Določitev parametrov enosmernega motorja z uporabo diferenčne evolucije na osnovi meritve toka in kotne hitrosti

Marko Jesenik, Mislav Trbušić

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor
E-pošta: marko.jesenik@um.si

Determination of a DC motor's parameters with the use of the differential evolution based on the current and angular speed response

Abstract. *A method is presented for the determination of a direct current motor and drive parameters. The basis for the parameters` determination are speed and current startup responses. Seven parameters of a direct current motor and drive are determined, which are ohmic resistance of the motor R_a, inductance of the motor L_a, constant of the motor c_m, inertia of the drive J and three coefficients that define the load torque T_{la}, T_{lb} and T_{lc}.*

The method can also be used in the case of controlled drive. The influence of the speed controller on the responses is considered in the motor's model with the use of the measured voltage.

We are dealing with an inverse problem, which is also an optimization problem; we are searching for the minimum difference between measured and simulated responses. Differential Evolution (DE) is used for the parameters` determination. Measured responses are compared to calculated responses, obtained using the DC motor's simulation. The motor's model simulation, which is used for the Objective Function calculation, is described with two coupled Differential Equations. The Runge-Kutta fourth order method is used for the solving of the system of two coupled Differential Equations.

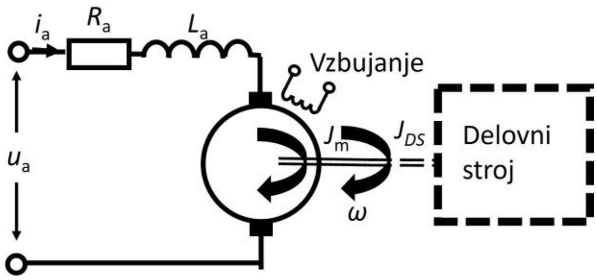
1 Uvod

Pogoni z enosmernimi motorji se zaradi visokega zagonskega navora uporabljajo v specifičnih industrijskih aplikacijah. Običajno jih najdemo v reguliranih pogoni ker so primerni za napajanje z napajalniki, ki omogočajo regulacijo vrtljajev ali navora. Dogaja se, da parametri enosmernega motorja niso znani ali pa imajo parametri, podani s strani proizvajalca, relativno velike tolerance.

Prav tako so primeri, da parametri pogona, kot so vztrajnostni moment, trenje in navor bremena, niso znani [1]. Pogoni so sestavljeni iz večjega števila delov in običajno ne poznamo vztrajnostnega momenta in trenja za vsak posamezen del pogona. Če želimo določiti čase prehodnih pojavov kot tudi pretoke energij v primeru stacionarnih in prehodnih stanj, moramo poznati vztrajnostni moment, trenje in breme.

2 Model enosmernega motorja

Shematski prikaz enosmernega motorja skupaj z delovnim strojem je predstavljen na (slika 1). Če nas zanimajo samo parametri motorja, delovni stroj ni dodan, če pa nas zanimajo parametri pogona, je delovni stroj povezan z motorjem.



Slika 1. Shema enosmernega motorja, povezanega z delovnim strojem.

R_a je ohmska upornost rotorskega navitja enosmernega motorja, L_a je induktivnost rotorskega navitja enosmernega motorja (privzamemo, da je le-ta konstantna vrednost, kar je poenostavitev modela), u_a je napetost, na katero je priključen rotorski tokokrog, i_a je tok skozi rotor motorja, J_m je vztrajnostni moment motorja, ω je kotna hitrost gredi motorja in J_{DS} je vztrajnostni moment delovnega stroja.

Delovanje pogona lahko simuliramo s sistemov dveh povezanih diferencialnih enačb, zapisanih z (1) in (2).

$$u_a = i_a \cdot R_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + e \tag{1}$$

$$T_m - T_{breme} = J\,\frac{d\omega}{dt} \tag{2}$$

J je vztrajnostni moment vseh vrtečih se delov pogona in e je inducirana napetost.

