

Kontrol Tegangan *Self-Excited Induction Generator* dengan *Electronic Load Controller* Terkontrol PID-GA

Ermanu Azizul Hakim^{*1}, Rahayu Pandunengsih², Diding Suhardi³, Novendra Setyawan⁴

^{1,2,3,4}Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Malang, Indonesia

e-mail: ¹ermanu@umm.ac.id, ²rpandunengsih@gmail.com, ³diding@umm.ac.id

⁴novendra@umm.ac.id

Abstrak

Generator induksi dalam operasinya memerlukan daya reaktif yang harus diumpangkan secara eksternal. Salah satu jenis generator induksi yaitu SEIG daya reaktifnya dipasok oleh bank kapasitor yang terhubung di terminal generator. SEIG banyak diminati untuk konversi energi di area terpencil, namun SEIG memiliki kelemahan utama yaitu pengaturan tegangan yang buruk dalam berbagai kondisi beban. Untuk mengatasi masalah tersebut digunakanlah ELC dengan kontrol PID yang dioptimasi menggunakan algoritma genetika agar dapat menjaga kestabilan tegangan ketika beban bervariasi. Hasil pengujian menunjukkan sistem SEIG menggunakan ELC dengan kontrol PID-GA dapat menjaga tegangan stabil sesuai standar dengan toleransi tegangan sebesar 10 % ketika terjadi perubahan beban. Penambahan GA untuk menentukan nilai parameter PID menghasilkan respon yang lebih baik dengan selisih nilai overshoot ketika start awal sebesar 70,48%, ketika terjadi penurunan beban di detik ke-5 sebesar 44,3% dan di detik ke-10 saat terdapat kenaikan beban sebesar 2 kW memiliki selisih 5,96% dibandingkan sistem dengan kontrol PID tanpa optimasi GA.

Kata kunci— Kontrol Tegangan, Generator Induksi Bereksitasi Mandiri, Pengontrol Beban Elektronik, Algoritma Genetika

Abstract

Induction generator operation requires reactive power with external contactor. One of induction generator types, SEIG reactive power supplied by capacitor bank connected to generator terminal. SEIG is alternative energy conversion in small area or rural, SEIG has the main disadvantage of poor voltage regulation under various load conditions. ELC combine PID control which is optimized using Genetic Algorithm in order to maintain the stability of the voltage when the load varies. The result shows the SEIG system using ELC with PID-GA control worked to stable voltage in accordance with the standard with voltage tolerance of 10% when load change. The addition of GA to determine the value of the PID parameter where response system better with difference overshoot value start is 70.48%, when decrease load in 5 second by 44.3% and in the 10 second when increase load of 2 kW is 5.96% compared system with PID control without GA optimization.

Keywords— Voltage Control, Self-Excited Induction Generator, Electronic Load Controller, Genetic Algorithm.

1. PENDAHULUAN

Generator induksi akhir-akhir ini semakin banyak digunakan karena memiliki fitur yang relative lebih menguntungkan dibandingkan jenis generator lain. Untuk operasinya, generator induksi memerlukan daya reaktif yang harus diumpangkan secara eksternal. Dalam aplikasinya generator induksi terbagi dua jenis, yaitu *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) dan *Self-Excited Induction Generator* (SEIG). Pada SEIG, daya reaktifnya dipasok oleh bank kapasitor

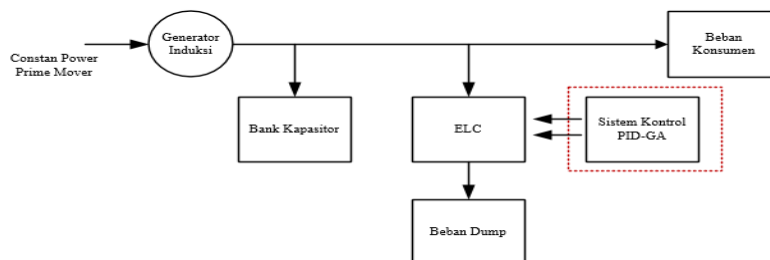
yang terhubung di terminal generator [1]. Untuk konversi energy di area terpencil yang terisolasi SEIG lebih diminati. Namun kelemahan utama dari SEIG adalah pengaturan tegangan dan frekuensi yang buruk dalam berbagai kondisi beban, sehingga dibutuhkan sistem yang dapat mempertahankan tegangan agar tetap konstan pada beban bervariasi. Biasanya, *Electronic Load Controller* (ELC) merupakan perangkat yang digunakan untuk masalah tersebut [2][3]. *Electronic Load Controller* (ELC) merupakan sistem sederhana yang terdiri dari sistem *rectifier* dan *chopper* tidak terkontrol dengan beban dump. Daya dalam beban dump dikontrol melalui *duty cycle* pada *chopper* untuk menjaga daya tetap konstan.

