dengan demikian, batas kestabilan *steady-state* dapat dinyatakan sebagai kondisi operasi *steady state* sistem tenaga yang masih dalam kondisi stabil, tetapi apabila kondisi operasi mengalami perubahan kecil sistem akan kehilangan kestabilannya (Eleschová and Belán, 2008; Savulescu, 2014). Definisi ini merujuk kepada konsep “kestabilan sistem untuk kondisi perubahan beban secara bertahap dan berubah secara perlahan”. Kesinkronan dan ketidakstabilan sistem dapat hilang disebabkan adanya *Voltage Collapse* yang diakibatkan oleh penguatan osilasi kecil dari semua bentuk ketidakstabilan *steady state* (Shapovalov, Spieker and Rehtanz, 2013; Zhang, Larsson, Turunen and Liisa, 2013).

2.2. Konsep Kestabilan Steady State Single Machine

Gambar 2 menunjukkan sebuah generator sinkron dihubungkan ke bus beban tak berhingga melalui saluran transmisi. Sistem sederhana semacam ini sering dijadikan benchmark analisis kestabilan steady state oleh para ahli. Terlihat pada gambar, generator diseri dengan reaktansi sinkron generator, reaktansi transformator step up, termasuk juga reaktansi sinkron generator. Hanya ada satu beban yang berada di bus tak berhingga. Kesepahaman para ahli menjelaskan bahwa bus tak berhingga adalah bus imajiner yang diadakan untuk menjadi tempat pusat beban. Sedang pengertian pusat beban adalah jumlah total beban yang tersebar dalam system (Soeprijanto, 2017).



Gambar. 2 - Sistem Single Machine To Infinite Bus ( SMIB)

Tegangan di bus tak berhingga  $|V|$  adalah besaran yang tetap dan sering diasumsikan 1 p.u. pada jaring yang sangat besar (*infinite*).  $P_G$  adalah fungsi dari sudut daya  $\delta$  apabila diasumsikan operasi generator dijaga pada eksitasi tetap,  $|E|$  tetap dan  $X_{eq}$  tetap. Persamaan daya riil yang diterima pada bus tak berhingga adalah :

$$P = V I \cos \theta \tag{1}$$

Persamaan (1) di atas dapat ditulis dalam bentuk lain dengan memanfaatkan aturan sinus sebagai berikut :

$$\frac{E}{\sin(90+\theta)} = \frac{IX}{\sin \delta} \tag{2}$$

Daya yang dibangkitkan sama dengan daya yang dikirimkan ke *infinite bus* apabila sistem dianggap tidak memiliki rugi-rugi daya, maka persamaan untuk  $P_G$  adalah (Saadat, 1999; Anderson and Fouad, 1977):

$$P_G = \frac{|E||V|}{X} \sin \delta \tag{3}$$

Daya maksimum yang dikirimkan ke *infinite bus* terjadi pada  $\delta = 90^\circ$ , maka Persamaan (3) menjadi :

$$P_G = P_{\max} \sin \delta \tag{4}$$

Daya maksimum ( $P$ ) yang dapat dikirimkan setiap saat terjadi kenaikan beban secara bertahap merupakan batas kestabilan *steady state* dari sistem. Jika dilakukan pengiriman daya lebih dari batas daya ini, maka sinkronisasi akan hilang. Daya maksimum juga biasa disebut *pull-out power* (Veleba and Nestorovič, 2013) :

$$P_{\max} = \frac{|E||V|}{X} \tag{5}$$

dengan :

$X$  = reaktansi transfer antara E dan V

2.3. Radial Basis Function Neural Network (RBFNN)

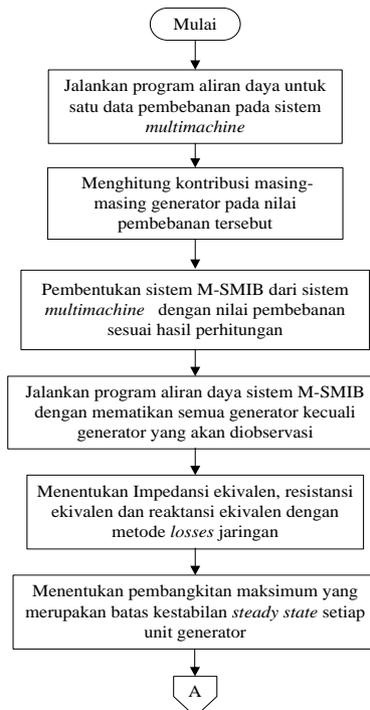
*Radial Basis Function Neural Network* (RBFNN) adalah salah satu model jaringan syaraf tiruan. RBF adalah fungsi yang umum digunakan dalam regresi. Fungsi RBF diterapkan dalam *multi layer perceptron* jaringan saraf yang disebut RBFNN. Model RBFNN terdiri dari tiga lapisan: lapisan *input*, *hidden layer* dan lapisan *output*. Lapisan *input* menerima masukan vektor  $x$ , kemudian dibawa ke *hidden layer* yang akan mengolah data masukan sebagai fungsi aktivasi *nonlinier*. *Output* dari *hidden layer* diproses lebih lanjut pada lapisan *output* sebagai data *linear* (Wei, Xiaopen, Chao and Desheng, 2011). Model RBFNN menggunakan fungsi dasar sebagai fungsi aktivasi untuk setiap *neuron* pada *hidden layer*.

