

Analisis Unjuk Kerja Motor Induksi Dengan Pengendali Thyristor Anti-Paralel

Supari¹, Bambang Sutopo²

¹Jurusan Teknik Elektro, Universitas Semarang, Semarang

²Jurusan Teknik Elektro, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

Abstrak

Salah satu cara pengendalian motor induksi tiga fase adalah dengan mengatur tegangan terminal motor. Pengaturan tegangan tersebut dapat dilakukan dengan menambahkan sepasang thyristor anti-paralel pada setiap fasenya. Berbagai model telah banyak digunakan untuk menganalisis unjuk kerja motor induksi dengan sistem pengendalian diatas. Tulisan ini membandingkan unjuk kerja *steady-state* tiga model yang telah digunakan oleh Lipo, Khater dan Nguyen. Unjuk kerja ketiga model tersebut disimulasikan dengan menggunakan MATLAB. Hasilnya menunjukkan bahwa model Lipo unggul dalam memberikan informasi bentuk gelombang tegangan, arus dan torsi sistem dalam kawasan waktu, sedangkan model Khater unggul dalam kecepatan komputasi.

KATA KUNCI : model Khater, model Lipo, model Nguyen.

1. Introduksi

Pengendalian motor induksi tiga fase dapat dilakukan dengan mengatur tegangan terminal motor. Pengaturan tegangan terminal motor tersebut dapat dilakukan dengan menambahkan sepasang thyristor yang dihubungkan secara anti-paralel pada masing-masing fasenya, sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 1. Sistem tersebut terdiri atas sumber tegangan tiga fase, dengan tiga pasang thyristor identik yang terhubung anti-paralel pada tiap fase motor besar. Sudut penyalan thyristor dihitung dari titik persilangan nol tegangan sumbernya. Pengaturan tegangan terminal motor, diperoleh dengan mengatur penghantaran thyristor dengan urutan tertentu. Bentuk gelombang tegangan dan arus motor ditunjukkan oleh gambar 2.

Lipo [4] telah menyelidiki unjuk kerja motor induksi tiga fase terkendali thyristor anti-paralel. Motor induksi maupun thyristor pengendalnya dimodelkan dengan model sumbu d-q, untuk dibuat persamaan variabel keadaan. Pada model ini, semua persamaan watak motor ditransformasikan ke sumbu d-q untuk dikerjakan dan diselesaikan dalam bentuk matrik. Hasil penyelesaian persamaan matrik tersebut ditransformasikan kembali ke sistem tiga fase.

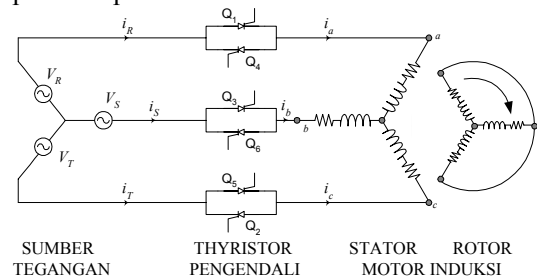
Khater dan Novotny [2] menganalisis unjuk kerja motor dengan memodelkan thyristor anti-paralel sebagai reaktansi seri, sedangkan

motor induksi dimodelkan dengan rangkaian ekuivalen satu fase. Besarnya reaktansi seri tersebut tergantung pada induktansi stator, induktansi rotor dan merupakan fungsi dari sudut tak-hantar thyristor (γ).

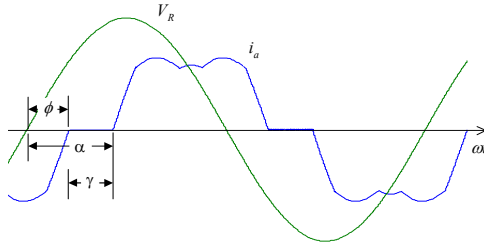
Nguyen dan Ramaswamy [6] menggabungkan model Lipo dan model Khater, yaitu, thyristor dimodelkan sebagai reaktansi seri, sedangkan motor induksi dimodelkan dengan model sumbu d-q.

