

OPTIMASI PARAMETER SISTEM EKSITASI UNTUK KONDENSOR SINKRON SEBAGAI PENGATUR TEGANGAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU (PLTB)

Maman Suryawan^{*)}, Tedjo Sukmadi^{*)}, Susatyo Handoko^{*)}

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH. Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}Email : mamansuryawan@gmail.com, tejo@elektro.ft.undip.ac.id, susatyo73@gmail.com

Abstrak

Teknologi pembangkit listrik tenaga angin pada dua dekade ini berkembang sangat pesat dan pemanfaatannya sangat menjajikan. Namun energi angin memiliki karakteristik yang berubah-ubah sehingga apabila output generator induksi dihubungkan pada jaringan akan menyebabkan transfer daya dan tegangan yang berubah-ubah. Permasalahan ini perlu dianalisa agar energi listrik yang dibangkitkan dapat dimanfaatkan secara optimal. Dalam penelitian ini akan disimulasikan suatu model pengaturan tegangan listrik pada pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) menggunakan software MATLAB 7.6 (R2008a). Penelitian ini menitik beratkan pada pemodelan sistem PLTB dan optimasi parameter sistem eksitasi tipe DC1A untuk kondensor sinkron sebagai pengaturan tegangan pada PLTB. Optimasi sistem eksitasi yang dilakukan menggunakan metode algoritma genetika. Dari hasil simulasi dan analisa menunjukkan bahwa optimasi parameter sistem eksitasi tipe DC1A untuk kondensor sinkron menggunakan algoritma genetika dapat menemukan kombinasi yang optimal sehingga pengaturan tegangan model sistem PLTB dapat bekerja dengan baik saat terjadi perubahan kecepatan angin. Pada simulasi dan analisa diketahui sistem PLTB dengan kondensor sinkron berparameter sistem eksitasi kombinasi algoritma genetika 3 (percobaan kedua kombinasi parameter algen dengan peluang pindah silang 0,6 dan peluang mutasi 0,032) yaitu $K_a = 297,2350$, $K_e = 0,6162$, $K_f = 0,01$, $T_a = 0,01$, $T_e = 0,01$, dan $T_f = 0,6278$ merupakan kombinasi parameter eksitasi terbaik yang diperoleh. Dengan menghasilkan nilai ITAE 115,6604, rise time 0,17 s, over shoot 1,54% steady state 0,44 s, tegangan terkecil setelah perubahan kecepatan angin 0,9957 pu dan tegangan terbesar setelah perubahan kecepatan angin yaitu 1,0025 pu.

Kata Kunci : PLTB, sistem eksitasi, kondenser sinkron, algoritma genetika.

Abstract

Technology of wind power in two decades is rapidly increasing and utilization is very promising. However, wind speed change continuously, so when output induction generator is connected to the network will cause the transfer of power and voltage swings. So that this problem needs to be analyzed in order to the electrical energy generated can be used optimally. In this final project a model of voltage regulation at power plants of wind energy (PLTB) will be simulated using MATLAB 7.6 (R2008a). This final project focuses on system modeling and optimization parameters of excitation systems type DC1A for synchronous condenser as voltage regulation on PLTB. Excitation system optimization made using genetic algorithms method. From the simulation results and analysis known than optimization parameters of excitation system for synchronous condenser type DC1A use genetic algorithms could find the optimal combination. So the voltage regulation of PLTB model can work well when there is change in the wind speed. In the simulation and analysis of systems known PLTB with excitation system parameterized combination of genetic algorithms 3 (second experiment of parameters combined with crossovers opportunities 0.6 and mutations opportunities 0.032) which $K_a = 297.2350$, $K_e = 0.6162$, $K_f = 0.01$, $T_a = 0.01$, $T_e = 0.01$ and $T_f = 0.6278$ is the best combination of excitation parameters obtained. By generating the 115.6604 ITAE value, over shoot 1.54%, steady state 0.44 s, the smallest voltage value after wind speed change is 0.9957 pu and the largest voltage value after wind speed change is 1.0025 pu.

Key Word : PLTB, excitation system, synchronous condenser, algoritma genetika.

1. Pendahuluan

Teknologi pembangkit listrik tenaga angin pada dua dekade ini berkembang sangat pesat. Energi listrik yang

dihasilkan oleh turbin angin memiliki banyak manfaat namun agar dapat dimanfaatkan pada banyak aplikasi dan sesuai secara ekonomis maka proses pembangkitan listrik sistem ini sendiri harus andal. Sistem ini harus memiliki

efisiensi tinggi dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan pembangkit alternatif lain yang ada saat ini.

Namun energi angin memiliki karakteristik yang berubah-ubah sehingga apabila output generator induksi dihubungkan pada jaringan akan menyebabkan transfer daya dan tegangan yang berubah-ubah. Sehingga permasalahan ini perlu dianalisa dan dikembangkan solusi pemecahannya. Salah satu solusi yang dapat digunakan adalah pengaturan kestabilan tegangan menggunakan kondensor sinkron. Kondensor sinkron merupakan motor sinkron yang beroperasi tanpa beban dimana komponen utama pembentukan profil tegangan terminal adalah sistem eksitasinya. Sistem eksitasi merupakan komponen yang sangat penting dalam pengoperasian mesin sinkron. Secara keseluruhan sistem eksitasi ini berperan dalam pengaturan daya reaktif dan meningkatkan sistem kestabilan tenaga listrik dengan tenaga angin. Pengaturan sistem eksitasi yang tepat dari sebuah sistem eksitasi dapat meningkatkan kestabilan dan keandalan sistem tenaga listrik. Sebaliknya pengaturan parameter yang tidak tepat pada sistem eksitasi dapat menurunkan keandalan sistem tenaga listrik.

