

Estimacija parametara transformatora primjenom Haotičnog Optimizacionog Algoritma

Danilo Mujčić

Student magistarskih studija
Elektrotehnički fakultet, UCG
Nikšić, Crna Gora
danilo.mujcic.me@gmail.com

Martin Čalasan, Vesna Rubežić, Luka Lazović

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet Crne Gore
Podgorica, Crna Gora
martinc@ucg.ac.me, vesnar@ucg.ac.me, lukal@ucg.ac.me

Sažetak—U ovom radu je predstavljena upotreba Chaotic Optimization algoritma (COA) u estimaciji parametara zamjenske šeme monofaznog transformatora. Pri određivanju parametara transformatora korišćene su vrijednosti struje primara i vrijednosti napona i struje sekundara. Rezultati dobijeni primjenom COA metode, upoređeni su sa rezultatima ostvarenim primjenom Bacterial Foraging algoritma, kao i sa rezultatima dobijenim pomoću klasičnih metoda, baziranih na sprovođenju eksperimenata praznog hoda i kratkog spoja. Pokazano je da COA može precizno identifikovati parametre zamjenske šeme transformatora.

Ključne riječi - transformator; zamjenska šema; parametri; haotični optimizacioni algoritam (transformer, equivalent circuit, parameters, optimization algorithm)

I. UVOD

Transformatori snage, značajan su segment distributivnih i prenosnih mreža. Ukupna instalisana snaga svih transformatora u okviru nekog elektroenergetskog sistema (EES) je oko pet puta veća od instalisane snage svih generatora tog sistema. Samim tim, jasno je da je pravilno funkcionisanje ovih mašina, neophodno radi pravilnog funkcionisanja EES-a u cjelini [1]. Iz tog razloga, poželjna je procjena stanja komponenti transformatora, kako bi se osiguralo odsustvo kvarova i minimizovali gubici u okviru sistema.

Zamjenska šema i njeni parametri definišu ponašanje same mašine. Stoga, estimacija ovih parametara može pružiti značajan uvid u stanje opreme i dati sliku o nivou performanse koji se od uređaja može očekivati. Parametri zamjenske šeme, mogu se odrediti standardnim eksperimentalnim procedurama, baziranim na sprovođenju oglada praznog hoda i kratkog spoja, kako nalažu IEEE odrednice [2]. Međutim, ovi postupci, radi sprovođenja eksperimenata, podrazumijevaju izlazak iz pogonskog stanja. Zbog nemogućnosti primjene na transformatore u radu, značajan trud se ulaže ka formulaciji novih metoda, kojima će se zaobići ova nepovoljnost.

Kroz literaturu, razmotrene su primjene raznih metaheurističkih metoda i algoritama, na pomenutu problematiku. Ove metode zasnivaju se na upotrebi podataka dobijenih mjerenjem vrijednosti odgovarajućih električnih veličina, tokom normalnog rada transformatora. U [3, 4] opisana

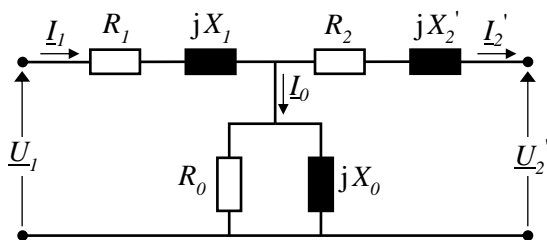
je upotreba PSO (Particle Swarm Optimization) algoritma, u cilju estimacije parametara mašine, dok se u [5, 6] koristi GA (Genetic Algorithm). Upotreba MOABC (Multi-Objective Artificial Bee Colony) optimizacije, razmotrena je u [7]. Isto tako, u [8] je pokazana primjena PSO i GA algoritama u cilju određivanja parametara transformatora u slučaju korišćenja podataka sa natpisne pločice. Međutim, ova istraživanja takođe podrazumijevaju i sprovođenje oglada praznog hoda i kratkog spoja. Slično istraživanje, ali sa upotrebom ICA (Imperialist Competitive Algorithm) i GSA (Gravitational Search Algorithm) algoritama, predstavljeno je u [9].