Tulisan ini membandingkan model Khater, model Lipo dan model Nguyen dalam hal unjuk kerja *steady-state* motor induksi, kecepatan komputasi dan beban komputasi yang harus dilakukan.

Unjuk kerja motor yang dihasilkan oleh tiap-tiap model diolah dari parameter-parameter motor induksi yang sama agar dapat diperbandingkan. Parameter motor induksi yang dipakai pada tulisan ini dapat dilihat pada lampiran.



Gambar.1 Motor induksi dengan pengendali thyristor anti-paralel.



Gambar.2 Bentuk gelombang steady-state sistem pada gambar 1, $\alpha = 78^\circ$, $\phi = 38^\circ$, $\gamma = 40^\circ$.

2. Pemodelan Sistem

2.1 Model Lipo

Persamaan sumbu d-q motor induksi seimbang dengan frame referensi sembarang di stator dinyatakan dalam p.u adalah sebagai berikut : [3]

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_b} x_{ss} & \frac{\omega}{\omega_b} x_{ss} & \frac{p}{\omega_b} x_m & \frac{\omega}{\omega_b} x_m \\ -\frac{\omega}{\omega_b} x_{ss} & r_s + \frac{p}{\omega_b} x_{ss} & -\frac{\omega}{\omega_b} x_m & \frac{p}{\omega_b} x_m \\ \frac{p}{\omega_b} x_m & \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} x_m & r'_r + \frac{p}{\omega_b} x'_{rr} & \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} x'_{rr} \\ -\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} x_m & \frac{p}{\omega_b} x_m & -\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} x'_{rr} & r'_r + \frac{p}{\omega_b} x'_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

besaran,

p = operator derivatif,

ω_r = kecepatan sudut listrik rotor,

ω = kecepatan sudut listrik referensi, dan

ω_b = kecepatan sudut listrik basis.

Dengan mengambil tegangan maksimum dan arus maksimum sebagai basis, torsi elektromagnetik yang dihasilkan :

$$T_e = x_m (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad (2)$$

Menurut Lipo, pada kondisi *steady-state*, terdapat dua mode operasi pada sistem motor induksi dengan pengendali thyristor anti-paralel. Mode operasi tersebut ditentukan oleh besarnya sudut tak-hantar thyristor, γ .

Mode 1 : $0^\circ < \gamma < 60^\circ$.

Pada mode ini, semua fase atau dua buah fase motor terhubung ke sumber tegangan pada setiap saat.

Mode 2 : $60^\circ < \gamma < 120^\circ$.

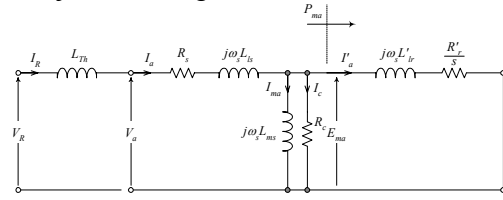
Pada mode ini, setiap saat ada dua buah fase atau satu fase motor terhubung ke sumber tegangan.

Setiap keadaan tersebut memberikan persamaan keadaan yang berbeda-beda, sehingga untuk nilai sudut tak-hantar, γ , tertentu, secara keseluruhan akan memberikan bentuk gelombang tegangan dan arus yang tertentu.

Penurunan persamaan keadaan untuk masing-masing kondisi diatas diberikan secara lengkap oleh Lipo [4].

2.2 Model Khater

Khater menggunakan model rangkaian ekuivalen satu fase untuk memodelkan motor induksi, sedangkan thyristor pengendali dimodelkan sebagai reaktansi seri, X_{Th} , pada setiap fase motor [2]. Model tersebut seperti ditunjukkan oleh gambar 3.



Gambar.3 Model Khater.