Penelitian sebelumnya [4], dilakukan analisis dan desain ELC untuk SEIG yang cocok untuk pembangkit listrik bersistem *stand-alone* dengan daya input konstan. ELC yang diusulkan terdiri dari *rectifier* dan *chopper* yang tidak terkontrol dengan beban dump seri. Prosedur desain untuk menghitung nilai berbagai komponen ELC juga disajikan untuk berbagai SEIG. Dan disimpulkan bahwa ELC SEIG yang dikembangkan dapat mempertahankan tegangan konstan pada frekuensi konstan meskipun ada variasi beban konsumen. Namun dalam penelitian tersebut ELC belum dilengkapi dengan suatu teknik pengontrolan. Sedangkan dalam penelitian [2], mengontrol tegangan dan frekuensi pada SEIG agar tetap konstan dengan menggunakan ELC. Hasilnya, dengan menggunakan ELC pada SEIG tegangan dan frekuensi dapat konstan walaupun terjadi perubahan beban. Namun disini hanya menggunakan kontroler PID, belum menggunakan teknik pengontrolan PID dengan menggunakan tuning algoritma untuk menentukan nilai K_p , K_i , dan K_d .

Performansi dari penelitian sebelumnya dapat ditingkatkan lagi dengan cara menambahkan algoritma heuristik untuk tuning nilai PID. Beberapa algoritma heuristic yang telah diimplementasikan diantaranya PSO [5][6], Jaya-Algorithm [7], dan Genetic Algorithm (GA) [8]. Pada penelitian ini akan menambahkan GA sebagai alternative metode dalam meningkatkan performansi ELC demi mempertahankan tegangan keluaran SEIG tetap konstan walaupun beban bervariasi. Metode ini dipilih karena algoritma genetika banyak dipergunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi. Kontroler algoritma genetika memiliki *overshoot* minimum, sehingga penggunaan algoritma genetika dapat menunjukkan performa yang baik dalam berbagai kondisi.

2. METODE PENELITIAN

Sistem kontrol tegangan *Self-Excited Induction Generator* (SEIG) menggunakan algoritma genetika secara umum dapat dilihat pada Gambar 1. Terdiri dari generator induksi, beban komplemen, beban konsumen dan sistem kontrol tegangan. SEIG tiga fase dihubungkan secara delta yang digerakkan oleh *prime mover* dengan nilai konstan. Bank kapasitor digunakan sebagai penyuplai daya reaktif generator yang dipasang pada terminal keluaran SEIG dengan terhubung delta. Daya yang dibutuhkan oleh beban konsumen suatu saat akan berubah-ubah. Saat itu terjadi, maka ELC akan mengalihkan kelebihan daya tersebut ke beban dump. Namun saat tidak terdapat kelebihan daya, maka tidak ada pengalihan beban ke beban dump. Algoritma genetika digunakan untuk tuning nilai PID dalam mengatasi fluktuasi tegangan karena perubahan beban, *output* dari generator ke konsumen akan disensor oleh sebuah sensor tegangan dan di umpan balikkan ke *set point* sebagai nilai *error*. Nilai *error* akan menjadi input dari *controller* PID.



Gambar 1. Skema Perancangan Sistem Kontrol Tegangan

2.1 Model Generator

Pemodelan generator berkapasitas 7.5 kW yang digunakan adalah mesin induksi yang dioperasikan sebagai generator. Data yang ditetapkan sebagai nilai parameter generator induksi pada penelitian ini merupakan data dari MATLAB. Tabel 1 adalah parameter generator induksi yang digunakan.

Tabel 1 Parameter Generator Induksi

Parameter	Value
Nominal Power (kW)	7.5
Voltage (line-to-line) (V)	400
Frequency (Hz)	50
Stator resistance (ohm)	0.7384
Rotor resistance (ohm)	0.7402
Stator inductance (H)	0.003045
Rotor inductance (H)	0.003045
Mutual inductance (H)	0.1241
Inertia ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.0343
Friction factor (N.m.s)	0.000503
Pole pairs	2

2.2 Kapasitor Bank

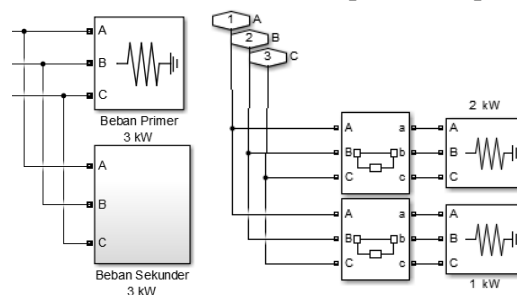
Kapasitor eksitasi yang digunakan adalah kapasitor tiga fasa yang terhubung delta. Kapasitor eksitasi yang digunakan akan bernilai tetap saat simulasi dilakukan. Setelah dilakukan perhitungan [9], besar nilai eksitasi minimum tersebut digunakan dalam simulasi, namun nilai tersebut belum dapat mencukupi daya rektif yang dibutuhkan oleh generator induksi. Untuk menyelaraskan reaktansi magnetic, maka penetapan nilai kapasitor eksitasi dilakukan dengan menggunakan metode *trial and error* ditunjukkan dalam Tabel 2. Sehingga pada sistem generator induksi 3 fasa dengan beban 6 kW didapat nilai kapasitor eksitasi yang sesuai yaitu sebesar 3700 Var.

