

IDENTIFIKASI PARAMETER MOTOR ARUS SEARAH DENGAN TAPIS KALMAN DAN VERIFIKASI HASIL IDENTIFIKASI DENGAN ALGORITMA GENETIKA

Husni Thamrin, Gunawan Ariyanto

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik UMS

Jl. A. Yani Pabelan-Kartasura, Tromol Pos 1 Surakarta

e-mail: hums07@lycos.com, goen_ay@yahoo.com

ABSTRAK

Penerapan beberapa sistem kendali mengharuskan agar model plant diketahui. Pengetahuan terhadap model plant dapat diperoleh melalui proses identifikasi. Parameter-parameter model linier motor arus searah dapat diidentifikasi melalui beberapa perhitungan aljabar statistik dan tapis Kalman. Proses identifikasi itu dilakukan terhadap data hasil pengukuran tegangan terminal, kecepatan putar dan arus jangkar selama selang waktu tertentu. Dalam selang waktu itu dikehendaki terdapat selang motor dalam keadaan mantap dengan masukan konstan dan terdapat selang motor dalam keadaan transien. Masukan berbentuk gelombang kotak sangat cocok untuk keperluan ini. Tapis Kalman secara mandiri tidak dapat digunakan untuk identifikasi parameter karena dalam model diskret motor arus searah parameter muncul dalam bentuk perbandingan, sehingga diperlukan proses statistik untuk menentukan sebagian parameter. Pengamatan eksperimental menunjukkan bahwa model motor arus searah hasil identifikasi dapat digunakan mengestimasi kecepatan motor dengan selisih sebesar 5 persen nilai kecepatan motor sebenarnya. Identifikasi dengan algoritma genetika dilakukan untuk menguji apakah hasil identifikasi dengan tapis Kalman dapat disebut baik dibanding dengan metode lain dan apakah terdapat kombinasi parameter lain selain yang dapat ditemukan oleh tapis Kalman. Pengamatan yang telah dilakukan menunjukkan belum ditemukan kombinasi parameter lain dan hasil identifikasi dengan algoritma genetika belum dapat disebut lebih baik dibanding hasil identifikasi dengan tapis Kalman

Kata kunci : motor arus searah - identifikasi - tapis Kalman - algoritma genetika

PENDAHULUAN

Pada kebanyakan sistem kendali, model plant perlu diketahui selengkap mungkin. Penentuan nilai elemen kendali PID menjadi lebih mudah dilaksanakan jika model *plant* diketahui. Bosgra dkk. (2001) menyatakan bahwa langkah

pertama perancangan klasik sistem kendali adalah menentukan fungsi alih *plant* berdasarkan model linier *plant*. Perancangan modern seperti regulator kuadratis linier (*LQR=linear quadratic regulator*) hanya dapat dilaksanakan setelah model *state plant* diketahui.

Tapis Kalman dapat digunakan untuk estimasi *state* dan identifikasi parameter sistem. Shi, dkk. mengestimasi kecepatan motor induksi dengan tapis Kalman ekstensi yang ditala dengan algoritma genetika (Shi, dkk., 2002). Dengan tapis Kalman, Acarnley dan Al-Tayie (1997) dapat mengestimasi kecepatan dan suhu jangkar motor arus searah, sedangkan Torres dan Verde (1995) dapat mengidentifikasi parameter motor induksi.

Motor arus searah banyak diterapkan sebagai penggerak pada sistem dengan kebutuhan kendali kecepatan yang baik (Fisher, dkk., 1995) dan dengan diketahuinya nilai parameter motor arus searah secara lengkap, berbagai skema kendali dapat diterapkan pada motor, sehingga lebih memperkokoh sistem kendali.

Identifikasi parameter motor arus searah dapat dilakukan dengan beberapa perhitungan statistik dan tapis Kalman. Diharapkan jika identifikasi dapat dilakukan dengan baik, sistem kendali motor arus searah yang akurat dan kokoh dapat diperoleh.

Dalam pengamatan ini dilakukan pula proses identifikasi dengan algoritma genetika. Kegiatan ini mempunyai 2 maksud, yaitu menguji apakah ada kombinasi parameter lain yang dapat ditemukan oleh algoritma genetika selain yang telah diperoleh dengan tapis Kalman dan mengamati apakah masih dapat dilakukan perbaikan terhadap hasil identifikasi dengan tapis Kalman.