Besarnya X_{Th} , didefinisikan :

$$X_{Th} = \omega L_{Th} = \frac{\omega L f(\gamma)}{(1 - f(\gamma))} \text{ Ohm} \quad (3)$$

dimana,

$$f(\gamma) = (3/2\pi)(\gamma + \sin\gamma)$$

dan $L = L_{ls} + L'_{lr}$

Daya mekanis tiga fase yang dibangkitkan adalah

$$P_{mech} = \frac{3(1-s)}{s} R'_r (I'_a)^2 \text{ Watt} \quad (4)$$

Torsi yang dihasilkan adalah

$$T = \frac{P_{mech}}{\omega_m} \text{ N.m} \quad (5)$$

dimana, s = slip motor,

dan ω_m = kecepatan sudut mekanis rotor.

2.3 Model Nguyen

Nguyen menggunakan model reaktansi seri untuk memodelkan thyristor pengendali, dan menggunakan model sumbu d-q untuk memodelkan motor induksi tiga fase [6].

Pada dasarnya model sumbu d-q motor induksi pada model Nguyen merupakan model sumbu d-q motor induksi pada model Lipo dengan sudut tak-hantar thyristor, γ , sama dengan nol, yang mendapat catu sumber tegangan jala-jala dikurangi jatuh tegangan pada reaktansi seri.

Untuk keperluan perbandingan hasil yang diperoleh dari setiap model, semua besaran yang didapatkan dalam p.u dikonversi menjadi besaran aktual, dengan cara mengalikan besaran tersebut dengan besaran basisnya.

3. Hasil simulasi

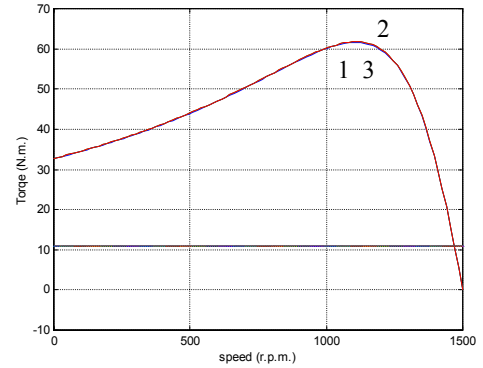
Gambar 4 menunjukkan unjuk kerja motor induksi 5 hp yang diperoleh dari masing-masing model untuk sudut tak-hantar thyristor sama dengan nol. Dari gambar 4 tersebut nampak bahwa untuk $\gamma = 0^\circ$, ketiga model memberikan unjuk kerja yang sama.

Unjuk kerja motor yang sama, dengan $\gamma = 45^\circ$ ditunjukkan oleh gambar 5. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa ketiga model memberikan karakteristik torsi dan arus yang hampir sama, dengan deviasi yang masih pantas diterima, sedangkan karakteristik tegangan mengalami deviasi yang cukup besar diantara ketiganya.

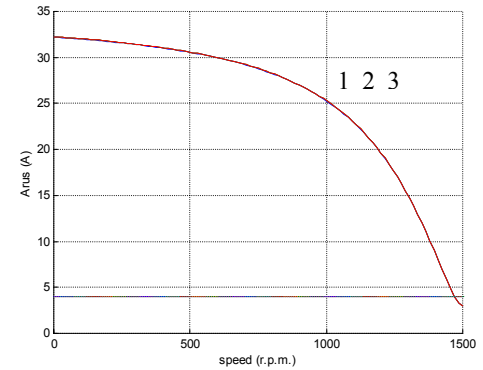
Gambaran perbandingan kecepatan dan beban komputasi masing-masing model terangkum dalam tabel 1.

TABEL 1. Kecepatan dan beban komputasi.

