

# Dinamika Rotor Motor Stepper Jenis Variable Reluctance

Budhi Anto

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Riau  
Kampus Binawidya, Jl. H. R. Subrantas, Pekanbaru  
e-mail: budhianto.ur@gmail.com

## Abstrak

Pemodelan dan simulasi dinamika bagian rotor dari suatu motor listrik merupakan bagian dari program penelitian untuk merancang dan membuat motor listrik dengan sasaran memperlihatkan bagian rotor dari rancangan motor listrik telah berputar seperti yang diharapkan. Paparan ini menampilkan simulasi gerakan rotor motor stepper jenis variable reluctance. Konstruksi motor stepper terdiri atas bagian stator yang mempunyai 3 pasang kutub menonjol dan bagian rotor yang mempunyai 4 gigi. Konversi elektromekanik diperoleh dengan cara mengalirkan arus listrik pada belitan-belitan yang terpasang pada kutub-kutub stator, sedangkan pada bagian rotor sama sekali tidak terdapat belitan. Proses simulasi dimulai dengan menurunkan persamaan gerakan rotor berdasarkan parameter-parameter rancangan motor stepper. Persamaan gerakan rotor tersebut kemudian disimulasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Simulasi memberikan hasil seperti yang diharapkan yaitu rotor motor stepper bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama sebesar 0,524 radian atau 30 derajat.

**Kata kunci :** motor stepper, variable reluctance, rotor, MATLAB

## 1. Pendahuluan

Pekerjaan simulasi merupakan bagian yang penting dari kegiatan penelitian bidang ilmu-ilmu terapan. Simulasi yang berhasil akan menimbulkan keyakinan yang kuat akan keberhasilan penelitian. Simulasi gerakan rotor dari suatu motor listrik merupakan bagian dari program penelitian untuk merancang dan membuat motor listrik dengan misi yang ingin dicapai adalah membuktikan bahwa bagian rotor dari motor listrik yang dirancang dapat berputar. Dengan menggunakan teknik simulasi menggunakan komputer, biaya penelitian dapat ditekan karena teknik coba-coba yang memerlukan banyak biaya dapat ditinggalkan.

Motor stepper adalah motor listrik yang mengubah pulsa-pulsa digital yang diberikan padanya menjadi gerak rotasi pada bagian rotornya (Krause, 1989). Sebuah pulsa digital yang diberikan pada belitan stator akan menyebabkan rotor bergerak sepanjang sudut tertentu. Sudut tersebut dinamakan *step length* (Krause, 1989) atau *step angle* (Nasar, 1987). Sebuah pulsa digital pada belitan stator menyebabkan rotor bergerak satu langkah yang panjangnya dinyatakan oleh nilai *step angle*. Untuk memenuhi satu putaran penuh (360 derajat), beberapa pulsa digital harus diberikan pada motor stepper. Dengan demikian motor stepper bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama.

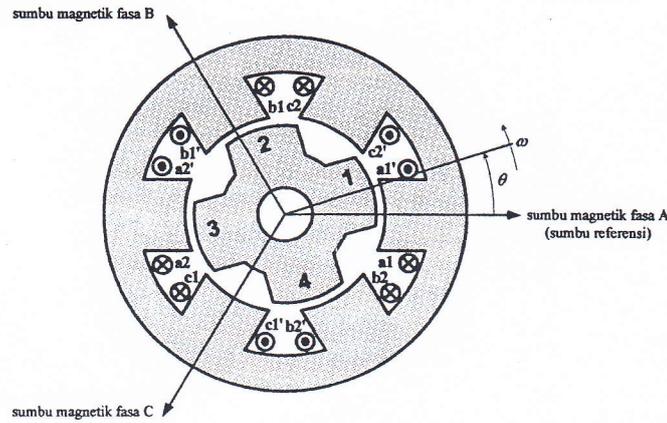
Motor stepper banyak digunakan sebagai aktuator pada berbagai sistem pengaturan seperti pada printer, disc drive, rotary actuator dan mesin perkakas berbasis kontrol numerik. Berdasarkan prinsip kerjanya, motor stepper dikelompokkan atas 2 jenis yaitu motor stepper jenis *variable reluctance* dan motor stepper jenis *permanent-magnet* (Krause, 1989). Perbedaan mendasar kedua jenis motor stepper tersebut terletak pada adanya magnet permanen yang terpasang aksial pada poros rotor motor stepper jenis *permanent-magnet*. Disini hanya disimulasikan gerakan rotor motor stepper jenis *variable reluctance*.

