

# PEMODELAN SISTEM GENERATOR INDUKSI TEREKSITASI SENDIRI (*SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR (SEIG)*)

A.Y. Erwin Dodu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tadulako  
Jl. Sukarno-Hatta Palu, Indonesia 94118, Tlp. 085241263284

## **Abstrak**

Mesin induksi telah digunakan secara luas untuk beragam pemakaian dalam hal konversi daya listrik ke kerja mekanis atau lebih dikenal dengan istilah motor. Selain sebagai motor, mesin ini juga dapat dimanfaatkan sebagai generator terutama jika input kecepatan yang masuk ke mesin tidak konstan atau bervariasi. Keuntungan utama dari mesin induksi adalah konstruksinya yang kokoh tanpa sikat (*brushless*) dan tidak diperlukannya pemisahan daya medan DC. Mesin ini sangat ekonomis, andal dan mempunyai *range* daya listrik yang luas. Tulisan ini akan menganalisa suatu pemodelan yang tepat terhadap sistem generator induksi tereksitasi sendiri. Dimulai dengan analisis detail terhadap mesin induksi yang berdiri sendiri. Selanjutnya juga akan dibicarakan tentang efek induktansi magnetisasi pada generator induksi tereksitasi sendiri dan pada akhirnya akan ditunjukkan hasil simulasi unjuk kerja generator pada berbagai variabel kecepatan.

**kata kunci** : generator induksi, pemodelan, tereksitasi sendiri, induktansi magnetisasi

## **I. PENDAHULUAN**

### **I.1 Mesin Induksi**

Pada struktur elektromagnetik mesin induksi, stator (bagian mesin yang diam) disusun dengan susunan tertentu dari sejumlah kumparan yang dibagi dalam tiga group dan disuplai dengan arus tiga fasa. Ketiga group kumparan tersebut secara fisik tersebar disekitar ruang fasa stator dan masing-masing membawa arus yang berbeda secara waktu fasa. Kombinasi ini menghasilkan suatu medan magnetik yang berotasi dan merupakan syarat utama agar mesin dapat bekerja. Mesin induksi merupakan mesin yang memiliki kecepatan tidak serempak (*asynchronous*) dimana titik operasi berada di bawah kecepatan serempak (*synchronous*) jika berperilaku sebagai motor dan di atas kecepatan serempak jika berperilaku sebagai generator (pembangkit daya listrik). Kehadiran resistansi negatif (terjadi bila slip-nya negatif) pada mesin induksi menyatakan bahwa selama mode pembangkitan, daya mengalir dari rotor (bagian mesin yang berputar) ke stator.

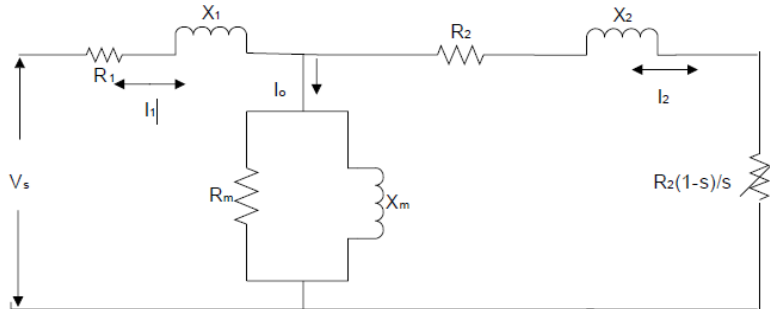
### **I.2 Rangkaian Listrik Ekuivalen Mesin Induksi**

Teori operasi mesin induksi didasarkan pada rangkaian ekuivalen per fasa seperti ditunjukkan pada gambar 1. Pada gambar tersebut R menyatakan nilai resistansi dan X menyatakan nilai reaktansi induktif. Subscript 1 untuk stator, 2 untuk rotor dan m untuk komponen magnetisasi. Mesin induksi membutuhkan arus eksitasi AC agar bisa beroperasi. Arus eksitasi ini bisa dari mesin

