Estimacija parametara jednokavezne asinhrone mašine primjenom teorije haosa

ŽELJKO M. FUŠTIĆ, Crnogorski elektrodistributivni sistem, Podgorica, Crna Gora

NIKOLA LJ. KOLJČEVIĆ, Univerzitet Crne Gore,

Elektrotehnički fakultet, Podgorica, Crna Gora

MARTIN P. ČALASAN, Univerzitet Crne Gore,

Elektrotehnički fakultet, Podgorica, Crna Gora

VESNA Z. RUBEŽIĆ, Univerzitet Crne Gore,

Elektrotehnički fakultet, Podgorica, Crna Gora

Originalni naučni rad

UDC: 519.87:124.1

DOI: 10.5937/tehnika2001057F

U radu je predstavljena upotreba teorije haosa, konkretno upotreba Chaotic Optimization algoritma – COA, u estimaciji parametara zamjenske šeme jednokavezne asinhrone mašine. Za određivanje parametara zamjenske šeme asinhrone mašine korišćene su vrijednosti parametara koje daje proizvođač (polazni moment, prevalni moment, nominalni moment i nominalna vrijednost faktora snage). Rezultati koji su dobijeni primjenom COA algoritma, upoređeni su sa rezultatima dobijenim primjenom Shuffled frog-leaping algorithm (SFLA), Modified shuffled frog-leaping algorithm (MSFLA), Differential evolution (DE), Particle swarm optimization (PSO) i GAs (Genetic algorithms). Pokazano je da se COA algoritam može veoma efikasno primijeniti u estimaciji parametara zamjenske šeme jednokavezne asinhrone mašine.

Ključne riječi: asinhrona mašina, zamjenska šema, estimacija parametara

1. UVOD

Asinhrona mašina ili indukciona mašina je najčešće korišćena vrsta električne mašine za naizmjeničnu struju. Samim tim, jasno je da je pravilno funkcionisanje ovih mašina, jako bitno za svaki električni pogon i aplikaciju u kojoj se ista primjenjuje. Iz tog razloga, poželjno je poznavati stanje komponenti asinhrone mašine, kako bi se smanjili gubici i osiguralo odsustvo kvarova.

Zamjenska šema mašine i njeni parametri definišu rad same mašine. Zbog toga estimacija parametara pruža značajan uvid u stanje mašine i daje sliku o nivou performansi koje se od iste mogu očekivati [1].

Parametri zamjenske šeme se mogu odrediti sprovođenjem ogleda praznog hoda i kratkog spoja, kako nalažu IEEE i IEC odrednice [2-3]. Međutim, ove odrednice podrazumijevaju izvođenje različitih eksperimenata opterećenja mašine i rada u praznom hodu što

podrazumijeva izlazak mašine iz pogonskog stanja. Zbog nemogućnosti određivanja parametara asinhrone mašine u njenom pogonskom stanju, značajni i naučni i stručni naponi se ulažu ka formulaciji novih metoda, tj. pristupa kojima će se zaobići ovaj problem.

S' prethodnim u vezi, u literaturi su razmotrene primjene raznih metoda i algoritama u cilju estimacije parametara mašine u pogonskom stanju. Neki od pristupa se zasnivaju na upotrebi podataka sa natpisne pločice [4-6], dok se drugi pristupi baziraju na mjerenju pojedinih varijabli tokom različitih režima rada mašine (ubrzavanje mašine [7-8], direktni start [9], frekventno napajanje [10], generatorski režim rada [11], impulsni odziv [12] i slično). Međutim, bez obzira koji od pristupa se koristi, potrebno je koristiti neku od optimizacionih tehnika ili iterativnih metoda za estimaciju parametara mašine (algoritam zasnovan na teoriji hranjenja bakterija - Bacterial Foraging algorithm - BFA [5], algoritam zasnovan na teoriji rojeva - Particle Swarm Optimization Algorithm – PSO [13], algoritam zasnovan na skakanju žaba - Shuffled Frog-Leaping Algorithm – SFLA [14], algoritam zasnovan na koloniji pčela - Artificial Bee Colony Algorithm – ABC [15], Newton-Raphson algoritam [16], Levenberg-Marquardt algoritam [4]. itd.). Ovaj rad se bavi

Adresa autora: Željko Fušić, Crnogorski elektrodistributivni sistem, Podgorica, Ivana Milutinović 12, Crna Gora

e-mail: zeljkofustic@gmail.com

Rad primljen: 07.11.2019.