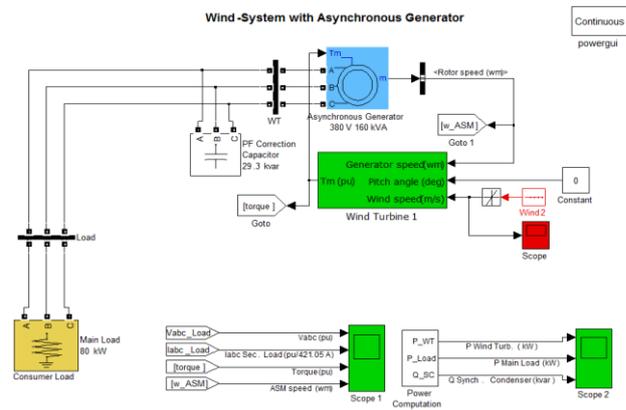
Tujuan pembuatan penelitian ini adalah untuk adalah memperoleh parameter K_a , K_e , K_f , T_a , T_e , dan T_f sistem eksitasi tipe DC1A standar IEEE yang digunakan pada kondensor sinkron menggunakan metode algoritma genetika. Dan membandingkan unjuk kerja sistem eksitasi kondensor sinkron dengan parameter K_a , K_e , K_f , T_a , T_e , dan T_f yang diperoleh menggunakan teknik komputasi algoritma genetika dengan parameter K_a , K_e , K_f , T_a , T_e , dan T_f dari contoh parameter jurnal IEEE 421.5 2005 pada kondisi perubahan kecepatan angin.

2. Metode

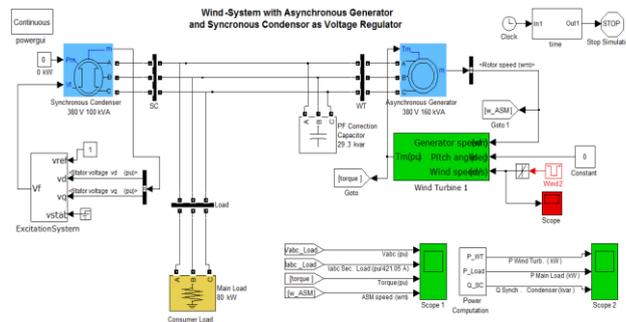
Dalam penelitian ini, metode peneliain yang dilakukan adalah memodelkan sistem PLTB dan sistem eksitasi kondensor sinkron kedalam bentuk model simulink perangkat lunak MATLAB kemudian dianalisa berdasarkan kondisi sebelum sistem eksitasi dioptimasi dan sesudah dioptimasi. Berikut adalah penjelasan proses pembuatan model dan program optimasi sistem.

2.1 Model Rangkaian Simulasi

Model rangkaian simulasi dari pengaturan tegangan pada PLTB dengan kondensor *sinkron* dapat dilihat pada gambar 6 dan 7.



Gambar 1. Model simulink sistem PLTB tanpa kondensor sinkron



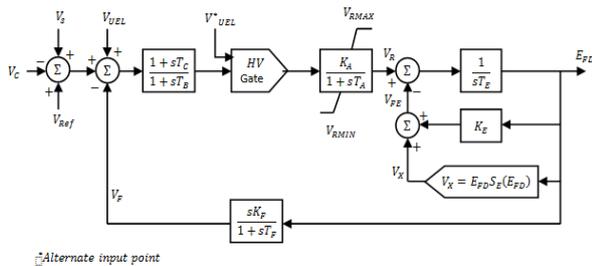
Gambar 2. Model simulink sistem PLTB dengan kondensor sinkron

Spesifikasi model yang digunakan antara lain, model turbin angin digunakan untuk mengkonversi energi angin menjadi energi kinetik yang kemudian dikonversi lagi menjadi energi listrik oleh generator. Model mesin induksi tiga fasa tipe *squirrel cage* (mesin induksi rotor sangkar bajing) yang digunakan sebagai generator induksi dengan kemampuan menghasilkan daya 160 kVA, tegangan antar fasa 380 volt dan frekuensi listrik 50 Hertz. Nilai R_s , L_{ls} , R_r , L_{lr} , L_m , Inertia, pole, dan Friction Factor berturut-turut adalah 0,01379 pu, 0,04775 pu, 0,007728 pu, 0,04775 pu, 2,416 pu, 0,2236 pu, 2 pasang, dan 0,008726 pu

Daya kapasitor yang dipilih adalah 29,3 kVAR Sedangkan *Consumer Load* yang digunakan adalah beban resistif tiga fasa dengan besar daya 80 kW. Model mesin *sinkron* yang digunakan dalam simulasi ini adalah model mesin *sinkron* dalam satuan pu (per unit) dengan daya 100 kVA, tegangan antar fasa 380 volt dan frekuensi listrik 50 Hertz. Kondisi awal pada model mesin *sinkron* ini berdasarkan nilai awal pada MATLAB yaitu nilai arus sebesar 0,827 pu untuk tiap-tiap fasa dan tegangan medan pada *rotor* atau *eksitasi* sebesar 2,71455 pu. Nilai masukan daya mekanis yang diberikan pada model mesin *sinkron* bernilai 0 kW.

2.2 Pemodelan Sistem Eksitasi

Fungsi utama sebuah sistem *eksitasi* adalah untuk menyediakan arus searah (AS/DC) ke kumparan medan mesin *sinkron*. Selain itu, sistem *eksitasi* melakukan kontrol dan fungsi perlindungan untuk kehandalan performa sistem listrik dengan cara mengatur tegangan medan dan arus medan. Dalam penelitian ini, sistem *eksitasi* yang dibahas adalah sistem *eksitasi* tipe DC1A seperti yang diperlihatkan pada gambar 4.