MODEL MOTOR ARUS SEARAH

Motor arus searah dapat dimodelkan dengan model linier persamaan 1.

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= -\frac{B}{J}\omega - \frac{T_L}{J} + \frac{K}{J}i \\ \frac{di}{dt} &= -\frac{R}{L}i - \frac{K}{L}\omega + \frac{V}{L} \end{aligned} \dots\dots\dots(1)$$

Akan tetapi karena tapis Kalman bekerja pada sistem diskret, model motor arus searah perlu didiskretkan. Model diskret pada persamaan 2 dan 3 diperoleh dari persamaan 1 dengan metode *backward difference* (Bozic, 1994).

$$\left(1 + \frac{B}{J}\Delta t\right)\omega_k = \omega_{k-1} - \frac{T_L}{J}\Delta t + \frac{K}{J}i_k\Delta t \dots\dots\dots(2)$$

$$\left(1 + \frac{R}{L}\Delta t\right)i_k = i_{k-1} + \frac{V_k - K\omega_k}{L}\Delta t \dots\dots\dots(3)$$

dengan Δt selang waktu pencuplikan. Persamaan 2 dan 3 dapat digabung dan ditulis dalam bentuk persamaan *state* diskret:

$$\begin{bmatrix} \left(1 + \frac{B}{J}\Delta t\right)\omega_k \\ \left(1 + \frac{R}{L}\Delta t\right)i_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{K}{J}\Delta t \\ -\frac{K}{L}\Delta t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{k-1} \\ i_{k-1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

$$+ \begin{bmatrix} -\frac{1}{J}\Delta t & 0 \\ 0 & \frac{1}{L}\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_L \\ V \end{bmatrix}$$

Pada kondisi mantap dan konstan, yaitu tegangan terminal konstan, beban tidak berubah, kecepatan motor dan arus jangkar konstan, persamaan 2 dan 3 dapat disederhanakan menjadi (Dewan, dkk., 1994):

$$B\omega_k = -T_L + Ki_k \dots\dots\dots(5)$$

$$Ri_k = V - K\omega_k \dots\dots\dots(6)$$

IDENTIFIKASI PARAMETER MOTOR ARUS SEARAH

Persamaan 4 memperlihatkan bahwa *state* model diskret motor arus searah adalah kecepatan ω_k dan arus jangkar i_k dan masukannya adalah tegangan terminal

V dan torsi beban T_L . Parameter motor adalah B, J, R, L, dan K.

State motor dapat diukur. Akan tetapi dari 2 besaran masukan, hanya tegangan terminal yang diketahui dan mudah diukur. Masukan torsi beban sukar diukur dan seringkali tidak diketahui. Dalam proses identifikasi ini, torsi beban ikut teridentifikasi.

Identifikasi parameter motor dilakukan bertahap dengan menggunakan metode yang berbeda-beda.

Konstanta motor K. Konstanta motor diidentifikasi dengan regresi linier berdasarkan data pengukuran tegangan lawan dan kecepatan. Hubungan linier tegangan lawan dan kecepatan telah diketahui dan data dapat diperoleh saat arus jangkar sama dengan nol (terminal diisolasi dari catu daya dan motor sedang berputar).

Resistansi R. Resistansi jangkar dihitung dengan persamaan 6 berdasarkan rerata data pengukuran kecepatan, arus jangkar dan tegangan masukan. Untuk menghitung resistansi R, konstanta motor harus diketahui lebih dahulu.

Faktor gesekan B dan torsi beban T_L . Kedua besaran ini dihitung dengan persamaan simultan linier. Dari persamaan 5 dapat diperoleh 2 persamaan linier dengan 2 variabel jika terdapat data pengukuran 2 kondisi mantap yang berbeda. Artinya pada 2 tegangan masukan yang berbeda, akan terdapat 2 nilai kecepatan yang berbeda dan 2 nilai arus yang berbeda. Untuk perhitungan ini, konstanta motor harus diketahui.

Parameter J dan L. Jika parameter K, R, B dan torsi beban T_L telah diketahui, maka pada persamaan 4 terdapat 2 parameter yang belum diketahui, yaitu J dan L. Berdasarkan persamaan 4 dapat diterapkan tapis Kalman untuk identifikasi

kedua parameter itu. Akan tetapi karena munculnya parameter J dan L dalam persamaan itu selalu dalam bentuk $\Delta t/J$ dan $\Delta t/L$, dengan alasan kemudahan komputasi, dilakukan identifikasi terhadap $\Delta t/J$ dan $\Delta t/L$. Dalam hal ini, Δt merupakan waktu pencuplikan data dan diketahui nilainya.