Rad prihvaćen: 30.01.2020.

estimacijom parametara mašine na osnovu njenih kataloških podataka, pri čemu se kao optimizacioni metod koristi algoritam zasnovan na teoriji haosa (Chaotic Optimization Algorithm -COA).

COA je optimizacioni metod koji je našao primjenu u mnogim inženjerskim aplikacijama [17]-[25]. Prednost primjene COA algoritma, u odnosu na pomenute metode ogleda se u eliminaciji problema retencije lokalnih minimuma. Sa druge strane, treba naglasiti da postoji veliki broj tipova haotičnih jednačina na kojima se može bazirati haotični algoritam. Ovaj rad je zasnovan na jednačini logističkog preslikavanja [20-21].

Sam rad je organizovan na sljedeći način. U drugom poglavlju opisana je zamjenska šema asinhrone mašine. Kratak opis realizovanog COA

algoritma prikazan je u poglavlju 3. Rezultati estimacije parametara asinhrone mašine na osnovu kataloških podataka prikazani su u Poglavlju 4. Zaključna razmatranja i smjernice za budući rad su dati u Poglavlju 5.

2. ZAMJENSKA ŠEMA JEDNOKAVEZNE ASINHRONE MAŠINE

Zamjenska šema jednokavezne asinhrone mašine, prikazana je na slici 1. Sa R_1 i $X_{\sigma 1}$, označena je aktivna otpornost, odnosno rasipna reaktansa namotaja statora, dok su sa R_2 i X_2 predstavljene otpornost i rasipna reaktansa rotora, svedene na stator. Reaktansa grane magnećenja je označena sa X_m . Klizanje mašine, tj. kašnjenje rotora u odnosu na obrtno polje statora je označeno sa s .

Slika 1 - Ekvivalentna šema jednokavezne asinhrone mašine

Ukupna kompleksna impedansa grane rotora i grane magnećenja se računa na sljedeći način:

$$\underline{Z}_P(s) = \frac{1}{jX_m + \frac{1}{\frac{R_2}{s} + jX'_{\sigma 2}}}, \quad (1)$$

dok se kompleksna vrijednost struje statora računa kao:

$$\underline{I}_1(s) = \frac{\underline{U}_1}{R_1 + jX_{\sigma 1} + \underline{Z}_P(s)}. \quad (2)$$

Struja rotora asinhrone mašine se može odrediti na osnovu strujnog djelitelja ako je poznata struja statora:

$$\underline{I}_2(s) = \frac{\underline{Z}_P(s) * \underline{I}_1(s)}{\frac{R_2}{s} + jX'_{\sigma 2}}. \quad (3)$$

Moment mašine se može odrediti na sljedeći način:

$$T(s) = \frac{3p}{\omega_s} (\underline{I}_2(s))^2 \frac{R_2}{s}. \quad (4)$$

Ako se uzme da je $s=1$, lako se može odrediti vrijednost polaznog momenta. Maksimalna vrijednost momenta se dobija diferenciranjem jednačine (4), tj. momenta, po klizanju. U tom slučaju, odgovarajuća – prevalna vrijednost klizanja ima vrijednost

$$s_m = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_{\sigma 2})^2}} \quad (5)$$

gdje je:

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} = \frac{1}{\frac{1}{R_1 + X_{\sigma 1}} + \frac{1}{jX_m}}. \quad (6)$$