Enačbi (1) in (2) sta povezani, saj je inducirana napetost e odvisna od kotne hitrosti ω in navor motorja T_m je odvisen od toka i_a, zapisano v (3) in (4).

$$e = c_m \cdot \omega \tag{3}$$

$$T_m = c_m \cdot i_a \tag{4}$$

c_m je konstanta motorja, za katero lahko privzamemo, da se ne spreminja. Navor bremena T_{breme}, zapisan v (2), je razdeljen v več delov, ki predstavljajo komponento konstantnega navora bremena, komponento navora bremena, linearno odvisnega od kotne hitrosti, in komponento navora bremena, kvadratično odvisnega od kotne hitrosti. Navor bremena, razdeljen v komponente, je zapisn s (5).

$$T_{breme} = T_{\mathrm{la}} + T_{\mathrm{lb}} \cdot \omega + T_{\mathrm{lc}} \cdot \omega^2 \tag{5}$$

Če v enačbah (1) in (2) upoštevamo enačbe (3), (4) in (5), dobimo enačbi (6) in (7), ki sta osnova za matematični model motorja.

$$u_a = i_a \cdot R_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + c_m \cdot \omega \tag{6}$$

$$c_m \cdot i_a - \left(T_{\mathrm{la}} + T_{\mathrm{lb}} \cdot \omega + T_{\mathrm{lc}} \cdot \omega^2\right) = J\,\frac{d\omega}{dt} \tag{7}$$

Simulacija zagona motorja je narejena z numeričnim reševanjem sistema diferencialnih enačb (6) in (7).

Pri numeričnem reševanju diferencialnih enačb iščemo vedno le partikularno rešitev, ki jo določa ustrezno število začetnih in robnih pogojev. Le poznavanje teh pogojev nas skozi numerični postopek pripelje do enolične rešitve. Ta je navadno podana tabelarično v točkah, ki jih na začetku izberemo.

Za reševanje obravnavanega problema je uporabljena metoda Runge-Kutta 4. reda, zapisana z enačbami (8)-(17).

$$K_1 = f\left(x_i, y_i, z_i\right) \tag{8}$$

$$L_1 = g\left(x_i, y_i, z_i\right) \tag{9}$$

$$K_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hK_1, z_i + \frac{1}{2}hL_1\right) \tag{10}$$

$$L_2 = g\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hK_1, z_i + \frac{1}{2}hL_1\right) \tag{11}$$

$$K_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hK_2, z_i + \frac{1}{2}hL_2\right) \tag{12}$$

$$L_3 = g\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hK_2, z_i + \frac{1}{2}hL_2\right) \tag{13}$$

$$K_4 = f\left(x_i + h, y_i + hK_3, z_i + hL_3\right) \tag{14}$$

$$L_4 = g\left(x_i + h, y_i + hK_3, z_i + hL_3\right) \tag{15}$$

$$y_{i+1} = y_i + h\left(\frac{1}{6}K_1 + \frac{1}{3}K_2 + \frac{1}{3}K_3 + \frac{1}{6}K_4\right) \tag{17}$$

$$z_{i+1} = z_i + h\left(\frac{1}{6}L_1 + \frac{1}{3}L_2 + \frac{1}{3}L_3 + \frac{1}{6}L_4\right) \tag{17}$$

Oznaka f predstavlja odvod toka, zapisan v enačbi (6) in oznaka g predstavlja odvod kotna hitrosti, zapisan v enačbi (7).

Za numerično reševanje moramo izraziti odvod toka iz (6), zapisan z (8), in odvod kotne hitrosti iz (7), zapisan z (9).

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} \cdot \left(u_a - i_a \cdot R_a - c_m \cdot \omega\right) = f\left(t, i_a, \omega\right) \tag{18}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot \left[c_m \cdot i_a - \left(T_{la} + T_{lb} \cdot \omega + T_{lc} \cdot \omega^2\right)\right] = g\left(t, i_a, \omega\right) \tag{19}$$

Tako poteka izračun simulacije delovanja pogona z uporabo enačb (8) do (17) in upoštevanjem odvodov, zapisnih z enačbama (18) in (19).

3 Uporabljena optimizacijska metoda za določitev iskanih parametrov

Določitev parametrov (R_a, L_a, c_m, J, T_{la}, T_{lb} in T_{lc}) temelji na primerjavi merjenega poteka toka in kotne hitrosti ob zagonu z izračunanim potekom toka in kotne hitrosti. Izračunan potek toka in kotne hitrosti ob zagonu je izveden z opisanim modelom, sestavljenim iz sistema dveh diferencialnih enačb. Uporabljamo direktni pristop reševanja inverznega problema, kjer iščemo takšne parametre modela, da dobimo izračunane poteke toka in kotne hitrosti, ki so čim bolj podobni merjenim. Za določitev parametrov lahko uporabimo optimizacijsko metodo, v našem primeru smo uporabili Diferenčno evolucijo (DE) [2,3].