Ovaj rad analizira primjenu COA (Chaotic Optimization Algorithm) optimizacije na problem određivanja parametara transformatora. Naime, COA je moćan optimizacioni alat koji je našao primjenu u brojnim inženjerskim aplikacijama [12]-[16]. Osim jednostavnije implementacije i kraćeg vremena izvršenja [16, 17], prednost primjene COA algoritma, nad prethodno navedenim metodama, ogleda se i u eliminaciji problema retencije lokalnih minimuma. Brojni su tipovi haotičnih jednačina [18] koje se koriste pri implementaciji samog algoritma. Metod koji je predstavljen u ovom radu, zasnovan je na primjeni jednačina logističkog preslikavanja [18].

Rad je podjeljen u nekoliko sekcija. Najprije je, u poglavlju II, izložen matematički model transformatora, tj. njegova zamjenska šema uz prateće matematičke relacije koje su dio samog modela. Nakon toga, u kratkim crtama je opisan tok predloženog COA algoritma. Primjena algoritma na opisanu problematiku, objašnjena je u poglavlju IV, a rezultati dobijeni primjenom pomenute metode, upoređeni sa rezultatima izloženim u [10]. Na kraju je, u zaključku dat kratak osvrt na cjelokupan rad i navedene su smjernice za buduće istraživanje.

II. ZAMJENSKA ŠEMA TRANSFORMATORA

Ekvivalentna šema monofaznog transformatora, prikazana je na Sl. 1. Aktivna otpornost i rasipna reaktansa primarnog namotaja, označene su sa R_1 i X_1 , dok su R_2' i X_2' , otpornost i rasipna reaktansa sekundara. Gubici u gvožđu se modeluju aktivnom otpornošću R_0 , vezanom paralelno reaktansi magnećenja X_0 , u poprečnoj grani zamjenske šeme.



Slika 1. Ekvivalentna T šema transformatora

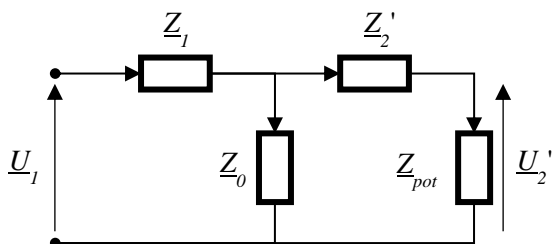
Impedansa primara i impedansa sekundara svedena na primar, mogu se napisati u obliku:

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1 \\ Z_2' &= R_2' + jX_2' \end{aligned} \quad (1)$$

a impedansa poprečne grane:

$$Z_0 = \frac{R_0 \cdot jX_0}{R_0 + jX_0} \quad (2)$$

Ekvivalentna šema transformatora, u slučaju priključenog potrošača, data je na Sl. 2.



Slika 2. Ekvivalentno kolo opterećenog transformatora

Ukoliko se impedansa potrošača označi sa Z_{pot} , ekvivalentna impedansa ovog kola, jednaka je:

$$Z = Z_1 + Z_0 P(Z_2' + Z_{pot}) \quad (3)$$

Efektivna vrijednost struje primarnog namotaja se može izračunati kao:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z} \quad (4)$$

gdje je Z – moduo ekvivalentne impedanse kola, a U_1 – efektivna vrijednost napona primara.

Struja sekundara, svedena na primar, određena je izrazom:

$$I_2' = \left| \frac{Z_0}{Z_0 + (Z_2' + Z_{pot})} \cdot \left(\frac{U_1}{Z} \right) \right| \quad (5)$$

Efektivna vrijednost napona sekundara, svedena na naponski nivo primara je:

$$U_2' = I_2' \cdot |Z_{pot}| \quad (6)$$

III. HAOTIČNI OPTIMIZACIONI ALGORITAM

Među savremenim heurističkim tehnikama, ističu se one zasnovane na haotičnim sistemima. Haotične sekvence našle su primjenu u brojnim optimizacionim problemima [12]-[16], a algoritmi zasnovani na njihovoj upotrebi jednostavni su za implementaciju i imaju kratko vrijeme izvršenja [16, 17]. Kroz literaturu su navedeni različiti pristupi formiranju ovih sekvenci: Lozi, Gaus, Tent i ostala iterativna preslikavanja [18]. Algoritam predstavljen u ovom radu, koristi jednačinu Logističkog preslikavanja [18] :