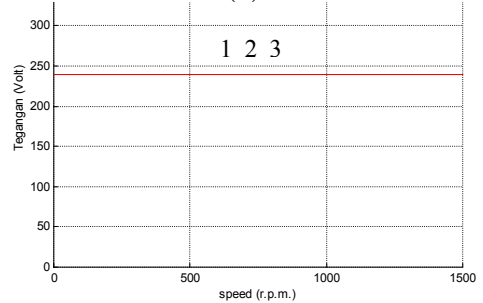
γ	Model	Kecepatan (detik)	Beban Komputasi (flops)
0°	Khater	7.64	8768
	Lipo	304.46	14300031
	Nguyen	297.48	14730076
45°	Khater	7.42	9273
	Lipo	321.09	14570595
	Nguyen	294.89	14660816



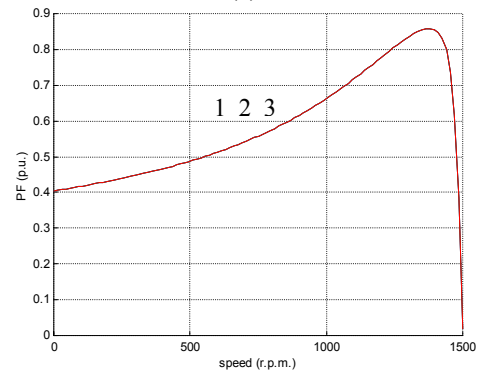
(a)



(b)

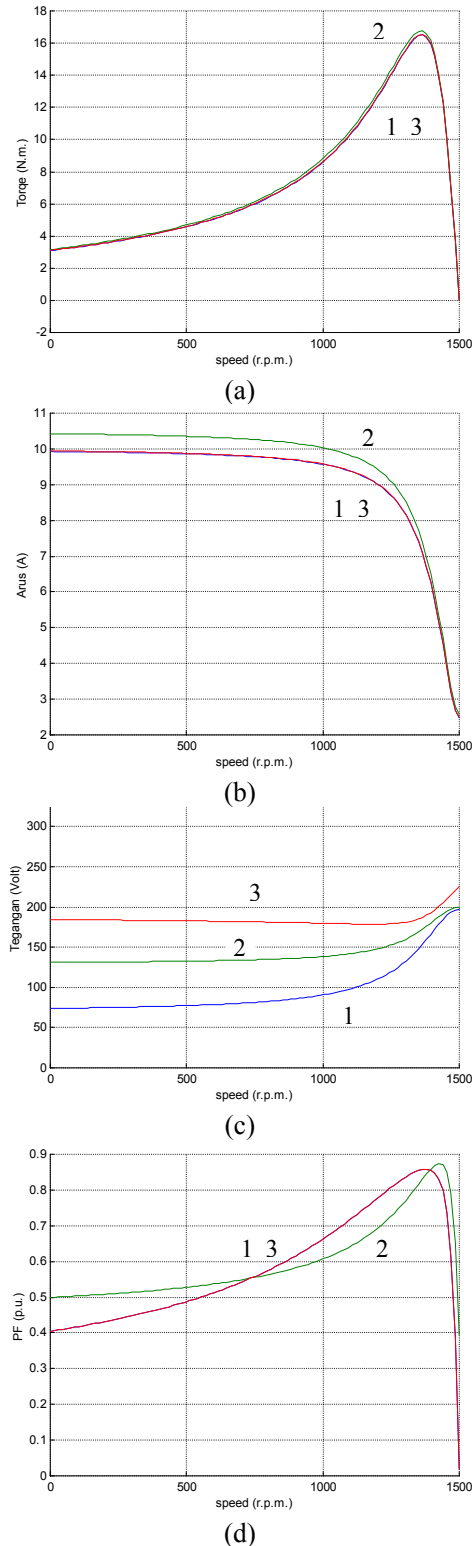


(c)



(d)

Gambar.4 Perbandingan Model Khater (1), Model Lipo (2) dan Model Nguyen (3) Pada motor 5 hp untuk $\gamma = 0^\circ$



Gambar.5 Perbandingan Model Khater (1), Model Lipo (2) dan Model Nguyen (3) Pada motor 5 hp untuk $\gamma = 45^\circ$

Model Khater akurat untuk sudut $\gamma = 0^\circ$. Untuk sudut γ yang lebih besar menyebabkan deviasi terhadap model d-q menjadi semakin besar. Bahkan model Khater menjadi tidak realistis digunakan pada sudut $\gamma > 67^\circ$, karena induktansi seri berubah menjadi kapasitansi.