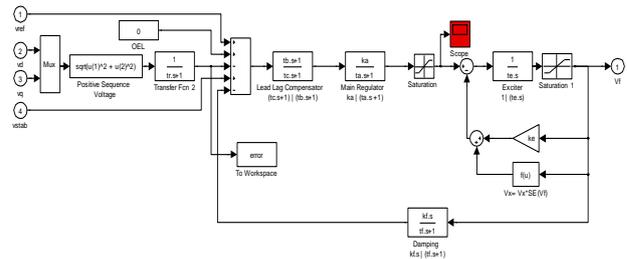


Gambar 3. Model *eksitasi* tipe DC1A

Model *eksitasi* tipe DC1A merepresentasikan *exciter* DC komutator pengatur medan, dengan respon pengatur tegangan yang berkelanjutan. *Eksitasi* bisa saja merupakan *eksitasi* terpisah ataupun *eksitasi* tunggal, meskipun tipe *eksitasi* sendiri menjadi tipe yang lebih biasa. Jika *eksitasi* adalah *eksitasi* sendiri K_E dipilih sehingga pada awalnya $V_R = 0$, V_R merepresentasikan aksi operator untuk melacak pengatur tegangan yaitu dengan secara periodik memangkas nilai error melalui setelan rheostat tipe shunt.

Sinyal *input* utama ke masing-masing sistem *eksitasi* adalah *output* V_C dari *tranduser*. Pada titik penjumlahan pertama, sinyal V_C dikurangi dari referensi pengatur voltase V_{ref} dan *output* V_S dari sistem penstabil kekuatan, jika digunakan, ditambahkan untuk menghasilkan sinyal penggerak yang mengatur sistem *eksitasi*. Sinyal tambahan, seperti halnya pembatas *output* *eksitasi* (V_{VEL}), hanya berperan selama kondisi ekstrim atau tidak biasa. Di bawah keadaan stabil, $V_S=0$ dan V_R bernilai tidak biasa untuk kondisi mesin *sinkron* berbeban sehingga sinyal error menghasilkan medan voltase E_{fd} yang diperlukan.

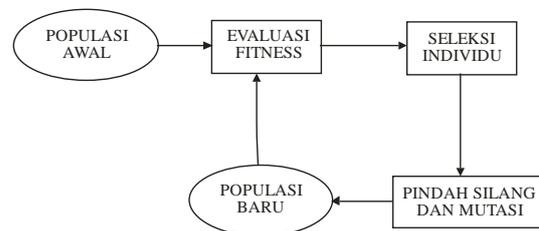
Perancangan model sistem *eksitasi* dalam penelitian ini merencanakan besar konstanta penguatan untuk sistem *Amplifier* (K_A dan T_A), *Exciter* (K_E dan T_E), dan *Stabilizer/Regulator* (K_f dan T_f). Model standar yang digunakan adalah sistem *eksitasi* tipe DC1A standar IEEE 421.5 2005. Model sistem *eksitasi* yang digunakan pada rangkaian simulasi MATLAB adalah sebagai berikut.



Gambar 4. Model sistem *eksitasi* TIPE DC1A pada MATLAB

2.3 Pembuatan Program Optimasi

Pada penelitian ini, metode optimasi yang digunakan adalah teknik komputasi algoritma genetika. Algoritma genetika menggunakan analogi secara langsung dari kebiasaan yang alami yaitu seleksi alam. Algoritma ini bekerja dengan sebuah populasi yang terdiri dari individu – individu, yang masing – masing individu mempresentasikan sebuah solusi yang mungkin bagi persoalan yang ada. Dalam kaitan ini, individu dilambangkan dengan sebuah nilai fitness yang akan digunakan untuk mencari solusi terbaik dari persoalan yang ada. Siklus dalam algoritma genetika dapat disederhanakan seperti terlihat pada gambar 5 berikut.

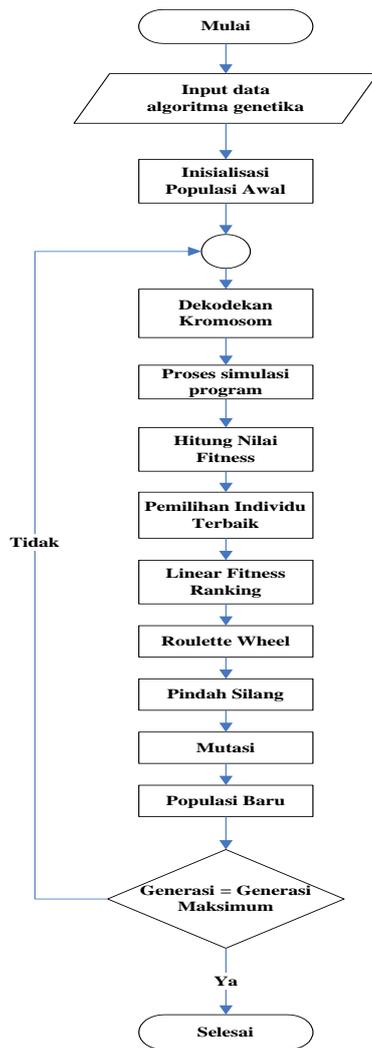


Gambar 5. Siklus Algoritma Genetika

Dalam penerapan algoritma genetika, ada beberapa parameter yang dilibatkan, di mana parameter ini menentukan kesuksesan suatu proses optimasi. Jenis parameter yang digunakan bergantung pada permasalahan yang diselesaikan, namun ada beberapa parameter yang menjadi standar, yaitu:

- Ukuran populasi (pop_size)
- Probabilitas *crossover* (p_c)
- Probabilitas mutasi (p_m)

Program ini dibuat dalam 9 tahap, Tahap-tahap tersebut dirumuskan dalam diagram alir yang ditunjukkan oleh gambar 9 berikut.



