

PENGUJIAN DAYA BALIK PADA SINKRONISASI GENERATOR DENGAN SUMBER DAYA SANGAT BESAR (INFINITE BUS) SECARA OTOMATIS MENGGUNAKAN MULTIFUNCTION RELAY TIPE GCP-30 DI LABORATORIUM SISTEM PROTEKSI DAN DISTRIBUSI JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Yaman¹, Teuku Hasanuddin², Yassir³, Reza Tri Fahlevi⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Lhokseumawe

Email: yaman.gayo@gmail.com¹, hasanudin10955@gmail.com², yassir@pnl.ac.id³, r3zac.s@gmail.com⁴

Abstrak – Daya balik atau *motoring* adalah peristiwa berubahnya fungsi generator listrik menjadi motor listrik pada saat sinkronisasi generator. Perubahan ini diakibatkan oleh berbaliknya arah aliran daya. Pengamanan generator dari gangguan daya balik biasanya menggunakan *reverse power relay*, dengan proses sinkronisasi dilakukan secara manual menggunakan *synchronoscope*. *Multifunction Relay* tipe GCP-30 adalah alat yang dapat melakukan kedua hal tersebut secara bersamaan. Alat ini berfungsi untuk menyinkronisasi generator secara manual atau otomatis, yang dilengkapi dengan pengaman, termasuk gangguan dari daya balik. Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh daya balik terhadap perubahan parameter torsi, arus medan eksitasi generator, dan jumlah beban yang dilayani. Hasil dari pengujian torsi diperoleh bahwa perubahan torsi akan mengubah pembagian beban, yang akan mengakibatkan timbulnya daya balik yang berlebih. *Multifunction Relay tipe GCP-30* akan trip pada saat daya balik bernilai -67 W jika di set -8%. Hasil dari pengujian perubahan arus medan eksitasi generator adalah tidak adanya daya balik, tetapi generator akan berubah menjadi beban reaktif. Daya reaktif bernilai -441 VAR pada saat arus eksitasi bernilai 0 A. Adapun hasil dari pengujian perubahan beban adalah bertambah atau berkurangnya daya akan ditanggung oleh sumber daya yang lebih besar, yaitu daya dari sistem.

Kata-kata kunci: daya balik, *Multifunction Relay GCP-30*, sinkronisasi generator

Abstract – Reverse power or motoring is an event that changes the function of an electric generator into an electric motor when synchronizing the generator. This change is caused by the reversal of the direction of the power flow. Generator protection from reverse power disturbances usually uses a reverse power relay, with the synchronization process being carried out manually using a synchronoscope. Multifunction Relay type GCP-30 is a tool that can do both things simultaneously. This tool serves to synchronize the generator manually or automatically, which is equipped with safety, including interference from reverse power. Tests were carried out to determine the effect of reverse power on changes in torque parameters, generator excitation field currents, and the number of loads served. The results of the torsion test show that a change in torque will change the load sharing, which will result in excessive reverse power. Multifunction Relay type GCP-30 will trip when the return power is -67 W if set -8%. The result of testing the change in the generator excitation field current is that there is no reverse power, but the generator will turn into a reactive load. The reactive power is -441 VAR when the excitation current is 0 A. The results of the load change test are that the increase or decrease in power will be borne by a larger resource, namely the power from the system.

Key words: motoring, *Multifunction Relay GCP-30*, generator synchronization

I. PENDAHULUAN

Daya balik atau *motoring* adalah kondisi berubahnya fungsi generator listrik menjadi motor listrik yang diakibatkan oleh berbaliknya arah aliran daya pada saat sinkronisasi generator. Reverse power relay digunakan untuk mengamankan aliran daya balik ini. Proses sinkronisasi dapat dilakukan secara manual menggunakan *synchronoscope*.

Laboratorium Sistem Proteksi dan Distribusi Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe (Lab. Proteksi dan Distribusi JTE PNL) memiliki alat yang dapat menyinkronisasi generator

secara manual dan otomatis. Alat ini adalah *Multifunction Relay* tipe GCP30. Alat dilengkapi dengan berbagai pengaman generator, yang salah satunya adalah pengaman aliran daya balik. *Multifunction relay* ini masih dalam tahapan uji coba. Oleh karena itu, pengujian fungsi alat dianggap perlu untuk melihat apakah alat tersebut telah memenuhi aturan standar.