## 2. Konstruksi Dan Pemodelan

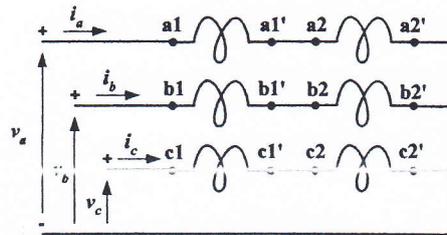
Motor stepper yang disimulasikan adalah motor stepper 3-fasa. Konstruksi motor stepper diperlihatkan pada Gambar 1a. Bagian stator motor stepper mempunyai sepasang kutub menonjol tiap fasanya, sehingga pada stator terdapat 6 kutub menonjol. Belitan-belitan stator dililitkan pada kutub-kutub menonjol. Pada bagian rotor terdapat 4 gigi, tidak terdapat belitan pada bagian rotor. Sebagai pengenal setiap gigi rotor diberi nomor 1, 2, 3 dan gigi 4. Inti stator dan rotor terbuat dari bahan magnetik. Diagram pengawatan belitan-belitan stator motor stepper diperlihatkan pada Gambar 1b.

Dari konstruksi pada Gambar 1a, kemudian diturunkan persamaan gerakan rotor. Penyelesaian analitis terhadap persamaan gerakan rotor merupakan persamaan yang menyatakan posisi rotor setiap waktu  $\theta(t)$ . Perilaku gerak rotasi rotor dipelajari dengan memplot persamaan posisi rotor tersebut sehingga diperoleh grafik posisi rotor terhadap waktu. Kecepatan gerak rotor setiap waktu  $\omega(t)$  diperoleh dari turunan pertama terhadap  $\theta(t)$ .





Gambar 1a. Motor stepper jenis variable reluctance dengan 6 kutub stator dan 4 gigi rotor



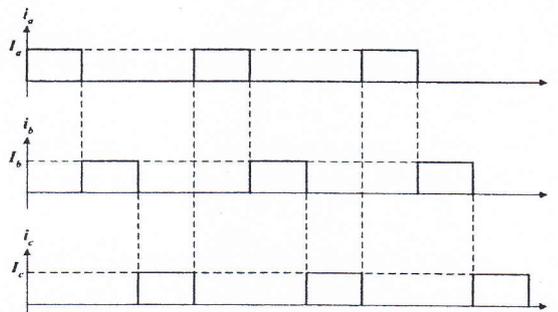
Gambar 1b. Diagram pengawatan belitan-belitan stator

Grafik  $\theta(t)$  dan  $\omega(t)$  diperoleh dengan cara mensimulasikan persamaan gerakan rotor secara langsung. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Perilaku bagian rotor dari rancangan motor stepper dipelajari berdasarkan bentuk  $\theta(t)$  dan  $\omega(t)$ .