IDENTIFIKASI DENGAN TAPIS KALMAN EKSTENSI

Tapis Kalman ekstensi dapat digunakan untuk mengestimasi *state* sistem diskret tak linier dan mengestimasi parameter sistem (Candy, 1986). Model sistem yang diolah dengan tapis Kalman perlu dinyatakan dengan persamaan:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k \dots\dots\dots(7)$$

State dari sistem itu dengan suatu cara diukur dan hasil pengukurannya berhubungan dengan *state* mengikuti persamaan:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{g}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \dots\dots\dots(8)$$

Pada kedua persamaan di atas, simbol-simbol mempunyai arti sebagai berikut.

- \mathbf{x}_k vektor *state* ($n \times 1$) saat t_k .
- \mathbf{u}_k vektor masukan saat t_k .
- \mathbf{w}_k vektor ($n \times 1$) derau sistem yang menggambarkan derau putih dengan variansi **Q**. Derau sistem atau derau pemodelan tidak berkorelasi dengan *state*.
- \mathbf{y}_k vektor ($m \times 1$) vektor pengukuran saat t_k .
- \mathbf{v}_k vektor ($m \times 1$) galat pengukuran, diasumsikan merupakan derau putih dengan variansi **R** dan disebut juga derau pengukuran. Derau pengukuran tidak berkorelasi dengan *state* dan dengan derau sistem \mathbf{w}_k .
- f** fungsi sistem
- g** fungsi pengukuran

Proses estimasi *state* dengan tapis Kalman dilakukan secara iteratif. Satu

iterasi tapis Kalman ekstensi terdiri atas 5 langkah:

1. $\bar{x}_k = f(\hat{x}_{k-1}, u_k)$
2. $\bar{P}_k = F P_{k-1} F' + Q$
3. $K_k = \bar{P}_k G' (G \bar{P}_k G' + R)^{-1}$
4. $\hat{x}_k = \bar{x}_k + K_k e_k = \bar{x}_k + K_k (y_k - g(\bar{x}_k))$
5. $P_k = (I - K_k G) \bar{P}_k$

Arti simbol pada iterasi di atas adalah sebagai berikut.

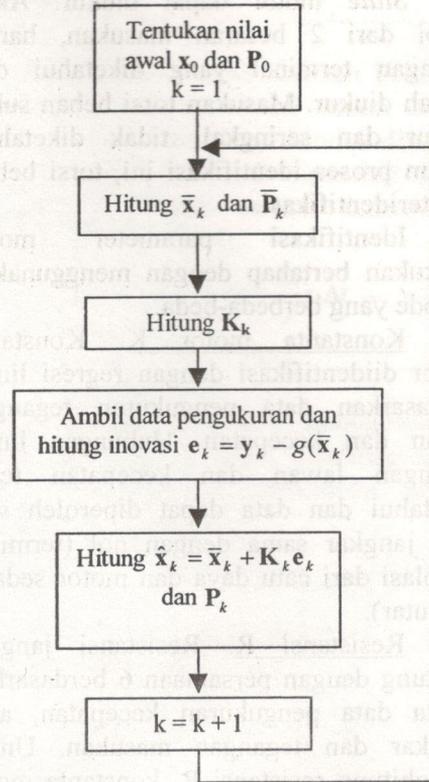
- \hat{x} estimasi terbaik terhadap *state*.
- P variansi galat estimasi *state* \hat{x} .
- \bar{x} estimasi apriori terhadap *state*.
- \bar{P} variansi galat estimasi apriori *state* \bar{x} .
- K bati Kalman (*Kalman gain*).
- $F = \frac{\partial f}{\partial x}$ jacobian fungsi f terhadap *state* x .
- $G = \frac{\partial g}{\partial x}$ jacobian fungsi g terhadap *state* x .

Gambar 1 merupakan diagram alir proses tapis Kalman. Langkah awal proses adalah penentuan nilai awal \hat{x}_0 dan P_0 yang dapat diberikan sembarang. Iterasi dimulai mengikuti langkah-langkah di atas dan dihentikan jika data pengukuran dalam selang waktu tertentu telah diolah.

