



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 14, No. 1, 2023
Research Paper

Estimation of Electrical Parameters of the Induction Machine Steady State Model Using Nameplate Data and Hunger Game Search Algorithm

Ahmad Shirzadi¹, Arash Dehestani Kolagar², Mohammad Reza Alizadeh Pahlavani³

¹M.A student, Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

²Assistant Professor, Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

³Associate Professor, Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Abstract:

In this paper, the Hunger Games Search (HGS) optimization algorithm is used to estimate the electrical parameters of the induction machine steady state model. Induction machine nameplate data is used as input to the proposed algorithm. The performance of the proposed method is confirmed by comparing the output characteristics obtained by estimating the motor parameters including torque, current and power factor in the steady state model of the induction machine with the values provided by the manufacturer. In addition, by evaluating and comparing the results of the proposed method with the results of previous research, it is shown that the proposed algorithm is a very effective and accurate method for the acceptable estimation of induction machine parameters.

Keywords: Hunger Games Search, Parameter estimation, Induction machine, Optimization.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2022.131991.1532>

مقاله پژوهشی

تخمین پارامترهای الکتریکی مدل حالت دائم ماشین القایی، با استفاده از داده‌های پلاک و الگوریتم جستجوی بازی‌های گرسنگی

احمد شیرزادی^۱، آرش دهستانی کلاگر*^۲، محمدرضا علیزاده پهلوانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی مالک اشتر- تهران- ایران

ahmadshirzadi@mut.ac.ir

۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی مالک اشتر- تهران- ایران

a_dehestani@mut.ac.ir

۳- دانشیار، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی مالک اشتر- تهران- ایران

mr_alizadehp@mut.ac.ir

چکیده: در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی بازی‌های گرسنگی (HGS) به منظور تخمین پارامترهای الکتریکی مدل حالت دائم ماشین القایی استفاده می‌شود. داده‌های پلاک یا داده‌های سازنده ماشین القایی، به عنوان ورودی الگوریتم پیشنهادی، استفاده می‌شوند. صحت و کارایی روش پیشنهادی با مقایسه مشخصه‌های خروجی حاصل از تخمین موتور شامل گشتاور، جریان و ضریب توان در مدل حالت دائم ماشین القایی با مقادیر ارائه شده از سازنده به تأیید می‌رسد. همچنین، با ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از تحقیقات پیشین، نشان داده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی، روش بسیار مؤثر و دقیق برای تخمین مطلوب پارامترهای ماشین القایی است.

واژه‌های کلیدی: جستجوی بازی‌های گرسنگی، تخمین پارامتر، موتور القایی، بهینه‌سازی.

۱- مقدمه

و گسترده‌ای درباره IM صورت گرفته که بخشی از این مطالعات، ناظر بر تخمین پارامترهای IM بوده است. تخمین پارامترهای IM امری ضروری برای بررسی عملکرد ماشین القایی و پیش‌بینی رفتار آن است؛ بنابراین، در تمامی روش‌های کنترل سرعت و گشتاور، از روش‌های اسکالر گرفته تا روش کنترل برداری، اطلاع دقیق از پارامترهای IM یک موضوع اساسی است [۲]. به همین سبب، به یک روش تخمین پارامتر کارآمد، دقیق و قابل اعتماد و نیز یک مدار معادل مناسب نیاز است. این مسئله در استانداردهای مطرح جهانی و در پژوهش‌ها و تحقیقات اخیر، بحث و تجزیه و تحلیل شده است [۳-۸].

روش تحت مطالعه در مقاله حاضر، مبتنی بر مدل حالت پایدار ماشین است. در بیشتر مقالات مرتبط با تخمین پارامترهای IM نیز از همین مدل برای تخمین پارامترهای ماشین استفاده شده است [۹-۳۹].

موتورهای القایی (IM)، به‌ویژه از نوع قفس سنجابی به‌طور گسترده‌ای در صنایع گوناگون استفاده می‌شوند. این موتورها دارای مزایای زیادی نسبت به سایر موتورهای الکتریکی هستند؛ از جمله، کم‌بودن هزینه، قابلیت اطمینان بالا، عمر طولانی و تعمیر و نگهداری آسان؛ به همین دلایل، موتورهای القایی سه‌فاز به‌عنوان اصلی‌ترین محرکه‌ها در صنایع مختلف استفاده می‌شوند [۱]. تا کنون مطالعات جامع

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۸

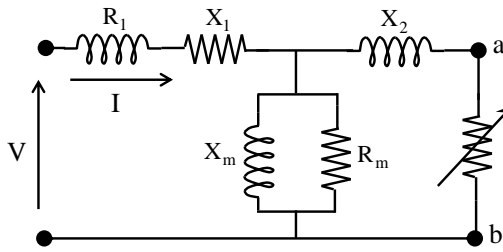
نام نویسنده مسئول: آرش دهستانی کلاگر

نشانی نویسنده مسئول: تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر

پارامتر مبتنی بر داده‌های پلاک یا اطلاعات سازنده، برای ماشین‌های القایی جدید که مجموعه کاملی از داده‌های سازنده را به همراه دارند، بسیار مناسب است. تخمین پارامترهای IM، صرف‌نظر از اینکه روش تخمین از داده‌های پلاک یا اطلاعات سازنده استفاده کند، به حل تعداد زیادی از معادلات پیچیده نیاز دارد. این معادلات را می‌توان به صورت تحلیلی [۹، ۴۰]، تکرار [۱۰، ۱۱] یا با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی [۱۲-۳۳] حل کرد. روش‌های تحلیلی، به معرفی مفروضات مناسب یا استفاده از برخی فرمول‌های تقریبی نیاز دارند؛ بنابراین، در این روش‌ها پارامترها با دقت کم و خیلی سریع محاسبه می‌شوند. تکنیک‌های تکرار برای تخمین پارامترهای IM، براساس استفاده از الگوریتم‌های عددی همچون نیوتن-رافسون یا الگوریتم لوبنبرگ-مارکوارت (LMA^۲) به حل معادلات می‌پردازند [۱۰، ۱۱، ۴۰]. برای اجرای این الگوریتم‌ها، فرضیات خاص یا داده‌های شناخته‌شده اضافی مورد نیاز است. علاوه بر این، برای اجرای صحیح آن، لازم است در مرحله آغازین الگوریتم، مقادیر شروع و معیارهای تکرار مناسب به طور دقیق تعریف شوند. همچنین، مقالات بسیاری تخمین پارامترهای IM را براساس استفاده از تکنیک‌های مختلف بهینه‌سازی (معمولاً فرا ابتکاری) انجام داده‌اند [۱۲-۳۳، ۳۸]. استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی نیازمند تعریف تابع هدف و معیارهای از پیش تعیین شده (قیود بهینه‌سازی) است. پارامترهای IM را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلفی چون الگوریتم ژنتیک (GA^۳) [۱۲]، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^۴) [۱۲، ۱۸]، الگوریتم جهش قورباغه بهم‌ریخته (SFLA^۵) [۱۲، ۱۸]، الگوریتم اصلاح‌شده و تغییر شکل داده شده جهش قورباغه (MSFLA^۶) [۱۲] و الگوریتم ترکیبی چرخه آب با نرخ تبرید-تبخیر (SA-ERWCA^۷) [۴۱] تخمین زد. علاوه بر تکنیک‌ها و روش‌های ذکرشده فوق، در تحقیقات پیشین از شبکه‌های عصبی نیز برای تخمین پارامترهای IM استفاده شده است [۳۹]. در این رویکرد، آموزش شبکه عصبی به داده‌های زیاد و پردازنده پرسرعت نیاز دارد. در مقاله حاضر، برای تخمین پارامترهای IM و حل معادلات مدل حالت دائم ماشین از الگوریتم بهینه‌سازی، با عنوان (HGS^۸)