3. COA

U savremenim heurističkim metodama, ističu se tehnike zasnovane na haotičnim sistemima. Haotične tehnike su našle primjenu u rješavanju brojnih problema [19]-[24]. Algoritmi zasnovani na njihovoj upotrebi su jednostavni i imaju kratko vrijeme izvršenja [16, 17]. U ovom radu se koristi algoritam zasnovan na jednačini Logističkog preslikavanja [20]:

$$y_{t+1} = ry_t(1 - y_t), \quad (7)$$

pri čemu je $r = 5$ – vrijednost parametra r pri kojoj Logističko preslikavanje ispoljava haotično ponašanje. Vrijednost članova formiranih haotičnih sekvenci nalazi se u opsegu [0-1], a radi formiranja prostora pretrage, potrebno ga je uskladiti sa predhodno definisanim granicama prostora. Zadatak haotičnog optimizacionog metoda je nalaženje rješenja X , koji minimizuje vrijednost kriterijumske funkcije.

Proces se odvija na sljedeći način. Globalna pretraga se vrši u kompletnom prostoru za pretragu. Rješenje globalne pretrage je X^* – tačka kojoj odgovara najmanja vrijednost kriterijumske funkcije. Cijeli proces je prikazan na slici 2. gdje je izložen pseudo kod algoritma.

Slika 2 - Izgled pseudo koda

4. ESTIMACIJA PARAMETARA ZAMJENSKE ŠEME JEDNOKAVEZNE ASINHRONE MAŠINE

COA algoritam opisan u prethodnom poglavlju primjenjen je na dvije asinhronne mašine čiji podaci su dati u tabeli 1 [14].

Tabela 2. Parametri zamjenske šeme asinhronne mašine od 5HP

Parametri [Ω]	DE	GAs	PSO	SFLA	MSFLA	COA
R ₁	0.1838	1.1316	0.9872	0.0008	0.0036	0.00001882
R ₂	2.1009	2.0330	2.0322	2.1330	2.1817	2.2003
X ₁	5.6197	5.3750	5.3785	5.5847	5.7202	5.8966
X ₂	5.6197	5.3750	5.3785	5.5847	5.7202	5.6481
X _m	99.1792	87.1944	77.0420	77.9101	94.1401	95.5638

Tabela 3. Parametri zamjenske šeme asinhronne mašine od 40HP

Parametri [Ω]	DE	GAs	PSO	SFLA	MSFLA	COA
R ₁	0.4993	0.4875	0.3555	0.3437	0.2707	0.2782
R ₂	0.3264	0.3264	0.3455	0.3360	0.3572	0.3722
X ₁	0.3510	0.3556	0.4353	0.4345	0.4773	0.3630
X ₂	0.3510	0.3556	0.4353	0.4345	0.4773	0.6126
X _m	5.6967	6.0718	6.4223	6.2629	7.5431	7.7173

Tabela 1. Kataloški podaci dvije posmatrane asinhronne mašine [14]

Podaci proizvođača	Mašina 1	Mašina 2
Nominalna snaga - P _n	5HP	40HP
Nominalni napon - U _n	400V	400V
Broj pari polova	2	2
Frekvencija - f	50	50
Polazni moment - T _{st}	15Nm	260Nm
Nominalni moment - T _n	25Nm	190Nm
Maksimalni moment - T _{max}	42Nm	370Nm
Faktor snage pri punom opterećenju - pf _n	0.8	0.8
Klizanje pri punom opterećenju - s _n	0.07	0.09

Kriterijumska funkcija (J) koja je korišćena za estimaciju parametara zamjenske šeme jednokavezni mašina data je sljedećom ralacijom [14]:

$$J = \sum_{k=1}^M \left[\left(\frac{p_{fl}^{k est}}{p_{fl}^k} - 1 \right)^2 + \left(\frac{T_{fl}^{k est}}{T_{fl}^k} - 1 \right)^2 + \left(\frac{T_{st}^{k est}}{T_{st}^k} - 1 \right)^2 + \left(\frac{T_{max}^{k est}}{T_{max}^k} - 1 \right)^2 \right] \quad (8)$$

gdje je M – broj sprovedenih mjerenja, dok članovi $p_{fl}^{k est}$, $T_{fl}^{k est}$, $T_{st}^{k est}$, $T_{max}^{k est}$ predstavljaju estimirane vrijednosti faktora snage, nominalnog momenta, početnog momenta i maksimalne vrijednosti momenta, respektivno. Vrijednost parametara p_{fl}^k , T_{fl}^k , T_{st}^k , T_{max}^k su vrijednosti parametara koji se nalaze u kataloškim podacima mašine.

