

OPTIMISASI KAPASITOR PADA *SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR* DENGAN METODE *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*

Nita Indriani Pertiwi¹, Dedet Candra Riawan², Heri Suryo Atmojo³

^{1,2,3} Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
¹nita.indriani.pertiwi13@mhs.ee.its.ac.id

Abstrak

Self Excited Induction Generator (SEIG) merupakan salah satu jenis generator induksi yang cocok digunakan pada wilayah terpencil. Penggunaan SEIG pada wilayah terpencil didasari karena SEIG mampu menghasilkan eksitasi secara mandiri tanpa harus terhubung dengan grid. Pengoperasian SEIG akan disesuaikan dengan kondisi pembebanan pada wilayah terpencil yang umumnya adalah beban satu fasa. SEIG satu fasa dapat dihadirkan dengan memanfaatkan mesin induksi satu fasa, namun mesin induksi satu fasa memiliki keterbatasan daya output. Permasalahan ini dapat diatasi dengan memanfaatkan mesin induksi tiga fasa yang akan dioperasikan sebagai SEIG satu fasa. Dalam mengoperasikan SEIG tiga fasa untuk menyuplai beban satu fasa, kapasitor merupakan komponen yang sangat penting. Selain akan menentukan tegangan terbangkit yang dihasilkan oleh SEIG, kapasitor akan mempengaruhi kondisi tak seimbang pada SEIG tiga fasa yang digunakan untuk menyuplai beban satu fasa. Pada penelitian ini, ukuran kapasitor akan dioptimisasi menggunakan sebuah metode *Artificial Intelligent* yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO). Penggunaan metode PSO akan mempermudah untuk mendapatkan ukuran kapasitor yang optimal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu meningkatkan kinerja SEIG hingga 43,85%.

Kata kunci : Kapasitor, Mesin Induksi, PSO, SEIG

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia dengan ribuan pulau yang tersebar di seluruh nusantara. Dengan kondisi geografis tersebut, memberikan tantangan tersendiri dalam penyebaran energi listrik terutama untuk wilayah terpencil. Hampir sebagian besar pulau terpencil di Indonesia belum mendapatkan suplai energi listrik akibat keterbatasan proses transmisi dan distribusi. Salah satu solusi mengatasi masalah tersebut adalah dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan yang tersedia di wilayah terpencil untuk menghasilkan energi listrik. Teknologi yang umum digunakan untuk mengkonversi sumber energi terbarukan menjadi energi listrik adalah generator induksi. Bila dibandingkan dengan generator sinkron, generator induksi memiliki beberapa kelebihan yaitu biaya operasi yang lebih rendah, tidak perlu pemeliharaan secara berkala serta lebih cocok digunakan pada sumber energi terbarukan yang bersifat fluktuatif.

Terdapat dua jenis generator induksi, yaitu *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) dan *Self Excited Induction Generator* (SEIG). Diantara kedua jenis generator induksi tersebut, SEIG merupakan jenis yang cocok untuk diaplikasikan pada wilayah terpencil karena mempunyai sistem eksitasi yang mandiri tanpa harus terkoneksi dengan *Grid*. Pada wilayah terpencil, dengan

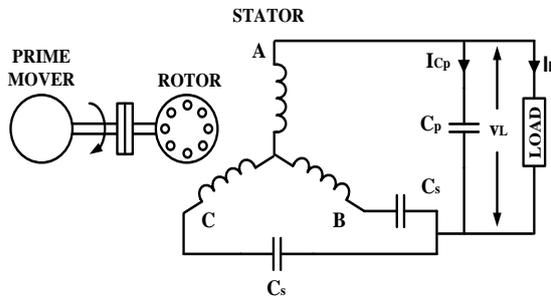
sebagian besar beban listrik adalah tipe satu fasa, dibutuhkan sebuah sistem untuk menghasilkan energi listrik satu fasa. Mesin induksi satu fasa dapat dimanfaatkan sebagai SEIG untuk menyuplai beban satu fasa, namun mesin induksi satu fasa memiliki rating daya yang relatif kecil. Untuk rating daya diatas 3kW, mesin tiga fasa memiliki harga yang lebih murah dan memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan mesin satu fasa [S.N. Mahato, S.P. Sing and M.P. Sharma. (2008)].