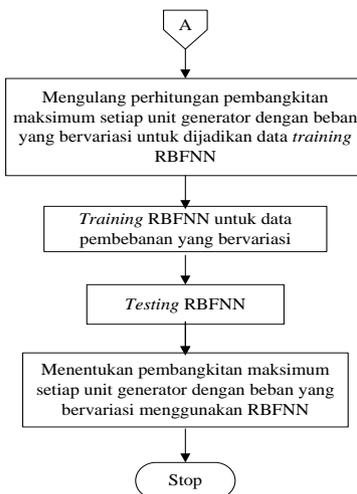
Langkah-langkah yang dilakukan dalam model RBFNN adalah (Bishop, 2006) :

1. *Preprocessing*: representasi data (dalam bentuk vektor), ekstraksi/pemilihan fitur dari data, misal  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$   
Diberikan data pelatihan berupa input data yaitu  $x_i$ ,  $i = 1$  sampai dengan  $N$ , dan target berupa output  $t_i$ ,  $i = 1$  sampai dengan  $N$ .
2. *Learning*: pemilihan model dan penentuan parameter model, misal  $w$ , berdasarkan data pelatihan (*training data*). Ada dua jenis learning, yaitu :
  - *Supervised Learning*. Data pelatihan disertai target, yaitu  $\{ x_i, t_i \}$ ,  $i = 1$  sampai dengan  $N$ . Tujuan pembelajaran adalah membangun model yang dapat menghasilkan output yang benar untuk suatu data input, misal untuk regresi, klasifikasian, regresi ordinal, ranking, dan lain-lain.  
*Supervised learning* terbagi dua, yaitu :
    1. Regresi
      - Nilai output  $t_i$  bernilai kontinu (riil).
      - Bertujuan memprediksi output dari data baru dengan akurat.
    2. Klasifikasi
      - Nilai output  $t_i$  bernilai diskrit (kelas).
      - Bertujuan mengklasifikasi data baru dengan akurat.
  - *Unsupervised Learning*. Data pelatihan tidak disertai target, yaitu  $x_i$ ,  $i = 1$  sampai dengan  $N$ . Tujuan pembelajaran adalah membangun model yang dapat menemukan komponen atau variable atau fitur tersembunyi pada data pelatihan, yang dapat digunakan untuk: pengelompokan (*clustering*), reduksi dimensi (*dimension reduction*), rekomendasi, dan lain-lain.
3. *Testing*: pengujian metode dengan data penguji (*testing data*) yang tidak sama dengan data pelatihan, sehingga didapat nilai estimasi untuk kapabilitas generalisasi dari model.

### 3. Menentukan Batas Kestabilan *Steady State* Sistem *Multimachine* melalui Pendekatan Sistem SMIB

Langkah-langkah yang ditempuh dalam dibuat dalam skema yang dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 3.





Gambar. 3 - Skema Penelitian

Prosedur untuk membentuk sistem SMIB dari sistem multimachine dan menghitung pembangkitan maksimum ( $P_{max}$ ) masing-masing generator dapat dijelaskan sebagai berikut (Rusilawati, Soeprijanto and Wibowo, 2017) :