Persamaan gerakan rotor diperoleh dengan mengambil beberapa asumsi sebagai berikut,

1. Fluksi magnet bocor yang terdapat pada masing-masing kutub stator diabaikan
2. Gandengan magnetik antar belitan fasa diabaikan
3. Motor stepper bekerja pada daerah linier dari karakteristik magnetik bahan stator dan rotor

Asumsi pertama dan kedua dapat diterima dengan syarat inti stator dan inti rotor terbuat dari bahan magnetik dengan permeabilitas tinggi dan arus pada masing-masing fasa ( $i_a$ ,  $i_b$  dan  $i_c$ ) diatur sedemikian rupa sehingga pada suatu waktu hanya terdapat 1 belitan fasa yang dialiri arus listrik. Diagram waktu arus masing-masing fasa diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram waktu arus stator motor stepper variable reluctance 3-fasa

Rotor motor stepper bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama. Panjang langkah ditentukan oleh nilai step angle. Untuk motor stepper jenis variable reluctance, nilai step angle ( $S_A$ ) dihitung menggunakan persamaan berikut (Nasar, 1987),

$$SA = \frac{|G_s - G_r|}{G_s \cdot G_r} \times 360 \text{ derajat} \quad (1)$$

dengan  $G_s$  adalah jumlah kutub stator dan  $G_r$  adalah jumlah gigi rotor. Dengan demikian, berdasarkan persamaan (1) diatas, motor stepper yang dirancang mempunyai nilai  $SA = 30$  derajat.

### Persamaan Gerakan Rotor

Berdasarkan Gambar 1b, persamaan tegangan belitan stator adalah sebagai berikut,

$$v_a = r_s i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (2)$$

$$v_b = r_s i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (3)$$

$$v_c = r_s i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (4)$$

Pada persamaan-persamaan diatas,  $r_s$  adalah resistansi belitan masing-masing fasa.  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$ , dan  $\lambda_c$  masing-masing adalah flux linkage fasa a, fasa b dan fasa c. Persamaan flux linkage masing-masing fasa adalah sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

$L_{aa}$ ,  $L_{bb}$ , dan  $L_{cc}$  masing-masing adalah induktansi diri masing-masing fasa. Induktansi-induktansi yang lain adalah induktansi yang muncul karena adanya gandengan magnetik antar fasa. Karena gandengan magnetik antar fasa diabaikan, persamaan (5) dapat direduksi menjadi persamaan berikut,

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & L_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

Persamaan induktansi diri masing-masing fasa diperoleh berdasarkan pengembangan terhadap mesin reluktans 1-fasa 2 kutub (Krause, 1989). Berdasarkan konstruksi motor stepper pada Gambar 1a, nilai induktansi diri masing-masing fasa adalah sebagai berikut,

$$L_{aa} = L_l + L_A + L_B \cos 4\theta \quad (7)$$

$$L_{bb} = L_l + L_A + L_B \cos 4(\theta - \frac{2}{3}\pi) \quad (8)$$

$$L_{cc} = L_l + L_A + L_B \cos 4(\theta + \frac{2}{3}\pi) \quad (9)$$

$L_l$  adalah induktansi bocor belitan masing-masing fasa.  $L_A$  dan  $L_B$  adalah induktansi yang dihitung menggunakan persamaan-persamaan berikut (Krause, 1989),

$$L_A = \frac{L_m(\max) + L_m(\min)}{2} \quad (10)$$

$$L_B = \frac{L_m(\max) - L_m(\min)}{2} \quad (11)$$

dengan  $L_m(\max)$  adalah nilai maksimum induktansi magnetisasi motor dan  $L_m(\min)$  adalah nilai minimum induktansi magnetisasi motor. Induktansi magnetisasi motor bervariasi sesuai posisi gigi-gigi rotor terhadap kutub-kutub stator. Induktansi magnetisasi minimum terjadi jika posisi gigi rotor memberikan nilai reluktansi maksimum, sedangkan induktansi magnetisasi maksimum terjadi jika posisi gigi rotor memberikan nilai reluktansi minimum.