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

pri čemu je $r = 4$ – vrijednost parametra r pri kojoj Logističko preslikavanje ispoljava haotično ponašanje. Kako se vrijednosti članova formiranih haotičnih sekvenci nalaze u opsegu $[0,1]$, tako ih je, radi formiranja prostora pretrage, potrebno uskladiti sa prethodno definisanim granicama ovog prostora. Zadatak optimizacionog algoritma, ogleda se u nalaženju rješenja X , kojim se minimizuje vrijednost kriterijumske funkcije. Proces nalaženja ove tačke, odvija se u dvije etape. Kompletan pretražni prostor, pokriven je prvim djelom algoritma, koji se naziva globalnom pretragom. Globalna pretraga, kao rješenje daje X^* - tačku kojoj odgovara najmanja vrijednost kriterijumske funkcije. Lokalna pretraga, ili druga etapa optimizacionog procesa, omogućava finiju pretragu u okolini rješenja X^* . Naime, prebacivanjem fokusa sa čitavog pretražnog prostora na okolinu tačke X^* , dolazi se do konačnog optimuma, za koji je vrijednost kriterijumske funkcije minimalna.

Tok algoritma je dodatno opisan priloženim pseudo-kodom:

<u>Globalna pretraga</u>	
Korak 1	Definisanje granica pretražnog prostora
Korak 2	Inicijalizacija haotičnog niza
Korak 3	Skaliranje vrijednosti haotičnog niza u skladu sa granicama prostora
Korak 4	Proračun vrijednosti kriterijumske funkcije za svaku od tačaka niza
Korak 5	Koordinate tačke X^* , za koju je proračunata minimalna vrijednost kriterijumske funkcije, prosljeđuju se algoritmu lokalne pretrage
<u>Lokalna pretraga</u>	
Korak 1	Fokusiranje prostora pretrage na okolinu tačke X^* , redefinisanjem njegovih granica
Korak 2	Inicijalizacija novog haotičnog niza
Korak 3	Skaliranje vrijednosti haotičnog niza u skladu sa redefinisanim granicama prostora pretrage
Korak 4	Proračun vrijednosti kriterijumske funkcije za svaku od tačaka niza
Korak 5	Koordinate tačke X , kojoj odgovara najmanja vrijednost kriterijumske funkcije, koordinate su konačnog globalnog optimuma

IV. ESTIMACIJA PARAMETARA ZAMJENSKE ŠEME TRANSFORMATORA

Algoritam opisan u prethodnom poglavlju, primjenjen je na monofazni transformator (2kVA, 230/115 V, 50Hz). Izmjerene efektivne vrijednosti napona i struja primara i sekundara, preuzete su iz [10] i date u Tabeli I. U konkretnom slučaju, opterećenje transformatora je čisto omsko.

TABELA I. IZMJERENE VRIJEDNOSTI FAZNIH STRUJA I NAPONA – PODACI PREUZETI IZ [10]

U_1 [V]	I_1 [A]	U_2 [V]	I_2 [A]
226	4.6	109	8.7
225	5.4	108	10.4
225	6.3	108	12.2
223	7.1	107	13.9
223	8.0	106	15.7
223	8.7	105	17.39

Kriterijumska funkcija koja je korišćena kod estimacije parametara transformatora, primjenom prethodno opisanog metoda, data je relacijom:

$$J = \sum_{k=1}^M \left[\left(\frac{I_{1est}^{(k)}}{I_1^{(k)}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{I_{2est}^{(k)}}{I_2^{(k)}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{U_{2est}^{(k)}}{U_2^{(k)}} - 1 \right)^2 \right], \quad (8)$$

gdje je M - broj izvršenih mjerenja. Pri tome su $I_{1est}^{(k)}$, $U_{2est}^{(k)}$, $I_{2est}^{(k)}$ - estimirane vrijednosti struje primara, odnosno napona i struje sekundara, dok su $I_1^{(k)}$, $U_2^{(k)}$, $I_2^{(k)}$ - mjerene vrijednosti ovih veličina, koje odgovaraju k - tom mjernom ciklusu.