Berdasarkan uraian diatas, *multifunction relay* akan dioperasikan dari salah satu fungsinya, yaitu sebagai pengaman aliran daya balik saat sinkronisasi generator.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Gangguan pada sistem tenaga listrik selalu ada saat menyalurkan energi listrik. Sebuah sistem proteksi dibuat untuk mengamankan sistem tenaga listrik. Sistem proteksi terdiri dari peralatan-peralatan yang terpasang pada sistem tenaga listrik untuk melindungi sistem dari kondisi operasi yang tidak normal. Pengamanan sistem dilakukan dengan cara memisahkan saluran yang beroperasi tidak normal dengan saluran yang beroperasi normal [1].

A. Generator Sinkron

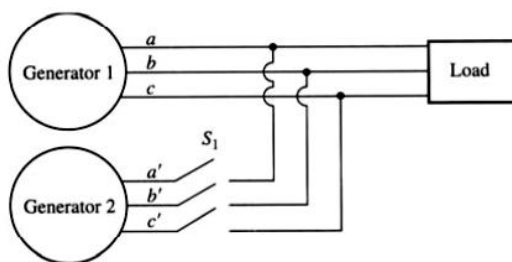
Generator sinkron merupakan mesin listrik yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Perubahan energi terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan jangkar. Alternator disebut juga generator sinkron karena kecepatan perputaran medan magnet yang terjadi sama dengan kecepatan perputaran rotor generator, sehingga menghasilkan energi listrik bolak balik (AC) AC 1-fasa atau 3-fasa [2].

B. Sinkronisasi Generator

Sebagian besar generator sinkron beroperasi secara sinkronisasi dengan generator sinkron lainnya untuk mensuplai listrik ke sistem yang lain. Operasi sinkronisasi pada generator sinkron ini, memberikan beberapa keuntungan diantaranya:

- dapat mensuplai daya ke beban lebih besar,
- jika total beban yang harus disuplai bernilai kecil, dapat menghentikan salah satu generator yang sedang beroperasi, dan
- memudahkan proses perawatan generator tanpa harus mematikan sistem pembangkit secara keseluruhan [3].

Ilustrasi sinkronisasi dua generator sinkron, seperti diperlihatkan pada Gambar 1.



Gbr. 1 Sinkronisasi 2 Generator Sinkron [3]

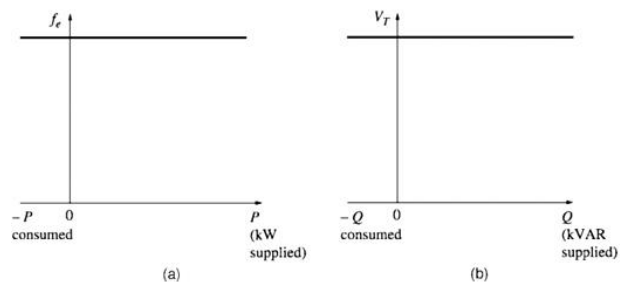
Sinkronisasi generator harus memenuhi kondisi-kondisi berikut:

1. tegangan efektif pada kedua generator harus sama besar,
2. kedua generator harus terhubung dengan urutan fase yang sama,
3. harus memiliki sudut fase yang sama, dan
4. nilai frekuensi generator *oncoming* harus sedikit lebih besar dari pada nilai frekuensi sistem yang sedang beroperasi [3].