Jika  $L_l$  diabaikan maka persamaan (7), (8) dan persamaan (9) diatas dapat disederhanakan menjadi persamaan-persamaan berikut,

$$L_{aa} = L_A + L_B \cos 4\theta \quad (12)$$

$$L_{bb} = L_A + L_B \cos 4(\theta - \frac{2}{3}\pi) \quad (13)$$

$$L_{cc} = L_A + L_B \cos 4(\theta + \frac{2}{3}\pi) \quad (14)$$

Torka elektromagnetik yang bekerja pada rotor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Krause, 1989),

$$T_e = \frac{\partial W_c(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (15)$$

$W_c$  adalah *co-energy*. Karena motor stepper bekerja pada daerah linier dari kurva magnetisasi bahan magnetik, maka energi yang tersimpan dalam medan magnet sama dengan *co-energy* (Krause, 1989), sehingga diperoleh persamaan berikut,

$$W_c = \frac{1}{2} L_{aa} i_a^2 + \frac{1}{2} L_{bb} i_b^2 + \frac{1}{2} L_{cc} i_c^2 \quad (16)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (12), (13) dan persamaan (14) ke persamaan (16) dan kemudian menyelesaikan persamaan (15), diperoleh persamaan berikut,

$$T_e = -2L_B \{ i_a^2 \sin 4\theta + i_b^2 \sin 4(\theta - \frac{2}{3}\pi) + i_c^2 \sin 4(\theta + \frac{2}{3}\pi) \} \quad (17)$$

Persamaan gerakan rotor diperoleh dengan menerapkan Hukum Newton pada gerak rotasi sehingga diperoleh persamaan berikut,

$$T_e - B_m \frac{d\theta}{dt} - T_L = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (18)$$

$B_m$  adalah konstanta redaman sebagai akibat adanya gesekan pada poros rotor dan hambatan udara.  $T_L$  adalah torka beban mekanik yang diputar oleh rotor motor stepper.  $J$  adalah konstanta inersia rotor dan beban mekanik.

Dengan mensubstitusi persamaan (17) ke persamaan (18) dan mengatur ulang persamaan terakhir diperoleh persamaan berikut,

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B_m \frac{d\theta}{dt} + T_L = -2L_B \{ i_a^2 \sin 4\theta + i_b^2 \sin 4(\theta - \frac{2}{3}\pi) + i_c^2 \sin 4(\theta + \frac{2}{3}\pi) \} \quad (19)$$

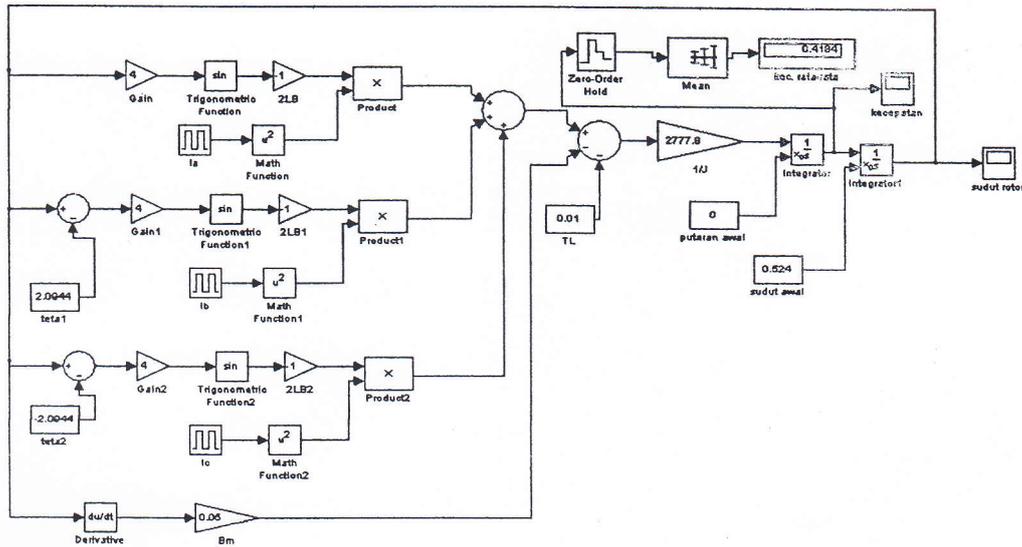
Persamaan (19) diatas menyatakan posisi rotor ( $\theta$ ) setiap waktu, karena itu persamaan (19) dinamakan persamaan gerakan rotor.

