

Simulasi Keamanan Kerja Generator PLTP Lahendong 4

Rifkania Kambey, Maickel Tuegeh, A.F.Nelwan, Marthinus Pakiding
Jurusan Teknik Elektro-FT, UNSRAT, Manado-95115, Email: rifkania@gmail.com

Abstrak-Generator sinkron merupakan sumber utama pembangkit tenaga listrik yang bekerja dengan mengubah energi mekanis menjadi energi listrik tiga fasa. Dalam pengoperasian generator, besar daya yang disuplai harus selalu berada dibawah kemampuan maksimum generator. Apabila kapasitas beban melebihi kemampuan daya generator maka akan mengakibatkan pemanasan berlebihan pada belitan-belitan stator maupun rotor generator yang dapat mengakibatkan kerusakan pada generator.

Oleh karena itu sangat perlu diperhatikan keamanan kerja generator dalam batas operasi yang sesuai dengan kemampuan generator. Dimana batas kemampuan kerja generator dinyatakan melalui kurva kapabilitas. Dalam tugas akhir ini disimulasikan kurva kapabilitas generator berdasarkan kurva kapabilitas generator PLTP Lahendong 4, menggunakan jaringan saraf tiruan metode *constructive backpropagation*. Untuk pembentukan kurva kapabilitas dengan jaringan saraf tiruan digunakan data kurva *PQ* sehingga didapatkan sudut θ sebagai masukan dan daya kompleks kurva (S) sebagai target pelatihan.

Kurva kapabilitas hasil jaringan saraf tiruan yang disimulasikan identik dengan bentuk kurva kapabilitas asli generator PLTP Lahendong 4. Juga dihasilkan letak titik kerja yang sama antara kedua kurva kapabilitas. Kurva kapabilitas yang disimulasikan dapat digunakan untuk memantau kerja generator saat menyuplai beban dengan mengacu pada letak titik kerja generator dalam batasan kurva kapabilitas.

Kata kunci: Generator sinkron, Kurva kapabilitas, Jaringan saraf tiruan, Titik kerja generator.

I. PENDAHULUAN

Keandalan sistem tenaga listrik dapat dilihat dari kontinuitas pelayanan daya listrik ke konsumen. Gangguan yang terjadi pada sistem pembangkit merupakan salah satu faktor yang menentukan tingkat keandalan dari sistem kelistrikan di wilayah Sulawesi Utara, khususnya pada sistem kelistrikan Minahasa.

Generator sinkron merupakan sumber utama pembangkit tenaga listrik. Sistem pengoperasian generator sinkron dalam suatu sistem kelistrikan dilakukan secara kontinu dengan beban tertentu, sehingga yang diperlukan adalah kemampuan generator tersebut dalam suplai daya. Besar daya yang disuplai harus selalu berada dibawah kemampuan maksimum generator. Apabila pengoperasian berada diatas kemampuan generator atau kapasitas beban melebihi kemampuan daya generator maka akan mengakibatkan pemanasan berlebihan pada generator tersebut. Pemanasan yang berlebihan ini dapat mengakibatkan kerusakan isolasi pada belitan-belitan rotor dan stator generator. Oleh karena itu sangat perlu diperhatikan keamanan kerja generator dalam batasan operasi yang sesuai dengan kemampuan suatu generator.

Batas kemampuan kerja generator dinyatakan melalui kurva kapabilitas. Kurva kapabilitas digunakan dalam monitoring pada sisi pembangkitan untuk memantau

perubahan daya akibat perubahan daya beban. Kurva kapabilitas generator akan memberi informasi tentang batasan kemampuan dari operasi generator dalam mensuplai daya. Batasan kemampuan operasi generator tersebut meliputi: batas daya aktif dan reaktif, batas arus rotor, batas arus stator, batas pemanasan ujung inti stator dan batas kestabilan *steady state*. Suatu program untuk menampilkan secara visual kerja generator dalam kurva kapabilitas dikembangkan dengan metode jaringan saraf tiruan (*artificial neural network*). Metode ini meniru cara kerja otak dalam berpikir untuk memecahkan beragam permasalahan.

Setiap pembangkit memiliki karakteristik kurva kapabilitas berbeda-beda, sesuai dengan kemampuan daya generator. Begitu pula untuk sistem kelistrikan Minahasa terdiri atas beberapa jenis pusat listrik, dengan sejumlah unit. Dalam hal ini akan disimulasikan batas keamanan kerja dari salah satu unit pembangkit sistem kelistrikan Minahasa yaitu PLTP Lahendong 4.

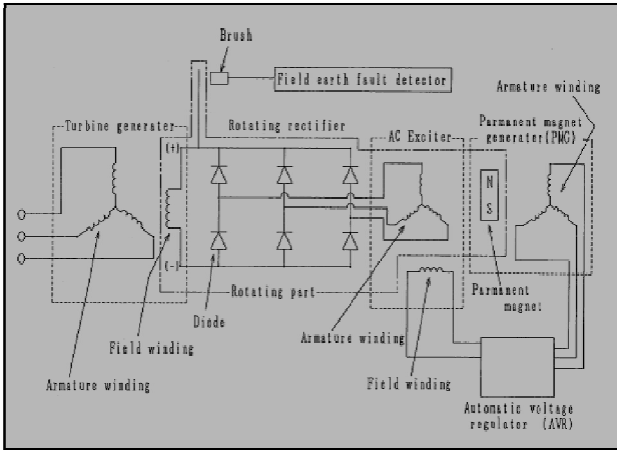
II. LANDASAN TEORI

A. Generator Sinkron

Generator sinkron (alternator) merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*). Sedangkan energi listrik dihasilkan dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya. Mesin penggerak yang banyak digunakan yaitu: mesin diesel, turbin uap, turbin air dan turbin gas.

Komponen generator sinkron: stator, rotor, dan celah udara. Stator merupakan bagian yang tersusun dari pelat-pelat dan mempunyai alur-alur sebagai tempat meletakkan belitan stator atau belitan jangkar. Sedangkan pada rotor terdapat kutub-kutub magnet dengan lilitan (belitan medan) yang dialiri arus searah dari suatu penguat (*exciter*). Belitan medan membawa arus searah dan menghasilkan medan magnet yang menginduksi tegangan bolak-balik pada belitan jangkar. Celah udara adalah ruang antara stator dan rotor. Dimana belitan jangkar biasanya dioperasikan pada tegangan yang lebih besar dibandingkan pada belitan medan, sehingga dibutuhkan ruang yang lebih yakni celah udara antara kedua belitan untuk isolasi.

Rotor pada generator sinkron pada dasarnya merupakan elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa kutub menonjol (*salient pole*) dan kutub tidak menonjol (*non-salient pole*) / kutub silinder. Pemilihan antara kedua jenis rotor bergantung pada kecepatan penggerak mula generator.



Gambar 1. Diagram Sistem Eksitasi Tanpa Sikat

Generator sinkron yang berkapasitas besar biasanya menggunakan sistem eksitasi / penguat tanpa sikat yang dilengkapi dengan generator magnet permanen. Hal ini dimaksudkan agar sistem eksitasi dari generator sama sekali tidak tergantung pada sumber daya listrik dari luar mesin tersebut. Sistem eksitasi tanpa sikat ditunjukkan pada gambar 1.

Prinsip kerja dari sistem eksitasi tanpa sikat adalah sebagai berikut. Eksitasi pada generator dengan penguat tanpa sikat berasal dari PMG. Dimana PMG menyuplai daya ke stator penguat AC. Kemudian penguat AC menghasilkan tegangan AC yang akan disearahkan oleh penyearah yang berputar (*rotating rectifier*) pada poros penguat AC tersebut. Selanjutnya penyearah menyuplai arus searah ke generator sebagai eksitasi. Daya dari generator dikontrol dengan AVR, yakni daya yang disuplai pada stator penguat AC dan sampai pada belitan rotor generator untuk menjaga tegangan keluaran generator pada batas yang ditetapkan.

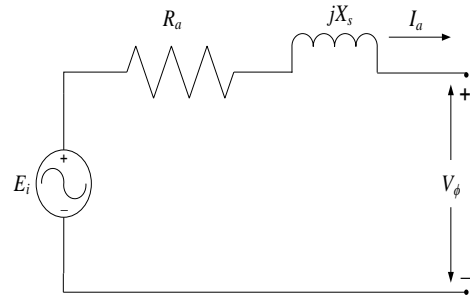
Rangkaian ekivalen generator sinkron 1 fasa jenis rotor silinder pada kondisi tunak (*steady state*) ditunjukkan pada gambar 2. Dengan asumsi tegangan terminal generator konstan, dan penggerak mula terkopel langsung terhadap poros generator dengan kecepatan konstan. Tegangan internal yang dibangkitkan generator berdasarkan gambar 2 dinyatakan oleh :

$$E_i = V_\phi + (R_a + jX_s)I_a \tag{1}$$

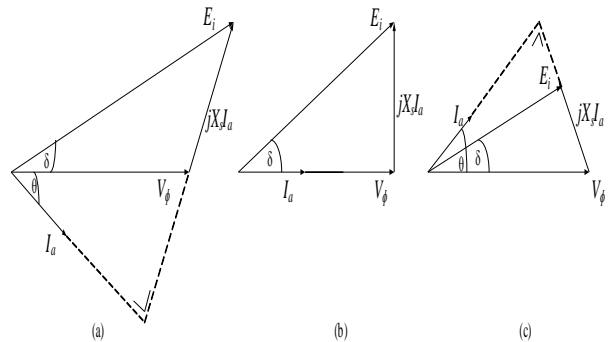
Apabila tahanan stator (R_a) diabaikan, maka tegangan internal generator (E_i) menjadi:

$$E_i = V_\phi + jX_s I_a \tag{2}$$

Diagram fasor generator sinkron berdasarkan persamaan (2), ditunjukkan pada gambar 3 dengan terminal fasa-netral (V_ϕ) sebagai referensi. Jika arus stator (I_a) tertinggal (*lagging*) terhadap V_ϕ maka generator bekerja pada kondisi eksitasi lebih, jika I_a berimpit terhadap V_ϕ maka generator bekerja dengan $pf = 1$, dan I_a mendahului (*leading*) terhadap V_ϕ maka generator bekerja pada kondisi eksitasi lemah. Ditinjau berdasarkan diagram fasor generator gambar 3 kondisi operasi generator terdiri atas kondisi eksitasi lebih, eksitasi normal dan eksitasi lemah.