1. Siapkan satu sistem tenaga listrik berupa sistem *multimachine*. Tentukan satu data nilai pembebanan pada sistem tenaga listrik tersebut. Jalankan program aliran daya pada sistem *multimachine* dengan nilai pembebanan tersebut. Pada langkah ini akan diperoleh hasil berupa data pembangkitan setiap generator dan aliran daya ke setiap bus pada sistem *multimachine* tersebut.  
 Dari data pembangkitan dan data aliran daya ke setiap bus pada langkah 1, dapat ditentukan nilai kontribusi dari masing-masing unit generator ke setiap beban pada nilai pembebanan tersebut .
2. Setelah nilai kontribusi setiap generator ke setiap beban diketahui, tentukan generator mana yang akan diamati (generator yang akan dianalisis batas kestabilan *steady state* dan dihitung impedansi ekuivalennya). Sesuaikan nilai setiap beban pada sistem *multimachine* dengan hasil perhitungan pada langkah 2.
3. Jalankan program aliran daya dengan semua generator dimatikan kecuali generator yang akan diamati dengan nilai pembebanan sesuai hasil perhitungan pada langkah 3. Pada langkah ini akan diperoleh nilai daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) yang dibangkitkan oleh generator yang diamati, rugi daya aktif ( $P_L$ ) dan rugi daya reaktif ( $Q_L$ ) yang mengalir di jaringan.
4. Dari data nilai-nilai yang diperoleh pada langkah 4, dapat dihitung nilai arus I dari generator yang diamati yang nilainya sama dengan nilai arus ekuivalen menggunakan persamaan:

$$I^* = \left( \frac{S_{in}}{\sqrt{3} \times V_i} \right) \tag{6}$$

dengan :

- $I^*$  = I conjugate
- $S_{in}$  =  $P + jQ$  = pembangkitan daya kompleks generator
- P = daya aktif yang dibangkitkan generator
- Q = daya reaktif yang dibangkitkan generator
- $V_i$  = tegangan pada bus i

5. Setelah nilai I diketahui, selanjutnya dapat dihitung nilai resistansi ekuivalen ( $R_{eq}$ ) dan nilai reaktansi ekuivalen ( $X_{eq}$ ) yang terdapat pada jaringan menggunakan konsep *losses* seperti ditunjukkan pada persamaan

$$Z_{eq} = \frac{S_L}{I^2} = \frac{P_L + jQ_L}{I^2} \tag{7}$$

$$S_L = P_L + jQ_L \tag{8}$$

dengan :

- $S_L$  = rugi daya kompleks
- $P_L$  = rugi daya aktif
- $Q_L$  = rugi daya reaktif

$$\text{dan,} \quad R_{eq} = \frac{P_L}{I^2} \quad (9)$$

$$\text{dengan :} \quad X_{eq} = \frac{Q_L}{I^2} \quad (10)$$

$Z_{eq}$	=	impedansi ekivalen
$R_{eq}$	=	resistansi ekivalen
$X_{eq}$	=	reaktansi ekivalen

6. Setelah diperoleh nilai-nilai yang diperlukan dari perhitungan di atas, maka dapat dibentuk sebuah sistem M-SMIB yang dapat mewakili keadaan operasi generator secara aktual dalam sebuah sistem *multimachine*, yaitu sistem dengan sebuah pembangkit yang dihubungkan melalui sebuah impedansi ekivalen ke sebuah beban ekivalen pada *infinite bus*.

Setelah melakukan pembentukan sistem M-SMIB dari sistem *multimachine* dengan prosedur yang telah dijelaskan sebelumnya, maka analisis kestabilan *steady state* sistem *multimachine* melalui pendekatan sistem M-SMIB dapat dilakukan dengan mudah.

Batas kestabilan *steady state* generator adalah batas maksimum pembangkitan generator yang tidak mengakibatkan ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik. Apabila nilai pembangkitan generator tersebut ditambah lagi, maka akan menyebabkan ketidakstabilan pada sistem tenaga sehingga dapat berakibat keseluruhan sistem tenaga mengalami gangguan, bahkan dapat mengakibatkan sistem *blackout* (mati total).

Prosedur untuk menentukan nilai pembangkitan maksimum setiap unit generator yang merupakan batas kestabilan *steady state* generator pada sistem *multimachine* melalui pendekatan sistem SMIB dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Hitung E menggunakan persamaan :

$$E = V + I j X \quad (11)$$

$$X = X_d' + X_{eq} \quad (12)$$

dengan:

$X_d'$	=	reaktansi generator
$X_{eq}$	=	reaktansi ekivalen
E	=	tegangan internal pada terminal generator
I	=	arus yang dibangkitkan
V	=	tegangan pada <i>infinite bus</i>

2. Tentukan pembangkitan maksimum generator dari generator yang diobservasi yang merupakan batas kestabilan *steady state* generator menggunakan persamaan (5).

3. Ulangi prosedur di atas untuk generator yang diobservasi dengan konfigurasi peletakan beban yang bervariasi sampai kita peroleh beberapa data pembebanan yang akan digunakan sebagai nilai *training* pada RBFNN.