Tabel 2. Penentuan Nilai Kapasitor Beban 6 kW

Kapasitor Eksitasi (Var)	Tegangan RMS (Volt)	Keterangan
1500	503	Vrms tinggi, > 400 Volt
2500	421	Vrms tinggi, > 400 Volt
3700	395	Vrms mendekati 400 Volt
5700	350	Vrms rendah, < 400 Volt

2.3 Perancangan Pembebanan

Beban yang digunakan merupakan beban resistif sebesar 6 kW. Skema peralihan daya dilakukan menggunakan *breaker*. Dalam hal ini, *breaker* berfungsi dalam mengatur waktu penambahan dan pelepasan daya. Pemodelan beban dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. (a) Pemodelan Beban Primer dan Sekunder (b) Subsistem dari Beban Sekunder

Daya aktif terbagi menjadi dua, yaitu daya utama sebesar 3 kW yang merupakan daya permanen dan tidak boleh dilepas dari sistem, serta 3 kW menjadi daya yang berubah-ubah. Daya yang berubah-ubah ini terhubung dengan *breaker* yang sudah diatur waktu untuk pelepasan dan penambahan dayanya. Skema pengurangan dan penambahan daya dalam

pengujian sistem terjadi di detik ke-5 dan ke-10. Pelepasan daya terjadi pada detik ke-5 sebesar 3 kW dan kemudian pada detik ke-10 terjadi penambahan daya sebesar 2 kW.

2.4 Perancangan ELC

Electronic Load Controller merupakan suatu alat kontrol yang dipakai dengan tujuan untuk melepaskan sisa daya listrik yang dihasilkan oleh generator. Prinsip dasar ELC adalah daya listrik pada generator harus konstan meskipun beban konsumen dapat bervariasi dengan cara yang tidak bisa dipresiksi dari nol hingga nilai beban penuh dari sistem. Apabila terjadi perubahan beban konsumen, beban *ballast* disesuaikan sehingga total beban pada generator tetap konstan seperti [10]:

$$P_{out} = P_c + P_d \quad (1)$$

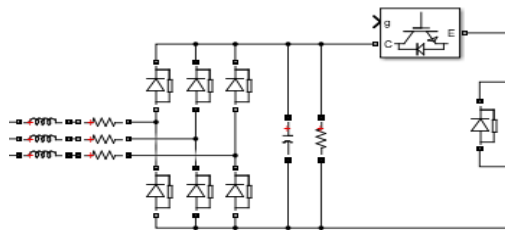
Di mana :

P_{out} = Daya *output* generator

P_c = Daya beban konsumen

P_d = *Dump Load Power*

Electronic Load Controller (ELC) yang digunakan telah ditunjukkan dalam gambar 3.

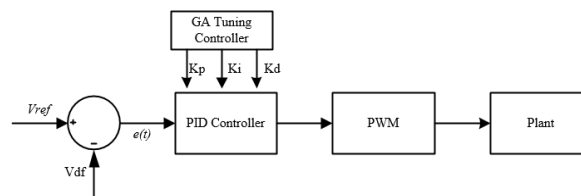


Gambar 3. Rangkaian *Electronic Load Controller* (ELC)

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 3, ELC yang digunakan terdiri dari jembatan penyearah diode yang tidak terkontrol, sirkuit kontrol dan juga saklar *solid-state* (IGBT) yang beroperasi sebagai *chopper* [11]. Tegangan keluaran generator diumpankan ke sirkuit ELC yang terdiri dari *diode rectifier* melalui nilai induktansi sumber yang kecil dan resistansi. Terdapat kapasitor penyangga dihubungkan di *output rectifier* untuk menyaring riak dari tegangan dc.

2.5 Perancangan PID-GA

Pada sistem kontrol PID ada tiga jenis aksi kontrol, diantaranya yaitu aksi kontrol proporsional, integral dan *derivative* dimana masing-masing memiliki keunggulan tersendiri. Seperti kontrol proporsional memiliki keunggulan *rise time* yang cepat, integral unggul dalam memperkecil *error* dan keunggulan dari kontrol *derivative* adalah meredam *error* atau *overshoot/undershoot* [12]. Kontrol PID digunakan untuk mempertahankan nilai nominal tegangan generator saat terjadi perubahan penggunaan daya konsumen. Gambar 4 merupakan pemodelan kontroler PID.



Gambar 4. Blok Diagram Konsep Pengontrolan menggunakan PID

Fluktuasi tegangan akibat adanya perubahan penggunaan daya pada konsumen ditangani kontroler PID dinilai cukup berpengaruh. Nilai parameter PID, $K_p = 2, K_i = 0,3$ dan $K_d = 0,5$ ditentukan dengan metode *trial and error*.

Penelitian ini algoritma genetika akan dipakai dalam menentukan nilai PID. Tujuan dari penentuan nilai parameter K_p, K_i dan K_d ini adalah untuk mengeluarkan hasil pengontrolan yang

maksimal [13]. Performa dari perancangan sistem kontrol yang bagus sangat bergantung dari seberapa baik dalam menentukan parameter awalnya. Tabel 3 merupakan parameter awal dari algoritma genetika.

Tabel 3. Parameter GA

Parameter	Nilai
Population size	30
Initial range	[0; 10]
Selection	Tournament
Mutation	Uniform
Crossover function	Scattered
Generation	50
Stall Generation	5

Perhitungan nilai fitness dari setiap kromosom sebagai pemilah fungsi objektif adalah suatu hal yang sangat vital. ITAE digunakan untuk menghitung indeks performa pada kontroler yang didefinisikan dalam Persamaan 4 [8].

$$ITAE = \int_0^T t \cdot |r(t) - y(t)| dt \quad (2)$$

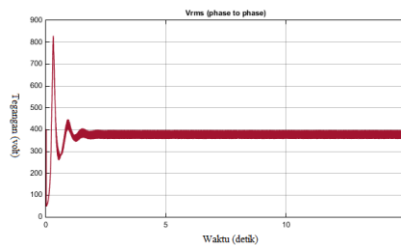
Dimana:

$r(t)$ = input referensi
 $y(t)$ = variable terukur

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

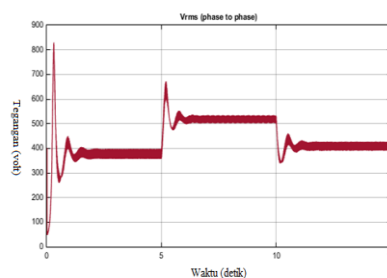
3.1 Pengujian Tanpa ELC Dengan Beban Konstan dan Berubah

Hasil tegangan *output* dari pengujian sistem dasar *Self-Excited Induction Generator* menggunakan beban resistif konstan sebesar 6000 watt dengan konfigurasi *star* tanpa ELC dapat dilihat dalam Gambar 5.



Gambar 5. Tegangan Output Sistem SEIG tanpa ELC dengan Beban Konsumen Konstan

Gambar 5 tersebut menunjukkan hasil dari pengujian sistem dasar dapat menghasilkan tegangan *output* generator senilai 395,5 V. Hal ini disebabkan oleh kinerja generator yang stabil sehingga bisa mempertahankan tegangan sistem. Kemudian, hasil dari pengujian sistem dasar SEIG tanpa dilengkapi dengan ELC ketika diuji dengan perubahan pada beban dapat dilihat dalam Gambar 6.

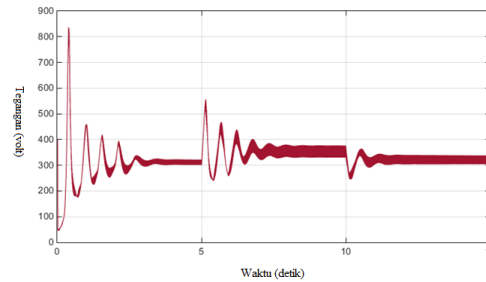


Gambar 6. Tegangan Output Sistem SEIG tanpa ELC dengan Beban Konsumen Berubah-ubah

Terlihat dalam Gambar 6 perubahan penggunaan daya beban konsumen mengakibatkan terjadinya fluktuasi tegangan. Ketika ada penurunan penggunaan daya beban pada detik ke-5 sebesar 50%, tegangan keluaran SEIG mengalami kenaikan dari yang sebelumnya 395,5 V menjadi 504,7 V. Selanjutnya, pada detik ke-10 ketika peningkatan daya beban sebesar 2 kW terjadi setelah adanya penurunan, respon tegangan keluaran generator turun menjadi 394,5 V.

3.2 Pengujian ELC Terkontrol PID

Dalam pengujiannya perubahan daya beban konsumen dilakukan dua tahap perubahan. Tahap pertama terjadi penurunan sebesar 50% dan yang kedua mengalami kenaikan sebesar 2 kW. Gambar 7 merupakan hasil pengujian sistem SEIG dengan kontrol PID pada ELC.



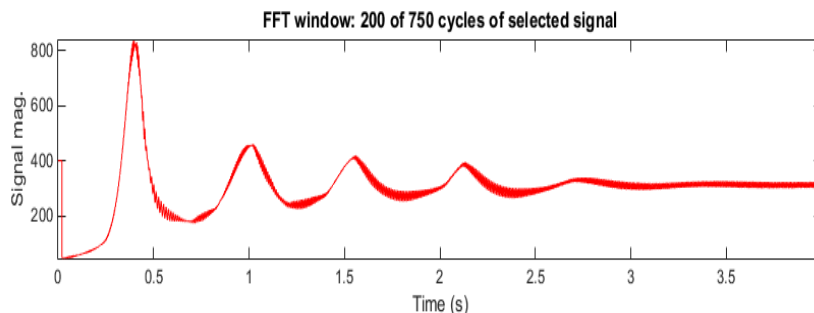
Gambar 7. Tegangan Keluaran saat Beban Konsumen Berubah-ubah dengan ELC terkontrol PID

Nilai parameter PID yang digunakan telah ditentukan dengan metode *trial and error*. Nilai K_p , K_i , dan K_d masing-masing sebesar 2, 0.3 dan 0.5. Dari Gambar 7 tersebut dapat dilihat bahwa pada saat terjadi penurunan penggunaan daya konsumen pada detik ke-5 terlihat bahwa tegangan yang dihasilkan sebesar 332 V. Selanjutnya setelah terjadi penurunan, pada detik ke-10 daya konsumen mengalami kenaikan sebesar 2 kW tegangan keluaran generator turun menjadi 318 V. Ketika terjadi perubahan pada beban terlihat tegangan keluaran generator tidak stabil karena melewati standar ketentuan yang telah ditetapkan untuk tegangan yaitu sebesar 10%. Tabel 4 menunjukkan respon transien tegangan keluaran generator ketika menggunakan ELC dengan kontrol PID.