Gambar 2. Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron 1 Fasa



Gambar 3. Diagram Fasor Generator Sinkron

(a) I_a tertinggal terhadap V_ϕ , (b) I_a berimpit terhadap V_ϕ , (c) I_a mendahului terhadap V_ϕ

1. Generator dalam kondisi eksitasi lebih jika:

$$|E_i| \cos \delta > |V_\phi| \tag{3}$$

Dalam kondisi eksitasi lebih kerja generator dipengaruhi oleh arus medan (I_f). Pada kondisi ini generator mengirim daya reaktif (Q) ke sistem dengan sudut faktor daya positif ($pf = \text{positif}$). Dipandang dari sistem, generator bersifat seperti kapasitor. Kondisi eksitasi lebih dapat terjadi pada saat *start-up* ataupun pada saat putaran rendah. Eksitasi lebih memberikan dampak pemanasan yang bila berlebihan dapat mengakibatkan kerusakan isolasi pada belitan stator.

2. Generator dalam kondisi eksitasi normal jika:

$$|E_i| \cos \delta = |V_\phi| \tag{4}$$

Pada kondisi ini, generator mengirim daya aktif (P) ke sistem dengan faktor daya satu ($pf = 1$) dan daya reaktif generator ke sistem nol ($Q = 0$). Kondisi kerja generator yang normal ini dibatasi oleh arus stator (I_a).

3. Generator dalam kondisi eksitasi lemah jika:

$$|E_i| \cos \delta < |V_\phi| \tag{5}$$

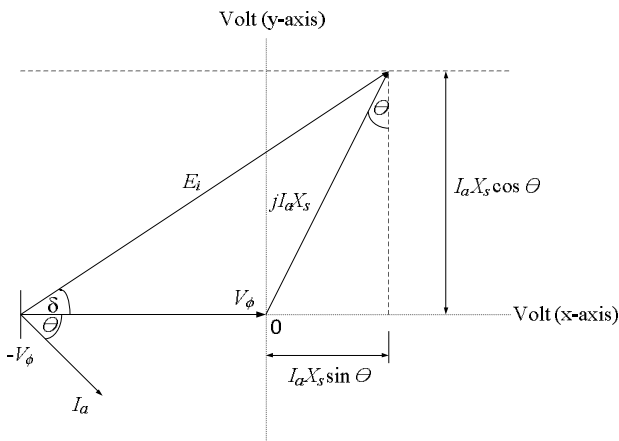
Dalam kondisi eksitasi lemah kerja generator juga dipengaruhi oleh arus medan (I_f). Pada kondisi ini arus eksitasi diperlemah sehingga generator menyerap daya reaktif (Q) dari sistem dengan sudut faktor daya negatif ($pf = \text{negatif}$). Dipandang dari sistem, generator bersifat seperti induktor.

Batas titik operasi generator dinyatakan dan divisualisasikan dalam bentuk kurva kapabilitas generator. Kurva kapabilitas generator memuat karakteristik dan kemampuan operasi kerja generator yang meliputi daya aktif (MW), daya reaktif (MVA) dan daya rating (MVA). Dimana kurva kapabilitas digambarkan dalam sumbu PQ.

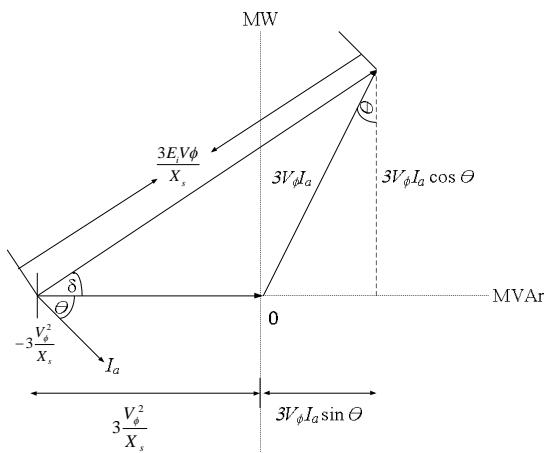
Kurva kapabilitas generator dibentuk berdasarkan diagram fasor seperti pada gambar 3. Dengan asumsi tegangan terminal (V_ϕ) konstan dan resistansi stator diabaikan. Tegangan terminal generator sebagai referensi fasor.

Kurva kapabilitas generator dibentuk berdasarkan langkah-langkah berikut.

1. Diagram fasor dari gambar 3(a) diplot kedalam sumbu x dan y , dimana sumbu x dan y menyatakan sumbu tegangan/Volt. Hasil plot ditunjukkan pada gambar 4.
2. Sumbu x dan y dari diagram fasor gambar 4 diubah kedalam bentuk daya aktif dan reaktif yaitu sumbu x menjadi daya reaktif (MVA), sumbu y menjadi daya aktif (MW), hasilnya ditunjukkan pada gambar 5. Dimana untuk mengubah skala dari unit tegangan ke unit daya dikalikan dengan $3V_\phi/X_s$.

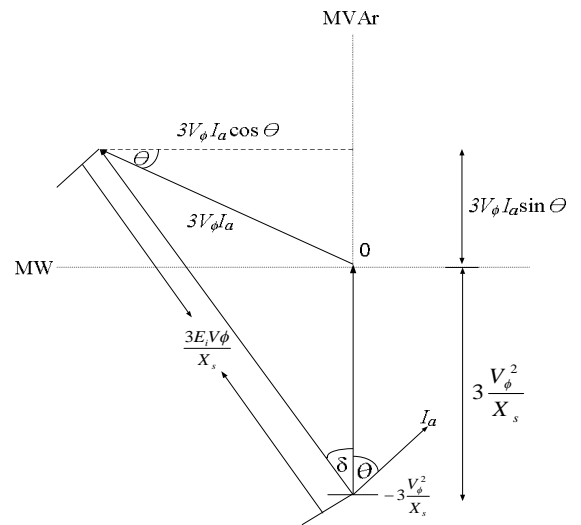


Gambar 4. Plot Diagram Fasor Dalam Sumbu Tegangan

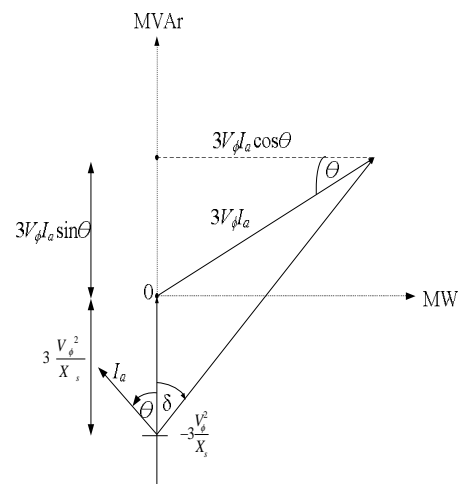


Gambar 5. Plot Diagram Fasor Dalam Sumbu Daya

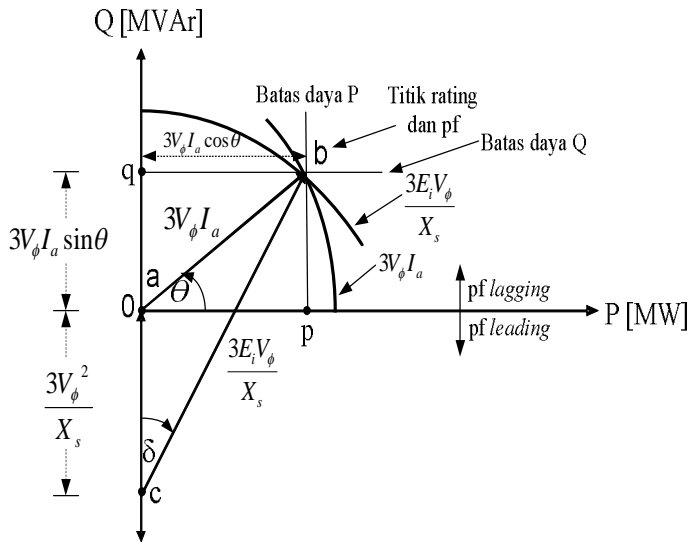
3. Secara teori, kurva kapabilitas generator terbentuk dengan daya aktif (MW) pada sumbu x dan daya reaktif (MVA) berada pada sumbu y . Oleh karena itu, diagram fasor dari gambar 5 diputar 90° terhadap sumbu O berlawanan arah jarum jam, menghasilkan diagram fasor dengan daya aktif (MW) pada sumbu x dan daya reaktif (MVA) pada sumbu y yang ditunjukkan pada gambar 6.
4. Berdasarkan diagram daya dari mesin sinkron, daerah kerja generator berada pada sumbu x positif sedangkan kerja motor berada pada sumbu x negatif. Oleh karena itu diagram fasor dari gambar 6 dicerminkan terhadap sumbu y , menghasilkan diagram fasor gambar 7 yang menyatakan daerah kerja generator pada sumbu x positif.