---

---

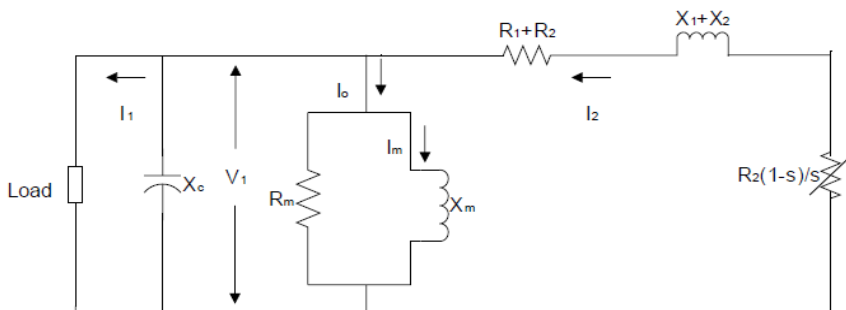
sendiri atau bisa juga berasal dari luar. Karena arus eksitasi utamanya merupakan komponen reaktif maka suatu sistem mesin induksi yang berdiri sendiri akan tereksitasi sendiri oleh kapasitor shunt.



Gambar 1. Rangkaian ekivalen per fasa mesin induksi dipandang dari stator

## II. GENERATOR INDUKSI TEREKSITASI SENDIRI (SEIG)

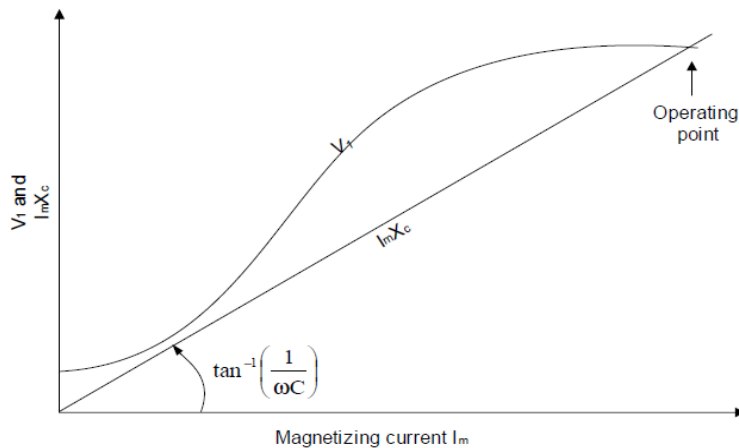
Generator induksi tereksitasi sendiri mempunyai cara kerja yang sangat mirip dengan cara kerja mesin induksi yang beroperasi pada daerah jenuh kecuali untuk suatu fakta bahwa generator induksi mempunyai kapasitor eksitasi yang dihubungkan sepanjang terminal statornya. Generator ini merupakan pilihan ideal untuk pembangkitan daya listrik dalam sistem pembangkitan listrik tenaga bayu yang berdiri sendiri dengan kecepatan bervariasi dimana tidak dimungkinkan untuk mengambil daya reaktif dari sistem pembangkit lainnya. Generator induksi akan mengeksitasi sendiri dengan menggunakan kapasitor luar hanya jika rotornya mempunyai medan magnetik remanensi yang cukup. Pada mode tereksitasi sendiri, frekuensi dan tegangan output dari generator dipengaruhi oleh kecepatan, beban dan nilai kapasitansi dalam satuan farad. Rangkaian ekivalen per fasa keadaan tunak untuk generator induksi tereksitasi sendiri ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Generator induksi tereksitasi sendiri dengan kapasitor eksternal

Proses eksitasi sendiri pada mesin induksi telah diteliti oleh para ahli selama beberapa dekade. Bila kapasitor dihubungkan sepanjang terminal stator mesin induksi dimana mesin ini digerakkan oleh suatu penggerak awal (*prime mover*) eksternal, maka tegangan akan diinduksikan

ke terminal-terminalnya. Gaya gerak listrik (ggl) dan arus induksi pada belitan stator yang dipengaruhi oleh kejenuhan magnetik mesin akan terus meningkat sampai kondisi keadaan tunak tercapai. Pada titik operasi ini tegangan dan arus akan distabilisasi oleh nilai puncak dan frekuensi yang diberikan. Agar eksitasi sendiri dapat terjadi maka harus diperhatikan hubungan antara nilai kapasitansi dan kecepatan minimum. Untuk mode operasi mesin yang berdiri sendiri, harus diupayakan agar generator induksi beroperasi pada daerah jenuh. Hal ini akan menjamin agar hanya satu titik perpotongan antara kurva magnetisasi dan garis reaktansi kapasitor yang menunjukkan kestabilan tegangan output pada keadaan berbeban seperti ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Determinasi operasi stabil pada generator induksi tereksitasi sendiri