U Tabeli II su prikazane vrijednosti parametara zamjenske šeme pomenutog monofaznog transformatora, estimirane primjenom COA algoritma. U Tabeli su takođe prikazani i parametri dobijeni primjenom oglada praznog hoda i kratkog spoja, kao i parametri dobijeni primjenom BF algoritma.

TABELA II. PARAMETRI ZAMJENSKE ŠEME

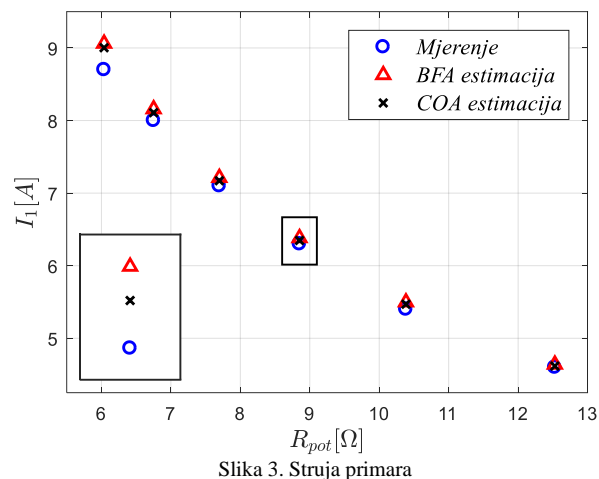
Parametri [Ω]	PH i KS [10]	BF [10]	HAOS
R_l	0.428	0.428	0.4545
X_l	0.21	0.43	0.2523
R_2'	0.508	0.493	0.6058
X_2'	0.03	0.024	0.0209
R_0	1437.5	1437.5	1614.4
X_0	294.8	294.226	286.4388

Upotrebom dobijenih parametara zamjenske šeme, proračunate su i estimirane vrijednosti struje primara i napona i struje sekundara, kako za BF algoritam, tako i za COA metod. Rezultati estimacije su prikazani na Sl. 3, 4 i 5, zajedno sa odgovarajućim izmjerenim vrijednostima. Za svaku od pomenutih električnih veličina, proračunate su i vrijednosti srednje apsolutne greške (Tabela III).