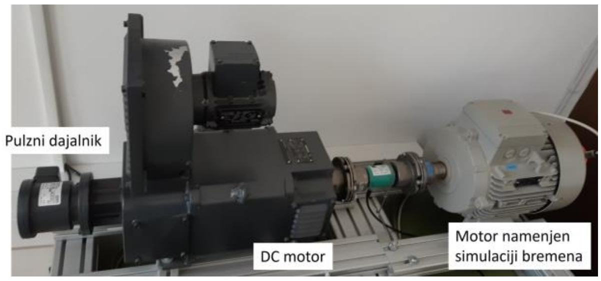
Diferenčna evolucija je tehnika optimizacije in iskanja, ki temelji na načelu genetike in naravne selekcije. Populacija DE je sestavljena iz posameznikov, iz katerih se pod določenimi pogoji generira nova generacija z namenom izboljšanja lastnosti posameznikov v smislu minimiziranja ciljne funkcije. Pomembni sestavini DE sta ojačanje diferencialne variacije in verjetnost križanja.

DE odlikujejo preprosta struktura, enostavna uporaba, hitrost in robustnost. Leta 1997 sta Price & Storn razvila princip delovanja DE z eno samo strategijo. Kasneje so bile razvite različne strategije DE. Uporablja se splošna konvencija označevanja DE/x/y/z. DE pomeni diferenčna evolucija (Differential Evolution), x predstavlja niz, ki označuje vektor, ki sodeluje v postopku generacije nove populacije, y je število diferenčnih vektorjev, upoštevanih za generacijo nove populacije, z pa pomeni vrsto uporabljenega križanja. Strategija, ki se izkaže kot najboljša za dan problem, morda ne deluje dobro, če ga uporabimo za drugačen problem.

Parametri DE so naslednji: uporabljena strategija je DE/rand/1/exp, ojačanje diferencialne variacije je 0,6 in verjetnost križanja je 0,8.

4 Rezultati

Merjeni poteki toka in kotne hitrosti ob zagonu so narejeni z napajalnikom SIEMENS SIMOREG DC-Master 6RA7013-6DV62-0-Z, enosmernim motorjem SIEMENS 1GG5104-0ED40-6VV1 in motorjem SIEMENS 1LA7139-4AA10-Z FDB0, ki ga lahko uporabimo za simulacijo bremena. Enosmerni motor in motor, ki se uporablja za simulacijo bremena sta prikazan na (slika 2).



Slika 2. Enosmerni motor in motor, ki je namenjen simulaciji bremena.

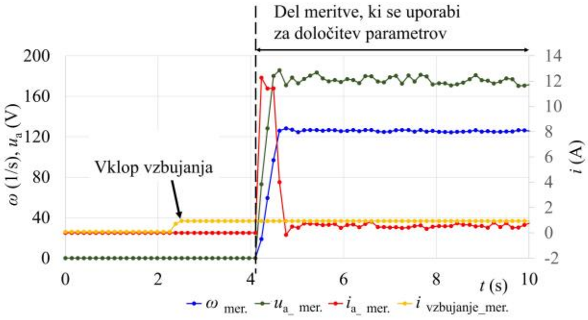
Meritve so narejene s pomočjo »Trace« funkcije, ki je del SIEMENS programske opreme. Podatki testnega primera zagona pogona so zapisani v tabeli 1.

Tabela 1. Podatki testnega zagona motorja

Parameter	Oznaka	Vrednost
Način obratovanja	/	n-control
Čas pospeševanja	$t_{\text{pospeševanja}}$	0 s
Končna hitrost	$\omega_{\text{končna}}$	126 s^{-1}
Tokovni limit	i_{a_limit}	11,44 A (110% i_{an})
Obremenitev	T_{breme}	0 Nm
Št. merjenih točk	N	87

Parameter T_{breme} = 0 pomeni, da smo na motorju, namenjenem simulaciji bremena, nastavili breme 0, vendar je še vedno prisotno trenje, kar pomeni, da T_{breme}, zapisan v enačbi (5), ne bo 0. Da zajamemo zaprtozančno obratovanje – regulacijo vrtljajev, je potrebno meriti napetost $u_a(t)$, ki je uporabljena kot vhodni podatek modela motorja.