C. Sinkronisasi Generator pada Infinite Bus

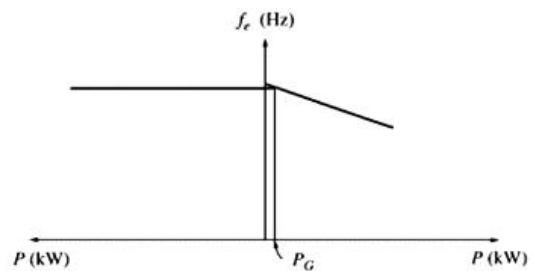
Generator sinkron yang dihubungkan dengan sistem tenaga listrik yang berkapasitas sangat besar, akan memberikan sedikit sekali pengaruh pada sistem tenaga listrik tersebut. Hal ini diidealisasikan menjadi konsep *infinite bus* (daya sangat besar) [3]. *Infinite bus* yaitu sistem tenaga listrik yang sangat besar, tegangan dan frekuensinya tidak berubah, dengan mengabaikan seberapa banyak daya aktif dan daya reaktif yang diambil dari sistem atau disuplai ke sistem tenaga listrik. Generator diasumsikan terhubung dengan *infinite bus* jika kapasitas generator <5% dari kapasitas sistem tenaga listrik yang dihubungkan ke generator tersebut.

Karakteristik daya aktif-frekuensi dan daya reaktif-tegangan dapat dilihat pada Gambar 2.



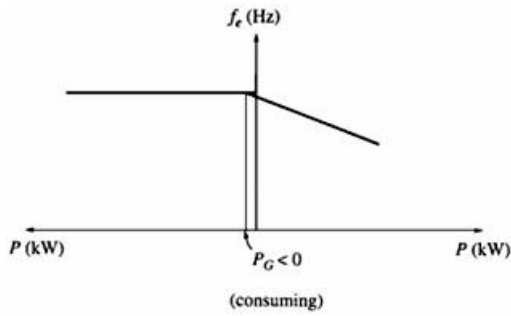
Gbr. 2 Operasi Sinkronisasi Generator dengan *Infinite Bus*:
(a) Karakteristik Daya Aktif terhadap Frekuensi;
(b) Daya reaktif terhadap tegangan [3]

Generator yang disinkronisasikan dengan *infinite bus*, akan menyuplai daya nyata kecil dengan sedikit atau tidak menyuplai daya reaktif [3]. *House diagram* frekuensi-daya sesaat setelah disinkronisasikan seperti diperlihatkan pada Gambar 3.



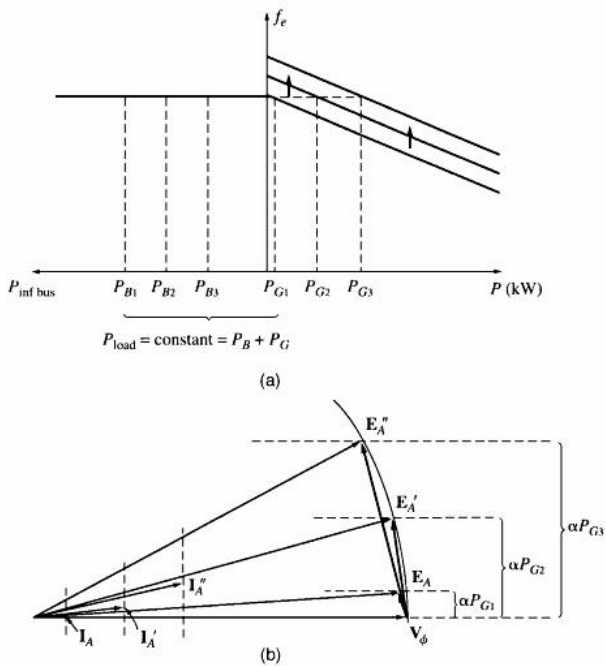
Gbr. 3 *House Diagram* Frekuensi-Daya Sesaat setelah Disinkronisasikan [3]

Frekuensi *no-load* generator lebih kecil dari pada frekuensi operasi sistem jika frekuensi generator yang akan disinkronisasi lebih kecil dari frekuensi sistem. Daya yang disuplai oleh generator bernilai negatif pada kondisi ini. Generator akan mengkonsumsi energi listrik karena sudah beroperasi sebagai motor. Generator yang disinkronisasikan pada sistem harus memiliki frekuensi sedikit lebih tinggi dari frekuensi sistem untuk memastikan bahwa generator akan menyuplai daya dan bukan mengkonsumsi daya [3]. *House diagram* frekuensi-daya jika frekuensi *no-load* lebih rendah dari frekuensi sistem seperti diperlihatkan pada Gambar 4.