Dalam proses identifikasi, parameter yang hendak diidentifikasi dijadikan *state* baru. *State* baru dan *state* yang sudah ada digabungkan (*augmented*). Persamaan sistem dikembangkan terhadap *state* gabungan dan disebut persamaan sistem gabungan. Persamaan sistem gabungan bersifat tak linier, sehingga digunakan tapis Kalman ekstensi untuk mengestimasi *state*. Jika *state* sistem gabungan berhasil diestimasi, parameter sistem berhasil diidentifikasi.

Pada identifikasi perbandingan parameter $\Delta t/J$ dan $\Delta t/L$ dengan persamaan 4, *state* persamaan adalah ω_k dan i_k . Dalam

proses identifikasi, $\Delta t/J$ dijadikan *state* ketiga dan $\Delta t/L$ dijadikan *state* keempat.



Gambar 1. Diagram alir proses tapis Kalman

Jadi,

$$x_1 = \omega \quad x_2 = i_k \quad x_3 = \Delta t/J \quad x_4 = \Delta t/L$$

Persamaan 4 sekarang berubah menjadi:

$$\begin{bmatrix} (1 + Bx_{3,k-1})x_{1,k} \\ (1 + Rx_{4,k-1})x_{2,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Kx_{3,k-1} \\ -Kx_{4,k-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,k-1} \\ x_{2,k-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$+ \begin{bmatrix} -x_{3,k-1} & 0 \\ 0 & Rx_{4,k-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_L \\ V \end{bmatrix}$$

Parameter $\Delta t/J$ dan $\Delta t/L$ dianggap konstan sepanjang pengamatan sehingga:

$$x_{3,k} = x_{3,k-1} \dots \dots \dots (10)$$

$$x_{4,k} = x_{4,k-1} \dots \dots \dots (11)$$

Persamaan 9, 10 dan 11 merupakan persamaan *state* sistem gabungan dengan persamaan 9 bersifat tak linier. Jika *state*

x_1 , x_2 , x_3 , dan x_4 berhasil diestimasi dengan baik, berarti parameter $\Delta t/J$ dan $\Delta t/L$ teridentifikasi dengan baik.

HASIL PENGAMATAN

Pengamatan dilakukan terhadap motor arus searah dengan arus rating 5,2 A, kecepatan rating 3000 rpm, tegangan rating 17,7 volt dan daya keluaran 46 watt. Identifikasi dilakukan mengikuti langkah-langkah yang diurai pada subjudul 3.

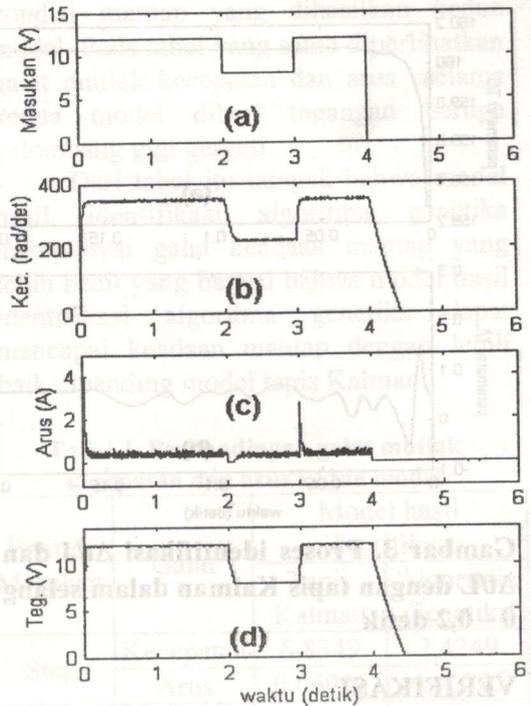
Untuk memperoleh data beberapa kondisi motor, tegangan seperti Gambar 2.a diterapkan. Gambar 2.b sampai 2.d memperlihatkan hasil akuisisi terhadap besaran kecepatan motor, arus jangkar dan tegangan terminal. Waktu pencuplikan data adalah $\Delta t=2$ milidetik.

Pada detik ke-0 sampai detik ke-2 motor diberi tegangan masukan 12 volt dan dipertahankan cukup lama agar kondisi mantap tercapai. Pada detik ke-4 sampai detik ke-6 tegangan masukan dinolkan. Pada saat itu arus jangkar akan nol. Motor masih berputar karena ada momen inersial dan semakin lama putaran itu mengecil sampai motor berhenti.