Pada keadaan tidak berbeban, arus kapasitor  $I_c = V_1/V_c$  harus sama dengan arus magnetisasi  $I_m = V_1/X_m$ . Tegangan  $V_1$  merupakan fungsi dari  $I_m$  secara linear meningkat sampai titik saturasi inti magnetik tercapai. Frekuensi output dari generator induksi tereksitasi sendiri adalah  $f = 1/(2\pi CX_m)$  dan  $\omega = 2\pi f$  dimana  $C$  adalah kapasitansi eksitasi sendiri.

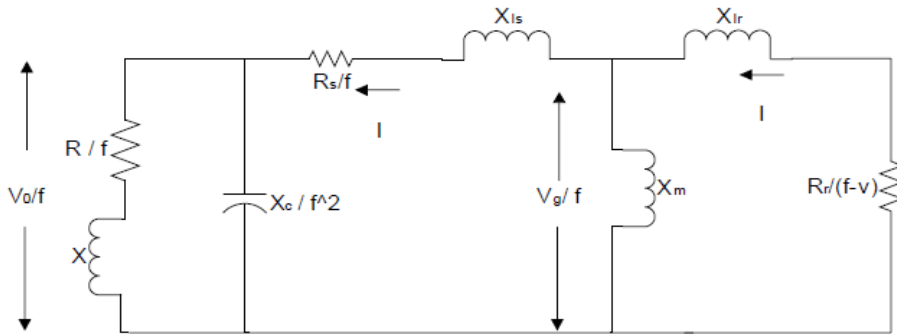
## II.1 Metode Analisis

Terdapat dua metode pemodelan rangkaian dasar yang dapat digunakan untuk menganalisa karakteristik SEIG. Pertama adalah rangkaian ekuivalen per fasa yang melibatkan metode loop impedansi dan admitansi nodal. Metode ini tepat digunakan untuk mempelajari karakteristik keadaan tunak mesin. Metode lain adalah model  $dx-axis$  yang didasarkan pada teori generalisasi mesin dan dapat digunakan untuk menganalisis baik kondisi transien maupun keadaan tunak mesin.

### II.1.1 Keadaan Tunak

Analisis keadaan tunak generator induksi menjadi pusat perhatian baik dari segi perancangan maupun operasionalnya. Dengan mengetahui parameter-parameter mesin maka dapat ditentukan performansi mesin pada nilai kecepatan, kapasitansi dan kondisi beban tertentu. Metode loop impedansi dan admitansi nodal digunakan untuk menganalisis SEIG yang keduanya didasarkan pada rangkaian ekuivalen keadaan tunak per fasa dari mesin induksi yang dimodifikasi untuk kasus

eksitasi sendiri (gambar 4). Telah digunakan prinsip konservasi daya aktif dan reaktif dengan menulis persamaan loop atau persamaan nodal untuk rangkaian ekuivalen. Metode-metode tersebut sangat efektif untuk menghitung nilai minimum kapasitansi yang dibutuhkan agar eksitasi sendiri generator induksi terjamin. Untuk operasi stabil, nilai kapasitansi eksitasi harus sedikit lebih tinggi daripada nilai minimum. Selain itu juga terdapat ambang batas bawah kecepatan dimana tidak ada eksitasi. Kecepatan ini disebut kecepatan *cutoff* mesin.