Persamaan (19) merupakan persamaan differensial orde dua tak-linier. Solusi terhadap persamaan tersebut adalah fungsi yang menyatakan posisi rotor setiap waktu  $\theta(t)$ . Grafik  $\theta(t)$  diperoleh dengan mensimulasikan persamaan (19) secara langsung menggunakan program MATLAB/Simulink.

### Simulasi Gerakan Rotor

Gerakan rotor disimulasikan dengan cara menyelesaikan persamaan (19) untuk memperoleh grafik  $\theta(t)$ . Disini MATLAB/Simulink digunakan untuk mendapatkan grafik  $\theta(t)$  tersebut. Grafik kecepatan sudut rotor  $\omega(t)$ , diperoleh dari turunan pertama terhadap  $\theta(t)$ . Persamaan (1) digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi gerakan rotor. Berdasarkan persamaan (1), bagian rotor dari rancangan motor stepper akan berputar langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama sebesar 30 derajat atau 0,524 radian.

Model MATLAB/Simulink terhadap persamaan (19) diperlihatkan pada Gambar 3. Data-data rancangan motor stepper variable reluctance adalah sebagai berikut,  $T_e$  (maksimum) = 0,25 N.m;  $L_B$  = 0,5 H;  $J$  = 0,00036 kg.m<sup>2</sup>;  $B_m$  = 0,05 N.m.s;  $I_a = I_b = I_c = 1$  A;  $T_L$  = 0,01 N.m.



Gambar 3. Model MATLAB/Simulink terhadap persamaan gerakan rotor

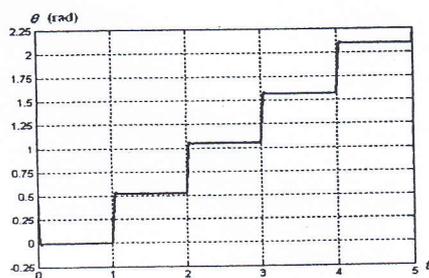
### 3. Hasil Dan Pembahasan

Beberapa hasil simulasi diperlihatkan pada Gambar 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan Gambar 10. Pada Gambar 4, frekuensi pulsa arus masing-masing fasa adalah 0,333 Hz dengan duty cycle 0,333, yang berarti arus hanya mengalir pada belitan masing-masing fasa selama 1 detik dengan periode 3 detik. Urutan penyalaan adalah fasa a, fasa b dan fasa c. Mula-mula rotor pada posisi 0,524 radian atau 30 derajat, setelah 1 detik sudut rotor menjadi 0 radian (0 derajat). Hal ini disebabkan arus listrik hanya mengalir pada belitan fasa a, belitan fasa b dan belitan fasa c tidak dialiri arus, sehingga gigi 1 dan gigi 3 rotor berhadapan-hadapan dengan kedua kutub fasa a. Selang 1 detik kemudian, sudut rotor menjadi 0,524 radian (30 derajat). Hal ini disebabkan arus listrik hanya mengalir pada belitan fasa b, sehingga gigi 2 dan gigi 4 rotor berhadapan-hadapan dengan kedua kutub fasa b. Selang 1 detik kemudian, sudut rotor menjadi 1,048 radian (60 derajat), karena arus listrik hanya mengalir pada belitan fasa c, sehingga gigi 1 dan gigi 3 rotor berhadapan-hadapan dengan kutub-kutub fasa c. Selang 1 detik kemudian, sudut rotor menjadi 1,572 radian (90 derajat), karena arus listrik hanya mengalir pada belitan fasa a, sehingga gigi 2 dan gigi 4 rotor berhadapan-hadapan dengan kutub-kutub fasa a. Hasil simulasi pada Gambar 4 memperlihatkan bahwa rotor bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama sebesar 0,524 radian (30 derajat). Panjang 1 langkah ditempuh dalam waktu 1 detik.