Gbr. 4 House diagram Frekuensi-Daya jika Frekuensi no-load lebih rendah dari Frekuensi Sistem [3]

Governor setpoint ditingkatkan untuk menggeser frekuensi no-load generator ke atas frekuensi sistem agar tetap konstan. Dengan demikian, daya keluaran generator akan meningkat. Ilustrasi house diagram dan diagram fasor seperti diperlihatkan pada Gambar 5 [3].



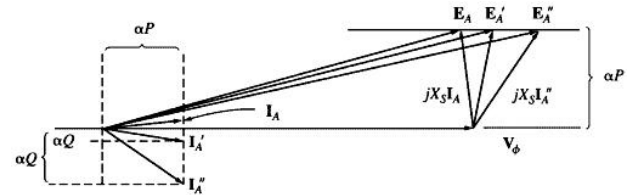
Gbr. 5 Pengaruh Peningkatan Governor Setpoint pada (a) House Diagram dan (b) Diagram Fasor [3]

Pada gambar 5 (b) besar E_A tetap konstan karena I_F dan ω tidak berubah, sedangkan $E_A \sin \delta$ proporsional terhadap daya keluaran generator sepanjang V_T tetap konstan. Ketika governor set point ditingkatkan, frekuensi no-load dan daya keluaran generator akan kembali meningkat. Peningkatan daya dan besarnya E_A akan tetap konstan, sedangkan $E_A \sin \delta$ akan terus meningkat.

Pada diagram fasor, generator mempunyai faktor daya leading yang berarti generator mengkonsumsi daya reaktif. Penyesuaian besar arus medan diperlukan untuk menyesuaikan faktor daya agar generator mensuplai daya reaktif. Sehingga, penyesuaian besar arus medan juga diperlukan dengan menjaga daya aktif.

Jika arus medan ditingkatkan, maka fluks ϕ akan meningkat, sehingga E_A juga meningkat. Jika E_A meningkat dengan $E_A \sin \delta$ tetap konstan, maka fasor E_A akan bergeser sepanjang garis daya konstan. Karena V_ϕ

bernilai konstan, sudut dari $jX_S I_A$ berubah, sehingga besar I_A akan berubah. Hasil akhir dari peningkatan arus medan jarak yang proporsional terhadap Q ($I_A \sin \theta$) akan meningkat. Dapat disimpulkan, peningkatan arus medan pada generator sinkron yang bekerja sinkronisasi terhadap infinite bus akan meningkatkan daya reaktif keluaran generator [3]. Ilustrasi diagram fasor seperti diperlihatkan pada Gambar 6.



Gbr. 6 Pengaruh Peningkatan Arus Medan [3]

Daya aktif bernilai konstan, dengan perubahan arus medan, maka:

1. Besar daya masukan generator adalah $P_{in} = \tau_{ind} \omega_m$
2. Penggerak mula (prime mover) mempunyai karakteristik torsi-kecepatan yang tetap untuk governor setting tetap.
3. Generator yang dihubungkan dengan infinite bus dengan kecepatan tetap (governor setpoint tidak diubah), maka daya yang disuplai generator akan tetap konstan.
4. Daya yang disuplai tidak berubah ketika arus medan disesuaikan nilainya. Maka $I_A \cos \theta$ dan $E_A \sin \delta$ tidak akan berubah (proporsional terhadap daya).

D. Daya Balik

Daya balik (reverse power) diakibatkan oleh berubahnya operasi generator, yang seharusnya berfungsi sebagai penghasil daya listrik, menjadi motor pengguna daya listrik. Perubahan fungsi ini menimbulkan daya balik. Daya balik bisa terjadi karena:

1. Generator dihubungkan paralel atau bergabung dalam suatu jaringan dengan generator lain. Saat frekuensi generator yang akan disinkronkan sedikit lebih rendah dari frekuensi pada sistem, maka daya akan mengalir dari sistem ke generator.
2. Torsi yang dihasilkan oleh penggerak mula (prime mover) lebih kecil dari torsi yang dibutuhkan untuk menjaga agar kecepatan rotornya berada pada kecepatan proporsionalnya.
3. Terjadi kehilangan torsi dari penggerak mulanya, sehingga mengalami kegagalan operasi dan generator masih terhubung dengan jaringan [4].