Konstanta motor diperoleh dengan regresi linier terhadap data tegangan terminal dan kecepatan pada detik ke-4 sampai detik ke-4,4. Hasil perhitungan menghasilkan nilai $K=0,03007$ V/(rad/det). Resistansi motor dihitung berdasarkan data dari detik ke-1 sampai detik ke-2 sesuai persamaan 6 dengan menggunakan nilai K yang telah dihitung sebelumnya. Hasil perhitungan menghasilkan nilai $R=3,82 \Omega$.

Nilai parameter B dan torsi beban T_L dihitung sesuai persamaan 5 dengan menggunakan nilai K yang telah dihitung sebelumnya. Dengan menggunakan data 2 kondisi mantap, yaitu data pada detik ke-2,5 sampai detik ke-3 dan data pada detik ke-3,5 sampai detik ke-4, akan diperoleh 2

persamaan dengan 2 variabel. Penyelesaian simultan kedua persamaan menghasilkan nilai $B=1,57e-5$ Nm/(rad/det) dan $T_L=0,0066$ Nm.

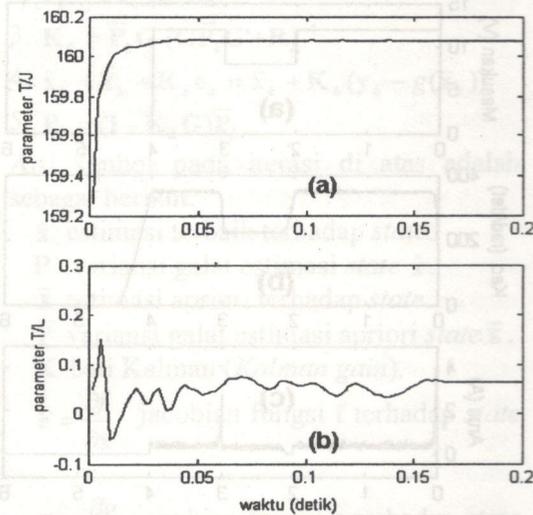


Gambar 2. Grafik tegangan masukan motor dan besaran-besaran yang diukur pada motor

Perbandingan parameter $\Delta t/J$ dan $\Delta t/L$ diidentifikasi dengan tapis Kalman terhadap tegangan masukan, arus jangkar dan kecepatan motor pada detik ke-0 sampai detik ke-0,2 (yaitu selama motor berada pada kondisi transien) berdasarkan persamaan 4.

Pada Gambar 3 diperlihatkan proses identifikasi $\Delta t/J$ dan $\Delta t/L$ dengan tapis Kalman. Persamaan *state* sistem gabungan untuk proses ini telah dijelaskan pada subjudul 4, yaitu persamaan-persamaan 9, 10, dan 11. Pada saat-saat awal tampak tapis Kalman mencoba "mencari" nilai parameter yang tepat, dan pada detik 0,15

nilai parameter telah ditemukan. Rerata nilai parameter yang diperoleh adalah $\Delta t/J=160,1$ dan $\Delta t/L=0,0522$ yang berarti $J=1,25e-5 \text{ kgm}^2$ dan $L=0,0725H$.



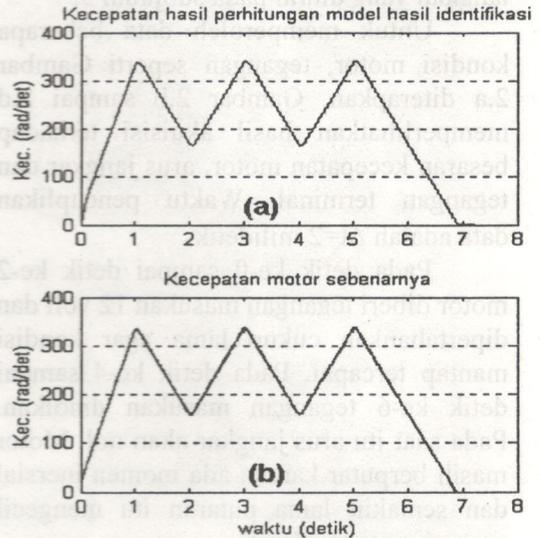
Gambar 3. Proses identifikasi $\Delta t/J$ dan $\Delta t/L$ dengan tapis Kalman dalam selang 0 – 0,2 detik