IM را به طور کلی، عملکرد روش‌های مدل حالت پایدار تخمین پارامتر، برپایه داده‌های سازنده یا اطلاعات درج‌شده بر پلاک موتور است [۱۱، ۱۸، ۲۴، ۳۵-۳۸]. روش‌های استاندارد تست IM نیز در استانداردهای معتبر ارائه شده‌اند [۳-۶]. دو مورد از معروف‌ترین این استانداردها عبارت‌اند از IEEE 112 و IEC 60034-28؛ در استاندارد IEEE 112، چهار روش مختلف برای تخمین پارامترهای IM ارائه شده است [۳]. برخی از روش‌های توصیه‌شده در این استاندارد از داده‌های آزمایش بدون بار و روتور قفل شده استفاده می‌کنند. به علاوه، استاندارد IEC 60034-28 نیز برای تخمین پارامترهای IM روش‌هایی را پیشنهاد داده است. در این استاندارد، عناصر مدار معادل IM، تعریف و نیز روش‌هایی با استفاده از آزمون برای تخمین پارامترهای مدار معادل یک فاز IM معرفی شده‌اند [۴]. همچنین، این استاندارد آزمون منحنی بار را روش جایگزین برای آزمون‌های چرخش معکوس و روتور قفل پیشنهاد داده است؛ بنابراین، استفاده از استانداردهای IEEE و IEC برای تعیین پارامترهای IM، به لحاظ تکیه بر انجام آزمایش‌های میدانی، چندان آسان نیست؛ در نتیجه، به دلیل دشواری پیاده‌سازی دقیق شرایط و الزامات استاندارد، نتایج حاصل از این استانداردها دارای خطا هستند که به طور خاص در [۵] ذکر شده‌اند. با توجه به پیچیدگی‌های روش‌های آزمایشگاهی، نوع دیگری از روش‌ها معرفی شده‌اند که تکیه بر داده‌های سازنده IM دارند. سازندگان مختلف IM، داده‌های متنوعی را در پلاک موتور ارائه می‌دهند. در بعضی از انواع ماشین‌ها، پلاک صرفاً اطلاعات اساسی مانند ولتاژ، توان و سرعت نامی را ارائه می‌دهد؛ در حالی که در برخی از انواع دیگر، پلاک برخی از اطلاعات مربوط به داده‌های گشتاور را نیز در اختیار قرار می‌دهد. علاوه بر این، اطلاعات زیادی مربوط به IM در اسناد فنی (کاتالوگ یا داده‌های سازنده) وجود دارد. در این راستا، روش‌های منتشرشده در مقالات از متغیرهای مختلفی چون گشتاور نامی، حداکثر گشتاور، جریان راه‌اندازی، جریان نامی، حداکثر جریان، قدرت نامی، ضریب توان نامی و موارد دیگر، برای تخمین پارامترهای IM استفاده کرده‌اند [۶، ۱۱، ۱۶، ۱۸]. درخور ذکر است روش‌های تخمین

ضمیمه آورده شده‌اند.



شکل (۱): مدل حالت پایدار IM

۳- تعریف تابع هدف

برای ارزیابی پارامترهای تخمینی، از تابع هدف مشخصی استفاده می‌شود. تابع هدف در مسئله تخمین پارامترهای IM، میزان انحراف بین داده‌های سازنده و داده‌های حاصل از مدل حالت دائم IM را نشان می‌دهد که با پارامترهای تخمین زده شده مقارنه می‌شود. مقدار انحراف ذکر شده به‌عنوان خروجی تابع هدف (OF^a) شناخته می‌شود.

زمانی بین دو الگوریتم مقایسه منطقی حاصل می‌شود که شرایط یکسانی برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی در نظر گرفته شود؛ بنابراین، با توجه به اینکه نتایج روش تخمین پیشنهادی با نتایج مراجع [۴۱، ۱۲] مقایسه شده‌اند، از تابع هدف معرفی شده در این مراجع استفاده شده است؛ بنابراین، تابع هدف در مقاله حاضر به‌صورت (۱) در نظر گرفته می‌شود.

$$OF = \sum_{i=1}^4 (F_i)^2 \quad (1)$$

در عبارت فوق، F_i با استفاده از مجموعه روابط (۲) تا (۵) محاسبه می‌شود:

$$F_1 = \frac{T_{fl,cal} - T_{fl,m}}{T_{fl,m}} \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{T_{st,cal} - T_{st,m}}{T_{st,m}} \quad (3)$$

$$F_3 = \frac{T_{max,cal} - T_{max,m}}{T_{max,m}} \quad (4)$$

$$F_4 = \frac{pf_{fl,cal} - pf_{fl,m}}{pf_{fl,m}} \quad (5)$$

استفاده می‌شود. شایان ذکر است HGS یک الگوریتم قدرتمند است که به‌تازگی معرفی شده و تا کنون در زمینه مسائل تخمین پارامتر مدل‌های فتوولتائیک [۴۲] و نیز پیش بینی شدت ارتعاشات زمینی ناشی از انفجار مین [۴۳]، از این الگوریتم استفاده شده است. در این مقاله برای مدل‌سازی حالت دائم، از مدل IM تأییدشده استاندارد IEEE استفاده شده است. درخور ذکر است در سایر مقالاتی که به موضوع تخمین پارامترهای IM پرداخته‌اند نیز عمدتاً از این مدار معادل استفاده شده است [۶، ۱۲، ۳۱، ۳۴، ۴۱، ۴۴، ۴۵]. توضیحاتی در این خصوص به‌طور مختصر در بخش دوم ارائه شده‌اند. همچنین، روابط مربوط به آن نیز در بخش ضمیمه مقاله آورده شده‌اند. در بخش سوم و چهارم، به ترتیب تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی تعریف شده‌اند. در بخش‌های پنجم و ششم که سهم اصلی مقاله حاضر را به خود اختصاص می‌دهند، روش بهینه‌سازی HGS و نحوه پیاده‌سازی این الگوریتم برای شناسایی پارامترهای IM، به تفصیل تشریح شده است. در نهایت، در بخش هفتم نتایج شبیه‌سازی‌ها و مقایسه الگوریتم پیشنهادی با نتایج حاصل از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، اعم از GA، SA، ERWCA، PSO، MFSLA و SLA ارائه می‌شوند.