Daya balik yang terjadi pada suatu unit pembangkit listrik akan menyebabkan kerusakan pada peralatan penggerak mulanya atau turbinnya. Jadi pada generator dipasang peralatan pengaman relay reverse power [4].

Pengaturan pada relay reverse power berdasarkan daya balik, harus diatur pada $\frac{1}{2}$ dari nilai daya motoring generator [5]. Ketentuan ini sesuai dengan standarisasi IEEE seperti pada Tabel 1.

Tabel I.

Kisaran Daya Balik dan Kemungkinan Terjadinya Kerusakan yang disebabkan oleh Daya Balik, sesuai dengan Standar IEEE [5]

Penggerak Mula	Daya Balik (% Daya Generator)	Kemungkinan Kerusakan	Pengaturan Proteksi Relay Daya Balik
Mesin Diesel	5 – 25	Terbakar/meledak pada tangki bahan bakar. Kerusakan pada gearbox dan poros.	
Turbin Gas	10 – 15 (split shaft) >50 (single shaft)	Kerusakan gearbox.	50% dari daya balik
Turbin Air	0,2 – 2	Kavitasi pada pisau. Kerusakan pisau turbin.	
Turbin Uap	0,5 – 6	Meledak karena kenaikan suhu uap. Kerusakan pada gearbox.	



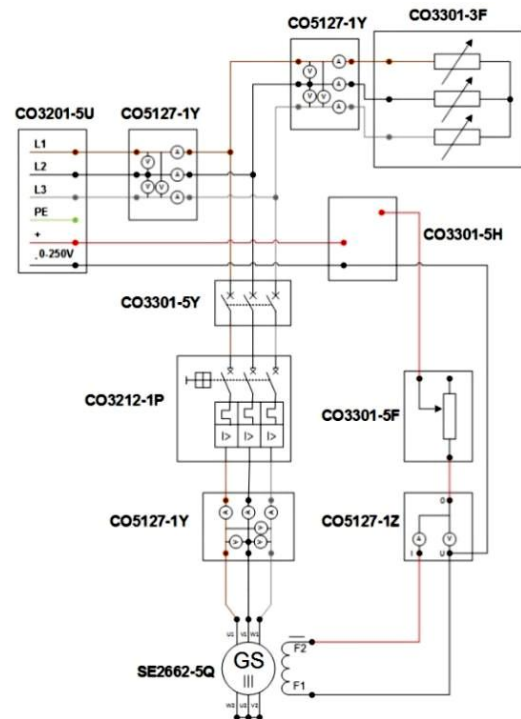
Gbr. 7 Konstruksi Multifunction Relay tipe GCP-30 [6]

Spesifikasi dari alat:

- Catu daya : 12/24 Vdc
- Konsumsi daya : Maksimal 20 W
- Tegangan input : 120 Vac dan 480 Vac
- Arus input : 1A atau 5A

Rangkaian Pengujian

Rangkaian pengujian seperti pada Gambar 8.



Gbr. 8 Blok Diagram Rangkaian Pengujian Daya Balik pada Sinkronisasi Generator

III. METODOLOGI

Metode eksperimen yang dilakukan adalah metode pengukuran langsung untuk mendapatkan informasi atau data-data langsung dari pengujian di Lab. Proteksi dan Distribusi. Alat yang dibutuhkan dalam eksperimen ini adalah:

1. Universal Power supply for DC Ana Three-phase current (CO3212-5U)
2. Three-phase synchronous Machines 0,8 kW (SE2662-5Q)
3. Servo Machines Test bench 1,4 kW (CO2663-6U)
4. Exciter voltage regulation unit (CO3301-5F)
5. Analog/digital multimeter (CO5127-1Z)
6. Three phase meter (CO5127-1Y)
7. Multifunction relay GCP-30 (CO3301-5Y)
8. Motor Protection switch 3 pole, 1,6-2,5A (CO3212-1P)
9. De-excitation switch (CO3301-5H)
10. Resistive load (CO3301-3F)
11. Rubber coupling sleeve, 1kW (SE2662-6A)
12. Coupling guard, 1kW (SE2662-6B)
13. Shaft And guard, 1kW (SE2662-6C)
14. Safety connection plug with tapping (jumper H)
15. Safety connection plus (jumper U)
16. Set of Safety measurement cables 4mm.