Dalam memanfaatkan SEIG tiga fasa untuk menyuplai beban satu fasa akan menimbulkan sebuah permasalahan, yaitu kondisi tidak seimbang pada ketiga belitan stator saat kondisi operasi. Untuk mengatasi permasalahan ini dibutuhkan nilai kapasitor eksitasi yang tepat agar dapat mengurangi kondisi tidak seimbang pada belitan stator. Selain untuk mengurangi kondisi tidak seimbang, pemilihan kapasitor akan menentukan besar tegangan yang dibangkitkan oleh SEIG. Oleh karena itu pada penelitian ini akan membahas pemanfaatan SEIG tiga fasa yang digunakan untuk menghasilkan suplai satu fasa, selain itu akan dilakukan optimisasi nilai kapasitor pada SEIG menggunakan sebuah metode *Artificial Intelligence* yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO).

2. SEIG untuk Beban Satu Fasa

Skema SEIG tiga fasa dengan belitan stator terhubung wye dapat dilihat pada Gambar 1. Skema

tersebut menunjukkan bahwa pada penelitian ini akan digunakan tiga buah kapasitor eksitasi yaitu satu buah kapasitor yang terhubung paralel (C_p) dan dua buah kapasitor yang terhubung seri (C_s). Sementara itu, pada penelitian ini beban yang akan digunakan adalah beban resistif satu fasa.

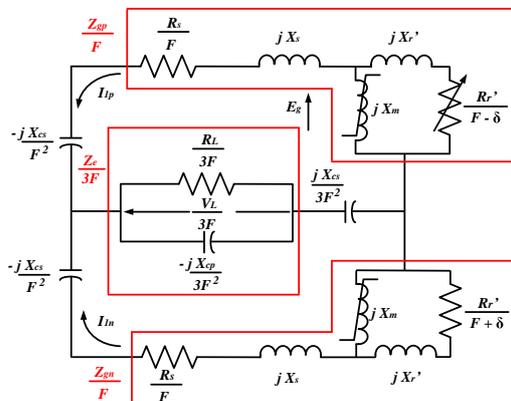


Gambar 1. Skema SEIG Tiga Fasa untuk Beban Satu Fasa

2.1 Rangkaian Ekuivalen SEIG

Sebelum melakukan pemodelan SEIG, akan dilakukan penentuan parameter mesin induksi seperti resistansi stator (R_s), resistansi rotor (R'_r), reaktansi induktif stator (X_s) reaktansi induktif rotor (X'_r) dan reaktansi magnetisasi maksimum (X_{m-max}). Parameter-parameter ini dapat diperoleh dengan melakukan pengujian pada mesin induksi yaitu *No-load Test*, *DC Test* dan *Locked Rotor Test* [Stephen J. Chapman. (2005)]. Rating mesin induksi yang akan digunakan untuk pengujian parameter ditunjukkan Tabel 1 dan parameter mesin induksi yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 2.

Pemodelan *steady state* SEIG dapat dilakukan dengan dua metode, yaitu metode admitansi dan metode impedansi. Pada penelitian ini dipilih metode impedansi dimana rangkaian ekuivalen SEIG dalam kondisi *steady state* dapat dilihat pada Gambar 2. Persamaan yang lebih terperinci untuk memperoleh rangkaian ekuivalen dapat dilihat pada referensi [F. Tadashi, K. Yuichi, K. Satoru and M. Toshio. (1999)].