۲- مدارهای معادل ماشین القایی

مدار معادل مدل حالت دائم IM در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل R_1, X_1, R_2, X_2 و X_m به ترتیب مقاومت استاتور، مقاومت روتور ارجاع‌شده به سمت استاتور، مقاومت مدل‌کننده تلفات هسته، اندوکتانس ناشی استاتور، اندوکتانس ناشی روتور ارجاع‌شده به طرف استاتور و اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی هستند [۵]؛ بنابراین، به‌طور کلی، این مدار دارای شش پارامتر مختلف است؛ با این حال، در بسیاری از مقالات مرتبط با تخمین پارامتر ماشین القایی، مقاومت متناظر با تلفات هسته نادیده گرفته شده است [۱۶، ۲۴، ۴۱، ۴۴، ۴۶]؛ از این رو، در مدل‌سازی‌های موجود در مقاله حاضر نیز از این مقاومت برای ساده‌سازی، صرف‌نظر شده است. همچنین، معادلات مربوط به مدل مذکور نیز در بخش

رفتار مشارکتی حیوانات در طبیعت به منظور جستجوی غذا در زمان گرسنگی بوده است. احساس گرسنگی یکی از مهم‌ترین انگیزه‌ها برای اخذ تصمیمات و انجام اقدامات در زندگی حیوانات است. با وجود طیف گسترده‌ای از محرک‌ها و تقاضاهای رقابتی که همواره و به طور یقین کیفیت زندگی حیوانات را تحت تأثیر قرار می‌دهد، آنها باید هنگام مواجهه با کمبود کالری، منابع غذایی را انتخاب و تعقیب کنند. طبق آزمایش‌های انجام‌شده، گرسنگی می‌تواند از احساسات دیگر مانند تشنگی، عصبی‌بودن، ترس از شکارچیان و نیازهای اجتماعی پیشی بگیرد [۴۸]. در این راستا، عصب‌شناسان کشف کردند گرسنگی احتمالاً در رأس سلسله‌مراتب احساسات قرار دارد. زندگی اجتماعی به حیوانات کمک می‌کند تا با اجتناب از شکارچیان، منابع غذایی خود را پیدا کنند. این امر شانس زنده‌ماندن آنها را افزایش می‌دهد. این تکامل طبیعت است که به موجب آن، حیوانات سالم می‌توانند منابع غذایی خود را پیدا کنند و شانس بیشتری برای زنده‌ماندن نسبت به حیوانات ضعیف‌تر داشته باشند. این واقعیت می‌تواند به‌عنوان بازی گرسنگی در طبیعت مطرح شود. هر تصمیم اشتباه ممکن است نتیجه بازی را تغییر دهد و به مرگ یک حیوان یا حتی از بین رفتن کامل یک گونه منجر شود؛ از این رو، هنگامی که منابع غذایی محدود است، یک بازی منطقی بین حیوانات گرسنه برای جستجو و یافتن منبع غذا و پیروزی در این اوضاع وجود خواهد داشت. در واقع، این بازی براساس تصمیمات منطقی و حرکات گونه‌ها بنا شده است.

۶- مدل‌سازی ریاضی HGS

مدل ریاضی الگوریتم HGS مطابق با فعالیت‌های ناشی از گرسنگی است. در اینجا سعی شده است مدل ارائه‌شده تا حد امکان، ساده و براساس تخمین پارامترهای IM پایه‌گذاری شود.

۶-۱- یافتن غذا

حیوانات اجتماعی غالباً در هنگام جستجوی غذا با یکدیگر همکاری می‌کنند؛ اما این احتمال وجود دارد که تعداد کمی از اعضا در این همکاری مشارکت نکنند.

در روابط فوق، T_{\max} ، T_{st} ، T_{fl} و pf_{fl} به ترتیب حداکثر گشتاور، گشتاور راه‌اندازی، گشتاور بارکامل و ضریب قدرت بارکامل هستند. باید توجه داشت در تمامی معادلات تعریف‌شده در این بخش، اندیس زیرنویس "cal" معرف مقدار محاسبه‌شده بوده و اندیس زیرنویس "m" نیز نشان‌دهنده داده‌های سازنده است. همچنین، محاسبات مربوط به اندیس زیرنویس "cal" با استفاده از روابط آورده‌شده در بخش ضمیمه انجام شده‌اند.

۴- قیود مسئله بهینه‌سازی

در بسیاری از مقالات، برای تخمین پارامترهای IM، از روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری مقید استفاده شده است [۱۲-۳۸]. مسائل بهینه‌سازی مقید در کاربردهایی استفاده می‌شوند که در آنها قیدهای صریحی روی متغیرهای مسئله لحاظ شده باشد. قیدهای تعریف‌شده می‌توانند کران‌های ساده یا دستگاههایی از معادلات و نامعادلات باشند که روابط میان متغیرهای مسئله را مدل می‌کنند. این مقاله، قیودی را برای اندوکتانس‌های نشتی استاتور و روتور و دیگر عناصر مدار معادل IM لحاظ کرده‌اند که عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_2 \\ R_1, R_2, X_1, X_2, X_m &> 0 \end{aligned} \quad (6)$$

مبنای این فرض ریشه در استاندارد IEEE 112 دارد؛ البته در این استاندارد، این فرض صرفاً درخصوص IM با کلاس طراحی A و D، طبق استاندارد طراحی NEMA MG-1، برقرار است. رابطه بین راکتانس نشتی استاتور و روتور برای کلاس طراحی B به صورت $X_1 = 0.67 X_2$ بوده و برای کلاس طراحی C نیز به شکل $X_1 = 0.43 X_2$ است [۳]؛ بنابراین، بخشی از قیود با توجه به کلاس طراحی IM تعیین می‌شوند.

۵- الگوریتم جستجوی بازی‌های گرسنگی

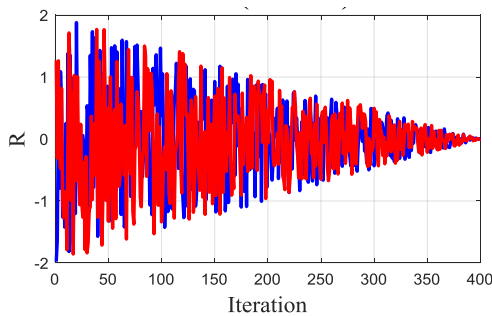
جمعی از پژوهشگران، الگوریتم HGS را در سال ۲۰۲۱ معرفی کردند [۴۷]. الهام‌بخش اصلی این الگوریتم

یافتن غذا را متوقف می‌کند، این امر با متغیر \vec{R} مدل شده است؛ به این صورت که این متغیر به تدریج به مقدار صفر کاهش می‌یابد. مقدار این متغیر در محدوده $[-a, a]$ است و به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{R} = a \times (2 \times \text{rand} - 1) \quad (12)$$

$$a = 2 \times \left(1 - \frac{t}{\text{MaxIter}} \right) \quad (13)$$

که در آن، عبارت rand یک عدد تصادفی در محدوده $[0, 1]$ بوده و عبارت MaxIter نیز نشان‌دهنده بیشترین تعداد تکرار است. شکل (۲) کاهش مقدار \vec{R} و ذات تصادفی بودن این پارامتر را در طول فرآیند الگوریتم، به خوبی نشان می‌دهد.