Da lahko uporabimo predstavljeni model, je potrebno vzbujanje vklopiti pred vklopom tokokroga rotorja, tako da se prehodni pojav v vzbujalnem tokokrogu konča pred vklopom tokokroga rotorja in je vzbujanje prisotno ob vklopu rotorskega tokokroga. Na (slika 3) je prikazan del meritve, ki se uporabi za določitev parametrov.



Slika 3. Predstavitev dela meritve, ki se uporabi za določitev parametrov.

Različne nastavitve regulatorja vplivajo na napetost motorja in le-ta je uporabljena kot vhodni podatek modela motorja. Na ta način je dinamika motorja oziroma pogona v matematičnem modelu v celoti upoštevana.

Kriterij za vrednotenje razlike med merjenim in izračunanim potekom toka in kotne hitrosti je zapisan v ciljni funkciji (CF), zapisano z (20).

$$\mathrm{CF} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\left(\frac{i_{a\_simuliran\_i} - i_{a\_merjen\_i}}{i_{a\_merjen\_\max}}\right)^2 + \left(\frac{\omega_{simuliran\_i} - \omega_{merjen\_i}}{\omega_{merjen\_\max}}\right)^2\right) \tag{20}$$

Izraz v (20) je deljen s številom točk meritve N. Na tak način lahko primerjamo rezultate, dobljene za meritve z različnim številom točk. Kadar uporabljamo evolucijske metode, je potrebno postaviti zgornje in spodje meje parametrov, zapisane v tabeli 2.

Tabela 2. Meje parametrov

Parameter	Spodnja meja	Zgornja meja
R_a	0	100 Ω
L_a	0	100 H
c_m	0	5 Vs
J	0	1 kgm^2
T_{la}	0	20 Nm
T_{lb}	0	$9{,}55\cdot10^{-2}$ Nm/s
T_{lc}	0	$4{,}56\cdot10^{-6}$ Nm/s^2

Meje parametrov, predstavljene v tabeli 2, ustrezajo velikosti predstavljenega pogona. Če je pogon za bistveno večje navore, je potrebno meje parametrov ustrezno prilagoditi.

Velikost populacije, uporabljene v diferenčni evoluciji, je bila postavljena na desetkratnik števila parametrov, kar je 70. Narejenih je bilo 50 neodvisnih izračunov – ponovitev izračuna. Rezultati so predstavljeni v tabeli 3.

Tabela 3. Najboljša vrednost CF (B), najslabša vrednost CF (W), srednja vrednost CF (M) in standardna deviacija (SD) za 50 neodvisnih izračunov

Rezultati	Vrednost
Najboljša vrednost CF (B)	$2{,}2531 \cdot 10^{-3}$
Najslabša vrednost CF (W)	$2{,}2531 \cdot 10^{-3}$
Srednja vrednost CF (M)	$2{,}2531 \cdot 10^{-3}$
Standardna deviacija (SD)	0

Na osnovi tabele 3 lahko vidimo, da je v primeru uporabe DE (strategija DE/rand/1/exp, ojačanje diferencialne variacije 0,6 in verjetnost križanja 0,8) postopek izračuna zelo stabilen, saj je rezultat za vseh 50 neodvisnih izračunov popolnoma enak. Takšna stabilnost izračuna v primeru drugačne strategije, drugačnih parametrov DE ali v primeru uporabe kakšne druge evolucijske metode ni zagotovljena.

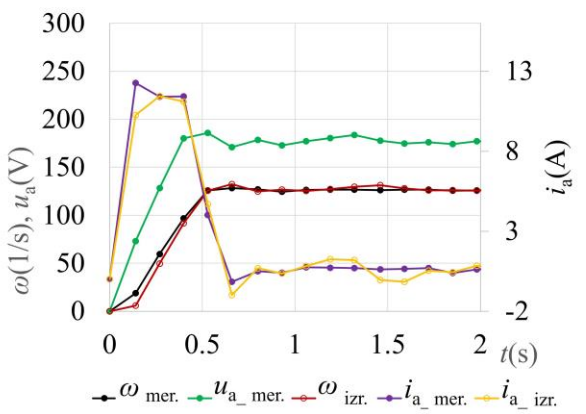
Izračunani parametri so predstavljeni v tabeli 4.