Gambar 6. Diagram Fasor Gambar 5 Setelah Diputar 90° Berlawanan Arah Jarum Jam



Gambar 7. Diagram Fasor Gambar 6 Setelah Dicerminkan Terhadap Sumbu y



Gambar 8. Kurva Kapabilitas Akhir Dibentuk dari Diagram Fasor Generator

Keterangan gambar 8:

- $3V_\phi I_a \cos \theta$: Batas daya aktif [MW]
 $3V_\phi I_a \sin \theta$: Batas daya reaktif [MVar]
 $3V_\phi I_a$: Batas arus stator [A]
 $\frac{3E_i V_\phi}{X_s}$: Batas arus rotor [A]
 Titik b : Rating generator [MVA]

Batas kemampuan operasi generator dalam mengirim daya ke sistem digambarkan seperti pada gambar 8 dan gambar 9 yang menunjukkan batas-batas berikut:

1. Batas Daya Generator

Daya aktif (P) generator dihasilkan dengan mengatur kecepatan penggerak mula generator (*prime mover*). Batas daya aktif generator dinyatakan oleh:

$$P = 3V_\phi I_a \cos \theta \quad (6)$$

Secara visual batas daya aktif generator ditunjukkan pada gambar 8:

- Dengan menarik garis vertikal dari titik b ke p yang sejajar terhadap sumbu Q .
- Jarak titik operasi sumbu daya aktif P (MW) dinyatakan oleh $3V_\phi I_a \cos \theta$.

Daya reaktif generator dihasilkan dengan mengatur sistem eksitasi generator, yakni arus penguat medan (I_f). Batas daya reaktif (Q) generator dinyatakan oleh :

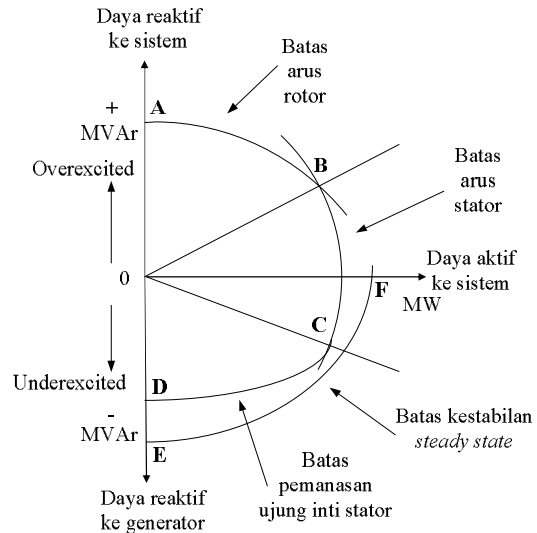
$$Q = 3V_\phi I_a \sin \theta \quad (7)$$

Secara visual batas daya reaktif generator ditunjukkan pada gambar 8:

- Dengan menarik garis horizontal dari titik b ke q yang sejajar terhadap sumbu P .
- Jarak titik operasi sumbu daya reaktif Q (MVar) dinyatakan oleh $3V_\phi I_a \sin \theta$.

Batas daya kompleks atau daya rating generator dinyatakan oleh :

$$S = 3V_\phi I_a \quad (8)$$



Gambar 9. Kurva Kapabilitas Dengan Batas Kestabilan Keadaan Tunak

Secara visual batas daya kompleks generator ditunjukkan pada gambar 8:

- Titik b merupakan titik rating generator (MVA)
- Jarak rating generator dinyatakan oleh $3V_\phi I_a$

2. Batas Arus Stator (*Armature Current Limit*)

Arus jangkar / *armature* (I_a) yang mengalir pada belitan stator mengakibatkan rugi daya (I^2R). Rugi daya ini dapat mengakibatkan peningkatan suhu konduktor dan lingkungan terdekat. Jika dibiarkan, peningkatan suhu ini dapat terjadi secara terus-menerus. Oleh karena itu, salah satu batasan dalam kerja generator yaitu besar arus maksimum yang dapat dibawa oleh jangkar tanpa melebihi batas pemanasan yang diizinkan. Secara visual batas arus stator ditunjukkan pada gambar 8:

- Digambarkan sebagai lingkaran $3V_\phi I_a$
- Pusat titik lingkaran : pada titik a (0,0)
- Panjang jari-jari lingkaran : panjang garis a-b = $3V_\phi I_a$, merupakan rating generator.

3. Batas Arus Rotor (*Field Current Limit*)

Akibat adanya pemanasan yang dihasilkan dari rugi-rugi tembaga pada belitan rotor, maka arus rotor juga menentukan batas dalam operasi generator. Batas arus rotor dipengaruhi oleh arus eksitasi. Dimana arus eksitasi dapat dipertahankan konstan dengan mempertahankan arus searah I_f dibelitan medan konstan. Secara visual batas arus rotor ditunjukkan pada gambar 8:

- Digambarkan sebagai lingkaran $\frac{3E_i V_\phi}{X_s}$
- Pusat titik lingkaran: pada titik c: $\left(0, -\frac{3V_\phi^2}{X_s}\right)$
- Panjang jari-jari lingkaran: panjang garis c-b : $\left(\frac{3E_i V_\phi}{X_s}\right)$

4. Batas Pemanasan Ujung Inti Stator (*Stator-End Region Heating Limit*)

Pemanasan ujung inti stator menentukan batas operasi generator dalam daerah eksitasi lemah (daerah dibawah sumbu P). Pemanasan ujung inti stator disebabkan oleh fluks bocor di celah udara. Fluks bocor tersebut merupakan hasil penjumlahan vektor fluks arus beban di belitan stator dan fluks arus searah pada belitan rotor. Sebagian besar fluks bocor melewati celah udara antara belitan stator dan rotor dan sebagian kecil fluks bocor tetap berada pada bagian akhir dari belitan stator. Skema dari daerah pemanasan ujung inti stator generator ditunjukkan pada gambar 10.

Pada saat generator beroperasi dalam kondisi eksitasi lebih maka arus medan tinggi, sehingga di cincin penahan (*retaining ring*) akan mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang kecil. Pada saat beroperasi dalam kondisi eksitasi lemah maka arus medan kecil, sehingga di cincin penahan tidak mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang tinggi. Batas pemanasan ujung inti stator (*stator-end region heating limit*) digambarkan sebagai lingkaran C-D pada gambar 9:

- Pusat lingkaran : $\left(0, K_1 \frac{V_\phi^2}{X_s}\right)$
- Jari-jari lingkaran: $\left(K_2 \frac{V_\phi}{X_d}\right)$

Dimana:

$$K_1 = -\frac{(N_a N_f - N_f^2)}{(N_a^2 + N_f^2 - 2N_a N_f)} \quad (9)$$

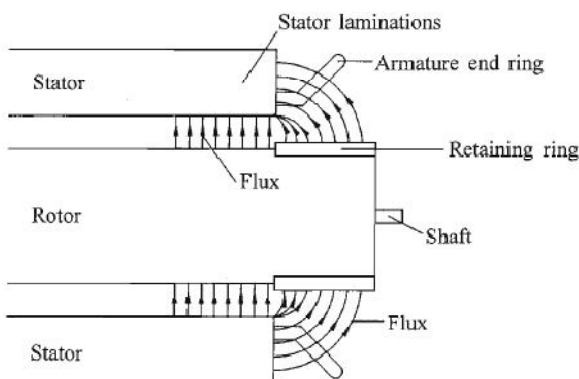
$$K_2 = \sqrt{\frac{\Delta T}{K_t (N_f^2 + N_a^2 - 2N_a N_f)}} \quad (10)$$

Keterangan:

N_a dan N_f : jumlah belitan stator dan rotor

ΔT : suhu maksimum yang diijinkan pada bagian ujung inti stator dan rotor (*end core region*)

K_t : konstanta penghubung pemanasan dengan fluks magnetik



Gambar 10. Daerah Pemanasan Ujung Inti Stator Generator

Batas lain dalam penyaluran daya oleh unit pembangkit adalah kestabilan keadaan tunak. Saat beroperasi dalam kondisi beban penuh, generator cenderung bekerja pada daerah *leading*, yaitu daerah yang menyerap daya reaktif dari sistem. Dalam kondisi ini, generator harus dioperasikan secara hati-hati, sehingga ditambahkan batas kestabilan keadaan tunak dalam daerah operasi generator.