Multifunction Relay tipe GCP-30

Multifunction Relay tipe GCP-30 memiliki konstruksi seperti pada Gambar 7.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

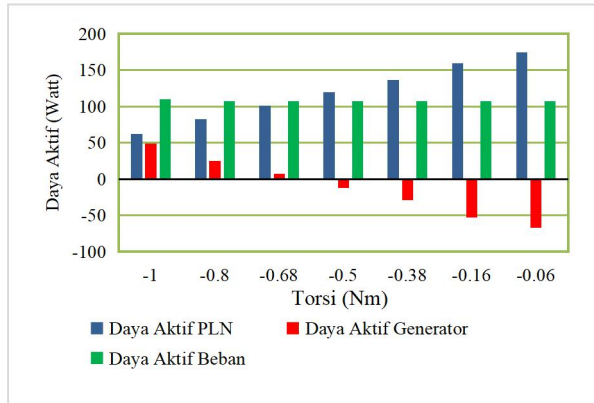
Pengujian dilakukan dengan cara mengubah salah satu parameter ketika generator berhasil disinkronisasikan pada sumber daya yang sangat besar (sumber dari PLN). Parameter yang diubah ada tiga, yaitu torsi prime mover, arus medan eksitasi, dan nilai beban yang dilayani.

A. Pengujian dengan Perubahan Parameter Torsi Prime Mover

Hasil pengujian dengan perubahan parameter torsi prime mover dapat dilihat pada Tabel 2, dan karakteristiknya dapat dilihat pada Gambar 9.

Tabel II
Hasil Pengujian dengan Perubahan Parameter Torsi *Prime Mover*

Torsi (Nm)	Daya Aktif (Watt)			Keterangan Relay
	Sistem (PLN)	Generator	Beban	
-1	62	49	110	Tidak trip
-0,8	83	25	107	Tidak trip
-0,68	101	7	107	Tidak trip
-0,5	120	-12	107	Tidak trip
-0,38	137	-29	107	Tidak trip
-0,16	160	-53	107	Tidak trip
-0,06	175	-67	107	Trip



Gbr. 9 Karakteristik Pengujian Perubahan Torsi *Prime Mover* (Torsi-Daya Aktif)