Gambar 2. Rangkaian ekuivalen SEIG untuk beban satu fasa

- X_{cs} : reaktansi kapasitor C_s (pu)
- X_{cp} : reaktansi kapasitor C_p (pu)
- X_m : reaktansi magnetisasi per fasa (pu)
- F : frekuensi per unit (pu)
- R_s : resistansi per fasa stator (pu)
- R'_r : resistansi per fasa rotor (pu)
- X_s : reaktansi per fasa stator (pu)
- X'_r : reaktansi per fasa rotor (pu)
- R_L : resistansi beban (pu)
- δ : kecepatan putar rotor (pu)
- Z_{gp} : komponen urutan positif SEIG (pu)
- Z_{gn} : komponen urutan negatif SEIG (pu)
- Z_e : impedansi ekuivalen antara beban dan kapasitor C_p
- E_g : tegangan terbangkit pada generator (pu)
- I_{ap}, I_{an} : arus stator urutan positif dan negatif (pu)

Tabel 1. Rating mesin induksi

kW/HP	0,75/1
Tegangan (Δ -Y)	220V/380V
Arus (Δ -Y)	3,6A/2,1A
Frekuensi	50 Hz
Jumlah kutub	4

Tabel 2. Parameter mesin induksi

Parameter	Nilai
R_s	11,14 Ω
R'_r	6,37 Ω
X_s	15,57 Ω
X'_r	15,57 Ω
X_{m-max}	303,8 Ω

Untuk mempermudah mendapatkan impedansi total dari sistem, maka digunakan tiga impedansi yaitu Z_{gp}/F , Z_{gn}/F dan $Z_e/3F$.

$$\frac{Z_{gp}}{F} = \left(\frac{R_s}{F} + jX_s \right) + \frac{(jX_m) \left(\frac{R'_r}{F - \delta} + jX'_r \right)}{\frac{R'_r}{F - \delta} + j(X_m + X'_r)} \quad (1)$$

$$\frac{Z_{gn}}{F} = \left(\frac{R_s}{F} + jX_s \right) + \frac{(jX_m) \left(\frac{R'_r}{F + \delta} + jX'_r \right)}{\frac{R'_r}{F + \delta} + j(X_m + X'_r)} \quad (2)$$

$$\frac{Z_e}{3F} = \frac{\left(\frac{R_L}{3F} \right) \left(-\frac{jX_{cp}}{3F^2} \right)}{\left(\frac{R_L}{3F} \right) + \left(-\frac{jX_{cp}}{3F^2} \right)} \quad (3)$$

Persamaan impedansi diatas selanjutnya digunakan untuk memperoleh persamaan impedansi total seperti yang ditunjukkan pada persamaan (4).

2.2 Perhitungan Nilai Frekuensi dan Reaktansi Magnetisasi

Nilai frekuensi dan reaktansi magnetisasi merupakan dua nilai yang penting untuk menghitung performa SEIG pada berbagai kondisi beban, kapasitor dan kecepatan rotor. Dengan melihat rangkaian ekivalen pada Gambar 2. Maka akan diperoleh loop arus seperti pada persamaan (3) [4].

$$ZI_{ap} = 0 \tag{3}$$

Karena saat proses pembangkitan daya I_{ap} tidak bernilai 0, maka nilai Z (total impedansi) yang memiliki nilai 0.

$$Z = \left(\frac{Z_{gp}}{F} - \frac{jX_{cs}}{F^2} \right) + \left[\frac{\left(\frac{Z_{gn}}{F} - \frac{jX_{cs}}{F^2} \right) \left(\frac{Z_e}{3F} + \frac{jX_{cs}}{3F^2} \right)}{\left(\frac{Z_{gn}}{F} - \frac{jX_{cs}}{F^2} \right) + \left(\frac{Z_e}{3F} + \frac{jX_{cs}}{3F^2} \right)} \right] \tag{4}$$

Dari persamaan (4) terlihat bahwa Z akan memiliki bagian riil dan imajiner. Ketika Z bernilai 0 maka baik bagian riil maupun bagian imajiner akan bernilai 0 seperti pada persamaan (5) dan (6) dibawah ini.

$$\Re(Z) = 0 \tag{5}$$

$$F(f, \delta, R_s, R_r, R_L, X_s, X_r, X_{cs}, X_{cp}) = 0$$

$$\Im(Z) = 0 \tag{6}$$

$$F(f, \delta, R_s, R_r, R_L, X_s, X_r, X_{cs}, X_{cp}) = 0$$

Dengan memisahkan bagian riil dan imajiner dari Z, maka akan diperoleh dua persamaan tak linier. Dari persamaan tersebut terdapat dua variabel yang tidak diketahui yaitu F dan X_m . Dengan bantuan software untuk menyelesaikan persamaan tak linear tersebut, maka F dan X_m dapat diperoleh.