شکل (۲): رفتار متغیر R در طول دوبار اجرا و ۴۰۰ تکرار

یافتن غذا در این الگوریتم به صورت گروهی انجام می‌شود؛ در نتیجه، به منظور اینکه دیگر اعضای جمعیت از رسیدن بهترین هم‌تا به محل غذا مطلع شوند، بهترین عضو جمعیت با اعمال ضریب گرسنگی، به صورت عبارت $\vec{W}_1 \cdot \vec{X}_b$ ، در معادله جمع یا تفریق می‌شود. در ادامه بعد از یافتن غذا، دوباره با توجه به مکان یافت شده، جستجو برای یافتن غذای جدید ادامه خواهد داشت؛ تا زمانی که شرط توقف الگوریتم محقق شود. قوانین موجود در معادلات (۷) تا (۹) به اعضا این امکان را می‌دهد که مکان‌های ممکن در نزدیکی راه‌حل بهینه و مکان‌های بسیار دور از راه‌حل بهینه را جستجو کنند؛ بنابراین، الگوریتم حاضر، جستجوی تمامی مکان‌های داخل مرزهای فضای راه‌حل را تضمین می‌کند. براساس قانون موجود معادلات (۷) تا (۹)، روند و منطق HGS برای جستجوی فضاها در شکل (۳) نشان داده شده است.

دستورالعمل‌های این بازی با معادلات (۷) تا (۹) نشان داده شده است. این روابط، معادلات محوری الگوریتم HGS برای ارتباطات فردی و رفتار جستجوی مشارکتی هستند.

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}(t) \cdot (1 + \text{randn}(1)), \quad r_1 < 1 \quad (7)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{W}_1 \cdot \vec{X}_b + \vec{R} \cdot \vec{W}_2 \cdot |\vec{X}_b - \vec{X}(t)|, r_1 > 1, r_2 > E \quad (8)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{W}_1 \cdot \vec{X}_b - \vec{R} \cdot \vec{W}_2 \cdot |\vec{X}_b - \vec{X}(t)|, r_1 > 1, r_2 < E \quad (9)$$

در روابط فوق، r_1 و r_2 به ترتیب اعداد تصادفی در محدوده $[0, 1]$ بوده‌اند و $\text{randn}(1)$ نیز بیان‌کننده عدد تصادفی با توزیع نرمال‌اند. همچنین، متغیر t نشان‌دهنده تکرار فعلی است، \vec{W}_1 و \vec{W}_2 وزن گرسنگی را نشان می‌دهند. به علاوه، \vec{X}_b بیان‌کننده بهترین مقدار پارامترهای تخمین زده شده است و $\vec{X}(t)$ مقدار پارامترهایی را نشان می‌دهد که قرار است برای هر عضو از جمعیت تخمین زده شود. متغیر E نیز برای بهبود الگوریتم طراحی شده است و در بخش بعدی با توجه به میزان تأثیر این پارامتر بر روش پیشنهادی، مقدار آن تعیین می‌شود. متغیر E نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E = \text{sech}(|OF - BF|) \quad (10)$$

که در آن OF مقدار تابع هدف پارامترهای تخمین زده شده را نشان می‌دهد و با رابطه (۱) محاسبه می‌شود و BF نیز معرف بهترین مقدار تابع هدف است. به علاوه، Sech نیز یک تابع هذلولی است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Sech}(x) = \frac{2}{e^x + e^{-x}} \quad (11)$$

همچنین در معادله (۷)، عبارت $\vec{X}(t) \cdot (1 + \text{randn}(1))$ نشان می‌دهد چگونه یک عضو به صورت تصادفی تلاش در یافتن غذا دارد. عبارت $|\vec{X}_b - \vec{X}(t)|$ نیز مدل دامنه فعالیت اعضا در تکرار فعلی را نشان می‌دهد که این عبارت در \vec{W}_2 ، وزن گرسنگی، ضرب شده است تا وزن گرسنگی بر دامنه فعالیت تأثیر بگذارد. با توجه به اینکه یک عضو وقتی گرسنه نیست، جستجو برای

متغیرهای r_3 ، r_4 و r_5 نیز اعدادی تصادفی در بازه $[0,1]$

هستند. رابطه مبین $hungry(i)$ نیز به صورت زیر است:

$$hungry(i) = \begin{cases} 0, & AllFitness(i) = BF \\ hungry(i) + H, & AllFitness(i) \neq BF \end{cases} \quad (17)$$

که در آن، $AllFitness(i)$ مقدار تابع هدف را در

تکرار فعلی ذخیره می‌کند و متغیر H نیز به شرح زیر حاصل می‌شود:

$$TH = \frac{F(i) - BF}{WF - BF} \times r_6 \times 2 \times (UB - LB) \quad (18)$$

$$H = \begin{cases} LH \times (1 + r), & TH < LH \\ TH, & TH \geq LH \end{cases} \quad (93)$$

در عبارت فوق، r_6 عددی تصادفی در محدوده $[0,1]$

است و $F(i)$ نیز مقدار تابع هدف هر عضو را نشان

می‌دهد. همچنین، WF بهترین مقدار تابع هدف است که

الگوریتم به دست آورده است. به علاوه، UB و LB

به ترتیب کران بالا و پایین فضای جستجو را مشخص

می‌کنند. پارامتر LH نیز به منظور بهبود عملکرد الگوریتم

طراحی شده است و در بخش بعدی با توجه به میزان تأثیر

این پارامتر در روش پیشنهادی، مقدار آن تعیین خواهد شد.

همچنین، در معادله (۱۸)، عبارت $F(i) - BF$ نشان‌دهنده

مقدار غذایی است که عضو گرسنه نیاز دارد و در هر تکرار،

میزان گرسنگی عضو تغییر خواهد کرد. به علاوه، عبارت

$WF - BF$ مقدار ظرفیت جمع‌آوری غذا توسط یک عضو

در تکرار جاری را نشان می‌دهد؛ از این رو، عبارت

$\frac{F(i) - BF}{WF - BF}$ مشخص‌کننده نسبت گرسنگی است. همچنین،

با استفاده از عبارت $r_6 \times 2$ ، تأثیرات مثبت یا منفی عوامل محیطی بر میزان گرسنگی مدل‌سازی می‌شود.