Gambar 6. Diagram alir program optimasi

Pada program optimasi, fungsi objektif digunakan untuk mengetahui atau mengukur secara kualitatif seberapa baik solusi yang dihasilkan atau model yang terbentuk berdasarkan tujuan perencanaan sedangkan fungsi fitness digunakan untuk mengetahui secara kualitatif solusi yang dihasilkan berdasarkan fungsi objektif dan pelanggaran kendala (*Constraints Violance*). Dalam pemodelan sistem *eksitasi* fungsi objektif dibentuk berdasarkan akumulasi kesalahan tanggapan sistem dalam suatu durasi waktu simulasi tertentu. Teori yang mendukung pembentukan fungsi objektif adalah, kinerja suatu sistem kontrol terukur berdasarkan metode ITAE (*Integral of Time Multiplied by Absolute Error*) atau besar akumulasi kesalahan tanggapan sistem dikalikan dengan waktu untuk satu periode simulasi, secara matematis perhitungan diskrit dapat dirumuskan seperti pada (3.1).

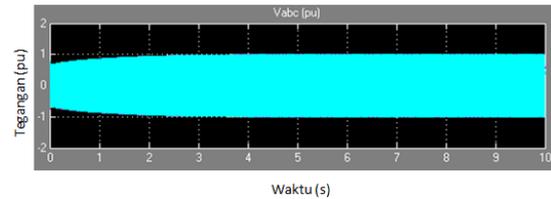
$$ITAE = \sum_{t=0, t+\Delta t}^{t_s} t|\varepsilon(t)| \quad (1)$$

dimana Δt adalah lebar cuplikan waktu simulasi.

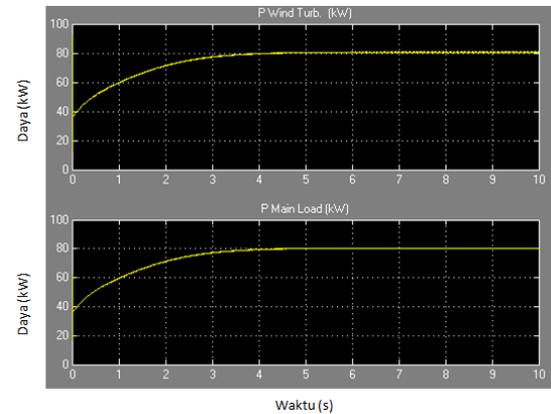
3. Pengujian dan Analisa

3.1 Simulasi PLTB tanpa kondensor *sinkron* dan PLTB dengan kondensor *sinkron*

3.1.1 Simulasi PLTB tanpa kondensor *sinkron* kondisi kecepatan angin tetap

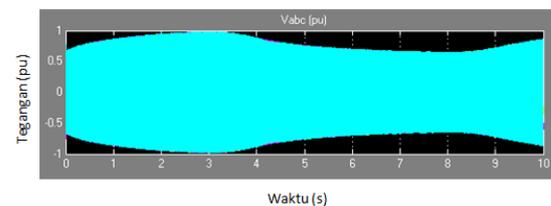


Gambar 7. Tegangan terminal (Vabc) pada simulasi PLTB tanpa kondensor *sinkron* kondisi angin tetap

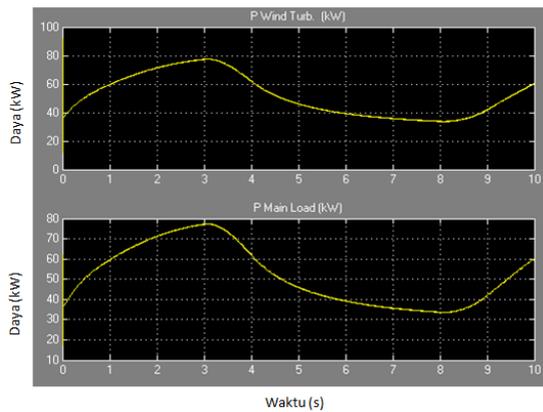


Gambar 8. Daya generator turbin dan daya beban pada simulasi PLTB tanpa kondensor *sinkron* kondisi angin tetap

3.1.2 Simulasi PLTB tanpa kondensor *sinkron* kondisi kecepatan angin berubah

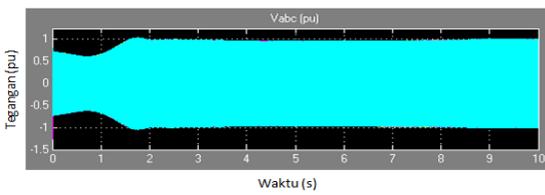


Gambar 9. Tegangan terminal (Vabc) pada simulasi PLTB tanpa kondensor *sinkron* kondisi angin berubah

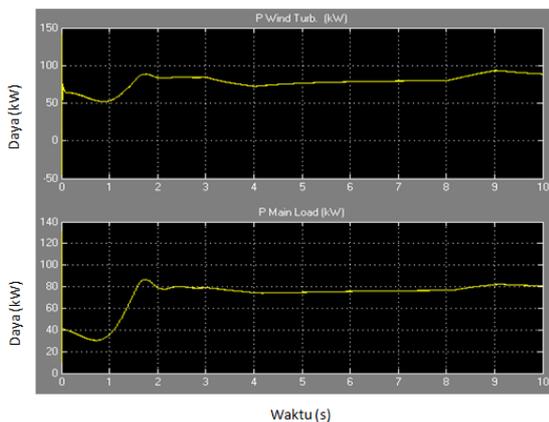


Gambar 10. Daya generator turbin dan daya beban pada simulasi PLTB tanpa kondensor sinkron kondisi angin berubah

3.1.3 Simulasi PLTB dengan kondensor sinkron



Gambar 11. Tegangan terminal (Vabc) pada simulasi PLTB dengan kondensor sinkron kondisi angin berubah



Gambar 12. Daya generator turbin dan daya beban pada simulasi PLTB dengan kondensor sinkron kondisi angin berubah

3.2 Simulasi Optimasi Sistem Eksitasi

3.2.1 Simulasi Optimasi Sistem Eksitasi Kombinasi Parameter Algen 1

Pada simulasi ini, parameter sistem eksitasi kondensor sinkron pada PLTB serta parameter algoritma genetika jumlah generasi (MaxG) dan jumlah populasi (UkPop)

pada nilai awal. Sedangkan peluang pindah silang (Psilang) dimasukkan sebesar 0,8 dan peluang mutasi (Pmutasi) sebesar 0,1, 0,070, 0,048, 0,032, dan 0,016. Hasil dari simulasi diperoleh data seperti yang ditunjukkan tabel 1.