Gambar 4. Rangkaian ekuivalen generator induksi tereksitasi sendiri dengan beban R-L

Rangkaian keadaan tunak per fasa per unit dari generator induksi dengan beban R-L ditunjukkan pada gambar 4 dengan:

$R_s, R_r, R$  : stator per fasa p.u., rotor p.u. (dipandang dari stator) dan resistansi beban p.u.

$X_{ls}, X_{lr}, X, X_m$  : rugi-rugi stator per fasa p.u., rugi-rugi rotor p.u. (dipandang dari stator), beban p.u. dan reaktansi pemagnetan p.u. (pada frekuensi dasar).

$X_{smax}$  : reaktansi pemagnetan jenuh maksimum p.u.

$C$  : kapasitansi terminal eksitasi per phase

$X_c$  : reaktansi kapasitif per fasa p.u. (pada frekuensi dasar) dari terminal eksitasi kapasitor

$f, v$  : frekuensi p.u. dan kecepatan p.u.

$N$  : kecepatan dasar dalam rev/min

$Z_b$  : impedansi dasar per fasa

$f_b$  : frekuensi dasar

$V_g, V_0$  : gap udara per fasa dan tegangan output per fasa

Dalam analisis SEIG, beberapa analisis berikut telah dibuat:

1. Hanya reaktansi magnetik  $X_m$  yang dianggap dipengaruhi oleh kejenuhan magnetik sedangkan parameter yang lain dianggap konstan.
2. Reaktansi rugi-rugi stator dan rotor dalam satuan per unit dianggap sama. Asumsi ini secara normal adalah valid dalam analisis mesin induksi.
3. Rugi-rugi inti dalam mesin diabaikan.

Untuk rangkaian yang ditunjukkan dalam gambar 4, persamaan loop arus dapat dituliskan sebagai berikut:

$$IZ = 0 \quad (1)$$

dimana  $Z$  adalah impedansi loop total:

$$Z = \left( \left( \frac{R_r}{f-v} \right) + jX_{lr} \parallel jX_m \right) + \frac{R_s}{f} + jX_{ls} + \left( \frac{-jX_c}{f^2} \parallel \left( \frac{R}{f} + jX \right) \right) \quad (2)$$

untuk eksitasi keadaan tunak  $I \neq 0$ , berdasarkan persamaan (1) maka dapat diketahui nilai  $Z = 0$ . Hal ini menyatakan bahwa bagian real dan imajiner dari  $Z$  adalah nol. Kedua persamaan di atas dapat dipecahkan secara simultan dengan dua variabel yang belum diketahui (biasanya tegangan dan frekuensi). Untuk nilai tegangan yang berhasil dibuat maka kombinasi beban kapasitansi dan kecepatan rotor harus menghasilkan nilai yang sedemikian rupa sehingga  $X_m = X_{smax}$ . Hasil ini menyatakan bahwa nilai minimum kapasitansi eksitasi di bawah nilai minimum kegagalan SEIG pada eksitasi sendiri.

### II.1.2 Model Keadaan Tunak dan Transien (Transformasi $abc-dq0$ )

Proses eksitasi sendiri merupakan suatu fenomena transien dan lebih mudah dipahami jika dianalisis menggunakan model transien. Untuk sampai pada model transien generator induksi, akan digunakan model transformasi  $abc-dq0$  yang mentransfer sistem  $abc$  (dalam kerangka acuan tertentu) ke sistem rotasi  $dq0$ . Seperti diketahui bahwa semua induktansi yang berubah waktu dapat dieliminasi dengan menggunakan variabel stator dan rotor ke suatu kerangka acuan yang berputar pada kecepatan putar tertentu atau dibiarkan tetap stasioner. Semua transformasi kemudian didapatkan dengan menandai kecepatan rotasi yang tepat ke urutan kerangka acuan ini. Jika sistem ini diseimbangkan maka komponen nol akan sama dengan nol. Perubahan variabel yang memformulasi transformasi variabel 3 fasa elemen-elemen rangkaian stasioner ke urutan kerangka acuan bisa diekspresikan dengan:

$$f_{qd0s} = K_s f_{abcs} \quad (3)$$

dimana:

$$f_{qd0s} = \begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \\ f_{0s} \end{bmatrix}; f_{abcs} = \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix}; K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}; \theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0)$$