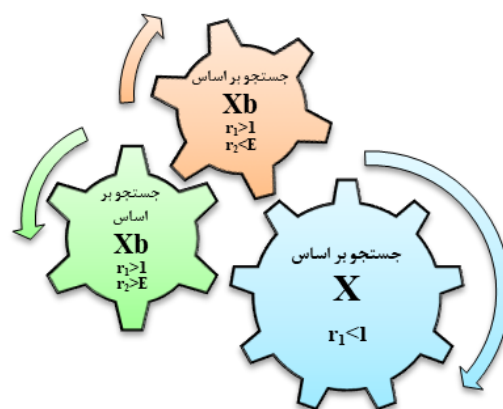
۶-۴ - شبه-کد و فلوجارت الگوریتم HGS

شبه-کد مربوط به الگوریتم HGS در ادامه آورده شده

است. همچنین، برای جمع‌بندی، فلوجارت مربوط به کلیه

مراحل فرآیند تخمین پارامترهای IM، با استفاده از الگوریتم

HGS، در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۳): منطق HGS در طول بهینه‌سازی

با توجه به شکل (۳)، جهت‌های جستجو به دو دسته

تقسیم می‌شوند؛ دسته نخست، جستجو بر اساس \bar{X} است

که نخستین دستورالعمل بازی، عضوی وابسته به خود را

شبیه‌سازی می‌کند که روحیه کار تیمی ندارد و در آن

دخالتی نمی‌کند. در این مرحله، اعضای جمعیت درگیر

همکاری نیستند و فقط عضو گرسنه به دنبال غذا خواهد

بود. دسته دوم نیز جستجو بر اساس X_b است که

دستورالعمل دوم بازی با متغیرهای نقش گرسنگی (R ،

W_1 و W_2) ارتباط نزدیک دارد. در این حالت، با اصلاح

این سه عامل، موقعیت هر عضو تکامل می‌یابد. این مرحله

برای شبیه‌سازی جستجوی غذا، از همکاری چندین قسمت

۶-۲ - نقش گرسنگی

ویژگی‌های ضریب گرسنگی اعضا در جستجو از نظر

ریاضی با \bar{W}_1 و \bar{W}_2 تبیین می‌شوند که عبارت‌اند از:

$$\bar{W}_1(i) = hungry(i) \cdot \frac{N}{SHungry}, \quad r_3 < 1 \quad (14)$$

$$\bar{W}_1(i) = 1, \quad r_3 > 1 \quad (15)$$

$$\bar{W}_2(i) = 2r_5(1 - \exp(-|hungry(i) - SHungry|)) \quad (16)$$

که در آن، عبارت $hungry$ بیان‌کننده میزان گرسنگی

هر فرد بوده، متغیر N معرف تعداد اعضای جمعیت و

$SHungry$ نیز نشان‌دهنده مجموع احساسات گرسنگی

همه افراد، یعنی مجموع کلیه ($hungry$)‌هاست که در شروع

الگوریتم مقدار این متغیر صفر در نظر گرفته می‌شود.

شبه کد HGS

تنظیم ابتدایی پارامترهای Max_{iter} , LH , l , D , $SHungry$, N تغییردهی موقعیت اعضا: X_i ($i = 1, 2, \dots, N$)**While** ($t \leq Max_iter$)

محاسبه گشتاورهای راهاندازی، ماکزیمم، بارکامل و ضریب توان (با کمک روابط بخش ضمیمه)

محاسبه تابع هدف (۱)

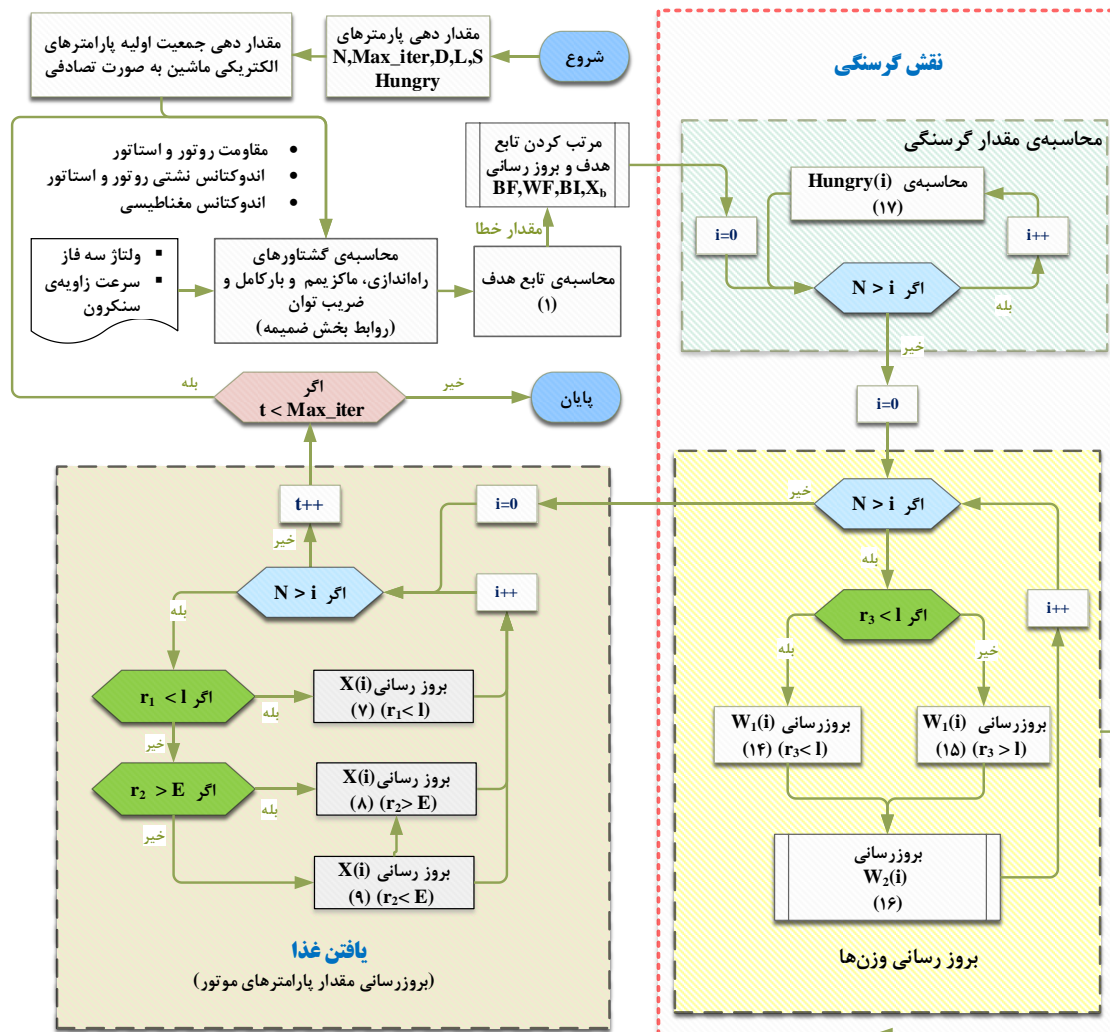
بهروزرسانی BF , WF , X_b , BI

نقش گرسنگی

For روی هر یک از اعضامحاسبه $Hungry(i)$ با رابطه (۱۶)**End For****For** روی هر یک از اعضامحاسبه W_2 با رابطه (۱۶)**if** ($r_3 < l$) **then**محاسبه W_1 با رابطه (۱۶)**if** ($r_3 > l$) **then**محاسبه W_1 با رابطه (۱۶)**End For**