Kondisi operasi keadaan tunak tercapai jika daya output mekanik (P_m) seimbang dengan daya keluaran listrik (P_e). Hubungan P_m dan P_e ditunjukkan pada gambar 11, dimana garis horizontal sebagai daya output mekanik yang dihasilkan oleh penggerak mula generator. Apabila beban pada generator meningkat maka putaran rotor akan melambat, dan sebaliknya akan semakin cepat apabila beban menurun.

Daya maksimum generator yang dikirim ke sistem berdasarkan kurva sudut daya pada gambar 11 dinyatakan sebagai berikut:

$$P_e = \frac{3E_i V_\phi}{X_s} \sin \delta \quad (11)$$

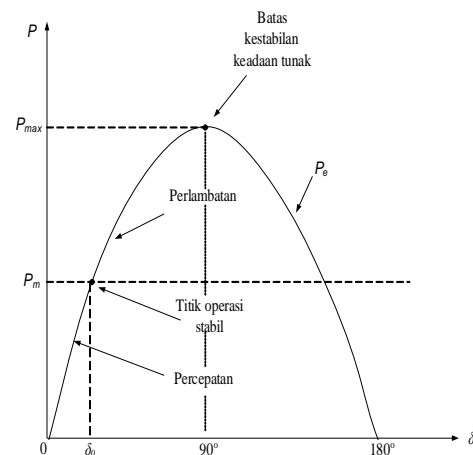
Keterangan:

P_e : daya keluaran listrik generator

δ : sudut daya antara tegangan E_i dan V_ϕ (sudut torsi mesin)

Persamaan (11) merupakan batas kestabilan saat $\delta = 90^\circ$. Dimana daya maksimum yang dapat disuplai generator terjadi saat $\delta = 90^\circ$. Secara visual, batas kestabilan keadaan tunak diplot kedalam sumbu PQ yang digambarkan seperti gambar 12:

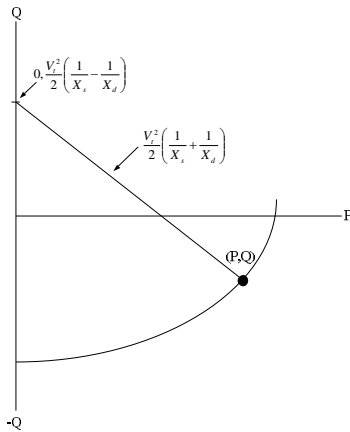
- Berpusat pada titik : $0, \frac{V_\phi^2}{2} \left(\frac{1}{X_s} - \frac{1}{X_d} \right)$
- Dengan jari-jari : $\frac{V_\phi^2}{2} \left(\frac{1}{X_s} + \frac{1}{X_d} \right)$



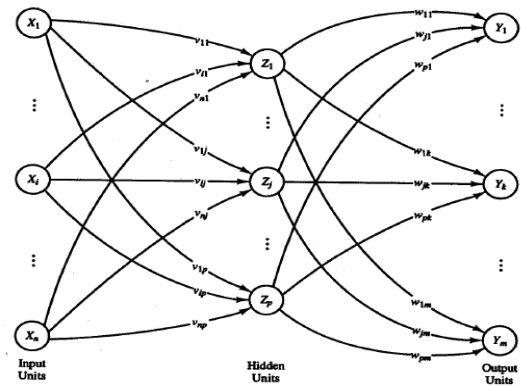
Gambar 11. Kurva Sudut Daya

Keterangan gambar 11:

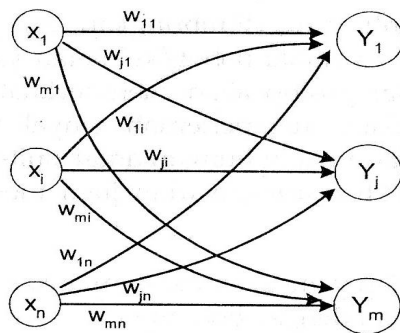
- Jika $P_e > P_m$ atau $\delta > \delta_0$: rotor mengalami perlambatan
 Jika $P_e = P_m$ atau $\delta = \delta_0$: titik operasi stabil
 Jika $P_e < P_m$ atau $\delta < \delta_0$: rotor mengalami percepatan



Gambar 12. Batas Kestabilan Keadaan Tunak (Steady State)



Gambar 14. Multi Layer Neural Network



Gambar 13. Single Layer Neural Network

B. Jaringan Saraf Tiruan

Jaringan saraf tiruan (*artificial neural networks*) adalah sistem pemroses informasi yang memiliki karakteristik mirip jaringan saraf biologi manusia. JST dibentuk sebagai pengembangan model matematika dari jaringan saraf biologi manusia. Dengan asumsi bahwa:

- a. Pemrosesan informasi terjadi secara sederhana pada elemen prosesor, elemen tersebut dinamakan neuron.
- b. Sinyal dilewatkan di antara neuron-neuron melalui suatu penghubung.
- d. Setiap penghubung memiliki pembobot tertentu dan sinyal yang dikirim akan dikalikan.
- e. Setiap neuron memiliki fungsi aktivasi (*non-linier*) terhadap masukan untuk menghasilkan sinyal keluaran.

Karakteristik dari JST ditentukan oleh tiga hal :

1. Pola Hubungan Antar Neuron (Arsitektur Jaringan)

Beberapa arsitektur jaringan yang sering dipakai dalam jaringan saraf tiruan:

 - a. Jaringan Layar Tunggal (*Single Layer Network*)

Dalam jaringan ini, semua unit masukan dihubungkan langsung dengan semua unit keluaran, meskipun dengan bobot yang berbeda seperti ditunjukkan pada gambar 13.
 - b. Jaringan Layar Jamak (*Multi Layer Network*)

Dalam jaringan ini, selain unit masukan dan keluaran terdapat juga unit-unit lain (disebut layar tersembunyi), seperti ditunjukkan pada gambar 14.

2. Fungsi Aktivasi

Operasi dasar *neural-network* merupakan hasil penjumlahan dari perkalian masing-masing sinyal input dengan pembobot, kemudian masuk ke dalam suatu fungsi aktivasi untuk menghasilkan keluaran. Beberapa fungsi aktivasi yang sering digunakan adalah fungsi *threshold* (batas ambang), fungsi sigmoid, fungsi identitas.

C. Metode Constructive Backpropagation

Proses terbentuknya konstruksi penambahan unit tersembunyi untuk metode pembelajaran *constructive backpropagation* terjadi secara satu demi satu. Algoritma pelatihan *constructive backpropagation* sebagai berikut :

1. Inisialisasi, yaitu pembentukan JST awal berupa JST tanpa unit tersembunyi. Penimbang dari konfigurasi awal dihitung dengan meminimalkan jumlah dari galat kuadrat (*sum of squared error / SSE*). Penimbang yang telah ditemukan dibuat tetap.
2. Pelatihan unit tersembunyi baru, yaitu menghubungkan masukan ke unit baru dan sambungkan keluarannya ke unit keluaran. Seluruh penimbang yang terhubung ke unit baru diatur dengan meminimalkan *mSSE (modified SSE)*.
3. Pembekuan unit tersembunyi baru, yaitu menetapkan secara permanen penimbang yang berinterkoneksi dengan unit baru.
4. Uji konvergensi, yaitu jika jumlah unit tersembunyi telah menghasilkan solusi yang layak, maka pelatihan dihentikan. Jika tidak, kembali ke langkah 2.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dan pengambilan data dilakukan di PLTP Lahendong 4, yang terletak di desa Pangolombian, Kecamatan Tomohon Selatan, Kota Tomohon, Propinsi Sulawesi Utara. PLTP Lahendong 4 dibangun untuk menyediakan dan menyalurkan energi listrik pada sistem Minahasa dengan daerah pelayanan Manado, Bitung, Minahasa Utara, Minahasa Selatan, Minahasa Tenggara, Kotamobagu ditambah dengan Gorontalo (dimulai tahun 2012). Pengambilan data dilakukan pada bulan Maret – Juli 2012. Data yang diambil yaitu data spesifikasi generator, ditunjukkan pada tabel Iserta kurva

kapabilitas generator PLTP Lahendong 4, ditunjukkan pada gambar 15.

B. Prosedur Penelitian

Secara umum, terdapat beberapa langkah yang dilakukan dalam penyelesaian penelitian mengenai simulasi keamanan kerja generator PLTP Lahendong 4 sebagai berikut:

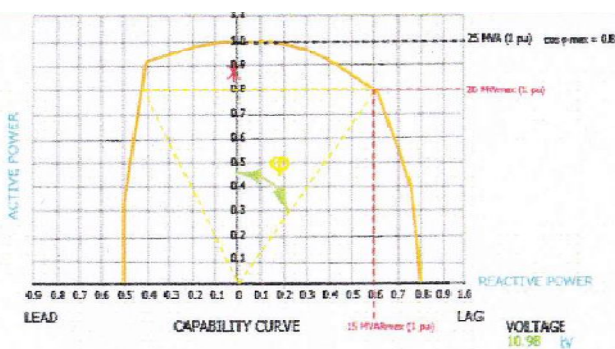
1. Melakukan studi literatur; berupa pengumpulan buku teks, makalah, skripsi dan artikel-artikel sebagai landasan teori mengenai generator sinkron, kurva kapabilitas generator, jaringan saraf tiruan dengan metode *constructive backpropagation*, serta bahasa pemrograman *Matlab* yang digunakan dalam simulasi kurva kapabilitas generator.
2. Melakukan pengambilan data di PLTP Lahendong 4 yaitu data spesifikasi generator serta kurva kapabilitas generator PLTP Lahendong 4.