$\xi$  adalah variabel integrasi buatan. Untuk transformasi invers:

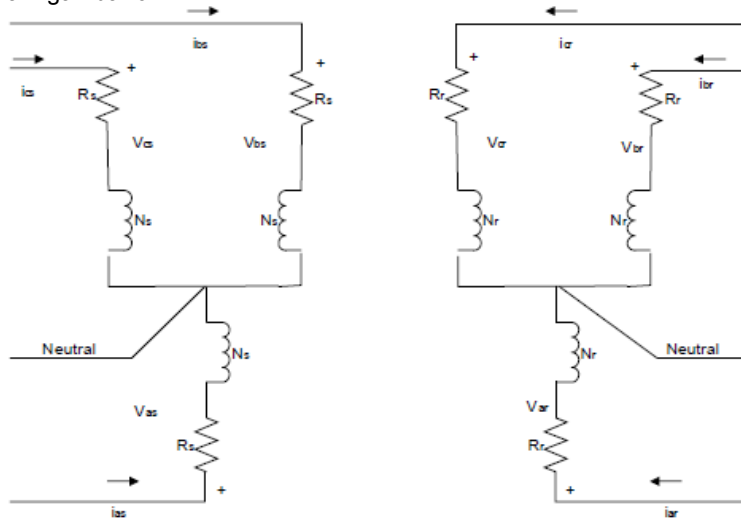
$$(K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix}$$

Pada persamaan (4),  $f$  dapat merepresentasikan tegangan, arus, tautan fluks atau muatan listrik. Subskript  $s$  mengindikasikan variabel, parameter dan transformasi yang dihubungkan dengan

rangkaian stasioner. Transformasi di atas juga dapat digunakan untuk mentransformasi belitan rotor berubah waktu (*time varying*) mesin induksi.

### II.2 Persamaan Tegangan pada Variabel Kerangka Acuan yang Berubah-ubah

Susunan belitan untuk suatu 2 kutub 3 fasa hubungan W mesin induksi simetris ditunjukkan dalam gambar 6.



Gambar 5. 2 kutub, 3 fasa hubungan W mesin induksi simetris.

Belitan stator merupakan belitan-belitan identik yang terdistribusi secara sinusoidal, terpisah  $120^\circ$  dengan jumlah belitan  $N_s$  dan resistansi  $r_s$ . Rotor terdiri dari tiga belitan identik yang terdistribusi secara sinusoidal dengan  $N_r$  merupakan jumlah belitan dan  $r_r$  nilai resistansinya. Persamaan tegangan dalam variabel mesin dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \tag{4}$$

$$V_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \tag{5}$$

dimana:

subskrip *s* menyatakan parameter dan variabel yang berhubungan dengan stator, subskrip *r* menyatakan parameter dan variabel yang berhubungan dengan rotor,  $V_{abcs}$  dan  $V_{abcr}$  merupakan tegangan fasa,  $i_{abcs}$  dan  $i_{abcr}$  merupakan arus fasa,  $\lambda_{abcs}$  dan  $\lambda_{abcr}$  merupakan tautan fluks serta  $p = d/dt$ .

Dengan menggunakan transformasi *abc-dq0* dan mengekspresikan tautan fluks sebagai perkalian arus dan induktansi belitan maka akan didapatkan persamaan tegangan dalam urutan kerangka acuan berikut:

$$V_{qdos} = r_s i_{qdos} + \omega \lambda_{dqs} + p \lambda_{qdos} \tag{6}$$

$$V'_{qdor} = r'_r i'_{qdor} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dqr} + p \lambda'_{qdor} \tag{7}$$

dimana:

$\omega$  merupakan kecepatan sudut listrik dari urutan-urutan kerangka acuan,  $\omega_r$  merupakan kecepatan sudut rotor,  $(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} \ -\lambda_{qs} \ 0]$ ;  $(\lambda'_{dqr})^T = [\lambda'_{ds} \ -\lambda_{qs} \ 0]$  dan tanda “ ’ ” menandakan nilai rotor yang dipandang dari sisi stator.