2.3 Identifikasi Tegangan Air-Gap

Untuk memperoleh tegangan air-gap (E_g), digunakan kurva antara E_g dan X_m . Informasi yang dibutuhkan untuk membuat kurva ini dapat diperoleh secara eksperimental. Mesin Induksi dapat dioperasikan sebagai motor dan diputar dalam kondisi tidak berbeban. Tegangan input akan divariasikan dan selanjutnya nilai X_m dapat dihitung.

Dari kurva $E_g - X_m$ yang ditunjukkan Gambar 3 maka diperoleh fungsi E_g terhadap X_m .

$$(1) 0,96 < X_m$$

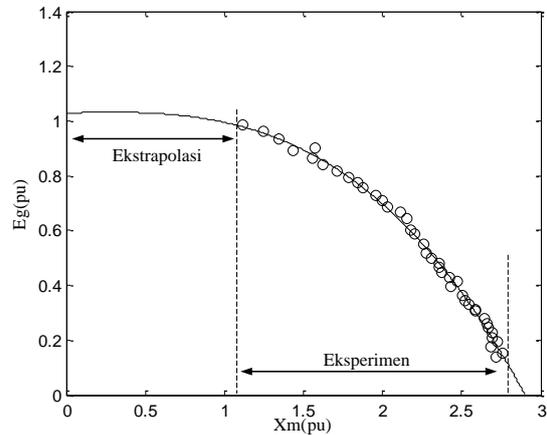
$$E_g = 1 \tag{2}$$

$$0,975 < X_m < 2,9$$

$$E_g = -0,041491X_m^3 - 0,007163X_m^2 + 0,015263X_m + 1,0287$$

$$X_m > 2,9$$

$$E_g = 0$$



Gambar 3. Kurva variasi E_g terhadap X_m

2.4 Perhitungan Performa SEIG

Rangkaian ekivalen pada Gambar 2 akan digunakan untuk memperoleh parameter yang dibutuhkan untuk menganalisa performa dari SEIG. Analisa performa SEIG dapat dilihat dari tegangan keluaran, daya keluaran serta arus keluaran seperti yang ditunjukkan pada persamaan (9-11).

$$I_{ap} = \frac{E_g}{\frac{R_s}{F} + jX_s - jX_{cs} + \frac{\left(\frac{Z_{gn}}{F} - j\frac{X_{cs}}{F^2} \right) \left(\frac{Z_e}{3F} + j\frac{X_{cs}}{3F^2} \right)}{\frac{Z_e}{3F} + \frac{Z_{gn}}{F} - j\frac{2X_{cs}}{3F^2}}} \tag{7}$$

$$I_{an} = -\frac{\frac{Z_e}{3F} + j\frac{X_{cs}}{3F^2}}{\frac{Z_e}{3F} + \frac{Z_{gn}}{F} - j\frac{2X_{cs}}{3F^2}} I_{ap} \tag{8}$$

$$I = -\frac{-j\frac{X_{cs}}{F^2}}{\frac{R_L}{F} - j\frac{X_{cp}}{F^2}} (I_{ap} + I_{an}) \tag{9}$$

$$V = R_L I \tag{10}$$

$$P_o = R_L |I|^2 \tag{11}$$

Dengan memperoleh semua data yang dibutuhkan seperti parameter mesin, E_g , F dan X_m

maka arus, tegangan dan daya keluaran dari SEIG dapat dihitung menggunakan persamaan (9-11).

3. Optimisasi Kapasitor dengan PSO

Penggunaan metode PSO untuk optimisasi kapasitor bertujuan untuk memperoleh nilai kapasitor yang tepat sehingga SEIG memiliki daya keluaran lebih dari 30% dari rating mesin induksi. Selain itu optimisasi kapasitor ini bertujuan agar ketika dibebani, arus belitan stator dan tegangan ke beban masih dalam batas yang diizinkan.