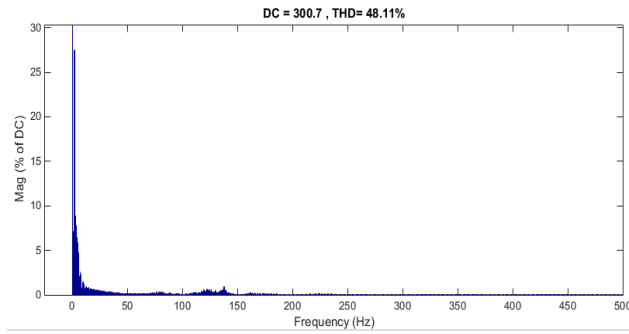
Tabel 4. ELC Terkontrol PID dengan Beban Berubah

Parameter	Nilai start awal	Nilai detik ke-5	Nilai detik ke-10
Rise Time (s)	4.5103e-17	0.015	0.017
Settling Time (s)	4.996	9.999	14.999
Overshoot (%)	173.090	67.707	17.614
Peak (rad/s)	836.678	556.248	372.247
Peak Time (s)	0.394	5.147	10.005

Berdasarkan sinyal yang didapat dalam Gambar 7 ketika beban 6 kW diambil sampel untuk analisa FFT sebanyak 200 siklus yang dimulai dari detik ke 0 dengan frekuensi fundamental 50 Hz dan maksimum frekuensi 500 Hz ditunjukkan Gambar 8. Mengacu pada Gambar 9 diketahui THD yang dihasilkan sebesar 48,11%.

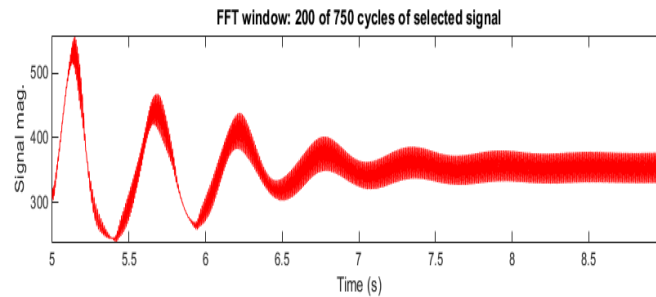


Gambar 8. Grafik Magnituda Sinyal Tegangan Beban 6 kW dengan Kontrol PID

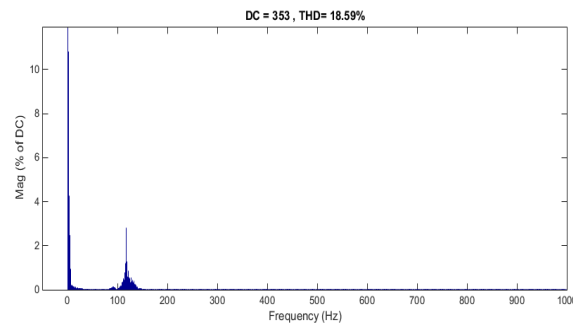


Gambar 9. Spektrum THD dari Sinyal Tegangan Beban 6 kW dengan Kontrol PID

Kemudian ketika beban 3 kW, seperti yang ditunjukkan Gambar 10 diambil sampel untuk analisa FFT sebanyak 200 siklus yang dimulai dari detik ke 5 dengan frekuensi fundamental dan maksimum frekuensi yang sama. Mengacu pada Gambar 11 diketahui THD sebesar 18,59%.

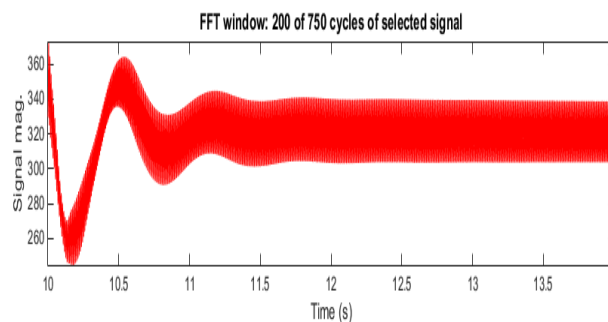


Gambar 10. Grafik Magnituda Sinyal Tegangan Beban 3 kW dengan Kontrol PID

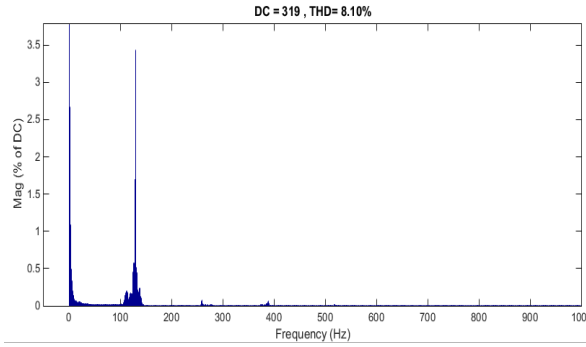


Gambar 11. Spektrum THD dari Sinyal Tegangan Beban 3 kW dengan Kontrol PID

Selanjutnya ketika beban 3 kW diambil sampel untuk analisa FFT sebanyak 200 siklus yang dimulai dari detik ke 10 dengan frekuensi fundamental dan maksimum frekuensi yang sama ditunjukkan oleh Gambar 12. Mengacu pada Gambar 13 diketahui THD sebesar 8,10%.