U tabelama 2 i 3 su prikazane vrijednosti parametara mašine dobijeni primjenom COA algoritma, kao i vrijednosti parametara dobijeni primjenom ostalih metoda opisanih u [14]: SFLA, GAs, DE, PSO i MSFLA.

Korišćenjem dobijenih parametara zamjenske šeme, proračunate su i estimirane vrijednosti faktora snage, nominalnog momenta, početnog momenta i maksimalnog momenta.

Rezultati estimacije ovih vrijednosti, kako za COA metod tako i za ostale metode, date su slikama 3-6, kao i u tabelama 4 i 5. Isto tako, u tabelama 4 i 5 su prikazane i proračunate vrijednosti greške shodno sljedećem izrazu:

$$greška = \frac{Z_{podaciproizv} - Z_{estimirano}}{Z_{podaciproizv}}, \quad (9)$$

gdje Z predstavlja T_{st} , T_{fl} , T_{max} i pf_{fl} .

Tabela 4. Vrijednosti estimiranih parametara za mašinu od 5HP

	T_{st}	T_{fl}	T_{max}	pf_{fl}
Podaci proizvođača	15	25	42	0.8
DE	15.359	26.574	41.075	0.811
Error DE	2.39%	6.29%	-2.20 %	1.38%
GAs	15.511	25.931	39.277	0.8101
Error GAs	3.40%	3.72%	-6.48 %	1.26%
PSO	15.472	27.778	39.323	0.7888
Error PSO	3.14%	11.11%	-6.37 %	-1.40 %
SFLA	15.620	25.8585	40.072	0.771
Error SFLA	4.13%	3.43%	-3.05 %	-3.63 %
MSFLA	15.397	25.763	40.717	0.7991
Error MSFLA	2.64%	3.05%	-3.05%	-0.11%
COA	15.2561	25.5083	40.3336	0.8000
Error COA	1.70%	2.03%	-3.96%	0.00%

Tabela 5. Vrijednosti estimiranih parametara za mašinu od 40HP

	T_{st}	T_{fl}	T_{max}	pf_{fl}
Podaci proizvođača	260	190	370	0.8
DE	265.669	190.903	349.843	0.8065
Error DE	2.18%	0.47 %	-5.44%	0.82%
GAs	268.016	192.789	353.871	0.817
Error GAs	3.08%	1.46%	-4.35%	2.13%
PSO	263.337	190.453	363.729	0.7883
Error PSO	1.28%	0.23 %	-1.69%	-1.46%
SFLA	262.4672	195.106	368.035	0.786
Error SFLA	0.94%	2.68%	-0.53%	-1.75%
MSFLA	261.687	192.196	373.851	0.7995
Error MSFLA	-0.64%	1.15%	1.04%	-0.06%
COA	259.9957	190.0049	370.007	0.8000
Error COA	-1.65E-5%	2.58E-5%	1.9189E-5%	0.00%

Na osnovu prikazanih rezultata je jasno da parametri određeni primjenom COA obezbjeđuju bolje poklapanje podataka sa natpisne pločice i estimiranih vrijednosti u nekoliko tačaka u odnosu na upotrebu ostalih algoritama. Međutim, vidi se da parametri određeni COA algoritmom imaju veće odstupanje kod maksimalnog momenta u odnosu na SFLA, MSFLA i DE

algoritma kod 5HP mašine. Razlog za ovo odstupanje može biti u tome što su svi parametri mašine posmatrani da ne zavise od klizanja mašine, tj. da imaju konstantnu vrijednost.