C. Pembentukan Kurva Kapabilitas Generator

Diagram alir pembentukan kurva kapabilitas generator ditunjukkan pada gambar 16. Pembentukan kurva kapabilitas dibagi dalam 2 tahap, yaitu plot titik P dan Q serta tahap pelatihan data kurva.

TABEL I. DATA TEKNIS GENERATOR PLTP LAHENDONG 4

Nama Generator	LH4
Tipe	GTLR1494 /45 – 2
Keluaran [MVA]	25
Keluaran [MW]	20
Tegangan [kV]	11
Arus [A]	1312
Tegangan Eksitasi [V]	160
Arus Eksitasi [A]	808
Fasa	3
Faktor Daya	0,8
Frekuensi [Hz]	50
Jumlah Kutub	2
Kecepatan [rpm]	3000
Tahun Pembuatan	2010
Pembuat	<i>Fuji Electric</i>

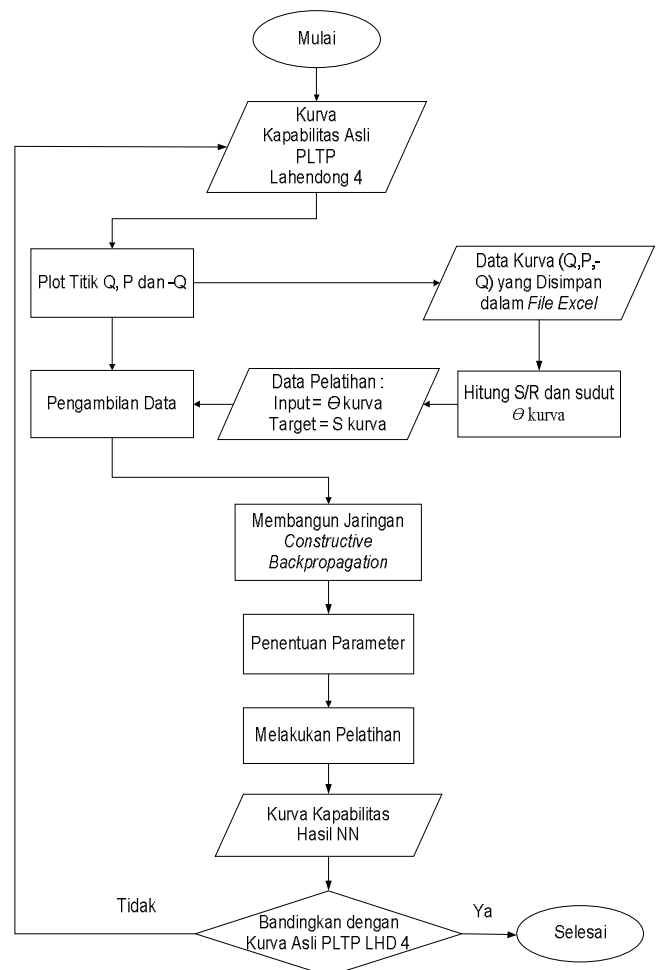


Gambar 15. Kurva Kapabilitas Generator PLTP Lahendong 4

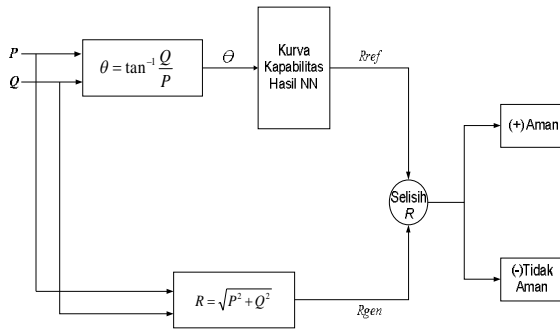
3. Membuat program untuk pembentukan kurva kapabilitas generator berbasis jaringan saraf tiruan (*artificial neural network*) dengan metode *constructive backpropagation* dengan perangkat lunak *Matlab* 2009a.
4. Membuat algoritma serta program pengujian keamanan generator.
5. Melakukan uji coba kurva kapabilitas yang dibentuk melalui jaringan saraf tiruan dengan beberapa kondisi pembebanan generator (data P dan Q) sebagai masukan dalam algoritma pengujian keamanan generator.
6. Membandingkan kurva kapabilitas hasil jaringan saraf tiruan dengan kurva kapabilitas asli generator PLTP Lahendong 4 dengan melakukan pengujian sama seperti langkah 5, namun dengan data masukan yakni data aktual operasi PLTP Lahendong 4.

D. Pengujian Kurva Kapabilitas Generator Hasil Pelatihan NN

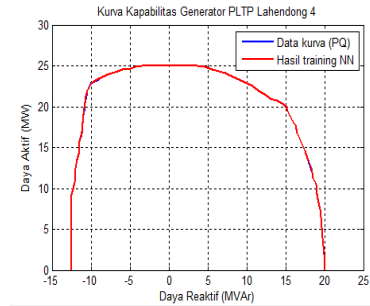
Pengujian kurva kapabilitas generator hasil pelatihan NN dilakukan untuk menguji keamanan generator. Untuk algoritma pengujian kurva kapabilitas generator ditunjukkan pada gambar 17.



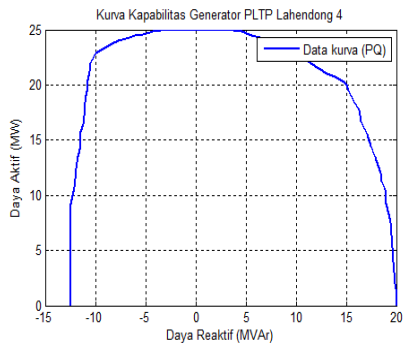
Gambar 16. Diagram Alir Pembentukan Kurva Kapabilitas Generator Metode *Constructive Backpropagation*



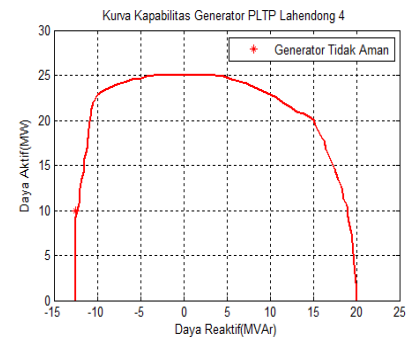
Gambar 17. Algoritma Pegujian Kurva Kapabilitas Generator



Gambar 19. Kurva Kapabilitas Generator PLTP Lahendong 4 Hasil Pelatihan NN



Gambar 18. Kurva Kapabilitas Generator PLTP Lahendong 4 dari Plot Data PQ

Gambar 20. Hasil Uji Coba Kurva Kapabilitas Pelatihan NN ($P = 10$ MW, $Q = -12.5$ MVAr)

IV. SIMULASI DAN ANALISA HASIL

A. Hasil Pembentukan Kurva Kapabilitas dengan Jaringan Saraf Tiruan

Dari plot kurva kapabilitas asli generator PLTP Lahendong 4 menghasilkan pasangan titik data PQ yang terdiri atas:

Titik P : 81 titik

Titik Q : 81 titik

Tampilan kurva kapabilitas yang disimulasikan sesuai dengan data PQ kurva asli generator PLTP Lahendong 4 ditunjukkan pada gambar 18.

Tampilan kurva kapabilitas generator PLTP Lahendong 4 hasil pelatihan NN ditunjukkan pada gambar 18. Kurva hasil pelatihan NN tersebut sudah mengenali target yaitu data PQ kurva. Hal ini terbukti dengan sudah berimpitnya kurva kapabilitas hasil pelatihan NN (berwarna merah) dengan target data kurva PQ (berwarna biru).

B. Uji Coba Kurva Kapabilitas Generator Hasil Simulasi

Uji coba terhadap kurva kapabilitas hasil pelatihan NN dilakukan untuk mendapatkan titik kerja dari generator sehingga dapat ditentukan apakah generator bekerja pada batasan yang aman atau tidak. Kerja generator dinyatakan aman bila memenuhi syarat $R_{gen} \leq R_{ref}$ sehingga R_{ref} dikurangi R_{gen} (selisih R) bernilai positif (+). Uji coba kurva kapabilitas generator dilakukan terhadap beberapa kondisi pembebanan yaitu dengan memasukkan nilai P dan Q sebagai masukan terhadap kurva kapabilitas hasil pelatihan NN.

1. Uji coba kondisi 1 dengan pembebanan kurva :

$$P = 10 \text{ MW}$$

$$Q = -12.5 \text{ MVAr}$$

Hasil simulasi kondisi 1 ditunjukkan pada gambar 20. Dari hasil simulasi, input kurva kapabilitas generator hasil pelatihan NN yaitu dengan pembebanan $P = 10$ MW dan $Q = -12.5$ MVAr tidak mengenali targetnya yaitu R_{ref} kurva karena titik kerja generator sudah berada di luar batas kurva kapabilitas hasil pelatihan NN, ditandai dengan titik kerja generator berwarna merah.