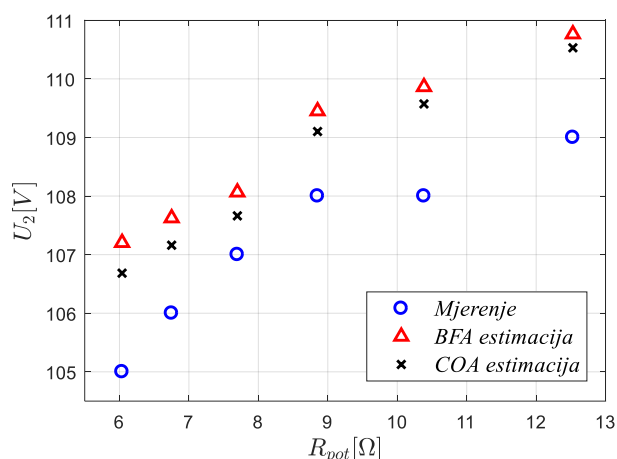
TABELA III. SREDNJA APSOLUTNA GREŠKA

	PH i KS	BFA	COA
I_1 [A]	0.6929	0.6956	0.6871
U_2 [V]	1.6364	1.6592	1.2221
I_2 [A]	0.2013	0.2043	0.1481

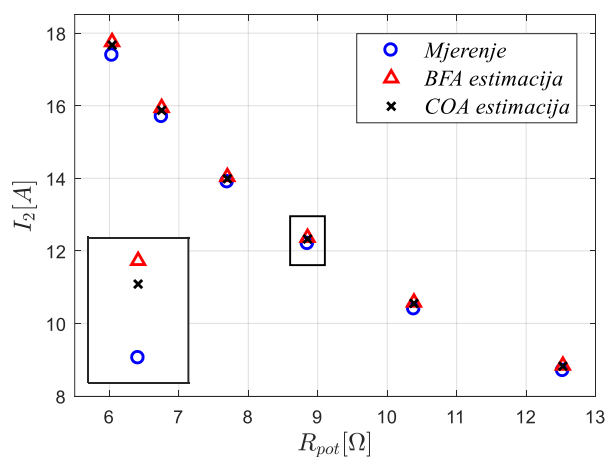
Detaljno poređenje izmjerenih i estimiranih struja i napona, prikazano je u Tabelama IV, V i VI. Iz svega priloženog se vidi da su estimirane struje i naponi, u slučaju upotrebe COA algoritma, najbliže mjerenim vrijednostima. Svi prikazani rezultati potvrđuju primjenjivost COA optimizacije na problem estimacije parametara transformatora.



Slika 3. Struja primara



Slika 4. Napon sekundara



Slika 5. Struja sekundara

TABELA IV. POREĐENJE REZULTATA: STRUJA I_1 [A]

I_1 [A]	PH i KS	Greška PH i KS	BF	Greška BF	COA	Greška COA
4.6000	5.1813	0.5813	5.1831	0.5831	5.1910	0.5910
5.4000	6.0452	0.6452	6.0473	0.6473	6.0500	0.6500
6.3000	6.9355	0.6355	6.9379	0.6379	6.9344	0.6344
7.1000	7.7640	0.6640	7.7669	0.6669	7.7563	0.6563
8.0000	8.7130	0.7130	8.7164	0.7164	8.6971	0.6971
8.7000	9.6181	0.9181	9.6221	0.9221	9.5935	0.8935

TABELA V. POREĐENJE REZULTATA: NAPON U_2 [V]

U_2 [V]	PH i KS	Greška PH i KS	BF	Greška BF	COA	Greška COA
109	110.7513	1.7513	110.7626	1.7626	110.4662	1.4662
108	109.8451	1.8451	109.8614	1.8614	109.5085	1.5085
108	109.4274	1.4274	109.4483	1.4483	109.0383	1.0383
107	108.0369	1.0369	108.0620	1.0620	107.5992	0.5992
106	107.5914	1.5914	107.6209	1.6209	107.0987	1.0987
105	107.1665	2.1665	107.1998	2.1998	106.6217	1.6217

TABELA VI. POREĐENJE REZULTATA: STRUJA I_2 [A]

I_2 [A]	PH i KS	Greška PH i KS	BF	Greška BF	COA	Greška COA
8.7000	8.8398	0.1398	8.8407	0.1407	8.8170	0.1170
10.4000	10.5777	0.1777	10.5792	0.1792	10.5453	0.1453
12.2000	12.3612	0.1612	12.3636	0.1636	12.3173	0.1173
13.9000	14.0347	0.1347	14.0380	0.1380	13.9778	0.0778
15.7000	15.9357	0.2357	15.9401	0.2401	15.8627	0.1627
17.3900	17.7488	0.3588	17.7543	0.3643	17.6586	0.2686

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je analizirana primjena haotičnog optimizacionog algoritma na problem određivanja parametara zamjenske šeme monofaznog transformatora. U optimizacionom procesu je korišćena kriterijumska funkcija koja uvažava struju primara i napon i struju sekundara. Na ovaj način ostvareno je dobro poklapanje estimiranih vrijednosti ovih električnih veličina sa odgovarajućim mjenjenim vrijednostima i time demonstrirana optimizaciona sposobnost samog algoritma. Štaviše, priloženim rezultatima je pokazano da je greška koja se javlja primjenom COA metode manja u odnosu na grešku dobijenu primjenom BF algoritma.