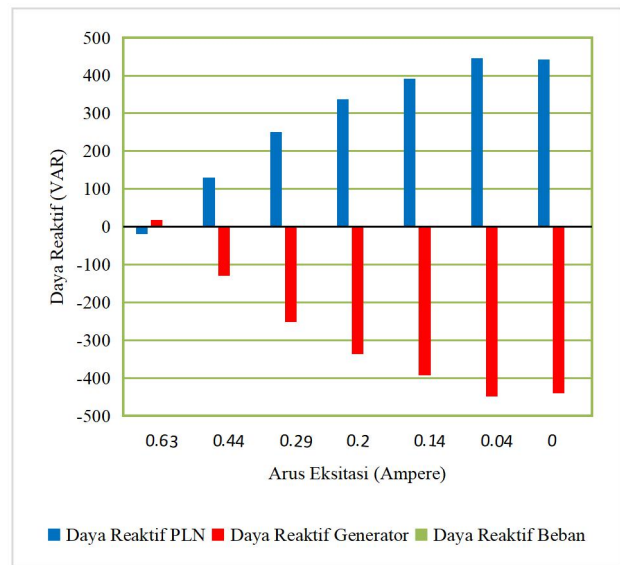
Total nilai daya aktif beban adalah penjumlahan dari nilai daya PLN dan daya generator. Nilai torsi berbanding lurus terhadap nilai daya aktif PLN dan berbanding terbalik terhadap nilai daya aktif generator. Semakin besar nilai torsi, maka semakin besar pula daya aktif yang disuplai oleh PLN. Namun daya yang disuplai oleh generator akan semakin kecil bahkan sampai aliran dayanya pun berubah arah, sehingga generator berfungsi sebagai beban listrik yang menerima aliran daya dari PLN. Ketika torsi -1 Nm, beban 110 W disuplai oleh PLN sebesar 62 W dan generator sebesar 49 W. Ketika torsi -0,8 Nm, beban 107 W disuplai oleh PLN sebesar 83 W dan generator sebesar 25 W. Ketika torsi -0,68 Nm, beban 107 W disuplai oleh PLN sebesar 101 W dan generator 7 W. Ketika torsi -0,5 Nm, beban 107 W disuplai oleh PLN sebesar 120 W dan 12 W diserap oleh generator, ketika torsi -0,38 Nm, beban 107 W disuplai oleh PLN sebesar 137 W dan 29 W diserap oleh generator, ketika torsi -0,16 Nm, beban 107 W disuplai oleh PLN sebesar 160 W dan 53 W diserap oleh generator, dan ketika torsi -0,06 Nm, beban 107 W disuplai oleh PLN sebesar 175 W dan 67 W diserap oleh generator.

B. Pengujian dengan Perubahan Parameter Arus Medan Eksitasi Generator

Hasil pengujian dengan perubahan parameter arus medan eksitasi generator dapat dilihat pada Tabel 3, dan karakteristiknya dapat dilihat pada Gambar 10.

Tabel III
Hasil Pengujian dengan Perubahan Parameter Arus Medan Eksitasi Generator

Arus Medan (A)	Daya Reaktif (VAR)		
	Sistem (PLN)	Generator	Beban
0,63	-19	19	0
0,44	130	-130	0
0,29	250	-251	0
0,2	338	-337	0
0,14	392	-392	0
0,04	446	-448	0
0	442	-441	0



Gbr. 10 Karakteristik Pengujian Perubahan Arus Medan Eksitasi (Arus Eksitasi - Daya Reaktif)

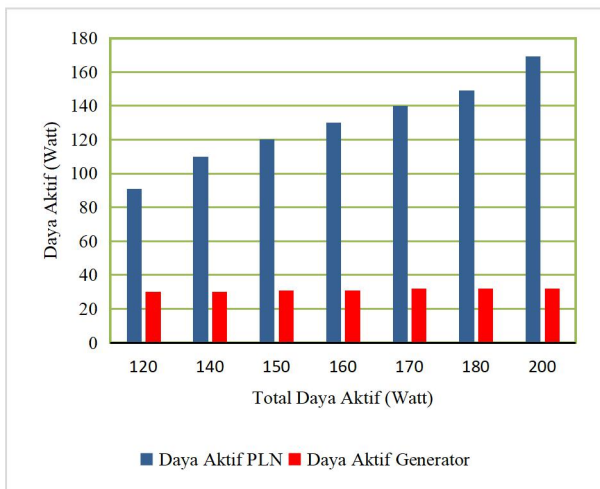
Pada pengujian arus medan eksitasi generator, semakin kecil arus searah yang mengalir ke eksitasi, maka semakin besar daya reaktif yang diserap oleh generator. Ketika arus eksitasi 0,63 A, daya reaktif yang diserap oleh generator adalah 19 VAR, ketika arus eksitasi 0,44 A, daya reaktif yang diserap oleh generator adalah 130 VAR, ketika arus eksitasi 0,29 A, daya reaktif yang diserap oleh generator adalah 251 VAR, ketika arus eksitasi 0,2 A, daya reaktif yang diserap oleh generator adalah 337 VAR, ketika arus eksitasi 0,14 A, daya reaktif yang diserap oleh generator adalah 392 VAR, ketika arus eksitasi 0,04 A, daya reaktif yang diserap oleh generator adalah 448 VAR, dan ketika arus eksitasi 0 A, daya reaktif yang diserap oleh generator adalah 441 VAR.