Tabel 1 Hasil simulasi optimasi sistem eksitasi dengan peluang pindah silang 0,8

Nilai peluang mutasi	Percobaan	ITAE	Nilai parameter sistem eksitasi
0,1	1	127,36 61	$K_a = 271,8469, K_e = 0,4932, K_f = 0,01, T_a = 0,0129, T_e = 0,011,$ dan $T_f = 0,3184$
	2	125,02 40	$K_a = 252,9943, K_e = 0,5968, K_f = 0,0148, T_a = 0,0158, T_e = 0,01,$ dan $T_f = 0,6462$
0,070	1	120,36 85	$K_a = 265,06, K_e = 0,6084, K_f = 0,01, T_a = 0,0148, T_e = 0,0119,$ dan $T_f = 0,4808$
	2	121,35 52	$K_a = 266,5682, K_e = 0,6075, K_f = 0,0119, T_a = 0,0129, T_e = 0,011,$ dan $T_f = 0,7854$
0,048	1	211,50 64	$K_a = 290,6994, K_e = 0,6294, K_f = 0,0719, T_a = 0,446, T_e = 0,01,$ dan $T_f = 0,936$
	2	202,94 07	$K_a = 52,9061, K_e = 0,2797, K_f = 0,0719, T_a = 0,0293, T_e = 0,01,$ dan $T_f = 0,9894$
0,032	1	116,07 85	$K_a = 298,7432, K_e = 0,6288, K_f = 0,0100, T_a = 0,0119, T_e = 0,0100,$ dan $T_f = 0,6268$
	2	115,95 24	$K_a = 282,4043, K_e = 0,6007, K_f = 0,01, T_a = 0,01, T_e = 0,01,$ dan $T_f = 0,6036$
0,016	1	303,14 92	$K_a = 59,1902, K_e = 0,1260, K_f = 0,1338, T_a = 0,0796, T_e = 0,409,$ dan $T_f = 0,7467$
	2	320,21 83	$K_a = 286,1748, K_e = 0,5118, K_f = 0,1338, T_a = 0,9894, T_e = 0,0255,$ dan $T_f = 0,9990$

Kombinasi parameter K_a, K_e, K_f, T_a, T_e dan T_f terbaik dapat ditentukan dengan memilih kombinasi dengan nilai ITAE paling kecil. Dari tabel 1 diatas diperoleh kombinasi terbaik adalah percobaan kedua kombinasi parameter algen dengan peluang pindah silang 0,8 dan peluang mutasi 0,032.

3.2.2 Simulasi Optimasi Sistem Eksitasi Kombinasi Parameter Algen 2

Pada simulasi ini, peluang pindah silang (Psilang) dimasukkan sebesar 0,7 dan peluang mutasi (Pmutasi) sebesar 0,1, 0,070, 0,048, 0,032, dan 0,016. Hasil dari simulasi diperoleh data seperti yang ditunjukkan tabel 2.

Tabel 2 Hasil simulasi optimasi sistem eksitasi dengan peluang pindah silang 0,7

Nilai peluang mutasi	Percobaan	ITAE	Nilai parameter sistem eksitasi
----------------------	-----------	------	---------------------------------

0,1	1	140,98 64	Ka = 243,4424, Ke = 0,4973, Kf = 0,0255, Ta = 0,0187, Te = 0,011, dan Tf = 0,6926
	2	131,50 88	Ka = 257,7703, Ke = 0,5040, Kf = 0,0158, Ta = 0,0119, Te = 0,0139, dan Tf = 0,5524
0,070	1	123,96	Ka = 297,7377, Ke = 0,6055, Kf = 0,0129, Ta = 0,0245, Te = 0,0110, dan Tf = 0,0521
	2	118,64 32	Ka = 245,4533, Ke = 0,5968, Kf = 0,01, Ta = 0,0139, Te = 0,01, dan Tf = 0,5021
0,048	1	118,65 31	Ka = 298,2404, Ke = 0,6268, Kf = 0,01, Ta = 0,0129, Te = 0,011, dan Tf = 0,4934
	2	116,49 51	Ka = 273,6064, Ke = 0,6152, Kf = 0,01, Ta = 0,011, Te = 0,01, dan Tf = 0,5659
0,032	1	127,90 38	Ka = 298,2404, Ke = 0,4895, Kf = 0,01, Ta = 0,011, Te = 0,011, dan Tf = 0,4325
	2	130,94 24	Ka = 260,5354, Ke = 0,5031, Kf = 0,0158, Ta = 0,011, Te = 0,01, dan Tf = 0,7873
0,016	1	170,53 00	Ka = 218,0543, Ke = 0,6210, Kf = 0,0409, Ta = 0,1028, Te = 0,01, dan Tf = 0,0751
	2	212,96 18	Ka = 290,9508, Ke = 0,5582, Kf = 0,0728, Ta = 0,2082, Te = 0,011, dan Tf = 0,9884

Dari tabel 2 diatas diperoleh kombinasi terbaik adalah percobaan kedua kombinasi parameter algen dengan peluang pindah silang 0,7 dan peluang mutasi 0,048.