Dengan menggunakan hubungan antara tautan fluks dan arus pada kerangka acuan berubah-ubah dan mensubstitusikannya ke dalam persamaan (6) dan (7) maka persamaan tegangan dan fluks dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (8)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (9)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \quad (10)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \quad (11)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (12)$$

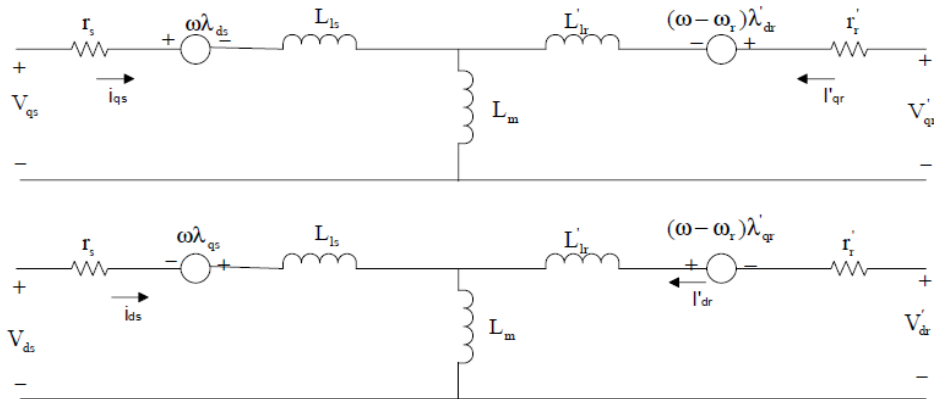
$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (13)$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + L_m (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (14)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + L_m (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (15)$$

dimana:  $L_{ls}$  dan  $L_{ms}$  adalah induktansi rugi dan induktansi pemagnetan stator.  $L_{lr}$  dan  $L_{mr}$  adalah induktansi rugi dan induktansi pemagnetan rotor. Induktansi pemagnetan  $L_{mr} = \frac{3}{2} L_{ms}$ .

Dari persamaan tegangan dan tautan fluks di atas dapat digambarkan rangkaian ekuivalen mesin induksi seperti yang tampak pada gambar 7.



Gambar 6. Rangkaian ekivalen kerangka acuan berubah-ubah untuk 3 fasa, mesin induksi simetris

### II.3 Persamaan Torka

Persamaan torka elektromagnetik, positif untuk operasi motor dan negatif untuk operasi generator, dalam konteks variabel acuan berurutan, dapat dinyatakan sebagai berikut:

Untuk aksi motor,

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) L_m (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad (16)$$

Untuk aksi generator,

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) L_m (i_{ds} i'_{qr} - i_{qs} i'_{dr}) \quad (17)$$

Sedangkan torka dan kecepatan dihubungkan oleh persamaan berikut:

Untuk operasi motor,

$$T_{e-motor} = J \left( \frac{2}{P} \right) p \omega_r + T_D \tag{18}$$

Untuk operasi generator,

$$T_D = J \left( \frac{2}{P} \right) p \omega_r + T_{e-gen} \tag{19}$$

dimana:

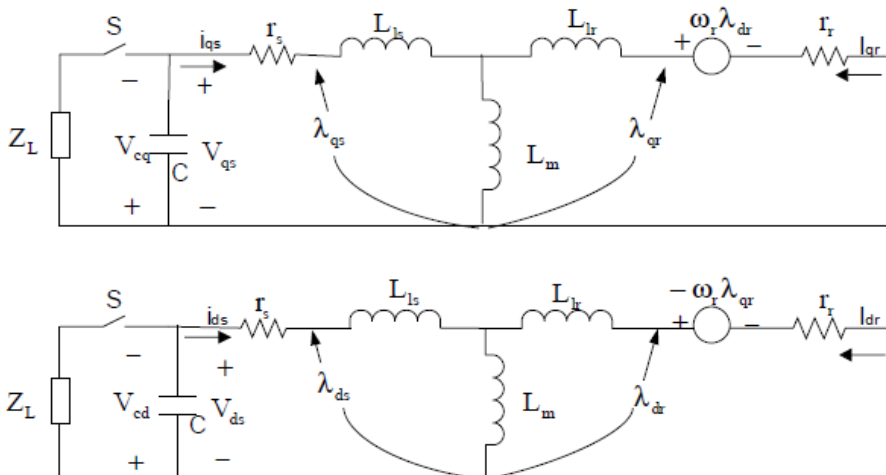
$P$  adalah jumlah kutub,  $J$  adalah inersia rotor dalam (Kg.m<sup>2</sup>) dan  $T_D$  merupakan torka penggerak dalam (N.m).