### 3.1. Training dan Testing RBFNN untuk Menentukan Batas Kestabilan Steady State Unit Generator

Beberapa data yang diperoleh pada prosedur yang telah dijelaskan di atas digunakan untuk nilai *training* pada RBFNN. *Input* data adalah variasi konfigurasi peletakan beban dan *output* adalah  $P_{max}$ . Nilai pembangkitan maksimum generator yang diperoleh adalah batas kestabilan *steady state* generator. Setelah *training*, *testing* akan dilakukan pada RBFNN untuk mengetahui keakuratan dari hasil yang diperoleh.

Dalam paper ini, penentuan batas kestabilan *steady state* generator dilakukan menggunakan RBFNN dengan menentukan batas pembangkitan maksimum setiap unit generator yang merupakan batas kestabilan *steady state* generator dengan konfigurasi variasi letak beban.

## 4. HASIL SIMULASI

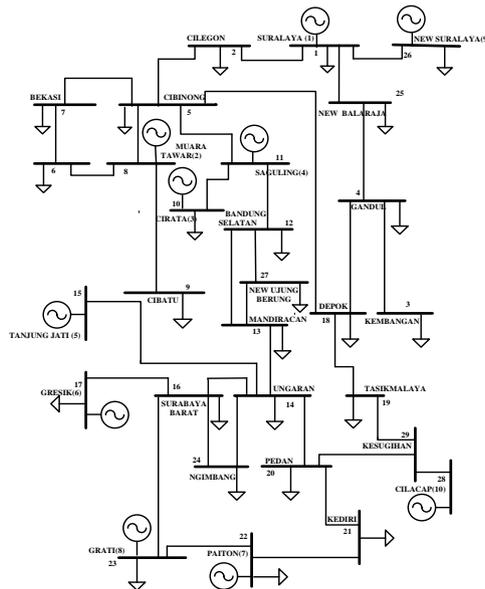
### 4.1. Hasil Simulasi dan Pembahasan

Simulasi dan analisa dilakukan pada sistem transmisi 500 kV Jawa-Bali yang terdiri dari 29 bus dengan 1 *swing bus*, 9 bus generator dan 19 bus beban. Data yang digunakan adalah data dari PT. PLN per 14 Maret 2016. Gambar. 4 menunjukkan SLD sistem Jawa-Bali 500 kV, 29 bus.

Prosedur untuk mengubah sistem *multimachine* menjadi sistem M-SMIB dan penentuan pembangkitan maksimum ( $P_{max}$ ) yang merupakan batas kestabilan *steady state* setiap unit generator sistem Jawa-Bali 500 kV 29 bus 10 generator dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Hasil *running* program aliran daya sistem Jawa Bali 500 kV pada nilai pembebanan 12472 MW dapat dilihat pada Tabel 1.
2. Nilai pembebanan disesuaikan dengan nilai kontribusi masing-masing generator. Nilai pembebanan untuk generator yang diobservasi yaitu generator 7 (pembangkit Paiton) yang terletak pada bus 22 pada nilai pembebanan 12472 MW adalah 4355,729 MW dan 332,762 Mvar.

3. *Running* program aliran daya dengan hanya menghidupkan generator 7 yang akan diobservasi batas kestabilan *steady statenya* dan mematikan generator lain pada nilai pembebanan  $P = 4355,729$  MW dan  $Q = 332,762$  Mvar.



**Gambar. 4 - SLD Sistem Jawa-Bali 500 kV 29 Bus**

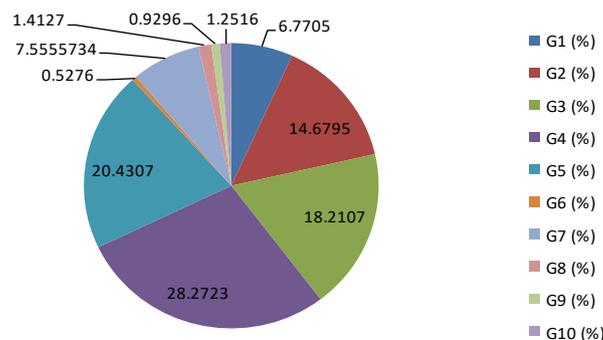
Diperoleh nilai daya aktif ( $P$ ) = 4509,199 MW, daya reaktif ( $Q$ ) = 716,416 Mvar, *losses* daya aktif  $P_L = 153,470$  MW dan *losses* daya reaktif ( $Q_L$ ) = 383,656 Mvar.