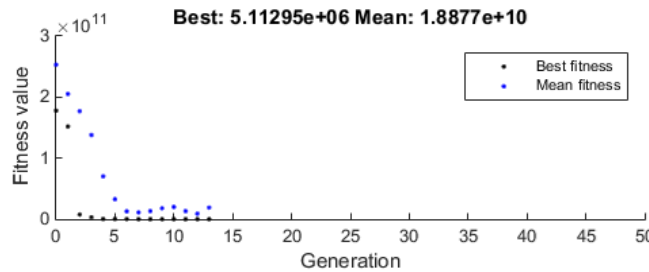
Gambar 12. Grafik Magnituda Sinyal Tegangan Beban 5 kW dengan Kontrol PID



Gambar 13. Spektrum THD dari Sinyal Tegangan Beban 5 kW dengan Kontrol PID

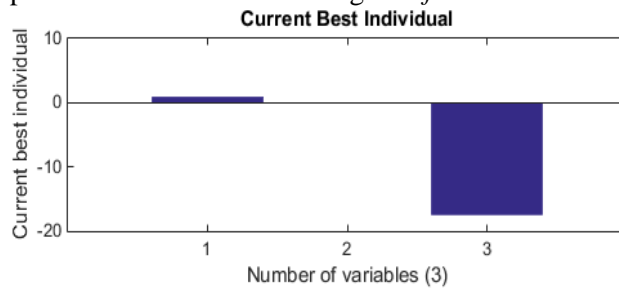
3.3 Pengujian ELC Terkontrol PID-GA

Pada hasil pengujian sistem SEIG menggunakan ELC terkontrol PID dengan optimalisasi berbasis algoritma genetika, didapat ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Grafik Nilai Mean Fitness dan Best Fitness

Dalam Gambar 14, *best fitness* merupakan plot yang menunjukkan nilai *fitness* terbaik di setiap generasi dan *mean fitness* merupakan plot individu dengan nilai fungsi *fitness* terbaik di setiap generasi. Dalam bab sebelumnya telah dijelaskan pengaturan algoritma genetika di *optimtool* MATLAB. Terlihat digambar 14 optimasi dihentikan pada iterasi ke 13, ini dikarenakan rata-rata perubahan nilai fitness kurang dari *function tolerance*.



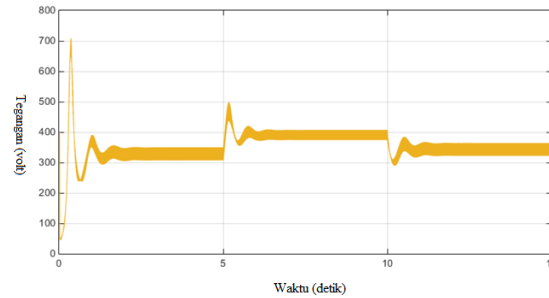
Gambar 15. Parameter Nilai K_p , K_d dan K_i dengan Optimasi GA

Gambar 15 akan diperjelas dengan Tabel 5, di mana merupakan nilai PID terbaik yang didapat setelah dioptimasi menggunakan algoritma genetika.

Tabel 5. Nilai Parameter PID dengan Optimasi GA

K_p	K_i	K_d
0.93	-17.507	0.082

Gambar 16 merupakan hasil pengujian sistem SEIG menggunakan nilai PID yang didapatkan melalui optimalisasi dengan algoritma genetika.



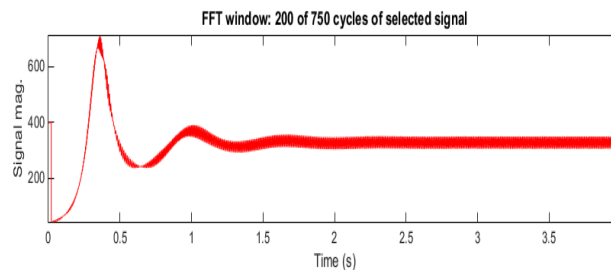
Gambar 16. Tegangan Keluaran saat Beban Konsumen Berubah-ubah dengan ELC Terkontrol PID-GA

Dalam gambar 16 tersebut terlihat saat terjadi penurunan penggunaan daya beban konsumen pada detik ke-5 tegangan yang dihasilkan senilai 403,5 V. Kemudian pada detik ke-10 mengalami kenaikan penggunaan daya beban konsumen sebesar 2 kW tegangan keluaran yang dihasilkan senilai 363 V. Tegangan yang dihasilkan cukup stabil karena masih pada *range* yang diizinkan.

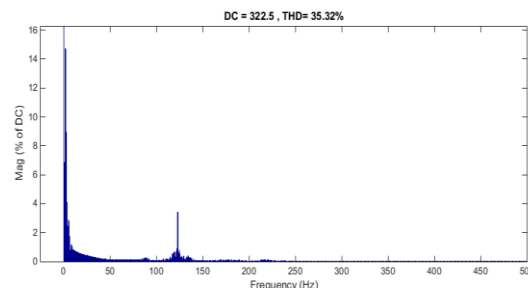
Tabel 6. ELC Terkontrol PID-GA pada Beban Berubah

Parameter	Nilai start awal	Nilai detik ke-5	Nilai detik ke-10
Rise Time (s)	2.7756e-17	0.032	0.012
Settling Time (s)	4.998	9.999	14.999
Overshoot (%)	102.609	23.409	11.655
Peak (rad/s)	708.864	498.540	406.011
Peak Time (s)	0.362	5.171	10.001

Berdasarkan sinyal yang didapat dalam Gambar 16 yang merupakan hasil pengujian sistem menggunakan kontrol PID-GA, saat beban 6 kW diambil sampel untuk analisa FFT sebanyak 200 siklus yang dimulai dari detik ke 0 seperti yang ditunjukkan Gambar 17 dengan frekuensi fundamental 50 Hz dan maksimum frekuensi 500 Hz. Mengacu pada Gambar 18 diketahui THD sebesar 35,32%.