#### II.4 Kerangka Acuan Tetap

Meskipun perilaku mesin induksi bisa digambarkan pada kerangka acuan manapun namun terdapat tiga kerangka acuan yang paling sering digunakan. Persamaan tegangan untuk masing-masing kerangka acuan tersebut bisa didapatkan dari persamaan tegangan pada kerangka acuan yang berubah-ubah dengan mengatur kecepatan yang tepat untuk  $\omega$ , yaitu  $\omega = 0$  untuk kerangka acuan tetap,  $\omega = \omega_r$  untuk kerangka acuan rotor dan  $\omega = \omega_e$  untuk kerangka acuan sinkron.

#### II.5 Model SEIG

Seperti yang telah disebutkan di atas, model  $dq$  dari SEIG pada kerangka acuan tetap didapatkan dengan mensubstitusikan  $\omega = 0$  pada kerangka acuan berubah-ubah ekuivalen dari mesin induksi seperti yang ditunjukkan pada gambar 7. Gambar 8 menunjukkan suatu model  $dq$ -axis yang lengkap, yaitu SEIG dengan beban, dalam kerangka acuan tetap. Kapasitor  $C$  dihubungkan pada terminal-terminal stator untuk eksitasi sendiri. Untuk lebih memudahkan analisis, semua nilai dianggap dipandang dari sisi stator dan disini, setelah “ ” dihilangkan jika mengekspresikan parameter-parameter rotor dipandang dari stator.



Gambar 7. Model  $dq$  SEIG pada kerangka acuan tetap (semua nilai dipandang dari stator)



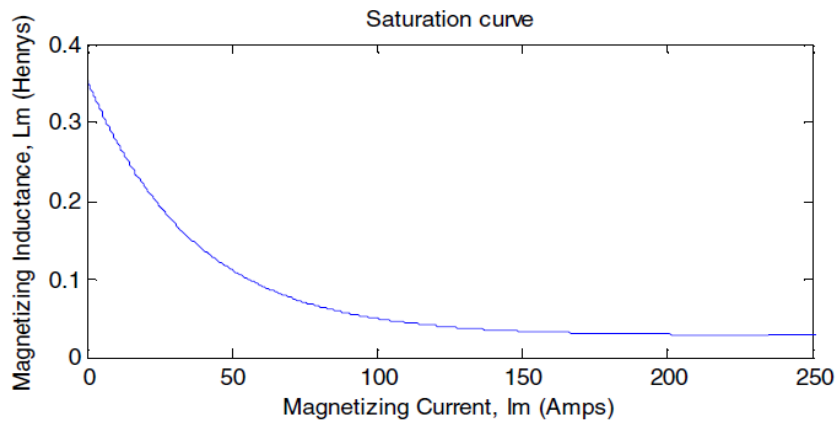
### III. HASIL SIMULASI

Berikut akan ditampilkan hasil simulasi model SEIG yang dibuat pada MATLAB/Simulink. Adapun parameter yang digunakan adalah:

Tabel 1. Parameter-parameter Mesin Induksi

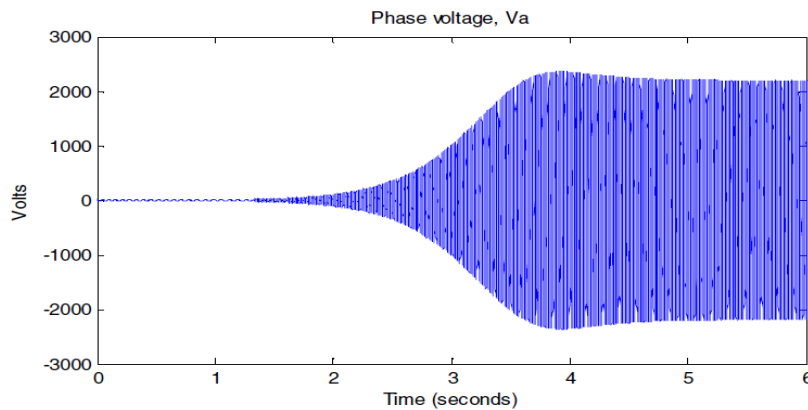
Rating Mesin			$I_B(abc)$	$r_r$	$r_s$	$X_{ls}$	$X_{lr}$	$X_m$	J
hp	Volts	rpm	Amps	Ohms	Ohms	Ohms	Ohms	Ohms	Kg.m <sup>2</sup>
500	2300	1773	93.6	0.187	0.262	1.206	1.206	54.02	11.06

#### 1. Kurva saturasi



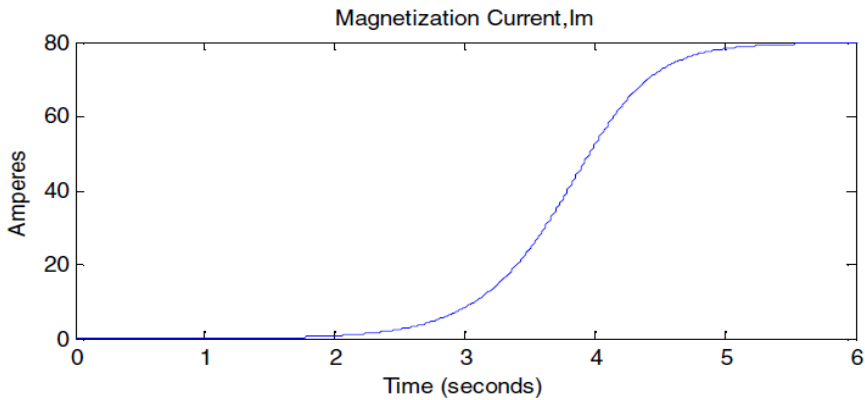
Gambar 8. Variasi induktansi pemagnetan terhadap arus pemagnetan

#### 2. Tegangan SEIG



Gambar 9. Tegangan yang dihasilkan dalam Self-Excited Induction Generator

### 3. Variasi arus pemagnetan



Gambar 10. Variasi arus pemagnetan terhadap tegangan yang dihasilkan

## IV. KESIMPULAN

Pemodelan dan analisis generator induksi pada tulisan ini telah dijelaskan secara detail dengan menggunakan teori  $dq$ -axis. Efek kapasitor eksitasi dan induktansi pemagnetan pada generator induksi, bila beroperasi sebagai generator yang berdiri sendiri, dapat mengakibatkan generator induksi tersebut akan tereksitasi sendiri. Dari hasil simulasi yang telah dibuat, dapat dikatakan bahwa Generator induksi tereksitasi sendiri (*Self-Excited Induction Generator/SEIG*) mampu beroperasi dengan baik pada berbagai macam kecepatan.

## V. DAFTAR PUSTAKA

1. Bimal K. Bose, *Modern Power Electronics and Ac Drives*, Pearson Education, 2003, ch. 2.
2. C. Grantham, D. Sutanto and B. Mismail, "Steady-state and transient analysis of self-excited induction generators," *Proceedings, IEE*, pt. B, vol. 136, no. 2, pp. 61-68, Mar. 1989.
3. Fitzgerald, Kingsley, Uman dan Achyanto, *Mesin-Mesin Listrik*, Penerbit Erlangga, 1992, Jakarta, Bab 9.
4. S. S. Murthy, O. P. Malik and A. K. Tandon, "Analysis of self excited induction generators," *Proceedings, IEE*, pt. C, vol. 129, no. 6, pp. 260-265, Nov. 1982.
5. Zuhal, *Dasar Tenaga Listrik*, Penerbit ITB Bandung, 1991, Bandung, Bab 4 dan Bab 6.