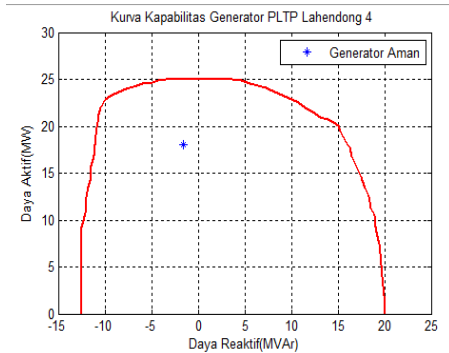
Pada kondisi ini generator menarik daya reaktif dari sistem dengan jumlah maksimum (dari daya reaktif yang dapat diterima oleh generator PLTP Lahendong 4) yaitu 12.5 MVAr menandakan adanya kegagalan eksitasi generator atau generator mengalami kehilangan eksitasi yang cukup besar. Akibatnya generator akan berputar pada kecepatan konstan, diatas kecepatan sinkron dan akan bekerja sebagai generator induksi.

Disimpulkan bahwa pada kondisi pembebanan 1, generator bekerja dalam kondisi tidak aman. Oleh karena itu pada kondisi ini, perlu diatur eksitasi pada generator yaitu dengan meningkatkan arus eksitasi pada belitan medan di rotor. Sehingga generator tidak menyerap daya reaktif terlalu besar dari sistem. Selain itu faktor daya generator akan meningkat.

2. Uji coba kondisi 2 dengan pembebanan kurva :

$$P = 18 \text{ MW}$$

$$Q = -1.6 \text{ MVAr}$$



Gambar 21. Hasil Uji Coba Kurva Kapabilitas Pelatihan NN
($P = 18 \text{ MW}$, $Q = -1.6 \text{ MVar}$)

Hasil simulasi kondisi 2 ditunjukkan pada gambar 21. Dari hasil simulasi, input kurva kapabilitas hasil pelatihan NN yaitu $P=18\text{MW}$, $Q = -1.6\text{MVar}$ mengenali targetnya (R_{ref} kurva) karena titik kerja generator berada didalam batas kurva kapabilitas hasil pelatihan NN, ditandai dengan titik kerja generator berwarna biru. Generator beroperasi pada kondisi eksitasi lemah, yakni generator bekerja pada daerah *leading* atau menarik daya reaktif dari sistem. Disimpulkan bahwa pada kondisi pembebanan ke-2 generator bekerja dalam kondisi aman.

3. Uji coba kondisi 3 dengan pembebanan kurva :

$$P = 20 \text{ MW}$$

$$Q = 0 \text{ MVar}$$

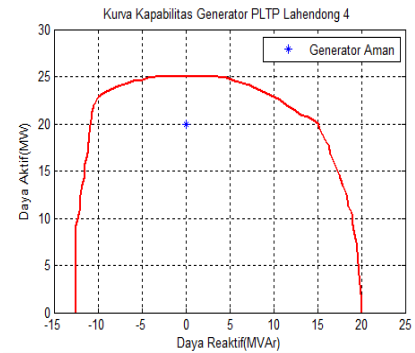
Hasil simulasi kondisi 3 ditunjukkan pada gambar 22. Dari hasil simulasi, input kurva kapabilitas hasil pelatihan NN yaitu $P = 20 \text{ MW}$ dan $Q = 0 \text{ MVar}$ mengenali targetnya (R_{ref} kurva) karena titik kerja generator berada didalam batas kurva kapabilitas hasil pelatihan NN, ditandai dengan titik kerja generator berwarna biru. Generator beroperasi pada kondisi eksitasi normal, yakni generator mengirim daya aktif (P) ke sistem. Generator beroperasi pada kondisi eksitasi normal, yakni generator mengirim daya aktif (P) ke sistem. Kondisi ini ditunjukkan dengan sudut faktor daya nol ($\text{teta} = 0$) sehingga faktor dayanya menjadi 1. Generator yang beroperasi dengan faktor daya 1 atau berada diantara faktor daya *lagging* dan *leading* dapat menyebabkan pemanasan pada belitan stator, namun untuk kondisi ini titik kerja generator masih berada dalam batasan kurva kapabilitas, menandakan tidak terjadi pemanasan lebih pada belitan statornya. Disimpulkan bahwa pada kondisi pembebanan ke-3 generator bekerja dalam kondisi aman.

4. Uji coba kondisi 4 dengan pembebanan kurva :

$$P = 25 \text{ MW}$$

$$Q = 5.5 \text{ MVar}$$

Hasil simulasi kondisi 4 ditunjukkan pada gambar 23. Dari hasil simulasi, input kurva kapabilitas hasil pelatihan NN yaitu $P = 25 \text{ MW}$ dan $Q = 5.5 \text{ MVar}$ tidak mengenali targetnya (R_{ref} kurva) karena titik kerja generator sudah berada diluar batas kurva kapabilitas hasil pelatihan NN, ditandai dengan titik kerja generator menjadi berwarna merah.



Gambar 22. Hasil Uji Coba Kurva Kapabilitas Pelatihan NN
($P = 20 \text{ MW}$, $Q = 0 \text{ MVar}$)

Generator beroperasi pada kondisi eksitasi lebih, yakni kerja generator berada pada daerah *lagging* atau mengirim daya reaktif (Q) kesistem.

Pada kondisi ini titik kerja generator sudah melewati batas kurva kapabilitas yaitu pada batas pemanasan belitan stator. Kondisi ini disebabkan oleh daya keluaran generator yaitu daya aktif sudah melewati daya *rating* generator yaitu 20 MW menjadi 25 MW. Hal ini dapat dipengaruhi oleh peningkatan daya masukan generator yaitu daya mekanik yang berasal dari penggerak mula generator (turbin). Dimana peningkatan dayamasukan mekanik dipengaruhi oleh jumlah aliran massa uap ke turbin. Peningkatan daya masukan generator menyebabkan sudut δ diantara tegangan internal (E_i) dan tegangan terminal generator (V_ϕ) meningkat. Nilai sudut δ yang besar menghasilkan daya kirim daya aktif (P) ke sistem menjadi besar pula. Disimpulkan bahwa pada kondisi pembebanan ke-4 generator bekerja dalam kondisi tidak aman. Oleh karena itu, pada kondisi ini daya keluaran generator yakni daya aktif (P) harus dikurangi dengan mengatur jumlah aliran massa uap yang masuk ke turbin.

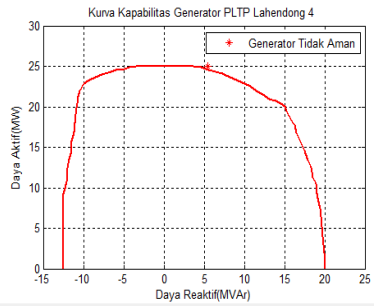
5. Uji coba kondisi 5 dengan pembebanan kurva :

$$P = 16 \text{ MW}$$

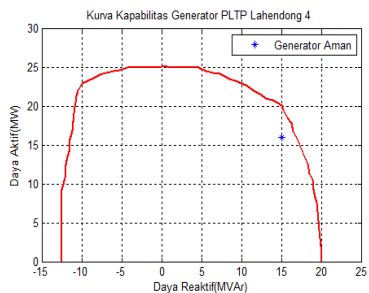
$$Q = 15 \text{ MVar}$$

Hasil simulasi kondisi 5 ditunjukkan pada gambar 24. Dari hasil simulasi, input kurva kapabilitas generator hasil pelatihan NN yaitu dengan pembebanan $P = 16 \text{ MW}$, $Q = 15 \text{ MVar}$ mengenali targetnya yaitu R_{ref} kurva karena titik kerja generator berada didalam batas kurva kapabilitas hasil pelatihan NN, ditandai dengan titik kerja generator berwarna biru. Generator beroperasi pada kondisi eksitasi lebih, yakni generator bekerja pada daerah *lagging* atau mengirim daya reaktif ke sistem.

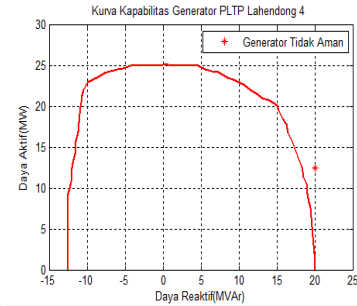
Pada kondisi ini generator terlalu diperkuat sehingga menyuplai daya reaktif (Q) ke sistem dengan jumlah yang cukup besar mencapai daya reaktif maksimum yang dapat disuplai generator yakni 15 MVar. Dapat dilihat dari hasil simulasi pada gambar 4.8, titik kerja generator hampir mendekati batas arus rotor, juga faktor daya kurang dari 0.8 (faktor daya *rating* generator PLTP Lahendong 4) yaitu 0.7295 *lagging*. Dimana generator dengan faktor daya *lagging* akan menyebabkan pemanasan pada kumparan rotor dan akhirnya mengakibatkan kerusakan pada generator.