4. Diperoleh nilai  $I = 4,451923$  pu.
5. Nilai  $R_{eq}$  dan  $X_{eq}$  berturut-turut = 0,007743 pu dan 0,019357 pu.
6. Hasil perhitungan batas kestabilan *steady state* generator 7 yang dihitung sebagai pembangkitan maksimum pada nilai pembebanan 12472 MW adalah 4872,205 MW.
7. Hal yang sama dapat dilakukan apabila akan menentukan batas kestabilan *steady state* generator-generator yang lain.
8. Ulangi prosedur di atas untuk setiap generator yang diamati dengan konfigurasi perubahan letak beban yang bervariasi sampai diperoleh beberapa data pembebanan yang digunakan sebagai nilai *training* pada RBFNN.
9. Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan pada generator 7 (pembangkit Paiton) sebagai generator yang diobservasi dan ditentukan nilai kestabilan *steady statenya* menggunakan RBFNN dengan konfigurasi perubahan letak beban yang bervariasi. Dilakukan penentuan nilai pembangkitan maksimum generator Paiton sebanyak 30 kali dengan data perubahan konfigurasi letak beban yang berbeda-beda sehingga diperoleh 30 data yang berbeda.
10. Data yang diperoleh pada langkah 9, sebanyak 25 data digunakan untuk data *training* RBFNN dan 5 data digunakan sebagai data *testing* RBFNN.

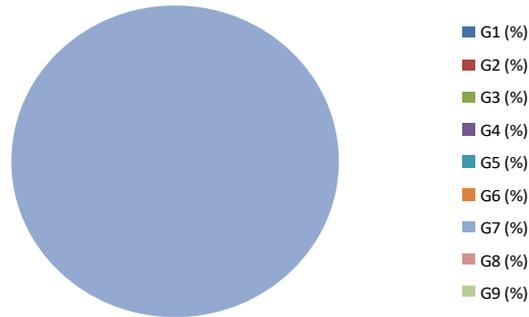
Tabel 1 - Hasil *running* program aliran daya sistem Jawa Bali 500 kV pada nilai pembebanan 12472 MW

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method							
Maximum Power Mismatch = 1.08281e-006							
No. of Iterations = 10							
Bus No	Voltage Magnitude	Angle Degree	Load		Generation		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1,020	0,000	75,000	73,000	2985,901	1244,066	0,000
2	1,011	-1,153	332,000	141,000	0,000	0,000	0,000
3	0,958	-10,770	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,958	-10,770	863,000	-82,000	0,000	0,000	0,000
5	0,956	-11,298	354,000	182,000	0,000	0,000	0,000
6	0,949	-14,520	529,000	111,000	0,000	0,000	0,000
7	0,949	-14,521	1196,000	9,000	0,000	0,000	0,000
8	0,960	-12,760	0,000	0,000	439,000	610,056	0,000
9	0,939	-13,622	1041,000	449,000	0,000	0,000	0,000
10	0,950	-11,103	620,000	207,000	346,000	475,806	0,000
11	0,950	-9,220	0,000	0,000	692,000	769,475	0,000
12	0,908	-6,940	505,000	242,000	0,000	0,000	0,000
13	0,869	-0,589	126,000	41,000	0,000	0,000	0,000
14	0,833	30,475	638,000	427,000	0,000	0,000	0,000
15	0,950	51,502	180,000	98,000	2137,000	970,564	0,000
16	0,922	38,984	1151,000	263,000	0,000	0,000	0,000
17	0,950	-39,024	287,000	80,000	412,000	903,191	0,000
18	0,957	-10,844	533,000	-29,000	0,000	0,000	0,000
19	0,908	5,608	295,000	110,000	0,000	0,000	0,000
20	0,823	26,231	697,000	221,000	0,000	0,000	0,000
21	0,798	41,152	623,000	175,000	0,000	0,000	0,000
22	0,950	65,167	894,000	212,000	4544,000	1075,296	0,000
23	0,950	51,057	562,000	261,000	458,000	1063,925	0,000
24	0,897	36,780	198,000	78,000	0,000	0,000	0,000
25	0,972	-7,081	704,000	203,000	0,000	0,000	0,000
26	1,020	0,032	45,000	-26,000	455,000	-68,559	0,000
27	0,896	-5,293	24,000	-4,000	0,000	0,000	0,000
28	0,950	18,032	0,000	0,000	503,000	743,000	0,000
29	0,924	17,149	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Total</b>			<b>12472,000</b>	<b>3282,000</b>	<b>12971,901</b>	<b>7786,818</b>	<b>0,000</b>

Pada Gambar.5 dan Gambar. 6 berturut-turut dapat dilihat kontribusi setiap unit generator pada beban yang terletak di bus 9 dan beban yang terletak di bus 21.