یافتن غذا

For روی هر یک از اعضامحاسبه E و R به ترتیب با روابط (۱۰) و (۱۲)**if** ($r_1 < l$) **then**بهروزرسانی مقادیر پارامترهای IM با رابطه (۷)**if** ($r_1 > l$ and $r_2 > E$) **then**بهروزرسانی مقادیر پارامترهای IM با رابطه (۸)**if** ($r_1 > l$ and $r_2 < E$) **then**بهروزرسانی مقادیر پارامترهای IM با رابطه (۹)**End For** $t = t + 1$ **End While****Return** BF , X_b



شکل (۴): فلوجارت تخمین پارامتر ماشین القایی با استفاده از الگوریتم جستجوی بازی‌های گرسنگی

همچنین، پیچیدگی محاسباتی وزن و به‌روزرسانی پارامترهای IM از مرتبه $O(N \times D)$ هستند. با استفاده از جمع پیچیدگی هر قسمت، پیچیدگی کل الگوریتم عبارت است از:

$$O(N(1+T \times N \times (2 + \log N + 2 \times D))) \quad (20)$$

فضای مسئله عبارت است از تمامی حالت‌های ممکن پارامترهای IM با فرض استقلال پیشامد حالات پارامترها نسبت به یکدیگر؛ البته با توجه به اینکه قیود از صفر تا بی‌نهایت در نظر گرفته شده‌اند، فضای این مسئله بی‌نهایت حالت دارد که در این مقاله شرط توقف، ۵۰ هزار فراخوانی از تابع هدف است؛ یعنی فقط با ۵۰ هزار حالت از بی‌نهایت

۶-۳- پیچیدگی محاسباتی HGS و فضای مسئله

درخصوص میزان پیچیدگی محاسباتی الگوریتم HGS، درخور ذکر است این پیچیدگی وابسته به سه فرآیند به‌روزرسانی گرسنگی، مرتب‌سازی و به‌روزرسانی وزن می‌شود. در این راستا، تعداد اعضای جمعیت برابر با N و بعد مسئله با D نشان داده می‌شود. همچنین، T نیز نشان‌دهنده حداکثر تعداد تکرارهاست. در طی مراحل الگوریتم، پیچیدگی محاسباتی تابع هدف و به‌روزرسانی گرسنگی هر دو از مرتبه $O(N)$ بوده و پیچیدگی محاسباتی مرتب‌سازی از مرتبه $O(N \log N)$ است.

نتایج این مقاله در دو بخش بررسی همگرایی عملکرد الگوریتم HGS و مقایسه نتایج روش پیشنهادی با سایر روش‌ها دسته‌بندی می‌شود. در بخش اول، همگرایی و تأثیر پارامترهای تنظیم الگوریتم HGS بررسی می‌شود و در بخش دوم، مقادیر تخمین زده شده با نتایج سایر مقالات مقایسه می‌شوند.

۷-۱- نتایج همگرایی الگوریتم HGS

برای اینکه الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهترین عملکرد را داشته باشند، لازم است پارامترهای آنها به‌درستی تنظیم شوند. بدین منظور، ۳۰ شبیه‌سازی مستقل برای تنظیم پارامترهای الگوریتم HGS انجام شده است که در ادامه نتایج میانگین و انحراف معیار تابع هدف برای هر پارامتر قابل تنظیم این الگوریتم آورده شده‌اند. در ادامه، برای بررسی عملکرد پارامترهای تنظیم الگوریتم، دو مسئله بررسی شده است. مسئله نخست، عملکرد کلی الگوریتم در تمامی ۳۰ شبیه‌سازی است که به کمک میانگین تابع هدف مشخص می‌شود و مسئله دوم، برقراری یکنواختی در پاسخ است؛ یعنی در تمام شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، تابع هدف نتایج تقریباً یکسانی داشته باشد؛ برای مثال، اگر مقدار انحراف معیار صفر باشد، نتایج تابع هدف مقدار یکسانی دارند که برابر با مقدار میانگین است و پراکندگی در پاسخ نهایی الگوریتم بهینه‌سازی (نتایج تابع هدف) وجود ندارد. تأثیر پارامتر I بر میانگین و انحراف معیار و مقایسه مقادیر مختلف این پارامتر، در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به نتایج این جدول، مشخص است بهترین مقدار I برای این مسئله ۰/۰۸ است. همچنین شایان ذکر است این پارامتر تأثیر چشمگیری بر عملکرد الگوریتم دارد.

این آزمایش برای مقادیر مختلف پارامتر LH نیز تکرار شده است. در این خصوص، تأثیر پارامتر LH بر میانگین تابع هدف و انحراف معیار و مقایسه مقادیر مختلف این پارامتر، در جدول (۴) آورده شده است.

حالت ممکن در مسئله، الگوریتم HGS توانست پارامترهای IM را تخمین بزند.

۷- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی و مطالعات بر کامپیوتر با مشخصات ویندوز ده، شصت و چهار بیت، پردازنده اینتل i7 2/2GHz، رم دوازده گیگابایت DDR3 و با استفاده از نرم‌افزار متلب ۲۰۲۱، نسخه آلفا، انجام گرفته است. به‌علاوه، مقادیر پارامترهای موتور تحت مطالعه، از مرجع [۴۱] اخذ شده‌اند که در جدول (۱) اطلاعات مربوط به پارامترهای موتور آورده شده‌اند.

جدول (۱): مشخصات موتور مورد مطالعه

مقادیر	پارامترها	مقادیر	پارامترها
Nm۲۶۰	T_{st}	HP۴۰	P_n
Nm۱۹۰	T_{fl}	V۴۰۰	V
Nm۳۷۰	T_{max}	Hz۵۰	F
۰/۸	pf_{fl}	۲	P
۰/۰۹	s_{fl}		

مشخصات مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی HGS، عبارت از جمعیت با تعداد ۲۰۰ عضو و شرط توقف برابر با ۵۰ هزار فراخوانی از تابع هدف است. همچنین، ۳۰ مرتبه شبیه‌سازی برای تخمین پارامترها به‌طور مستقل انجام شده که در تمامی این شبیه‌سازی‌ها همگرایی در نتایج وجود داشته است. در نهایت، بهترین نتیجه حاصل شده، در این مقاله ارائه شده است. همچنین، سایر مقادیر مربوط به الگوریتم در شکل (۲) آورده شده‌اند.