C. Pengujian Dengan Perubahan Nilai Beban

Hasil pengujian dengan perubahan parameter beban yang dilayani dapat dilihat pada Tabel 4, dan karakteristiknya dapat dilihat pada Gambar 11.

Tabel IV
Hasil Pengujian dengan Perubahan Parameter Beban yang dilayani

Daya Aktif (Watt)		
Sistem (PLN)	Generator	Beban
91	30	120
110	30	140
120	31	150
130	31	160
140	32	170
149	32	180
169	32	200



Gbr. 11 Karakteristik Pengujian Perubahan Nilai Beban (Total Daya Aktif - Daya Aktif)

Total daya aktif yang dilayani bernilai 120 W, maka PLN akan mensuplai daya aktif sebesar 91 W dan generator sebesar 30 W. Ketika total daya aktif yang dilayani bernilai 140W, maka PLN akan mensuplai daya aktif sebesar 110 W dan generator sebesar 30 W, ketika total daya aktif yang dilayani bernilai 150 W, maka PLN akan mensuplai daya aktif sebesar 120 W dan generator sebesar 31 W, ketika total daya aktif yang dilayani bernilai 160 W, maka PLN akan mensuplai daya aktif sebesar 130W dan generator sebesar 31 W, ketika total daya aktif yang dilayani bernilai 170W, maka PLN akan mensuplai daya aktif sebesar 140 W dan generator sebesar 32 W, ketika total daya aktif yang dilayani bernilai 180 W, maka PLN akan mensuplai daya aktif sebesar 149 W dan generator sebesar 32 W, dan terakhir ketika total daya aktif yang dilayani bernilai 200 W, maka PLN akan mensuplai daya aktif sebesar 169 W dan generator sebesar 32 W.

V. KESIMPULAN

Dari hasil analisis di atas dapat diambil kesimpulan:

1. Pada proses sinkronisasi generator terhadap jaringan daya yang sangat besar, apabila parameter torsi generator diubah maka akan mempengaruhi pembagian daya aktif pada masing-masing sumber daya. Apabila nilai torsi terlalu besar, maka akan menyebabkan generator tidak lagi menyuplai daya aktif, melainkan menyerap daya aktif tersebut.
2. Pada proses sinkronisasi generator terhadap jaringan daya yang sangat besar, apabila tegangan atau arus eksitasi generator diubah, maka akan mempengaruhi terhadap daya reaktif generator. Semakin kecil eksitasinya, maka semakin besar generator menyerap daya reaktif. Namun, daya aktifnya akan bernilai tetap atau konstan.
3. Pada proses sinkronisasi generator terhadap jaringan daya yang sangat besar, apabila jumlah beban berubah, maka hanya berpengaruh terhadap jaringan daya yang sangat besar. Sedangkan pada daya generator akan bernilai tetap atau konstan.
4. Pada pengujian perubahan torsi generator, relay akan trip jika di set -8% (-64 W) ketika torsi bernilai -0,06 karena muncul daya balik sebesar - 67 W.

REFERENSI

- [1] Silaban, A. (2009). Studi tentang Penggunaan Recloser pada Sistem Jaringan Distribusi 20 KV. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- [2] Anthony, Z. (2009). "Mesin Listrik AC". Institut Teknologi Padang: Padang.
- [3] Tchslavski, G.V. (2008). "Synchronous Machines". Lecture 7. ELEN 3441 Fundamentals of Power Engineering. Beaumont: Texas.
- [4] Kardilla, M. S. (2011). Tugas Akhir Sistem Proteksi Pembangkit Jenis Rele Daya Balik (Reverse Power Relay/32). Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat, Padang.
- [5] Aman, M. M., Jasmon, G. B., Khan, Q. A., Bakar, A. H. B. A., & Jamian, J. J. (2012, June). Modeling and simulation of reverse power relay for generator protection. In 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia (pp. 317-322). IEEE.
- [6] Woodward Governor Company. (2007). "GCP-30 Series Genset Control". Woodward SEG GmbH & Co. KG. Kempen, Germany.