Gambar.5 - Kontribusi setiap unit generator pada beban yang terletak di bus 9

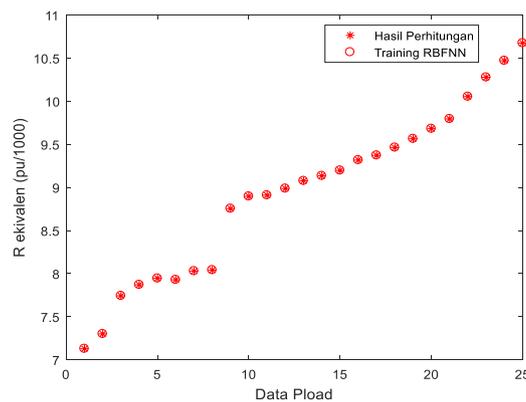


Gambar. 6 - Kontribusi setiap unit generator pada beban yang terletak di bus 21

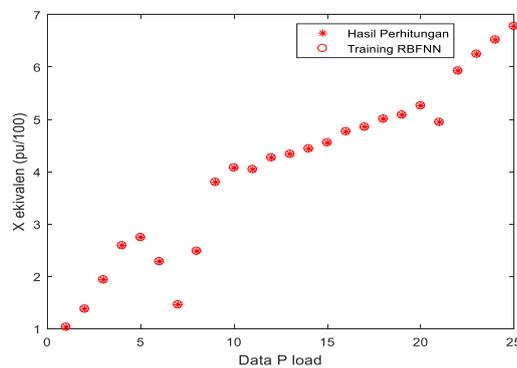
4.2. Training dan Testing RBFNN untuk Menentukan Batas Kestabilan Steady State setiap Unit Generator pada Sistem Jawa Bali 29 Bus

Beberapa data yang diperoleh pada prosedur yang telah dijelaskan, yaitu sebanyak 25 data digunakan untuk data *training* pada RBFNN. Setelah *training*, *testing* akan dilakukan pada RBFNN untuk mengetahui keakuratan dari hasil yang diperoleh pada sistem Jawa Bali 500 kV 29 Bus. Sebanyak 5 data digunakan sebagai data *testing* RBFNN.

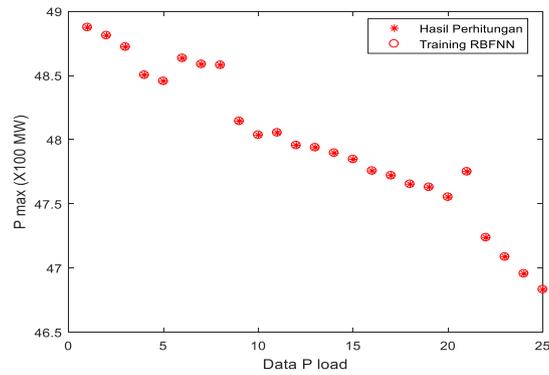
Perbandingan nilai  $R_{eq}$ ,  $X_{eq}$  dan  $P_{max}$  hasil perhitungan dengan hasil *training* RBFNN untuk generator 7 yaitu generator Paiton yang terletak di bus 22 pada sistem Jawa Bali 500 kV 29 bus pada nilai pembebanan sistem *multimachine* 12472 MW dapat dilihat pada Gambar. 7, Gambar .8. dan Gambar.9.



Gambar.7 - Perbandingan nilai  $R_{eq}$  hasil perhitungan dan *training* RBFNN untuk generator Paiton



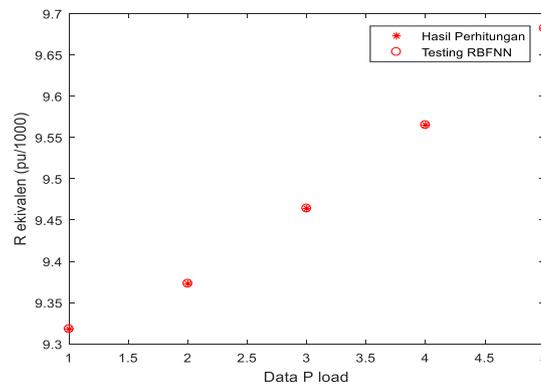
Gambar.8 - Perbandingan nilai  $X_{eq}$  hasil perhitungan dan *training* RBFNN untuk generator Paiton



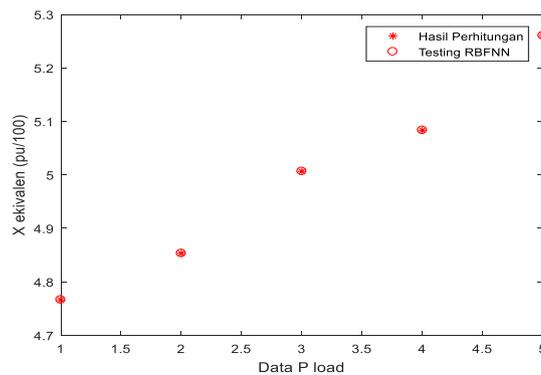
**Gambar.9 - Perbandingan nilai  $P_{\max}$  hasil perhitungan dan *training* RBFNN untuk generator Paiton**

Dapat dilihat pada Gambar.7, Gambar.8 dan Gambar.9 bahwa perbandingan nilai hasil *training* RBFNN dan hasil perhitungan pada generator Paiton menunjukkan hasil yang bagus dan mempunyai nilai *error* yang kecil.