جدول (۲): مقادیر اولیه تنظیم‌شده برای الگوریتم HGS

مقادیر	پارامترها	مقادیر	پارامترها
۰/۱	1	۲۰۰	N
۱۰۰۰	LH	۱	D
SHungry			

جدول (۳): تأثیر پارامتر I بر میانگین و انحراف معیار تابع هدف

I	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵
OF انحراف معیار	$7/77 \times 10^{-1}$	$6/72 \times 10^{-5}$	$4/99 \times 10^{-10}$	$6/13 \times 10^{-13}$	$1/43 \times 10^{-3}$	$1/92 \times 10^{-3}$	$1/62 \times 10^{-3}$	$1/18 \times 10^{-3}$	$1/34 \times 10^{-3}$
رتبه	۹	۳	۳	۱	۶	۸	۷	۴	۵
OF میانگین	$2/00 \times 10^{-1}$	$1/73 \times 10^{-5}$	$5/94 \times 10^{-10}$	$1/10 \times 10^{-12}$	$6/92 \times 10^{-4}$	$1/31 \times 10^{-3}$	$1/85 \times 10^{-3}$	$1/47 \times 10^{-3}$	$1/92 \times 10^{-3}$
رتبه	۹	۳	۲	۱	۴	۵	۷	۶	۸

جدول (۴): تأثیر پارامتر LH بر میانگین و انحراف معیار تابع هدف

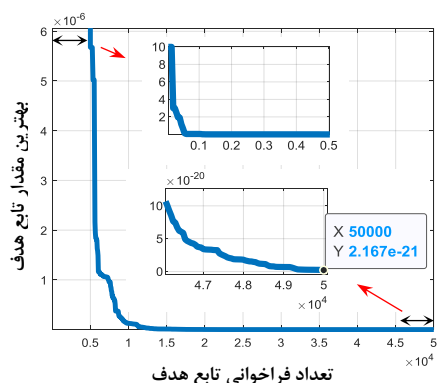
LH	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰۰
OF انحراف معیار	$1/57 \times 10^{-10}$	$6/53 \times 10^{-13}$	$2/18 \times 10^{-10}$
رتبه	۲	۱	۳
OF میانگین	$1/79 \times 10^{-11}$	$1/10 \times 10^{-12}$	$1/52 \times 10^{-11}$
رتبه	۳	۱	۲

اتخاذ و به‌کارگیری روش‌ها و سیاست‌هایی در مصرف انرژی الکتریکی است. ساختمان‌های مسکونی بخش مهمی از مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی به‌شمار می‌آیند. ورود تکنولوژی سیستم مدیریت هوشمند به ساختمان‌های مسکونی، تا حدودی مصرف انرژی الکتریکی را بهینه کرده است.

۷-۲- مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌ها

نتایج تخمین پارامترهای موتور تحت مطالعه با روش‌های بهینه‌سازی سایر مقالات و الگوریتم بهینه‌سازی HGS در شکل (۴) آورده شده‌اند. همچنین، برای نشان‌دادن برتری الگوریتم HGS نسبت به سایر روش‌ها، مقایسه‌ای بین مقادیر گشتاور و ضریب توان داده شده از شرکت سازنده و مقادیر گشتاور و ضریب توان حاصل از پارامترهای تخمین زده شده، در جدول ۵ آورده شده است. نکته درخور توجه در این جدول، خطای بسیار اندک روش بهینه‌سازی HGS نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی است.

توجه به نتایج این جدول، مشخص است بهترین مقدار LH برای این مسئله ۱۰۰۰ است. مشخصه همگرایی الگوریتم HGS در شکل (۵) نشان داده شده است. به‌وضوح، در تمامی مراحل، این الگوریتم سعی بر بهبود پارامترهای تخمینی IM و کاهش مقدار تابع هدف دارد. نکته قابل ملاحظه، همگرایی سریع این الگوریتم در مراحل ابتدایی است.



شکل (۵) مشخصه همگرایی الگوریتم HGS

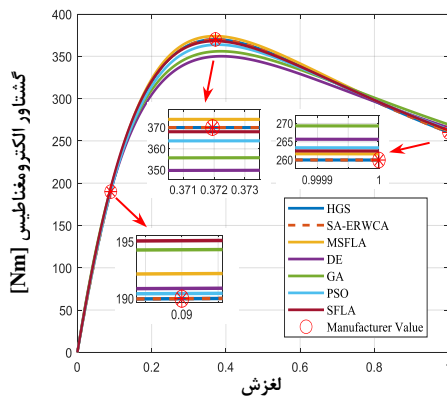
منظور از بهینه‌سازی مصرف انرژی انتخاب گوها،

جدول (۴): نتایج تخمین پارامترهای موتور تحت مطالعه با الگوریتم بهینه‌سازی HGS و سایر روش‌های بهینه‌سازی در مقالات

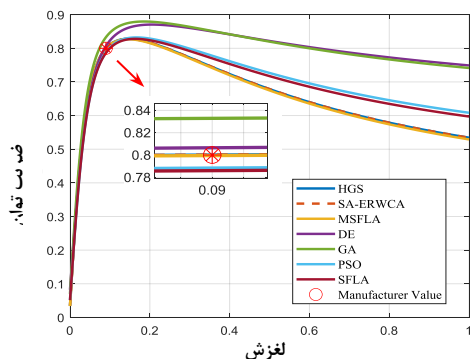
پارامترهای IM	HGS	SA_ERWCA [41]	MSFLA [12]	DE [12]	GA [12]	PSO [12]	SFLA [12]
R_1	۰/۲۷۸۲۳۰۱۵	۰/۲۷۸۲۱	۰/۲۷۰۷۱۹	۰/۴۹۹۳	۰/۴۸۷۵	۰/۳۵۵۵	۰/۳۴۳۷
X_1	۰/۴۷۹۴۷۶۲۲۶	۰/۲۰۱۱۱	۰/۴۷۷۳۱۱	۰/۳۵۱۰	۰/۳۵۵۶	۰/۴۳۵۳	۰/۴۳۴۵
R_2	۰/۳۶۱۰۲۰۵۶۶	۰/۳۸۷۹۵	۰/۳۵۷۲۲۴	۰/۳۲۶۴	۰/۳۲۶۴	۰/۳۴۵۵	۰/۳۳۶۰
X_2	۰/۴۷۹۴۷۶۲۲۶	۰/۸۰۳۸۰	۰/۴۷۷۳۱۱	۰/۳۵۱۰	۰/۳۵۵۶	۰/۴۳۵۳	۰/۴۳۴۵
X_m	۷/۵۹۹۸۲۹۰۷۹	۷/۸۷۸۲۰	۷/۴۳۱۹۴	۵/۶۹۶۷	۶/۶۰۷۲	۶/۴۲۲۳	۶/۲۶۲۹

جدول (۵) نتایج گشتاور، ضریب توان و تابع هدف برای موتور تحت مطالعه با الگوریتم بهینه‌سازی HGS و سایر روش‌های بهینه‌سازی در مقالات