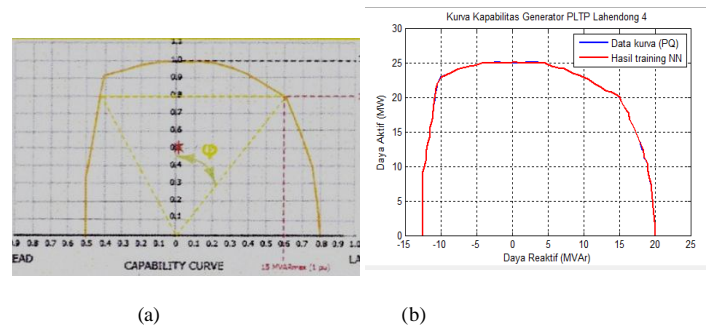
Gambar 23. Hasil Uji Coba Kurva Kapabilitas Pelatihan NN
($P = 25 \text{ MW}$, $Q = 5.5 \text{ MVAr}$)



Gambar 24. Hasil Uji Coba Kurva Kapabilitas Pelatihan NN
($P = 16 \text{ MW}$, $Q = 15 \text{ MVAr}$)



Gambar 25. Hasil Uji Coba Kurva Kapabilitas Pelatihan NN
($P = 12.5 \text{ MW}$, $Q = 20 \text{ MVAr}$)



(a) Kurva Kapabilitas Asli Generator PLTP Lahendong 4
(b) Kurva Kapabilitas Generator PLTP Lahendong 4 Hasil Pelatihan NN

Namun pada kondisi ini titik kerja generator masih berada didalam batas kurva, menandakan bahwa pemanasan yang terjadi tidak melewati batas pemanasan yang diijinkan pada kumparan rotor. Disimpulkan bahwa pada kondisi pembebanan ke-5 generator bekerja dalam kondisi aman.

6. Uji coba kondisi 6 dengan pembebanan kurva :
 $P = 12.5 \text{ MW}$
 $Q = 20 \text{ MVAr}$

Hasil simulasi kondisi 6 ditunjukkan pada gambar 25. Dari hasil simulasi, input kurva kapabilitas hasil pelatihan NN yaitu $P = 12.5 \text{ MW}$, $Q = 20 \text{ MVAr}$ tidak mengenali targetnya (R_{ref} kurva) karena titik kerja generator berada diluar batas kurva kapabilitas hasil pelatihan NN, ditandai dengan titik kerja generator berwarna merah. Generator beroperasi pada kondisi eksitasi lebih, yakni kerja generator berada pada daerah *lagging* atau mengirim daya reaktif (Q) kesistem. Pada kondisi ini titik kerja generator sudah melewati batas kurva kapabilitas yaitu pada batas arus rotor. Kondisi ini dapat terjadi akibat generator terlalu diperkuat sehingga menyuplai daya reaktif (Q) ke sistem dengan jumlah yang cukup besar melampaui daya reaktif maksimum yang dapat disuplai generator (15 MVAr) menjadi 20 MVAr. Selain itu, faktor dayanya kurang dari 0.8 (faktor daya rating generator PLTP Lahendong 4) yaitu 0.5300 *lagging*. Dimana generator dengan faktor daya *lagging* menyebabkan pemanasan pada kumparan rotor dan akhirnya mengakibatkan kerusakan pada generator.

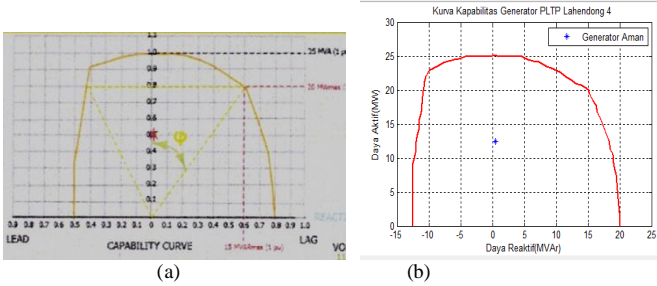
Disimpulkan bahwa pada kondisi pembebanan ke-6 generator bekerja dalam kondisi tidak aman. Oleh karena itu, seperti halnya pada kondisi ke-5, pada kondisi ke-6 ini juga eksitasi generator perlu dikurangi yaitu dengan mengurangi arus penguat medan pada rotor agar daya reaktif (Q) ke sistem menjadi berkurang sehingga faktor dayanya akan meningkat.

C. Pengujian Kurva Kapabilitas Hasil Simulasi

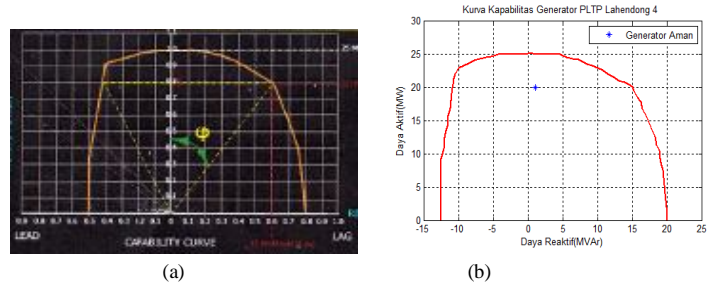
Pengujian terhadap kurva kapabilitas dilakukan untuk menguji apakah kurva kapabilitas tersebut sudah sesuai dengan kurva kapabilitas asli generator PLTP Lahendong 4 sehingga nantinya dapat menghasilkan letak titik kerja yang sama. Kurva kapabilitas asli generator PLTP Lahendong 4 dengan kurva hasil pelatihan NN ditunjukkan pada gambar 4.10. Untuk membuktikan bahwa letak titik kerja dari kurva kapabilitas yang disimulasikan sudah sesuai dengan letak titik kerja dari kurva kapabilitas asli generator PLTP Lahendong 4 maka disimulasikan beberapa data pembangkitan generator PLTP Lahendong 4.

- PLTP Lahendong 4 beroperasi dengan :
 Daya aktif (P) = 12.5 MW
 Daya reaktif (Q) = 0.412 MVAr

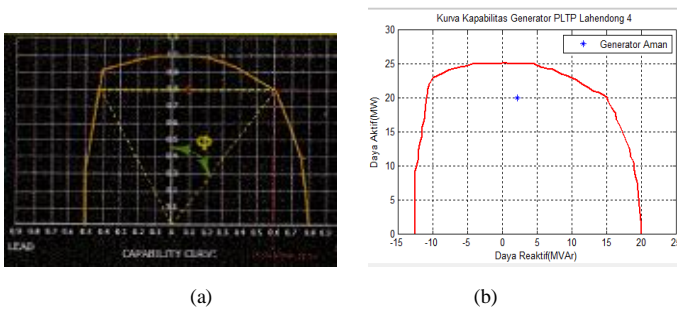
Saat generator menyuplai ke beban dengan $P = 12.5 \text{ MW}$, $Q = 0.412 \text{ MVAr}$, menghasilkan titik kerja generator ditunjukkan pada gambar 27. Dari kedua gambar (a) dan (b) menunjukkan letak titik kerja generator (P, Q) yang sama yaitu pada titik pembebanan (12.5 MW, 0.412 MVAr). Dimana pada kondisi pembebanan ini generator beroperasi pada kondisi eksitasi lebih, yakni generator bekerja pada daerah *lagging* atau mengirim daya reaktif ke sistem. Titik kerja generator berada didalam batasan kurva kapabilitas, selain itu daya reaktif yang dikirim generator ke sistem hampir mendekati nol yaitu 0.412 MVAr sehingga nilai faktor daya generator adalah 1.00 *lagging* yang menandakan bahwa kerja generator masih berada pada kondisi eksitasi normal. Oleh karena itu pada kondisi pembebanan ini kerja generator dalam kondisi aman.



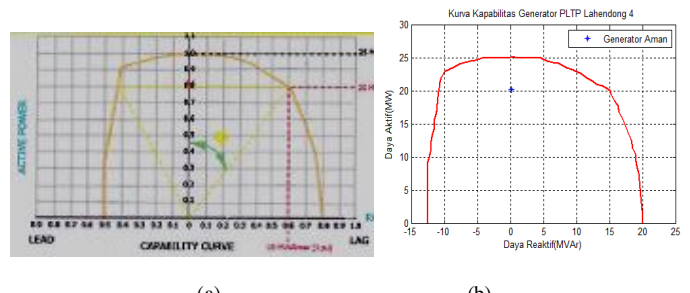
(a) Kurva Kapabilitas Asli Generator PLTP Lahendong 4
 (b) Kurva Kapabilitas Generator PLTP Lahendong 4 Hasil Simulasi
 Gambar 27. Perbandingan Kurva Kapabilitas Generator Asli dan Hasil Simulasi $P = 12.5 \text{ MW}$, $Q = 0.412 \text{ MVar}$



(a) Kurva Kapabilitas Asli Generator PLTP Lahendong 4
 (b) Kurva Kapabilitas Generator PLTP Lahendong 4 Hasil Simulasi
 Gambar 29. Perbandingan Kurva Kapabilitas Generator Asli dan Hasil Simulasi $P = 20 \text{ MW}$, $Q = 1.062 \text{ MVar}$