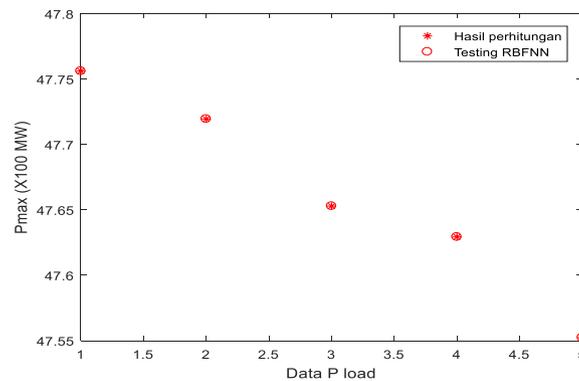
Selanjutnya dapat dilakukan *testing* RBFNN untuk menentukan nilai  $R_{\text{eq}}$ ,  $X_{\text{eq}}$  dan  $P_{\max}$  dari masing-masing generator. Pada Gambar.10, Gambar.11 dan Gambar.12 berturut-turut dapat dilihat perbandingan nilai  $R_{\text{eq}}$ ,  $X_{\text{eq}}$  dan  $P_{\max}$  hasil perhitungan dan *testing* RBFNN untuk generator Paiton.



**Gambar.10 - Perbandingan nilai  $R_{\text{eq}}$  hasil perhitungan dan *testing* RBFNN untuk generator Paiton**



**Gambar.11 - Perbandingan nilai  $X_{\text{eq}}$  hasil perhitungan dan *testing* RBFNN untuk generator Paiton**



**Gambar.12 - Perbandingan nilai  $P_{max}$  hasil perhitungan dan testing RBFNN untuk generator Paiton**

Dapat dilihat pada Gambar.10, Gambar.11 dan Gambar.12 bahwa *testing* RBFNN untuk nilai  $R_{eq}$ ,  $X_{eq}$  dan  $P_{max}$  untuk generator Paiton memberikan hasil yang bagus. Dengan demikian RBFNN dapat digunakan untuk menentukan nilai  $R_{eq}$ ,  $X_{eq}$  dan  $P_{max}$  yang merupakan batas kestabilan *steady state* setiap unit generator yang lain pada sistem Jawa Bali 29 bus, 10 generator secara langsung setiap saat terjadi perubahan letak pembebanan pada sistem tenaga listrik. Dari hasil simulasi yang dilakukan pada sistem pembangkitan Jawa Bali 500 kV, 29 Bus, 10 generator, yang dilakukan pada generator pada bus 22 (Generator Paiton), nilai batas kestabilan *steady state* generator-generator tersebut sudah mencapai nilai maksimumnya pada kapasitas 94% - 99% dari nilai maksimum yang tertera pada *nameplate* masing-masing generator. Ini berarti bahwa setiap generator tidak dapat dibebani sampai 100% kapasitas maksimumnya.

Dalam operasi riil, kapasitas pembangkitan maksimum generator yaitu nilai batas kestabilan *steady state* setiap generator dapat lebih rendah lagi dari nilai yang diperoleh dalam simulasi. Hal ini mungkin disebabkan karena dalam operasi riil, permintaan dan pembagian beban serta jarak pusat beban ke pembangkit lebih bervariasi sehingga nilai *losses* jaringan dan nilai reaktansi ekivalen dapat menjadi lebih tinggi sehingga menurunkan nilai batas kestabilan *steady state* generator.

Pembebanan setiap generator harus disesuaikan dengan batas nilai kestabilan *steady state* masing-masing generator, agar tidak terjadi kelebihan beban pada generator yang dapat menyebabkan hilangnya kestabilan generator tersebut dan pada akhirnya dapat mengakibatkan gangguan pada seluruh sistem.

## 5. KESIMPULAN

Pembentukan sistem *Modified Single Machine to Infinite Bus* (M-SMIB) yang secara aktual dapat mewakili keadaan operasi generator dalam sebuah sistem *multimachine* dengan metode sederhana telah dijelaskan dalam penelitian ini. Setelah terbentuk sistem M-SMIB, nilai pembangkitan maksimum dengan mudah dapat ditentukan yang merupakan batas kestabilan *steady state* dari generator tersebut.