3.1 Objective Function dan Constraint

Proses optimisasi akan dilakukan pada tiga buah kapasitor eksitasi, yaitu satu buah kapasitor paralel (C_p) dan dua buah kapasitor seri (C_s).

Objective function pada program optimisasi yang dilakukan adalah untuk mendapatkan impedansi total (Z) yang bernilai 0. *Objective function* dari permasalahan ini dapat dilihat pada persamaan (12).

$$\text{Minimize } Z(X_m, F) \tag{12}$$

Variabel yang akan dikontrol dari persamaan (12) adalah batas arus belitan stator dan tegangan beban. Sehingga penelitian ini akan memiliki *constraint* sebagai berikut.

- (a) Batas arus belitan stator

$$I_i \leq I_{\max} \quad i = a, b, c$$

- (b) Tegangan Beban

$$V_{\min} \leq V_L \leq V_{\max}$$

Arus pada belitan stator akan dijaga sehingga tidak melebihi arus maksimum (I_{\max}) yang tertera pada *nameplate*. Pada penelitian ini, mesin induksi yang digunakan memiliki nilai I_{\max} 2,1 A. Sementara itu, karena SEIG akan beroperasi untuk menyuplai beban satu masa maka nilai minimum dari tegangan beban adalah 10% dari 220 V dan tegangan maksimum adalah 5% dari 220V.

3.2 Algoritma PSO

Algoritma PSO yang umum diketahui diadaptasi dari perilaku sosial kawanan burung di alam. Kata partikel pada PSO menunjukkan seekor burung dalam kawanannya. Setiap partikel memiliki dua karakteristik yaitu posisi dan kecepatan. Setiap partikel bergerak dalam ruang tertentu dan akan mengingat posisi terbaik yang pernah dilalui (berupa fungsi nilai objektif). Partikel akan menyampaikan informasi atau posisi informasi atau posisi yang baik sehingga partikel-partikel lain akan menyesuaikan posisi dan kecepatan masing-masing berdasarkan informasi yang diterima [Singiresu S. Rao.(2009)]. Langkah-langkah yang dilakukan untuk melakukan optimisasi dengan PSO adalah sebagai berikut :

- (1) Menentukan jumlah kawanan (N) dan

partikel. Karena pada penelitian ini akan dilakukan optimisasi nilai kapasitor seri dan kapasitor paralel, maka akan terdapat dua partikel.

- (2) Inisiasi posisi partikel secara acak. Selanjutnya menetapkan posisi (X) dan kecepatan (V) selama iterasi.

$X_j(i)$ = posisi partikel- j pada iterasi ke- i

$V_j(i)$ = kecepatan partikel- j pada iterasi ke- i

$j = 1, 2, \dots, N$

- (3) Hitung nilai *fitness* dari *objective function* , yaitu pada penelitian ini merupakan nilai Z .

- (4) Menentukan P_{best} dan G_{best} , dimana P_{best} merupakan posisi terbaik partikel ke- j pada iterasi ke- i sementara G_{best} adalah posisi terbaik dari keseluruhan partikel pada iterasi ke- i . Karena *objective function* pada penelitian ini merupakan nilai minimum dari Z , maka akan dipilih partikel dengan nilai *fitness* paling rendah.

- (5) Menghitung *update* kecepatan dan posisi partikel ke- j pada iterasi ke- i

$$V_j(i) = w * V_j(i-1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - X_j(i-1)] + c_2 r_2 [G_{best} - X_j(i-1)] \tag{13}$$

$$X_j(i) = X_j(i-1) + V_j(i) \tag{14}$$

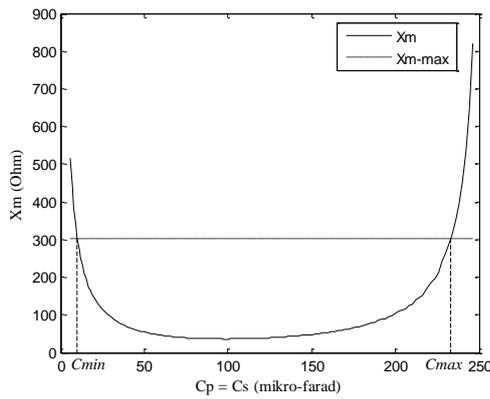
Dimana c_1 , c_2 dan masing-masing ditetapkan bernilai 0,1, sedangkan r_1 dan r_2 adalah bilangan acak.