VERIFIKASI

Hasil identifikasi parameter disajikan pada Tabel 1 dengan catatan bahwa torsi beban sebenarnya bukan parameter motor namun dalam proses ikut teridentifikasi. Hasil identifikasi tidak dapat diverifikasi secara langsung, sebab parameter motor yang benar tidak diketahui. Untuk verifikasi, dilakukan perbandingan unjuk kerja model hasil identifikasi dengan unjuk kerja motor sebenarnya. Tegangan terminal berbentuk beberapa gigi gergaji diterapkan dan kecepatan diamati. Pada Gambar 4.a tampak kecepatan yang dihasilkan model dan pada Gambar 4.b diperlihatkan kecepatan yang dihasilkan motor untuk tegangan masukan yang sama. Bentuk kurva kecepatan yang dihasilkan model dan motor nampak sama.

Tabel 1. Hasil identifikasi parameter

Parameter dan satuan		Nilai hasil identifikasi
K	V.det/rad	0,03007
R	Ω	3,82
J	kgm^2	$1,25e-5$
L	H	0,0725
B	Nm.det/rad	$1,57e-5$
T_L	Nm	0,0066



Gambar 4. Kecepatan yang dihasilkan model dan motor terhadap masukan yang sama

Pengamatan lebih detil menunjukkan adanya perbedaan antara kedua kurva. Nilai kecepatan yang dihasilkan model rata-rata berbeda kurang dari 5% relatif terhadap nilai kecepatan motor sebenarnya.

VERIFIKASI DENGAN ALGORITMA GENETIKA

Algoritma genetika telah dicoba untuk memperbaiki hasil identifikasi. Dua isu dapat dijawab oleh algoritma genetika, apakah dapat ditemukan kombinasi parameter lain selain yang telah diperoleh

dengan tapis Kalman di atas dan apakah hasil identifikasi dapat diperbaiki.

Kebaikan hasil identifikasi diartikan secara kuantitatif dengan 2 nilai galat: rerata galat mutlak kecepatan yang diestimasi oleh model dan kecepatan motor yang sebenarnya, rerata galat mutlak arus yang diestimasi oleh model dan arus motor sebenarnya. Dengan nilai kedua galat itu, unjuk kerja model hasil identifikasi tapis Kalman dapat dibandingkan dengan unjuk kerja model hasil identifikasi algoritma genetika. Tegangan masukan berbentuk gigi gergaji digunakan dalam perbandingan ini untuk memperlihatkan unjuk kerja dinamis model, dan masukan *step* digunakan untuk memperlihatkan unjuk kerja model saat mantap.

Fitness function adalah rerata galat kecepatan dan arus dengan masukan sistem berupa gelombang kotak seperti yang digunakan dalam identifikasi dengan tapis Kalman (Gambar 2.a). Untuk seleksi digunakan metode turnamen dan pindah silang seragam dengan peluang pindah silang 0,8 dan peluang mutasi 0,01. Jumlah generasi adalah 100 dengan 20 populasi tiap generasi.

Tabel 2. Hasil identifikasi tapis Kalman dibanding dengan algoritma genetika

Parameter dan satuan		Nilai hasil identifikasi	
		tapis Kalman	Algoritma Genetika
K	V.det/rad	0,03007	0,03202
R	Ω	3,82	2,63
J	kgm ²	1,25e-5	1,1e-5
L	H	0,0725	0,02625
B	Nm.det/rad	1,57e-5	1,66e-5
T _L	Nm	0,0066	0,0061

Dari Tabel 2 tampak bahwa sebagian parameter diidentifikasi dengan nilai yang tidak jauh berbeda oleh kedua metode, misalnya nilai K, B, dan T_L. Akan

tetapi beberapa parameter seperti R dan L diidentifikasi dengan perbedaan signifikan.

Tabel 3 memnyajikan perbandingan galat mutlak kecepatan dan arus pada kondisi mantap yang dihasilkan kedua model. Pada tabel yang sama diperlihatkan galat mutlak kecepatan dan arus selama kedua model diberi tegangan berupa gelombang gigi gergaji.

Dari tabel itu tampak bahwa model hasil identifikasi algoritma genetika mempunyai galat keadaan mantap yang lebih kecil yang berarti bahwa model hasil identifikasi algoritma genetika dapat mencapai keadaan mantap dengan lebih baik dibanding model tapis Kalman.