Untuk memudahkan penentuan batas kestabilan *steady state* generator yang berubah setiap saat terjadi perubahan nilai beban dan letak beban yang akan sangat sulit bila dilakukan dengan metode analitik, diaplikasikan salah satu model jaringan syaraf tiruan yaitu *Radial Basis Function Neural Network* (RBFNN). Dengan aplikasi RBFNN pada penelitian ini yang terbukti memberikan hasil yang bagus, dapat ditentukan batas kestabilan *steady state* dari setiap generator dengan variasi nilai beban dan letak beban. Dengan demikian, penentuan batas kestabilan *steady state* setiap unit generator dapat ditentukan secara langsung dan tidak perlu dihitung setiap saat terjadi perubahan pembebanan.

Pembebanan setiap generator harus disesuaikan dengan batas nilai kestabilan *steady state* masing-masing generator, agar tidak terjadi kelebihan beban pada generator yang dapat menyebabkan hilangnya kestabilan generator tersebut dan pada akhirnya dapat mengakibatkan gangguan pada seluruh sistem.

## DAFTAR PUSTAKA

Adi Soeprijanto, "Analisa Kestabilan Multi Generator dengan Konsep Mesin Tunggal", Edisi 1, Cetakan 1, Deepublish, Yogyakarta, September 2017.

A. Lendasse, J.Lee, E.de Bodt, V. Wertz, M. Verleysen, "Approximation by Radial Basis Function Network – Application to Option Pricing," 2003.

Anton Shapovalov, Christopher Spieker, Christian Rehtanz, "Network Reduction Algorithm for Smart Grid Applications", Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2013, Hobart, T AS, Australia, 29 September - 3 October, 2013.

Savu C. Savulescu, "Overview of Key Stability Concepts Applied for Real-Time Operations", IEEE Power Systems Conference & Exposition 2009 (IEEE PSCE'09), Seattle, WA, March 15-18 2009.

- 
- Badrul H. Chowdhury and Carson W. Taylor, "Voltage Stability Analysis: V-Q Power Flow Simulation Versus Dynamic Simulation," IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 4, November, 2000.
- Bishop, C. H., "Pattern Recognition and Machine Learning", Springer, 2006 (Bab 6.3).
- Ferdinand Gubina, David Grgi'c dan Ivo Bani'c, "A Method for Determining the Generators' Share in a Consumer Load", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 4, November 2000.
- G.B. Jasrnon, PhD and L.H.C.C. Lee, BEng, "New contingency ranking technique incorporating a voltage stability criterion," IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 2, March, 1993.
- Hadi Saadat, Power System Analysis, McGraw-Hill Inc, USA, 1999.
- Jan Veleba and Tomáš Nestorovič, "On Steady-State Voltage Stability Analysis Performance in MATLAB Environment," Proceedings of the 2013 International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Development, 2013.
- Mesut E. Baran and Felix F. Wu, "Network Reconfiguration In Distribution Systems For Loss Reduction And Load Balancing," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April, 1989.
- P. M. Anderson dan A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", Vol.1, The Iowa state University Press, Ames, Iowa, USA, 1977.
- Prabha Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Inc, USA, 1994.
- Rusilawati, Adi Soeprijanto and Rony Seto Wibowo, "Reactualization of a Modified Single Machine to Infinite Bus Model to Multimachine System Steady State Stability Analysis Studies Using Losses Network Concepts and Radial Basis Function Neural Network (RBFNN)", International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.), Vol. 10, N. 2, April 2017.
- Savu C.Savulescu, "Real-Time Stability Assessment in Modern Power System Control Center", IEEE Press, Wiley, 2009.
- S. C. Savulescu (ed.), "Real-Time Stability in Power Systems, (Power Electronics and Power Systems)", Springer International Publishing – Switzerland, 2014).
- Wei, Shen., Xiaopen, Guo., Chao, Wu., Desheng, Wu, Forecasting Stock Indices using Radial Basis Function Neural Networks Optimized by Artificial Fish Swarm Algorithm. *Knowledge Based System*. **24**, 378-385, 2011.
- Yan Zhang, Mats Larsson, Jukka Turunen, Haarla Liisa, "Network Reduction for Power Flow Based Applications", Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2013, Hobart, T AS, Australia, 29 September - 3 October 2013.
- Žaneta Eleschová and Anton Belán, "The power system steady-state stability analysis," AT&P journal PLUS2, 2008.