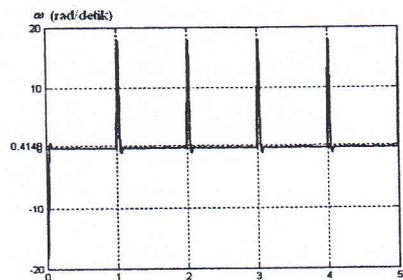
Gambar 5 memperlihatkan profil kecepatan sudut rotor pada frekuensi pulsa arus stator 0,333 Hz dan sudut awal rotor 0,524 radian atau 30 derajat. Pada 1 detik pertama, mula-mula rotor diam (kecepatan sudut sama dengan nol), kemudian kecepatannya naik hingga mencapai nilai maksimum dan kemudian menurun hingga akhirnya rotor berhenti pada posisi sudut rotor 0 derajat. Kecepatan sudut rotor pada 1 detik pertama bernilai negatif, menunjukkan bahwa rotor bergerak searah jarum jam. Untuk gerakan berlawanan arah jarum jam, kecepatan sudut akan bernilai positif. Setelah 1 detik pertama, rotor bergerak kembali dari posisi 0 derajat dan berhenti pada posisi 30 derajat. Selama 1 detik kedua ini, kecepatan sudut rotor bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Setelah 1 detik kedua, rotor bergerak kembali dari posisi 30 derajat dan berhenti pada posisi 60 derajat. Kecepatan sudut rotor bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Untuk 1 detik selanjutnya, kecepatan sudut rotor bernilai positif, sehingga dengan demikian rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Kecepatan sudut rata-rata adalah 0,4148 rad/detik (3,96 rpm).

Gambar 6 memperlihatkan perubahan posisi rotor pada frekuensi pulsa arus stator 3,33 Hz dengan duty cycle 0,333 dengan urutan penyalaan adalah fasa a, fasa b dan fasa c. Posisi awal rotor adalah -0,524 radian (-30 derajat). Pada 0,1 detik pertama, belitan fasa a di-energize sehingga rotor bergerak dari posisi -30 derajat dan berhenti pada posisi 0 radian (0 derajat), 0,1 detik kemudian, belitan fasa b di-energize sehingga rotor bergerak dari sudut 0 derajat dan berhenti pada sudut 30 derajat. Kemudian belitan fasa c di-energize selama 0,1 detik sehingga rotor bergerak dari sudut 30 derajat dan berhenti pada sudut 60 derajat. Kemudian

belitan fasa a kembali di-energize selama 0,1 detik sehingga rotor bergerak dari sudut 60 derajat dan berhenti pada sudut 90 derajat. Dan seterusnya. Hasil simulasi pada Gambar 6 memperlihatkan bahwa rotor bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama sebesar 0,524 radian (30 derajat). Panjang 1 langkah ditempuh dalam waktu 0,1 detik.