3.2.3 Simulasi Optimasi Sistem Eksitasi Kombinasi Parameter Algen 3

Pada simulasi ini, peluang pindah silang (Psilang) dimasukkan sebesar 0,6 dan peluang mutasi (Pmutasi) sebesar 0,1, 0,070, 0,048, 0,032, dan 0,016. Hasil dari simulasi diperoleh data seperti yang ditunjukkan tabel 3.

Tabel 3 Hasil simulasi optimasi sistem eksitasi dengan peluang pindah silang 0,6

Nilai peluang mutasi	Percobaan	ITAE	Nilai parameter sistem eksitasi
0,1	1	132,11 96	Ka = 241,9342, Ke = 0,4953, Kf = 0,0119, Ta = 0,011, Te = 0,011, dan Tf = 0,6887
	2	123,93 35	Ka = 264,8086, Ke = 0,5756, Kf = 0,0139, Ta = 0,01, Te = 0,0129, dan Tf = 0,6181
0,070	1	163,30 08	Ka = 285,1693, Ke = 0,6142, Kf = 0,0245, Ta = 0,0148, Te = 0,0216, dan Tf = 0,4615
	2	123,21 50	Ka = 283,6611, Ke = 0,6326, Kf = 0,0139, Ta = 0,0197, Te = 0,01, dan Tf = 0,7844
0,048	1	215,11 09	Ka = 260,7867, Ke = 0,6336, Kf = 0,0719, Ta = 0,5939, Te = 0,01, dan Tf = 0,9314
	2	327,79 55	Ka = 299,4973, Ke = 0,6307, Kf = 0,1338, Ta = 0,9362, Te = 0,0409, dan Tf = 0,9932

0,032	1	293,63 03	Ka = 161,9994, Ke = 0,2575, Kf = 0,1338, Ta = 0,1076, Te = 0,0158, dan Tf = 0,999
	2	115,66 04	Ka = 297,2350, Ke = 0,6162, Kf = 0,01, Ta = 0,01, Te = 0,01, dan Tf = 0,6278
0,016	1	319,34 46	Ka = 289,1912, Ke = 0,5060, Kf = 0,1338, Ta = 0,9304, Te = 0,0206, dan Tf = 0,9971
	2	319,35 41	Ka = 231,6281, Ke = 0,4654, Kf = 0,01338, Ta = 0,6017, Te = 0,0206, dan Tf = 0,9981

Dari tabel 3 diatas kombinasi terbaik adalah percobaan kedua kombinasi parameter algen dengan peluang pindah silang 0,6 dan peluang mutasi 0,032.

3.2.4 Simulasi Optimasi Sistem Eksitasi Kombinasi Parameter Algen 4

Pada simulasi ini, peluang pindah silang (Psilang) dimasukkan sebesar 0,5 dan peluang mutasi (Pmutasi) sebesar 0,1, 0,070, 0,048, 0,032, dan 0,016. Hasil dari simulasi diperoleh data seperti yang ditunjukkan tabel 4.

Tabel 4 Hasil simulasi optimasi sistem eksitasi dengan peluang pindah silang 0,5

Nilai peluang mutasi	Percobaan	ITAE	Nilai parameter sistem eksitasi
0,1	1	140,99 31	Ka = 165,2672, Ke = 0,5002, Kf = 0,0177, Ta = 0,0119, Te = 0,0206, dan Tf = 0,4895
	2	131,83 65	Ka = 261,7922, Ke = 0,5814, Kf = 0,0139, Ta = 0,0168, Te = 0,0197, dan Tf = 0,7071
0,070	1	119,01 21	Ka = 291,7049, Ke = 0,6113, Kf = 0,01, Ta = 0,0119, Te = 0,01, dan Tf = 0,4944
	2	119,31 64	Ka = 225,3439, Ke = 0,5727, Kf = 0,01, Ta = 0,011, Te = 0,01, dan Tf = 0,4712
0,048	1	116,81 33	Ka = 296,9836, Ke = 0,6384, Kf = 0,01, Ta = 0,011, Te = 0,01, dan Tf = 0,7013
	2	129,13 77	Ka = 291,9563, Ke = 0,5021, Kf = 0,0168, Ta = 0,01, Te = 0,01, dan Tf = 0,6075
0,032	1	124,35 95	Ka = 227,1035, Ke = 0,5040, Kf = 0,01, Ta = 0,01, Te = 0,01, dan Tf = 0,4083
	2	198,72 30	Ka = 45,1137, Ke = 0,2739, Kf = 0,0719, Ta = 0,0187, Te = 0,01, dan Tf = 0,9961
0,016	1	206,20 99	Ka = 282,6554, Ke = 0,3532, Kf = 0,0719, Ta = 0,0477, Te = 0,01, dan Tf = 0,9845
	2	318,65 16	Ka = 256,0107, Ke = 0,4219, Kf = 0,1338, Ta = 0,3445, Te = 0,0187, dan Tf = 0,9961

Dari tabel 4 diatas diperoleh kombinasi terbaik adalah percobaan pertama kombinasi parameter algen dengan peluang pindah silang 0,5 dan peluang mutasi 0,048.