- (6) Melakukan pengecekan apakah solusi yang dihasilkan telah konvergen . Solusi dikatakan konvergen ketika posisi partikel menuju ke nilai yang sama. Jika belum, maka akan dilakukan pengulangan pada langkah ke (3) dan (4) dan iterasi akan diperbarui $i = i+1$.

3.3 Batas Maksimum dan Minimum Kapasitor

Menentukan batas maksimum dan minimum dari variabel yang dioptimisasi merupakan hal yang penting. Selain agar proses optimisasi terarah, penentuan batas nilai C_s dan C_p dapat menentukan proses *self excitation* pada SEIG. Agar SEIG dapat melakukan *self excitation* nilai X_m harus kurang atau sama dengan nilai X_{m-max} [S.N. Mahato, S.P. Singh and M.P. Sharma. (2007)].

Untuk memperoleh batas nilai C_s dan C_p , SEIG akan diberikan nilai kapasitansi yang bervariasi pada kondisi tanpa beban. Dalam hal ini nilai C_s dan C_p diasumsikan sama. Sementara itu nilai X_{m-max} telah diperoleh pada bagian 2.3 yaitu 2,9 pu atau 303,81 ohm. Kurva X_m dengan variasi nilai C dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva variasi X_m terhadap C

Dapat dilihat dari Gambar 4. bahwa terdapat dua titik pada kurva X_m yang memotong garis X_{m-max} . Titik paling kiri merupakan nilai kapasitansi minimum (C_{min}) sementara titik disebelah kanan merupakan nilai kapasitansi maksimum (C_{max}). Nilai C_{min} dan C_{max} yang diperoleh masing-masing adalah $10\mu F$ dan $234\mu F$.

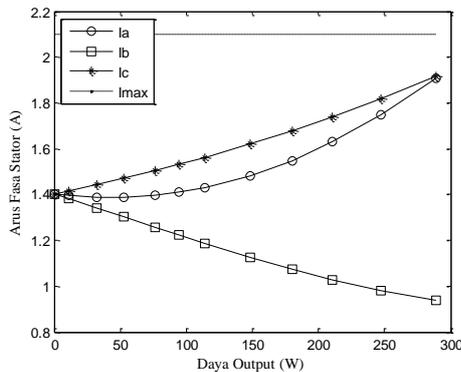
4. Analisis dan Hasil Simulasi

Pada bagian ini akan dianalisa perbandingan performa SEIG untuk beban satu fasa ketika nilai kapasitor tidak dioptimisasi dan ketika dilakukan optimisasi dengan PSO. Dalam analisis ini diasumsikan putaran rotor konstan yaitu 1500 rpm.

4.1 Performa SEIG Sebelum Optimisasi Kapasitor

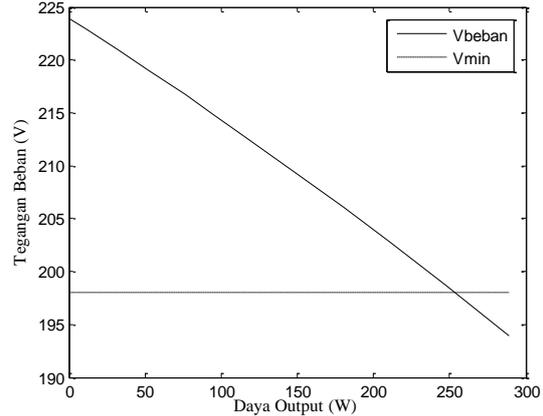
Performa SEIG akan diuji dengan nilai C_s dan C_p masing-masing bernilai $20\mu F$. Dengan nilai C_s dan C_p tersebut akan dilakukan kenaikan pembebanan terhadap SEIG. Selanjutnya akan dilakukan pengamatan terhadap arus fasa stator, tegangan beban dan frekuensi.