Tabel 3. Perbandingan galat mutlak kecepatan dan arus kedua model

Bentuk Masukan	Galat	Model hasil identifikasi	
		Tapis Kalman	Algoritma Genetika
Step	Kecepatan	6,8349	2,4249
	Arus	0,06993	0,05705
Gigi gergaji	Kecepatan	6,5537	7,3847
	Arus	0,05197	0,05286

Galat mutlak kecepatan yang diestimasi oleh model hasil identifikasi tapis Kalman adalah 6,5537 untuk masukan gigi gergaji, lebih kecil dibanding galat mutlak kecepatan model hasil identifikasi algoritma genetika yaitu 7,3847. Artinya model hasil identifikasi tapis Kalman mengestimasi kecepatan sedikit lebih baik dibanding model hasil identifikasi algoritma genetika dalam kondisi dinamis

Berdasarkan pengamatan yang telah dilakukan, algoritma genetika belum sepenuhnya dapat memperbaiki hasil identifikasi yang diperoleh dengan tapis Kalman. Jadi perbedaan signifikan pada

beberapa parameter hasil identifikasi belum menunjukkan mana parameter yang lebih tepat, dan mungkin memperlihatkan sensitivitas keluaran sistem (motor dc) terhadap perubahan parameter.

Perlu banyak pengamatan lebih lanjut terhadap identifikasi dengan algoritma genetika dengan berbagai nilai awal parameter untuk dapat menyimpulkan apakah terdapat kombinasi parameter lain yang benar-benar berbeda. Pengamatan yang telah dilakukan selalu menyertakan hasil identifikasi dengan tapis Kalman sebagai salah satu nilai awal dan hasil pengamatan belum pernah menghasilkan kombinasi parameter yang sama sekali berbeda dari hasil identifikasi dengan tapis Kalman.

diuraikan di atas dapat digunakan mengidentifikasi parameter motor arus searah. Nilai kecepatan yang ditunjukkan model hasil identifikasi tidak jauh berbeda dari nilai kecepatan yang ditunjukkan motor yaitu kurang dari 5% relatif terhadap kecepatan motor.

Pengamatan terhadap hasil identifikasi parameter motor arus searah dengan tapis Kalman dan hasil identifikasi dengan algoritma genetika belum menghasilkan kesimpulan tentang cara identifikasi yang lebih baik. Identifikasi dengan algoritma genetika yang telah dilakukan selalu mengarah ke nilai-nilai hasil identifikasi tapis Kalman. Hal ini berarti bahwa proses identifikasi dengan tapis Kalman telah mengarah ke nilai-nilai parameter yang benar.

KESIMPULAN

Tahapan-tahapan identifikasi dengan metode statistik dan tapis Kalman seperti

DAFTAR PUSTAKA

- Acarnley, P.P., Al-Tayie, J.K., 1997, *Estimation of Speed and Armature Temperature in a Brushed DC Drive Using the Extended Kalman Filter*, IEE on El. Pow. App., vol. 144, 13-20.
- Bosgra, O.H., Kwakernaak, H., Meinsma, G., 2001, *Design Methods for Control Systems*, Netherlands, Dutch Institute
- Bozic, S.M., 1994, *Digital and Kalman Filtering*, London, Edward Arnold.
- Candy, J.V., 1986, *Signal Processing the Model Based Approach*, New York, McGrawHill.
- Dewan, S.B., Slemon, G.R., Straughen, A., 1984, *Power Semiconductor Drives*, New York, John Wiley & Sons.
- Fisher, M.E.; Ghosh, A.; Sharaf, A.M., 1995, *Intelligent Control Strategies for Permanent Magnet DC Motor Drives*, Proc. Conf. Power Elect., Drives & Energy Syst. for Ind. Growth, 1996., Vol. 1, hal. 360 - 366.
- Shi, K. L., Chen, T. F., Wong, Y. K., Ho, S. L., 2002, *Speed Estimation of an Induction Motor Drive Using an Optimized Extended Kalman Filter*, IEEE Indust. Electr., vol. 49 no.1, hal. 124-133.
- Torres, M.A., Verde, C., 1995, *Real Time Parameters Estimation of an Induction Motor*, Proc. CTEP, Mexico, 29-32