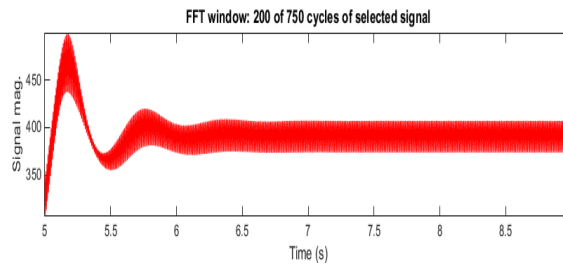
Gambar 17. Grafik Magnituda Sinyal Tegangan Beban 6 kW dengan Kontrol PID-GA



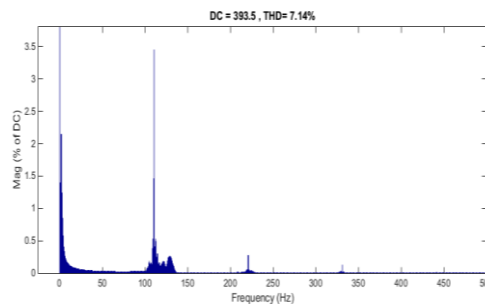
Gambar 18. Spektrum THD dari Sinyal Tegangan Beban 6 kW dengan Kontrol PID-GA

Kemudian ketika beban 3 kW diambil sampel untuk analisa FFT sebanyak 200 siklus seperti yang ditunjukkan Gambar 19 yang dimulai dari detik ke 5 dengan frekuensi fundamental

50 Hz dan maksimum frekuensi 500 Hz. Mengacu pada Gambar 20 diketahui THD sebesar 7,14%.

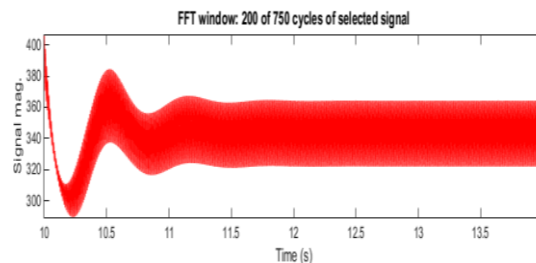


Gambar 19. Grafik Magnituda Sinyal Tegangan Beban 3 kW dengan Kontrol PID-GA

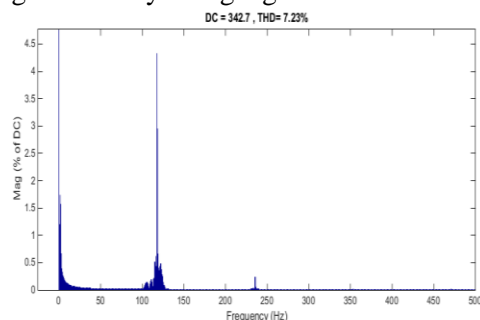


Gambar 20. Spektrum THD dari Sinyal Tegangan Beban 3 kW dengan Kontrol PID-GA

Selanjutnya ketika beban 5 kW diambil sampel untuk analisa FFT sebanyak 200 siklus yang dimulai dari detik ke 10 dengan frekuensi fundamental 50 Hz dan maksimum frekuensi 500 Hz ditunjukkan oleh Gambar 21. Mengacu pada Gambar 22 diketahui THD yang dihasilkan sebesar 7,23%.

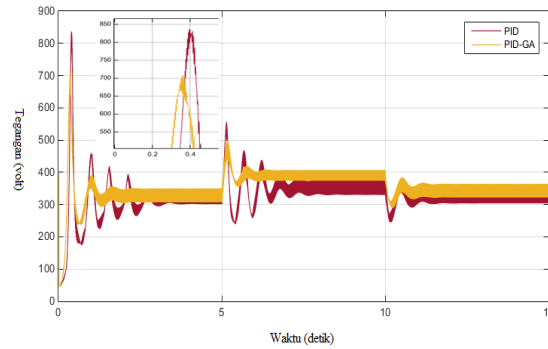


Gambar 21. Grafik Magnituda Sinyal Tegangan Beban 5 kW dengan Kontrol PID-GA



Gambar 22. Spektrum THD dari Sinyal Tegangan Beban 5 kW dengan Kontrol PID-GA

Hasil dari pengujian sistem ELC menggunakan kontrol PID dan ELC dengan kontrol PID-GA yang sudah dilakukan dibandingkan untuk mengetahui performa dari kedua kontroler. Gambar 23 merupakan perbandingan hasil sistem menggunakan ELC dengan kontrol PID dan PID-GA.



Gambar 23. Perbandingan Tegangan Keluaran saat Beban Konsumen Berubah-ubah dengan ELC terkontrol PID dan PID-GA

Dari gambar 23 yang merupakan perbandingan dari tegangan keluaran generator menggunakan ELC terkontrol PID dan PID-GA dapat dilihat bahwa keduanya menunjukkan respon yang berbeda. Terlihat bahwa pengaruh terhadap respon transien merupakan kelebihan dari optimalisasi algoritma genetika karena respon yang lebih baik ditunjukkan oleh sistem yang menggunakan PID-GA. Pada saat *start* awal maupun ketika terjadi perubahan beban terlihat bahwa *overshoot* yang dihasilkan oleh sistem dengan kontrol PID-GA lebih kecil dibandingkan dengan sistem yang menggunakan kontrol PID. Respon dari sistem yang menggunakan kontrol PID-GA juga terlihat lebih cepat dalam mencapai keadaan mantap daripada kontrol PID. Untuk dapat lebih jelas mengetahui perbandingan respon kedua kontroler tersebut dapat dilihat dalam Tabel 7.