Fokus daljeg istraživanja biće na analizi uticaja upotrebe kriterijumskih funkcija koje, osim odgovarajućih napona i struja, u obzir uzimaju i gubitke aktivne snage. Osim navedenog, u planu je i analiza uticaja varijacije napona napanja na vrijednosti parametara poprečne grane zamjenske šeme.

LITERATURA

- [1] Meier A. Electric Power Systems: A Conceptual Introduction, Wiley-IEEE Press, 2006.
- [2] IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Std C57.12.90 – 2015. J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.
- [3] Bhowmick D, Manna M, Chowdhury SK. Estimation of equivalent circuit parameters of transformer and induction motor using PSO, in Proc. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, Trivandrum, India, pp. 1-6, 14-17 December 2016.
- [4] Bhowmick D, Manna M, Chowdhury SK. Estimation of Equivalent Circuit Parameters of Transformer and Induction Motor from Load Data, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 54, No. 3, pp. 2784-2791, May-June 2018.
- [5] Thilagar SH, Rao GS. Parameter Estimation of Three-Winding Transformer Using Genetic Algorithm, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 15, No. 5, pp. 429-437, 2002.
- [6] Bigdeli M, Rahimpour E. Estimation of simplified transient model parameters using genetic algorithm, 18th Iranian Conference on Electrical Engineering, Isfahan, Iran, pp. 722-726, 11-13 May 2010.
- [7] Yilmaz Z, Oksar M, Basciftci F. Multi-Objective Artificial Bee Colony Algorithm to Estimate Transformer Equivalent Circuit Parameters, Periodicals of Engineering and Natural Sciences, Vol. 5, No. 3, pp. 271-277, November 2017.
- [8] Mossad MI, Mohamed A, Abu-Siada A. Transformer Parameters Estimation From Nameplate Data Using Evolutionary Programming Techniques, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 5, October 2014.
- [9] Illias HA, Mou KJ, Bakar AHA. Estimation of transformer parameters from nameplate data by imperialist competitive and gravitational search algorithms, Swarm and Evolutionary Computation, Vol. 36, pp. 18-26, October 2017.
- [10] Padma S, Subramanian S. Parameter estimation of single phase core type transformer using bacterial foraging algorithm, Engineering, Vol. 2, No. 11, pp. 917-925, 2010.
- [11] Padma S, Subramanian S. Bacterial Foraging Algorithm based Parameter Estimation of Three Winding Transformer, Energy and Power Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 135-143, February 2011.
- [12] Jovanović A, Lazović L, Rubežić V. Radiation pattern synthesis using a chaotic beamforming algorithm, COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 35, No. 5, pp. 1814-1829.
- [13] Rubežić V, Lazović L, Jovanović A. Parameter identification of Jiles-Atherton model using the chaotic optimization method, COMPEL – The

- [14] Liu B, Wang L, Jin YH, Tang F, Huang DX. Improved particle swarm optimization combined with chaos, *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 25, No. 5, pp. 1261–71, 2005.
- [15] Zuo XQ, Fan YS. 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.
- [16] Coelho LS. Tuning of PID controller for automatic regulator voltage system using chaotic optimization search, *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 39, pp. 1504-1514, 2009.
- [17] Yang D, Li G, Cheng G. On the efficiency of chaos optimization algorithms for global optimization, *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 34, No. 4, pp. 1366–1375, 2007.
- [18] Sprott JC, *Chaos and Time-Series Analysis*, Oxford University Press, Oxford, New York, 2003.

ABSTRACT

This paper presents the use of the Chaotic Optimization algorithm (COA) in parameter estimation of single phase transformer's equivalent circuit. In order to determine the unknown circuit parameters, values of primary and secondary current are used, along with the secondary voltage values. Results obtained by using the COA method were compared with the results achieved through the application of the Bacterial Foraging algorithm, as well as those obtained by classical methods based on Open Circuit and Short Circuit tests. It has been shown that COA can accurately identify the parameters of the transformer's equivalent circuit.

APPLICATION OF CHAOTIC OPTIMIZATION ALGORITHM IN TRANSFORMER PARAMETER ESTIMATION

Danilo Mujičić, Martin Čalasan, Vesna Rubežić, Luka
Lazović