Tabela 4. Izračunani parametri

Parameter	Znana vrednost	Izračunana vrednost
R_a	5,66 Ω	5,06 Ω
L_a	ni podatka	0,244 H
c_m	ni podatka	1,369 Vs
J	$0{,}04$ kgm^2	$0{,}0468$ kgm^2
T_{la}	0,9 Nm	0,799 Nm
T_{lb}	0 Nm/s	$7{,}70 \cdot 10^{-18}$ Nm/s
T_{lc}	0 Nm/s^2	$8{,}00 \cdot 10^{-19}$ Nm/s^2

V primeru izračuna R_a je 10,4% odstopanje med znano in izračunano vrednostjo, v premeru izračuna J je 17% odstopanje in v primeru izračuna T_{la} je 11,2% odstopanje.

Merjeni in izračunani poteki toka in kotne hitrosti so prikazani na (slika 4).



Slika 4. Merjeni in izračunani poteki toka in kotne hitrosti.

Na (slika 4) je prikazana tudi napetost u_a, ki je uporabljena kot vhodni podatek modela motorja.

5 Zaključek

Iz tabele 3 je vidno, da je izbrana DE (strategija DE/rand/1/exp, ojačanje diferencialne variacije 0,6 in verjetnost križanja 0,8) zelo stabilna kar se kaže v tem, da vseh 50 neodvisnih izračunov vodi do istih izračunanih parametrov.

S tem, ko merjeno napetost uporabimo kot vhodni podatek modela motorja, omogočimo, da je metoda uporabljana tudi za pogone, kjer so motorji napajani s krmiljenim napajalnikom in ne le za motorje, katerih parametri se določijo na osnovi odziva na vklop konstantne napetosti [4-7].

Izračunani parametri, predstavljeni v tabeli 4, kažejo na dobro ujemanje z znanimi vrednostmi. Odstopanja so med 10% in 17%. Dobro ujemanje med merjenim in izračunanim tokom kot tudi med merjeno in izračunano kotno hitrostjo je vidno tudi na (slika 4), kar potrjuje kvaliteto predstavljene metode.

Delo je financirala Javna agencija za znanstveno-raziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARRS) v okviru programa P2-0114.

Literatura

[1] N.B. Shanmuga, A. Mythile, S. Pavithra, N. Nivetha: “Parameter Identification of A DC Motor”, International journal of scientific & technology research, vol. 9 (2), 5746-5755, 2020.

[2] R.J. He, Z.Y. Yang: “Differential evolution with adaptive mutation and parameter control using Levy probability distribution”, Journal of Computer Science and Technology, vol. 27 (5), 1035-1055, 2012.

[3] S. Chattopadhyay, S.K. Sanyal: “Optimization of Control Parameters of Differential Evolution Technique for the Design of FIR Pulse-shaping Filter in QPSK Modulated System”, Journal of Communications, vol. 6 (7), 558-570, 2011.

[4] V. Sankardoss, P. Geethanjali: “Parameter estimation and speed control of a PMDC motor used in wheelchair”, 1st International Conference on Power Engineering, Computing and CONtrol, PECCON-2017, 2-4 March 2017, Energy Procedia, 117, 345-352.

[5] M.S. Amiri, M.F. Ibrahim, R. Ramli: “Optimal parameter estimation for a DC motor using genetic algorithm”, International Journal of Power Electronics and Drive System, 11 (2), 1047-1054, 2020.

[6] A. Dupuis, M. Ghribi, A. Kaddouri: “Multiobjective genetic estimation of DC motor parameters and load torque”, IEEE International Conference on Industrial Technology, IEEE ICIT '04, 8-10 Dec. 2004, Hammamet, Tunisia., DOI 10.1109/ICIT.2004.1490788.

[7] D. Puangdownreong, S. Hlungnamtip, C. Thamarat, A. Nawikavatan: “Application of flower pollination algorithm to parameter identification of DC motor model”, International Electrical Engineering Congress, 8-10 March 2017, Pattaya, Thailand, DOI: 10.1109/IEECON.2017.8075889.