3.3 Perbandingan Unjuk Kerja

3.3.1 Perbandingan Performansi Tegangan PLTB tanpa Kondensator Sinkron dan PLTB dengan Kondensator Sinkron

Tabel 5 Perbandingan performansi tegangan PLTB tanpa kondensator sinkron dan PLTB dengan kondensator sinkron

No	Performansi	PLTB tanpa kondensator sinkron	PLTB dengan kondensator sinkron, parameter sistem eksitasi dari jurnal IEEE
1	Rise time (s)	1,415	1,4
2	Over Shoot (%)	-	4
3	Steady state (s)	-	2,5
4	Tegangan terkecil setelah perubahan kecepatan angin (pu)	0,648	0,962
5	Tegangan terbesar setelah perubahan kecepatan angin (pu)	0,864	1,0135

Dari tabel 5, gambar 12 dan 14 diketahui bahwa saat PLTB mulai beroperasi dengan kecepatan angin 10 m/s kedua model sistem PLTB membutuhkan waktu lebih dari 1 s untuk mendekati nilai tegangan 1 pu. PLTB dengan kondensator sinkron menunjukkan nilai rise time yang lebih baik yaitu 1,4 s dibandingkan PLTB tanpa kondensator sinkron.

Pada saat terjadi perubahan kecepatan angin, kedua model sistem PLTB memberikan respon yang berbeda. PLTB tanpa kondensator sinkron menghasilkan tegangan yang mengikuti perubahan kecepatan angin, hal ini dikarenakan nilai tegangan yang dihasilkan oleh PLTB tanpa kondensator sinkron, dipengaruhi langsung oleh besarnya torsi masukkan generator induksi dari turbin angin. Sedangkan pada PLTB dengan kondensator sinkron, tegangan yang dihasilkan masih mendekati 1 pu, dimana tegangan terkecilnya 0,962 pu dan terbesarnya 1,0135 pu, hal ini dikarenakan adanya kondensator sinkron yang memberikan daya reaktif secara otomatis yang besarnya disesuaikan dengan perubahan tegangan terhadap nilai rujukan yaitu 1 pu. Namun hasil ini masih bias diperbaiki karena osilasi dan penurunan saat perubahan melebihi 2%.

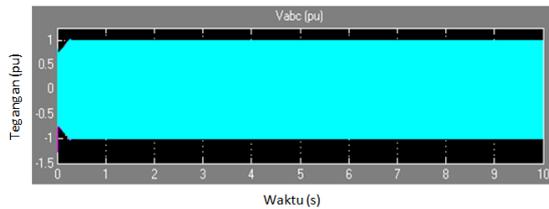
3.3.2 Perbandingan Performansi Tegangan PLTB dengan Kondensator Sinkron Parameter Jurnal IEEE dan Parameter Hasil Optimasi

Tabel 6 Perbandingan performansi tegangan PLTB dengan kondensator sinkron parameter jurnal IEEE dan parameter hasil optimasi

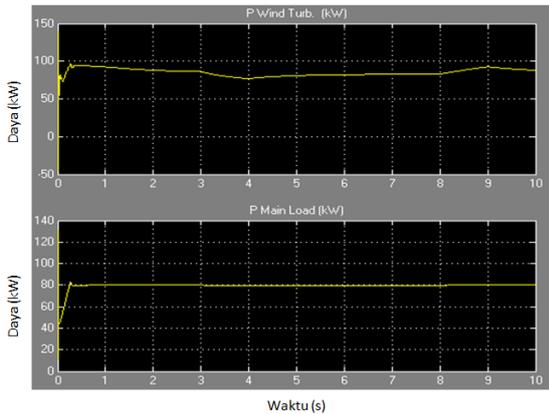
Performansi	Model PLTB sistem dengan PLTB kondensator sinkron, parameter sistem eksitasi dari jurnal IEEE	PLTB dengan kondensator sinkron, parameter sistem eksitasi kombinasi 1	PLTB dengan kondensator sinkron, parameter sistem eksitasi kombinasi 2	PLTB dengan kondensator sinkron, parameter sistem eksitasi kombinasi 3	PLTB dengan kondensator sinkron, parameter sistem eksitasi kombinasi 4
ITAE	840,2698	115,9524	116,4951	115,6604	116,8133
Rise time (s)	1,4	0,164	0,17	0,17	0,17
Over Shoot (%)	4	2,28	1,64	1,54	1,33
Steady state (s)	2,5	0,47	0,47	0,44	0,50
Tegangan terkecil setelah perubahan kecepatan angin (pu)	0,962	0,9957	0,9955	0,9957	0,9958
Tegangan terbesar setelah perubahan kecepatan angin (pu)	1,0135	1,0026	1,0026	1,0025	1,0023

Tabel 6 menunjukkan bahwa saat PLTB mulai beroperasi dengan kecepatan angin 10 m/s model sistem PLTB dengan parameter sistem eksitasi kondensator sinkron dari jurnal IEEE membutuhkan waktu lebih dari 1 s untuk mendekati nilai tegangan 1 pu sedangkan model sistem PLTB dengan parameter sistem eksitasi kondensator sinkron dari hasil optimasi hanya membutuhkan waktu kurang dari 0,18 s. Dari parameter lain juga menunjukkan bahwa model sistem PLTB dengan parameter model sistem PLTB dengan parameter sistem eksitasi kondensator sinkron dari hasil optimasi memiliki performa lebih baik dibandingkan dengan model sistem PLTB dengan parameter sistem eksitasi kondensator sinkron dari jurnal IEEE.

Pada saat terjadi perubahan kecepatan angin model sistem PLTB memberikan respon yang berbeda-beda. Perbedaan respon dari model sistem PLTB dipengaruhi oleh kinerja sistem eksitasi kondensator sinkron yang menghasilkan daya reaktif, Besarnya nilai daya reaktif yang dihasilkan oleh kondensator sinkron secara otomatis disesuaikan dengan perubahan tegangan terhadap nilai rujukan yaitu 1 pu. Semakin cepat respon dari kondensator sinkron memberikan nilai daya reaktif yang sesuai agar tegangan tetap mendekati 1 pu, maka semakin baik performa dari kondensator sinkron tersebut. Dari tabel 6 dapat dilihat bahwa model sistem PLTB dengan kondensator sinkron berparameter sistem eksitasi kombinasi 3 yang memberikan respon keluaran tegangan yang baik dibandingkan dengan model sistem PLTB yang lainnya.