(a) Kurva Kapabilitas Asli Generator PLTP Lahendong 4
 (b) Kurva Kapabilitas Generator PLTP Lahendong 4 Hasil Simulasi
 Gambar 28. Perbandingan Kurva Kapabilitas Generator Asli dan Hasil Simulasi $P = 19.9 \text{ MW}$, $Q = 2.236 \text{ MVar}$



(a) Kurva Kapabilitas Asli Generator PLTP Lahendong 4
 (b) Kurva Kapabilitas Generator PLTP Lahendong 4 Hasil Simulasi
 Gambar 30. Perbandingan Kurva Kapabilitas Generator Asli dan Hasil Simulasi $P = 20.2 \text{ MW}$, $Q = 0.155 \text{ MVar}$

2. PLTP Lahendong 4 beroperasi dengan :

$$\begin{aligned} \text{Daya aktif } (P) &= 19.9 \text{ MW} \\ \text{Daya reaktif } (Q) &= 2.236 \text{ MVar} \end{aligned}$$

Saat generator menyuplai ke beban dengan $P = 19.9 \text{ MW}$, $Q = 2.236 \text{ MVar}$, menghasilkan titik kerja generator yang ditunjukkan pada gambar 28. Dari kedua gambar (a) dan (b) menunjukkan letak titik kerja generator (P, Q) yang sama yaitu pada titik pembebanan (19.9 MW , 2.236 MVar). Dimana pada kondisi pembebanan ini generator beroperasi pada kondisi eksitasi lebih, yakni generator bekerja pada daerah *lagging* atau mengirim daya reaktif ke sistem. Titik kerja generator berada didalam batasan kurva kapabilitas, selain itu daya reaktif ke sistem cukup kecil yaitu 2.236 MVar sehingga menghasilkan nilai faktor daya generator yang besar yaitu 0.99 *lagging* yang menandakan bahwa generator masih dalam kondisi eksitasi normal. Oleh karena itu pada kondisi ini kerja generator dalam kondisi aman.

3. PLTP Lahendong 4 beroperasi dengan :

$$\begin{aligned} \text{Daya aktif } (P) &= 20 \text{ MW} \\ \text{Daya reaktif } (Q) &= 1.062 \text{ MVar} \end{aligned}$$

Saat generator menyuplai ke beban dengan $P = 20 \text{ MW}$, $Q = 1.062 \text{ MVar}$, menghasilkan titik kerja generator yang ditunjukkan pada gambar 29. Dari kedua gambar (a) dan (b) menunjukkan letak titik kerja generator (P, Q) yang sama yaitu pada titik pembebanan (20 MW , 1.062 MVar). Dimana pada kondisi pembebanan ini generator beroperasi pada kondisi eksitasi lebih, yakni generator bekerja pada daerah *lagging* atau mengirim daya reaktif ke sistem. Titik kerja generator berada didalam batasan kurva kapabilitas, selain itu-

daya reaktif ke sistem cukup kecil yaitu 1.062 MVar sehingga menghasilkan nilai faktor daya generator yang besar yaitu 1.00 *lagging* yang menandakan bahwa generator dalam kondisi eksitasi normal. Oleh karena itu pada kondisi ini kerja generator dalam kondisi aman.

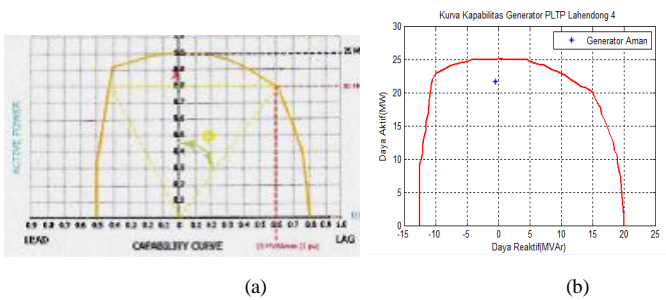
4. Generator PLTP Lahendong 4 beroperasi dengan :

$$\begin{aligned} \text{Daya aktif } (P) &= 20.2 \text{ MW} \\ \text{Daya reaktif } (Q) &= 0.155 \text{ MVar} \end{aligned}$$

Saat generator menyuplai ke beban dengan $P = 20.2 \text{ MW}$, $Q = 0.155 \text{ MVar}$, menghasilkan titik kerja generator yang ditunjukkan pada gambar 30. Dari kedua gambar (a) dan (b) menunjukkan letak titik kerja generator (P, Q) dari kurva kapabilitas asli PLTP Lahendong 4 dengan kurva kapabilitas hasil simulasi yang sama yaitu pada titik pembebanan (20.2 MW , 0.155 MVar). Dimana pada kondisi pembebanan ini generator beroperasi pada kondisi eksitasi lebih, yakni generator bekerja pada daerah *lagging* atau mengirim daya reaktif ke sistem. Daya reaktif ke sistem cukup kecil yaitu 0.155 MVar sehingga menghasilkan nilai faktor daya generator yang besar yaitu 1.00 *lagging* yang menandakan bahwa kerja generator dalam kondisi eksitasi normal. Oleh karena itu pada kondisi ini kerja generator dalam kondisi aman.

5. Generator PLTP Lahendong 4 beroperasi dengan :

$$\begin{aligned} \text{Daya aktif } (P) &= 21.7 \text{ MW} \\ \text{Daya reaktif } (Q) &= -0.424 \text{ MVar} \end{aligned}$$



(a) Kurva Kapabilitas Asli Generator PLTP Lahendong 4
 (b) Kurva Kapabilitas Generator PLTP Lahendong 4 Hasil Simulasi
 Gambar 31. Perbandingan Kurva Kapabilitas Generator Asli dan Hasil Simulasi $P = 21.7$ MW, $Q = -0.424$ MVar

Saat generator menyuplai ke beban dengan $P = 20$ MW, $Q = 1.062$ MVar, menghasilkan titik kerja generator yang ditunjukkan pada gambar 31. Dari kedua gambar (a) dan (b) menunjukkan letak titik kerja generator (P, Q) dari kurva kapabilitas asli PLTP Lahendong 4 dengan kurva kapabilitas hasil simulasi yang sama yaitu pada titik pembebanan (21.7 MW, -0.424 MVar). Dimana pada kondisi pembebanan ini generator beroperasi pada kondisi eksitasi lemah, yakni generator bekerja pada daerah *leading* atau menarik daya reaktif dari sistem. Letak titik kerja generator hampir mendekati titik 0 pada sumbu daya reaktif (Q), karena daya reaktif dari sistem cukup kecil yaitu -0.424 MVar sehingga menghasilkan nilai faktor daya generator yang besar yaitu 1.00 *leading* yang menandakan bahwa generator dalam kondisi eksitasi normal. Oleh karena itu pada kondisi ini kerja generator dalam kondisi aman.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi serta analisa hasil pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kurva kapabilitas generator dapat dibentuk dengan metode jaringan saraf tiruan (*artificial neural network*), sehingga menghasilkan model kurva kapabilitas yang identik dengan kurva asli generator PLTP Lahendong 4.
2. Dari pengujian terhadap kurva kapabilitas hasil simulasi, letak titik kerja yang dihasilkan sudah sesuai dengan letak titik kerja dari kurva kapabilitas asli generator PLTP Lahendong 4.
3. Apabila titik kerja generator berada didalam batas kurva kapabilitas maka kerja generator dalam kondisi aman, sebaliknya jika titik kerja generator berada diluar batas kurva kapabilitas maka kerja generator dalam kondisi tidak aman.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Marsudi, "Pembangkitan Energi Listrik", Erlangga, Jakarta, 2005
- [2] S. J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", McGraw-Hill International Edition, New York, 1991
- [3] P. Kundur, "Power System Stability and Control", The EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, Inc., 1994
- [4] H. Saadat, "Power System Analysis", International Edition. Second Edition, 2004
- [5] J.J. Grainger, W. Stevenson, "Power System Analysis", McGraw-Hill, Inc., 1994

- [6] *Instruction Manual Brush-less Exciter*. Fuji Electric System Co., Ltd.
- [7] "Standard Handbook for Electrical Engineers", Download from Digital Engineering Library @ McGraw-Hill
- [8] E. Pane, "Studi Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Permanent Magnet Generator", 2009
- [9] J. Lewis Blackburn, Thomas J. Domin, "Protective Relaying Principles and Application", Third Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2007
- [10] Ir. A.F. Nelwan, MT., "Teknik Tenaga Listrik", Lembaga Pembinaan dan Pengembangan Pendidikan (LP3), Universitas Sam Ratulangi, Manado, 2007
- [11] E. Supriyadi, "Sistem Pengaman Tenaga Listrik", Adicpta Karya Nusa, Yogyakarta, 1999
- [12] H. Talib Hashim. "Belajar Sendiri Dasar-Dasar Pemrograman Matlab", Gava Media, Yogyakarta, 2005
- [13] J.J. Siang, "Jaringan Saraf Tiruan dan Pemrogramannya Menggunakan Matlab", ANDI, Yogyakarta, 2004
- [14] M. Purnomo, A. Kurniawan, "Supervised Neural Networks", Graha Ilmu, Yogyakarta, 2006
- [15] "Stabilitas Sistem Tenaga", 2011, Tersedia di: <http://sistem-tenaga-listrik.blogspot.com>