Sa druge strane, kod 40HP mašine, COA obezbjeđuje najbolje poklapanje između estimiranih vrijednosti i katalogskih vrijednosti u odnosu na upotrebu

drugih algoritama. Prema tome, efikasna upotreba COA algoritma u estimaciji parametara asinhronne mašine je evidentna.

Slika 3 - Moment - klizanje karakteristike kod 5HP mašine

Slika 4 - Faktor snage - klizanje karakteristike kod 5HP mašine

Slika 5 - Moment - klizanje karakteristike kod 5HP mašine

Slika 6 - Faktor snage - klizanje karakteristike kod 40HP mašine

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izložena analiza primjene haotičnog optimizacionog algoritma na problemu određivanja vrijednosti parametara zamjenske šeme jednokavezne asinhronne mašine. U procesu optimizacije korišćena je kriterijumska funkcija koja uvažava faktor snage, početni moment, nominalni moment i maksimalni moment. Rezultati koji su dobijeni pokazuju dobra poklapanja estimiranih vrijednosti sa vrijednostima koje je dao proizvođač. Isto tako, poređenjem se pokazalo da COA algoritam obezbjeđuje u velikoj mjeri dobijanje boljih rezultata u odnosu na ostale optimizacione metode.

U daljem istraživačkom radu biće analiziran COA algoritam na dvokaveznu asinhronu mašinu, i dobijanje parametara zamjenske šeme dvokavezne asinhronne mašine. Takođe, razmotriće se primjena COA u određivanju parametara mašine koji su funkcija klizanja mašine.

LITERATURA

- [1] Krishnan R, *Electric motor drives – Modeling, Analysis and Control*, Prentice Hall, USA, 2001
- [2] IEEE Standard 112: *Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, 2004
- [3] IEC standards 60034-28 IEC - Rotating Electrical Machines - Part 28. *Test Methods for Determining Quantities of Equivalent Circuit Diagrams for Three-Phase Low-Voltage Cage Induction Motors*, Dec. 2012.
- [4] Haque M. H, Determination of NEMA design induction motor parameters from manufacturer data, *IEEE Trans. Energy Convers*, Vol. 23, No. 4, pp. 997–1004, 2008.
- [5] Sakthivel P, Bhuvaneswari R, Subramanian S, Bacterial Foraging Technique Based Parameter Estimation of Induction Motor from Manufacturer Data, *Elect. Power Comp. Syst*, Vol. 38, pp. 657-674, 2010.
- [6] Guimaraes J. M. C, Bernardes J. V, Hermeto A. E, Bortoni E. C, Parameter determination of asynchronous machines from manufacturer data sheet, *IEEE Trans. Energy Conv*, Vol. 29, Np. 3, pp. 689–697, 2014.
- [7] Babau R, Boldea I, Miller T. J. E, Muntean, N. Complete parameter identification of large induction machines from no-load acceleration deceleration tests, *IEEE Trans. Ind. Electr*, Vol. 54, No. 4, pp. 1962–1972, 2007.
- [8] Jafari H. K, Monjo L, Corcoles F, Pedra J, Using the instantaneous power of a free acceleration test for