4. Kesimpulan

Karakteristik torsi-speed yang dihasilkan oleh ketiga model mendekati sama. Model Khater hanya memerlukan perhitungan yang melibatkan bilangan kompleks sederhana, sehingga dapat memberikan penyelesaian yang lebih cepat, dengan beban komputasi yang relatif sangat kecil dibandingkan dua model lainnya. Model Lipo lambat dalam memberikan penyelesaian tetapi mempunyai informasi tentang bentuk gelombang tegangan dan arus motor, sehingga memungkinkan untuk analisis harmonik sistem.

Lampiran

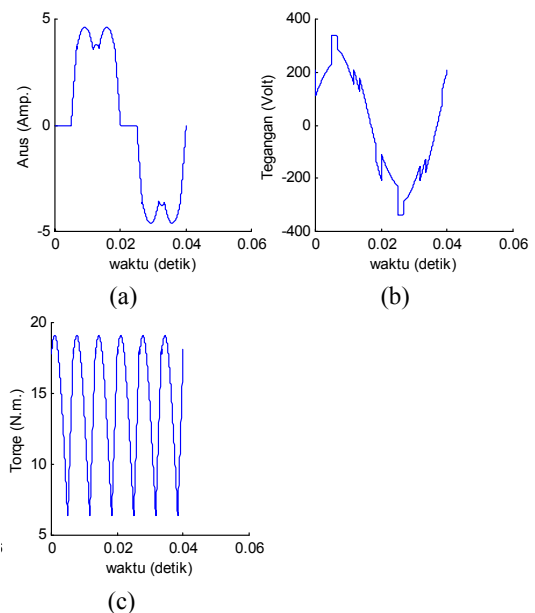
Parameter-parameter motor :

5 hp / 415 V / 50 Hz / 1470 rpm / 4 kutub

$R_s = 1.36 \text{ Ohm}$, $R'_r = 1.8 \text{ Ohm}$,

$L_{ls} = 11.0 \text{ mH}$, $L'_{lr} = 11.0 \text{ mH}$,

$L_{ms} = 241.2 \text{ mH}$



Gambar.L1 Bentuk gelombang arus, tegangan dan torsi pada motor 5 hp dengan model Lipo, pada kecepatan rated pada $\gamma = 45^\circ$.

Referensi :

- [1] Dewan, S.B., Slemon, G.R., dan Straugen, A., "Power Semiconductor Drives", John Wiley and Sons, Inc., New York, 1984.
- [2] Khater, F.M.H., dan Novotny, D.W., "An Equivalent-Circuit Model for Phase-Back Voltage Control of AC Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-22, No. 5, Sep/Oct 1986, pp. 835-841.
- [3] Krause, P.C., "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill Book Company, Inc., New York 1986
- [4] Lipo T.A., "The Analysis of Induction Motors with Voltage Control by Symmetrically Triggered Thyristors", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, March/April 1971, pp. 515-525.
- [5] Muchlas, "Sistem Kendali Soft-Start Motor Induksi Tiga Fase Berbasis Mikrokontroler", UGM, Master Tesis, 1998.
- [6] Nguyen, H.T., dan Ramaswamy, V., "Induction Motor Starter Instability", Proc. Conference on Industrial Drives, 18-20 September, 1991. pp. 104-107.
- [7] Santoso, P.B., "Pengendalian Motor Induksi dengan Thyristor", UGM, Skripsi S1, 1999.