Pada simulasi dengan C_s dan C_p $20\mu F$, SEIG dibebani hingga 288,9 W atau 38,5% dari rating daya mesin induksi. Dari hasil simulasi yang diperoleh terlihat bahwa terjadi kondisi tidak seimbang pada belitan fasa stator. Ketika beban maksimum, nilai I_a, I_b dan I_c masing-masing adalah 1,91 A, 0,938A dan 1,917A. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 5.

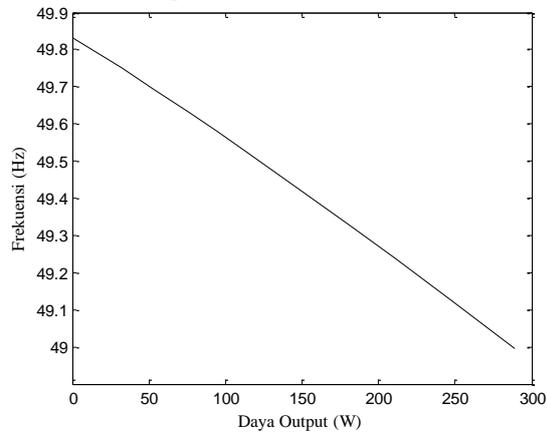


Gambar 5. Variasi arus fasa stator terhadap perubahan beban

Dari Gambar 6 terlihat bahwa ketika dilakukan perubahan beban, tegangan beban atau tegangan keluaran mengalami penurunan. Pada pembebanan 38,5% tegangan beban turun hingga 193,8V. Pembebanan 33% merupakan batas maksimum pembebanan SEIG pada kondisi ini, dimana tegangan keluaran masih 198,7V. Sama halnya dengan tegangan beban, frekuensi keluaran dari SEIG juga mengalami penurunan akibat kenaikan beban. Hingga pada beban 38,5% frekuensi yang dihasilkan adalah 48,99Hz.



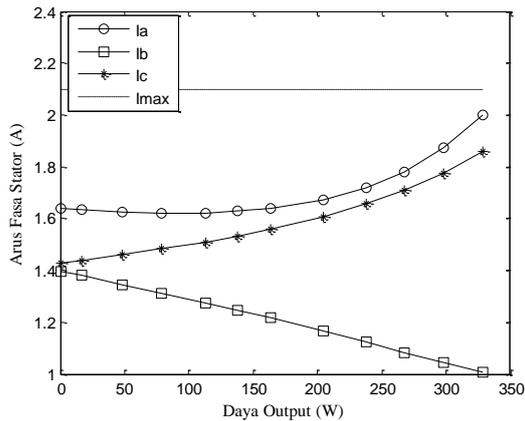
Gambar 6. Variasi tegangan beban terhadap perubahan beban



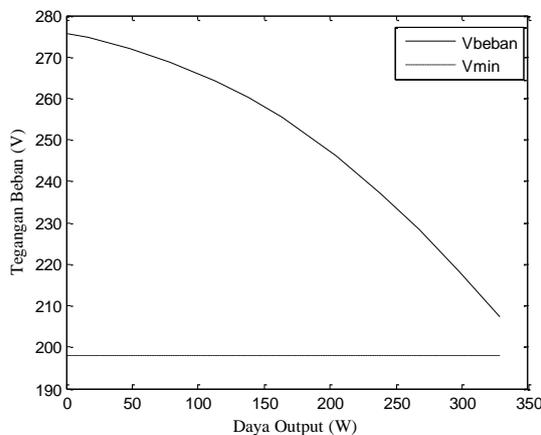
Gambar 7. Variasi frekuensi terhadap perubahan beban