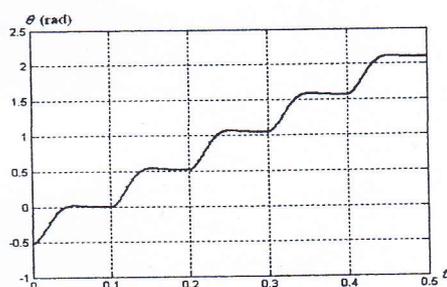


**Gambar 4.** Perubahan sudut rotor pada frekuensi arus stator 0,333 Hz dengan duty cycle 0,333

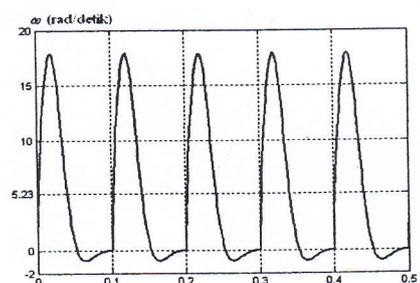


**Gambar 5.** Kecepatan sudut rotor pada frekuensi arus stator 0,333 Hz dengan duty cycle 0,333

Gambar 7 memperlihatkan profil kecepatan sudut rotor pada frekuensi pulsa arus stator 3,33 Hz dan sudut awal rotor -0,524 radian (-30 derajat). Pada 0,1 detik pertama, mula-mula rotor diam (kecepatan sudut sama dengan nol), kemudian kecepatannya naik hingga mencapai nilai maksimum dan kemudian menurun hingga akhirnya rotor berhenti pada posisi sudut rotor 0 derajat. Kecepatan sudut rotor pada 0,1 detik pertama bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Setelah 0,1 detik pertama, rotor bergerak kembali dari posisi 0 derajat dan berhenti pada posisi 30 derajat. Selama 0,1 detik kedua ini, kecepatan sudut rotor bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Setelah 0,1 detik kedua, rotor bergerak kembali dari posisi 30 derajat dan berhenti pada posisi 60 derajat. Kecepatan sudut rotor bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Untuk 0,1 detik selanjutnya, kecepatan sudut rotor bernilai positif, sehingga dengan demikian rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Kecepatan sudut rata-rata adalah 5,23 rad/detik (49,94 rpm).



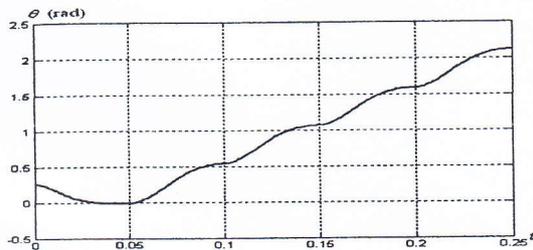
**Gambar 6.** Perubahan sudut rotor pada frekuensi arus stator 3,33 Hz dengan duty cycle 0,333



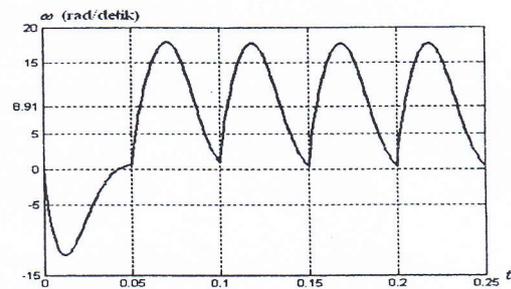
**Gambar 7.** Kecepatan sudut rotor pada frekuensi arus stator 3,33 Hz dengan duty cycle 0,333

Gambar 8 memperlihatkan perubahan posisi rotor pada frekuensi pulsa arus stator 6,67 Hz dengan duty cycle 0,333 dengan urutan penyalaan adalah fasa a, fasa b dan fasa c. Posisi awal rotor adalah 0,262 radian (15 derajat). Pada 0,05 detik pertama, belitan fasa a di-energize sehingga rotor bergerak dari posisi 15 derajat dan berhenti pada posisi 0 radian (0 derajat), 0,05 detik kemudian, belitan fasa b di-energize sehingga rotor bergerak dari sudut 0 derajat dan berhenti pada sudut 30 derajat. Kemudian belitan fasa c di-energize selama 0,05 detik sehingga rotor bergerak dari sudut 30 derajat dan berhenti pada sudut 60 derajat. Kemudian belitan fasa a kembali di-energize selama 0,05 detik sehingga rotor bergerak dari sudut 60 derajat dan berhenti pada sudut 90 derajat. Dan seterusnya. Hasil simulasi pada Gambar 8 memperlihatkan bahwa rotor bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama sebesar 0,524 radian (30 derajat). Panjang 1 langkah ditempuh dalam waktu 0,05 detik.