Tabel 7. ELC Terkontrol PID dan PID-GA dengan Beban Berubah

Param	PID			PID-GA		
	Start awal	Detik ke-5	Detik ke-10	Start awal	Detik ke-5	Detik ke-10
T_r (s)	4.5103 e-17	0.015	0.017	2.7756 e-17	0.032	0.012
T_s (s)	4.996	9.999	14.999	4.998	9.999	14.999
M_p (%)	173.09 0	67.707	17.614	102.60 9	23.409	11.655
Peak (rad/s)	836.67 8	556.24 8	372.247	708.86 4	498.54 0	406.01 1
Peak Time(s)	0.394	5.147	10.005	0.362	5.171	10.001
ITAE	2.0669e+11			5.1138e+06		

Berdasarkan Tabel 7 di atas dapat dilihat bahwa respon sistem yang menggunakan kontrol PID yang dioptimalisasi menggunakan algoritma genetika menghasilkan nilai *overshoot* dan *error* lebih kecil dibanding yang menggunakan kontrol PID. Saat *start* awal sistem dengan kontrol PID berbasis GA memiliki *overshoot* 70% lebih kecil dibandingkan sistem dengan kontrol PID begitu pula ketika terjadi perubahan penggunaan daya beban pada konsumen. ITAE yang dihasilkan dari pengujian dengan adanya perubahan beban juga jauh lebih kecil.

4. KESIMPULAN

Pada makalah ini desain sistem kontrol tegangan pada SEIG dengan PID^{GA} telah diusulkan. Berdasarkan pengujian Sistem SEIG menggunakan ELC dengan kontrol PID-GA lebih baik daripada sistem dengan kontrol PID dalam menjaga agar tegangan dipertahankan 380V hingga 400V dengan toleransi tegangan sebesar 10% ketika terjadi perubahan penggunaan daya beban pada konsumen. Penambahan GA untuk menentukan nilai parameter PID menghasilkan respon transien yang lebih baik dengan nilai *overshoot* dan *error* dalam ITAE lebih kecil dibandingkan dengan kontrol PID. Respon dari sistem yang menggunakan kontrol PID-GA juga terlihat lebih cepat dalam mencapai keadaan mantap daripada kontrol PID.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. A. Farret and M. G. Simoes, *Integation of Alternative Sources of Energy*. 2006.
- [2] B. Singh, S. Member, S. S. Murthy, L. S. Member, and S. Gupta, "Transient Analysis of Self-Excited Induction Generator With Electronic Load Controller (ELC) Supplying Static and Dynamic Loads," vol. 41, no. 5, pp. 1194–1204, 2005.
- [3] L. Goyal, O. M. P. Mahela, and S. Goyal, "A Survey Of Self-Excited Induction Generator Research," vol. 2, no. 1, pp. 31–40, 2013.
- [4] B. Singh, S. S. Murthy, and S. Gupta, "Analysis and implementation of an electronic load controller for a self-excited induction generator."
- [5] N. Setyawan, E. A. Hakim, and Z. Zulfatman, "Signature PSO: Modified Particle Swarm Optimization Dengan Fuzzy Signature Dan Implementasi Pada Optimalisasi Kendali LQR," *MULTITEK Indones.*, vol. 13, no. 2, pp. 29–38, 2020.
- [6] N. Setyawan, N. Mardiyah, K. Hidayat, and Z. Has, "Object Detection of Omnidirectional Vision Using PSO-Neural Network for Soccer Robot," in *2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, 2018, pp. 117–121.
- [7] N. Setyawan, M. Nasar, and N. Mardiyah, "Jaya-Neural Network for Server Room Temperature Forecasting Through Sensor Network," in *2019 International Electronics Symposium (IES)*, 2019, pp. 428–431.
- [8] T. O. Mahony, C. J. Downing, and K. Fatla, "Genetic algorithms for PID parameter optimisation : minimising error criteria," *Process Control Instrum.*, pp. 26–28, 2000.
- [9] R. Harahap, "Analisis Dan Simulasi Pengaturan Tegangan Generator Induksi Berpenguatan Sendiri Menggunakan Static Synchronous Compensator (STATCOM)," no. 1, pp. 83–88, 2016.
- [10] A. Kumar and V. K. Sharma, "Implementation of Self Excited Induction Generator (Seig) With Igbt Based Electronic Load Controller (Elc) in Wind Energy Systems," no. Im, pp. 188–193, 2013.
- [11] B. Singh, S. Member, S. S. Murthy, L. S. Member, and S. Gupta, "Analysis and Design of Electronic Load Controller for Self-Excited Induction Generators," vol. 21, no. 1, pp. 285–293, 2006.
- [12] E. C. Wijaya, "Sistem Kontrol Generator Induksi Dengan Beban Komplemen Berbasis Pid Pada Pembangkit Listrik Mikrohidro," Skripsi, Universitas Negeri Jember, 2015.
- [13] E. H. Putra, Z. Has, and M. Effendy, "Robust Adaptive Sliding Mode Control Design with Genetic Algorithm for Brushless DC Motor," *Proceeding Electr. Eng. Comput. Sci. Informatics*, vol. 5, no. 5, pp. 330–335, 2018.