- squirrel cage motor parameters estimation, *IEEE Trans. Energy Conv*, Vol. 30, No. 3, pp. 974–982, 2015.
- [9] Benzaquen J, Rengifo J, Albanez E, Aller J. M, Parameter Estimation for Deep-Bar Induction Machines Using Instantaneous Stator Measurements From a Direct Startup, *IEEE Trans Energy Conv*, Vol. 32, No. 2, pp. 516 – 524, 2017.
- [10] Seok J. K, Moon S. I, Sul S. K, Induction machine parameter identification using PWM inverter at standstill, *IEEE Trans. on Energy Conv*, Vol. 12, No. 2, pp. 127–132, 1997.
- [11] Laroche E, Boutayeb M, Identification of the Induction Motor in Sinusoidal Mode, *IEEE Trans Energy Conv*, Vol. 25, No. 1, pp. 11-19, 2010.
- [12] Repo A, Arkkio A, Numerical impulse response test to identify parametric models for closed-slot deep-bar induction motors, *IET Electr. Power Appl*, Vol. 1, No. 3, pp. 307–315, 2007.
- [13] Huynh D. C, Dunnigan M. W, Parameter estimation of an induction machine using advanced particle swarm optimisation algorithms, *IET Elect. Power Appl*, Vol. 4, No. 9, pp. 748–760, 2010.
- [14] Perez I, Gonzalez M. G, Jurado F, Estimation of induction motor parameters using shuffled frog-leaping algorithm, *Electrical Engineering*, Vol. 95, No. 1, pp. 267–275, 2013.
- [15] Abro A. G, Mohamed-Saleh J, Multiple-global bests guided artificial bee colony algorithm for induction motor parameter estimation, *Turkish J. Elect. Eng. Comp. Sci.*, Vol. 22, No. 1, pp. 620–638, 2014.
- [16] Akbaba M, Taleb M, Rumeli A, Improved estimation of induction machine parameters, *Electric Power Systems Research*, Vol. 34, pp. 65-73, 1995.
- [17] Liu B, et.al, Improved particle swarm optimization combined with chaos, *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 25, No. 5, pp. 1261–1271, 2005.
- [18] Zuo X. Q, Fan Y. S, A chaos search immune algorithm with its application to neuro-fuzzy controller design, *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 30, No. 1, pp. 94-109, 2006.
- [19] Coelho L. S, Tuning of PID controller for automatic regulator voltage system using chaotic optimization search, *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 39, pp. 1504-1514, 2009.
- [20] Čalasan M, Mujičić D, Rubežić V, Radulović M, Estimation of Equivalent Circuit Parameters of Single-Phase Transformer by Using Chaotic Optimization Approach, *Energies*, Vol. 12, pp. 1697, 2019
- [21] Čalasan M, Jovanović D, Rubežić V, Mujović S, Đukanović, S. Estimation of Single-Diode and Two-Diode Solar Cell Parameters by Using a Chaotic Optimization Approach, *Energies*, Vol. 12, pp. 4209, 2019.
- [22] Rubežić V, Lazović L, Jovanović A, Parameter identification of Jiles-Atherton model using the chaotic optimization method, *Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng*, Vol. 37, pp. 2067–2080, 2018.
- [23] Jovanović A, Lazović L, Rubežić V, Adaptive Array Beamforming Using a Chaotic Beamforming Algorithm, *Int. J. Antennas Propag.* Vol. 2016, pp. 8354204, 2016.
- [24] Jovanović A, Lazović L, Rubežić V, Radiation pattern synthesis using a Chaotic beamforming algorithm, *COMPEL Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng*. Vol. 35, pp. 1814–1829, 2016.
- [25] Sprott JC, *Chaos and Time-Series Analysis*, Oxford University Press, Oxford, New York, 2003.

SUMMARY

PARAMETER ESTIMATION OF SINGLE-STAGE INDUCTION MACHINE USING CHAOS THEORY

This paper presents the use of chaos theory, specifically the use of the Chaotic Optimization Algorithm - COA, in estimating the parameters of single-cage induction machine equivalent circuit. In order to estimate the parameters of single-cage induction machine equivalent circuit, the values provided by the manufacturer (starting torque, maximal torque, nominal torque and nominal value of the power factor) were used. The results obtained through COA algorithm are compared with the results obtained through the use of Shuffled frog-leaping algorithm (SFLA), Modified shuffled frog-leaping algorithm (MSFLA), Differential evolution (DE), Particle swarm optimization (PSO), GAs (Genetic algorithms). It has been shown that COA algorithm can be very effectively applied in estimating the parameters of single-cage induction machine equivalent circuit.

Key words: asynchronous machine, replacement scheme, parameter estimation