Gambar 13. Tegangan terminal (V_{abc}) pada simulasi optimasi sistem eksitasi kondensator sinkron PLTB kombinasi parameter algen 3



Gambar 14. Daya generator turbin dan daya beban pada simulasi optimasi sistem eksitasi kondensator sinkron PLTB kombinasi parameter algen 3

Model ini lebih baik dengan nilai ITAE paling kecil (115,6604), waktu *steady state* terbaik (0,44s) dan *osilasi* serta penurunan tegangan saat perubahan kecepatan angin kurang dari 2% (rata-rata 0,2275%).

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisa yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa model sistem PLTB dengan kondensator sinkron berparameter sistem eksitasi kombinasi algoritma genetika 3 (percobaan kedua kombinasi parameter algen dengan peluang pindah silang 0,6 dan peluang mutasi 0,032) yaitu $K_a = 297,2350$, $K_e = 0,6162$, $K_f = 0,01$, $T_a = 0,01$, $T_e = 0,01$, dan $T_f = 0,6278$ merupakan kombinasi parameter eksitasi terbaik yang diperoleh pada pengujian.

Model tersebut menunjukkan performansi yang lebih baik juga dari model sistem PLTB dengan kondensator sinkron berparameter sistem eksitasi dari contoh parameter sistem eksitasi IEEE 421.5 2005 ($K_a = 46$, $K_e = 1$, $K_f = 0,1$, $T_a = 0.06$, $T_e = 0,46$, dan $T_f = 1.0$). Analisa perbandingan antara hasil optimasi dan sebelum optimasi menunjukkan perbandingan nilai ITAE yaitu 115,6604 berbanding 840,2698, *rise time* yaitu 0,17 s berbanding 1,4 s, *over shoot* yaitu 1,54% berbanding 4%, *steady state* yaitu 0,44 s berbanding 2,5 s, tegangan terkecil setelah perubahan kecepatan angin yaitu 0,9957 pu berbanding 0,962 pu dan

tegangan terbesar setelah perubahan kecepatan angin yaitu 1,0025 pu berbanding 1,0135 pu.

Untuk pengembangan lebih lanjut diperlukan penelitian menggunakan metode yang lain misalnya metode logika fuzzy atau dikembangkan lebih lanjut dengan sistem eksitasi tipe lain selain tipe DC1A. Atau pengembangan model PLTB dengan pengaturan frekuensi sistem dan besar beban yang berubah-ubah.

Referensi

- [1] Abdulahovic, Tarik and Teleke, Sercan. 2006. "Modeling and Comparison of Synchronous Condenser and SVC". Sweden: Chalmers University of Technology.
- [2] Cahyo, R. Dwi. Robandi, Imam. 2007. "Optimisasi Parameter Sistem Eksitasi IEEE Type ST2 Menggunakan Genetic Algorithm". Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi 2006 (SNATI 2006). Yogyakarta, 17 Juni.
- [3] Elivina, Winna. 2008. "Analisa Karakteristik Pengaturan VAR Pada Generator Induksi Berpenguat Sendiri Dengan Menggunakan Kondensator Sinkron". Depok: Universitas Indonesia.
- [4] Irianto, Chairul Gagarin. 2004. "Suatu Studi Penggunaan Motor Induksi sebagai Generator: Penentuan Nilai Kapasitor Untuk Penyedia Daya Reaktif". JETri, Volume 3, Nomor 2, Februari 2004, Halaman 1-16, ISSN 1412-0372.
- [5] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Standard 421.5-2005, 2006.
- [6] Kundur, Prabha. 1993. "Power System Stability and Control". California: McGraw-Hill.
- [7] Kurniawan, Dedy. 2010. "Pengaturan Daya Pada Doubly Fed Induction Generator Menggunakan Type-2 Fuzzy PI Controller". Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [8] Meier, Alexandra von. 2006. "Electric power system: a conceptual induction". USA: A Wiley-International Publication.
- [9] Mobarak, Youssef A. "A Simulink Multi-Band Power System Stabilizer". Egypt : South Valley University.
- [10] Musyafa', Ali. A. Harika, I. M. Y. Negara, I. Robandi. 2010. "Pitch Angle Control of Variable Low Rated Speed Wind Turbine Using Fuzzy Logic Controller". International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol: 10 No: 05.
- [11] Nasution, Nasir Andi Hakim. 2010. "Pengaruh Pembebanan Terhadap Regulasi Tegangan Dan Efisiensi Pada Generator Induksi Penguatan Sendiri Dengan Kompensasi Tegangan Menggunakan Kapasitor (Aplikasi Pada Laboratorium Konversi Energi Listrik Ft-USU)". Medan : Universitas Sumatera Utara.
- [12] Saadat, Hadi. 1999. "Power System Analysis". Singapura : McGraw-Hill.
- [13] Suyanto. 2005. "Algoritma Genetika dalam MATLAB". Yogyakarta : Penerbit ANDI.
- [14] Wilopo, Endriyanto Nursukmadi and Sukmadi, Tedjo and Andromeda, Trias. 2011. "Perencanaan Optimasi Sistem Kontrol AVR (Automatic Voltage Regulator) untuk Memperbaiki Kestabilan Tegangan dengan Menggunakan Algoritma Genetika". Semarang : Universitas Diponegoro.

- [15] Wildi, Theodore. 1981. *“Electrical Machines, Drives, And Power System, Third Edition”*. USA: Prentice–Hall International, INC.
- [16] Yan, Chuan. 2011. *“Hardware Implementation of an AIS-Based Optimal Excitation Controller for an Electric Ship”*. IEEE Transactions On Industry Applications, Vol.47, No.2, March/April 2011.