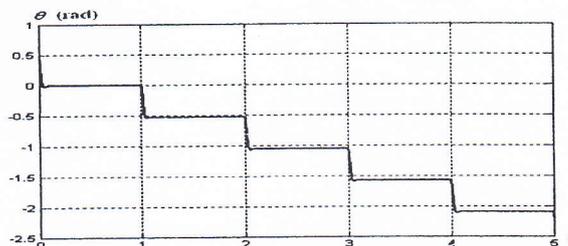
Gambar 9 memperlihatkan profil kecepatan sudut rotor pada frekuensi pulsa arus stator 6,67 Hz dan sudut awal rotor 0,262 radian (15 derajat). Pada 0,05 detik pertama, mula-mula rotor diam (kecepatan sudut sama dengan nol), kemudian kecepatannya naik hingga mencapai nilai maksimum dan kemudian menurun hingga akhirnya rotor berhenti pada posisi sudut rotor 0 derajat. Kecepatan sudut rotor pada 0,1 detik pertama bernilai negatif, menunjukkan bahwa rotor bergerak searah jarum jam. Setelah 0,1 detik pertama, rotor bergerak kembali dari posisi 0 derajat dan berhenti pada posisi 30 derajat. Selama 0,1 detik kedua ini, kecepatan sudut rotor bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Setelah 0,1 detik kedua, rotor bergerak kembali dari posisi 30 derajat dan berhenti pada posisi 60 derajat. Kecepatan sudut rotor bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Untuk 0,1 detik selanjutnya, kecepatan sudut rotor bernilai positif, sehingga dengan demikian rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Kecepatan sudut rata-rata adalah 8,91 rad/detik (85,08 rpm).



Gambar 8. Perubahan sudut rotor pada frekuensi arus stator 6,67 Hz dengan duty cycle 0,333



Gambar 9. Kecepatan sudut rotor pada frekuensi arus stator 6,67 Hz dengan duty cycle 0,333



Gambar 10. Perubahan sudut rotor pada frekuensi arus stator 0,333 Hz dengan duty cycle 0,333; sudut awal 0,524 radian urutan penyalan fasa a, fasa c dan fasa b.

Gambar 10 memperlihatkan perubahan posisi rotor pada frekuensi pulsa arus stator 0,333 Hz dengan duty cycle 0,333 dengan urutan penyalan adalah fasa a, fasa c dan fasa b. Posisi awal rotor adalah 0,524 radian (30 derajat). Pada 1 detik pertama, belitan fasa a di-energize sehingga gigi 1 dan gigi 3 rotor akan berhadapan-hadapan dengan kutub-kutub fasa a atau rotor bergerak dari posisi 30 derajat lalu berhenti pada posisi 0 radian (0 derajat). Selama 1 detik kemudian, belitan fasa c di-energize sehingga gigi 2 dan gigi 4 rotor berhadapan-hadapan dengan kutub-kutub fasa c atau rotor bergerak dari sudut 0 derajat lalu berhenti pada sudut -30 derajat. Kemudian belitan fasa b di-energize selama 1 detik sehingga gigi 1 dan gigi 3 rotor akan berhadapan-hadapan dengan kedua kutub fasa b atau rotor bergerak dari sudut -30 derajat lalu berhenti pada sudut -60 derajat. Kemudian belitan fasa a kembali di-energize selama 1 detik sehingga gigi 2 dan gigi 4 rotor akan berhadapan-hadapan dengan kedua kutub fasa a atau rotor bergerak dari sudut -60 derajat lalu berhenti pada sudut -90 derajat. Dan seterusnya. Dengan membandingkan hasil simulasi pada Gambar 4 dan hasil simulasi pada Gambar 10 terlihat bahwa telah terjadi pembalikan arah gerakan rotor ketika urutan penyalan belitan-belitan fasa diubah dari urutan a-b-c ke urutan a-c-b. Dengan urutan penyalan fasa a – fasa b – fasa c, rotor akan bergerak berlawanan arah jarum jam, jika urutan penyalan diubah menjadi fasa a – fasa c – fasa b, rotor akan bergerak searah jarum jam. Namun demikian pengubahan urutan penyalan belitan-belitan fasa tersebut tidak mengubah panjang langkah rotor yaitu sebesar 30 derajat.