4.2 Performa SEIG Setelah Optimisasi Kapasitor

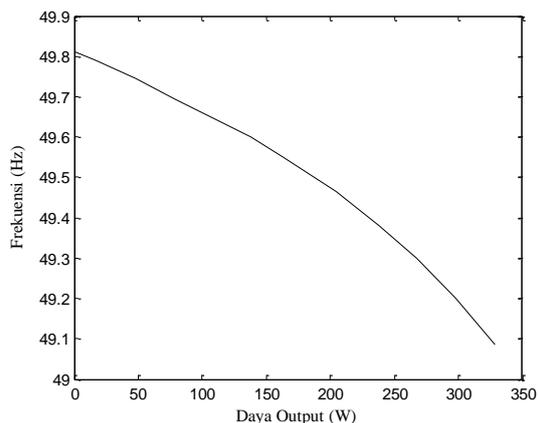
Dalam simulasi SEIG dengan optimisasi kapasitor, SEIG dibebani maksimum 44% dari rating daya mesin induksi. Dari hasil simulasi dengan PSO diperoleh nilai C_s $19\mu F$ dan C_p $25\mu F$. Dengan hasil C_s dan C_p yang telah diperoleh selanjutnya dilakukan variasi pembebanan untuk melihat performa dari SEIG.



Gambar 8. Variasi arus fasa stator terhadap perubahan beban setelah optimisasi



Gambar 9. Variasi tegangan beban terhadap perubahan beban setelah optimisasi



Gambar 10. Variasi frekuensi terhadap perubahan beban setelah optimisasi

Dari hasil simulasi yang diperoleh terlihat bahwa setelah dilakukan optimisasi nilai kapasitor C_s dan C_p , SEIG mampu dibebani hingga 329 W atau 43,85% dari rating mesin induksi. Dengan beban 43,85% tersebut, kondisi arus fasa pada belitan stator masih pada kondisi di bawah arus maksimum. Dari Gambar 8 ditunjukkan bahwa nilai

I_a , I_b dan I_c masing-masing adalah 1,99 A , 1,01A dan 1,857A.

Dari Gambar 9, terlihat bahwa pada kondisi pembebanan 43,85% SEIG memiliki tegangan keluaran 207,3V. Hal ini telah memenuhi target optimisasi dimana nilai paling minimum dari tegangan keluaran adalah 198V.

Sementara itu bila mengamati frekuensi keluaran dari SEIG terlihat bahwa pada kondisi beban maksimum SEIG memiliki frekuensi 49,1 Hz. Nilai frekuensi yang diperoleh tidak memiliki perbedaan nilai yang signifikan dengan frekuensi keluaran sebelum dilakukan optimisasi pada kapasitor.

5. Kesimpulan dan Saran

Dari simulasi yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa optimisasi kapasitor pada SEIG mampu meningkatkan kinerja dari SEIG untuk beban satu fasa. Sebelum menggunakan PSO, SEIG hanya mampu dibebani 33% dari rating mesin. Pada kondisi ini SEIG beroperasi tanpa melanggar batas dari tegangan minimum dibeban. Sementara itu setelah dilakukan optimisasi kapasitor, SEIG mampu dibebani hingga 43,85% dari rating mesin induksi. Hasil optimisasi dari PSO akan diuji eksperimen, dimana pengujian sedang dalam proses pengerjaan.

Daftar Pustaka :

S.N. Mahato, S.P. Sing and M.P. Sharma. (2008) : *Capacitor Required for Maximum Power of a Self-Excited Single Phase Induction Generator Using a Three-Phase Machine*, IEEE Transaction On Energy Conversion, Vol. 23, No. , June, 2008.

Stephen J. Chapman (2005) : *Electric Machinery Fundamentals*”, McGraw-Hill Companies, 2005.

F. Tadashi, K. Yuichi, K. Satoru and M. Toshio (1999) : *Performance Analysis of a Self Regulated Self-Excited Single-Phase Induction Generator Using a Three Phase Machine* , IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, September 1999.

Singiresu S. Rao. (2009) : *Engineering Optimization, Theory and Practice*”, Fourth Edition, John Wiley & Sons, New York, 2009.

S.N. Mahato, S.P. Singh and M.P. Sharma. (2007) : *Excitation Capacitance Required for Self Excited Single Phase Induction Generator Using Three Phase Machine*, Science Direct ,Energy Conversion and Management, September 2007.