مقادیر سازنده IM		HGS		SA_ERWCA [41]		MSFLA [12]	
عنوان	مقدار	مقدار	خطا	مقدار	خطا	مقدار	خطا
گشتاور بار کامل	۱۹۰	۱۹۰	$6/80 \times 10^{-9}$	۱۹۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۱	۱۹۲/۱۹۶۸	۲/۱۹۶۸
گشتاور راه‌اندازی	۲۶۰	۲۶۰	$7/54 \times 10^{-9}$	۲۶۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۲۲	۲۶۱/۶۸۷۳	۱/۶۸۷۳
حداکثر گشتاور	۳۷۰	۳۷۰	$3/63 \times 10^{-11}$	۳۷۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۸	۳۷۳/۸۵۱۶	۳/۸۵۱۶
ضریب توان بار کامل	۰/۸	۰/۸	$5/42 \times 10^{-12}$	۰/۸۰۰۰	$1/00 \times 10^{-6}$	۰/۷۹۹۵	۰/۰۰۰۵
تابع هدف		$2/1669 \times 10^{-31}$		$1/6128 \times 10^{-10}$		$2/8451 \times 10^{-4}$	
DE [12]		GA [12]		PSO [12]		SFLA [12]	
مقدار	خطا	مقدار	خطا	مقدار	خطا	مقدار	خطا
۱۹۰/۹۰۲۵	۰/۹۰۲۵	۱۹۴/۳۰۸۴	۴/۳۰۸۴	۱۹۴/۳۰۸۴	۴/۳۰۸۴	۱۹۰/۴۵۲۷	۲/۱۹۶۸
۲۶۸/۶۶۹۷	۵/۶۶۹۷	۲۶۹/۳۲۴۳	۹/۳۲۴۳	۲۶۹/۳۲۴۳	۹/۳۲۴۳	۲۶۳/۳۳۷۴	۱/۶۸۷۳
۳۵۰/۰۷۸۴	۱۹/۹۲۱۶	۳۵۵/۹۵۴۵	۱۴/۰۴۵۵	۳۵۵/۹۵۴۵	۱۴/۰۴۵۵	۳۶۳/۷۸۶۵	۳/۸۵۱۶
۰/۸۰۶۵	۰/۰۰۶۵	۰/۸۳۲۹	۰/۰۳۲۹	۰/۸۳۲۹	۰/۰۳۲۹	۰/۷۸۸۳	۰/۰۰۰۵
$3/4635 \times 10^{-3}$		$4/9292 \times 10^{-3}$		$6/6457 \times 10^{-4}$		$1/1457 \times 10^{-3}$	



شکل (۶) منحنی‌های گشتاور بر لغزش



شکل (۷) منحنی‌های ضریب توان بر لغزش

سرانجام، شکل (۶) و شکل (۷) به ترتیب منحنی‌های گشتاور و ضریب توان حاصل از معادلات مدل حالت دائم موتور و پارامترهای تخمین زده شده با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی SA_ERWCA, GA, PSO, MSFLA و HGS را برای موتور مطالعه‌شده نشان می‌دهند.

گفتنی است مقادیر تخمین زده شده با الگوریتم پیشنهادی، به صورت مطلوب با تمام نقاط گشتاور داده شده از شرکت سازنده، اعم از گشتاور راه‌اندازی، گشتاور ماکزیمم و گشتاور بارکامل انطباق دارد. به علاوه، مقادیر تخمین زده شده با الگوریتم پیشنهادی، توانست به نحو مطلوبی ضریب توان بارکامل داده شده از شرکت سازنده را در شکل (۷) نشان دهد.

۸- نتیجه‌گیری

برای محاسبه گشتاور الکترومغناطیسی و حداکثر گشتاور، نیاز است مدار معادل تونن را از دو سر a و b مدار شکل (۱) به دست آورد که پارامترهای مدار معادل تونن عبارت‌اند از:

امپدانس معادل تونن موتور:

$$\bar{Z}_{th} = R_{th} + jX_{th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)}$$

ولتاژ معادل تونن:

$$\bar{V}_{th} = \frac{jX_m \bar{V}_{ph}}{R_1 + j(X_1 + X_m)}$$

گشتاور الکترومغناطیسی:

$$T = \frac{3\bar{V}_{th}^2 R_2}{s\omega_s \left(\left(R_{th} + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{th} + X_2)^2 \right)}$$

حداکثر گشتاور:

$$T_{max} = \frac{3\bar{V}_{th}^2}{2\omega_s \left(R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} \right)}$$

مراجع:

- [1] M. Kazmierkowski, "Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control; Krishan, R., Ed," ed: Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2001.
- [2] C. T. Raj, S. Srivastava, and P. Agarwal, "Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor- A Review", International journal of computer and electrical engineering, Vol. 1, No. 1, p. 61, 2009.
- [3] I. P. E. Society, "IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators", ANSI, IEEE Standard 112, 2017.
- [4] IEC Standards 60034-28, Test Methods for Determining Quantities of Equivalent Circuit Diagrams for Three-Phase Low-Voltage Cage Induction Motors, I. Geneva, 2012.
- [5] M. Al-Badri, P. Pillay, and P. Angers, "A novel in situ efficiency estimation algorithm for three-phase IM using GA, IEEE method F1 calculations, and pretested motor data", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30, No. 3, pp. 1092-1102, 2015.
- [6] J. Pedra and L. Sainz, "Parameter estimation of squirrel-cage induction motors without torque measurements", IEE Proceedings-Electric Power Applications, Vol. 153, no. 2, pp. 263-270, 2006.
- [7] D. Lindenmeyer, H. Dommel, A. Moshref, and P. Kundur, "An induction motor parameter estimation method", International journal of

در این مقاله برای تخمین پارامترهای مدار معادل IM ، از داده‌های پلاک یا داده‌های سازنده و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی بازی‌های گرسنگی HGS استفاده شده است. همچنین، گشتاور و ضریب توان ارائه شده از شرکت سازنده نیز برای پایه‌ریزی تابع هدف در نظر گرفته شده است، تا انحراف بین داده‌های برآورد شده و داده‌های شرکت سازنده IM به حداقل ممکن برسد. همچنین، دستاوردهای این مقاله با دیگر مراجع حاضر به این صورت مرزبندی می‌شود: موارد مربوط به جنبه‌های کلی مسئله تخمین پارامترهای موتور القایی در سایر مراجع بیان شده است؛ اما برای تکمیل این محور تحقیقاتی، جنبه‌های استانداردسازی مسئله، در قالب یک مسئله مدون بهینه‌سازی با در نظرگیری شروط دقیق و جامع و همچنین، توسعه روش‌های حل این مسئله به کمک الگوریتم‌های نوین و هوشمند بهینه‌سازی، در مقاله حاضر مطرح شده و به انجام رسیده است. نتایج روش HGS با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی اعم از SA_ERWCA، GA، PSO، MFSLA، SLA مقایسه شده‌اند. این مقایسه نشان داد الگوریتم پیشنهادی، یک روش بسیار مؤثر و دقیق برای تخمین پارامترهای ماشین القایی است.

ضمایم

معادلات اساسی توصیف‌کننده عملکرد حالت دائم IM ، نشان داده شده در شکل (۱) بدون در نظر گرفتن مقاومت مدل‌کننده تلفات هسته (R_m)، به صورت زیر ارائه می‌شود:

امپدانس معادل موتور:

$$\bar{Z}_{in} = R_1 + jX_1 + \frac{jX_m \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right)}{\frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_m)}$$

ضریب توان ورودی موتور:

$$pf = \cos \left(\arctan \left(\frac{\text{Imag}(\bar{Z}_{in})}{\text{Real}(\bar{Z}_{in})} \right) \right)$$

- Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 22, No. 5, pp. 1177-1192, 2014.
- [21] J. Y. Lv, "Improved artificial fish swarm algorithm applied on the static model of the induction motor parameter identification", in Applied Mechanics and Materials, 2012, Vol. 220: Trans Tech Publ, pp. 753-761.
- [22] K. Huang, Q. Wu, and D. Turner, "Effective identification of induction motor parameters based on fewer measurements", IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 17, No. 1, pp. 55-60, 2002.
- [23] D. Huynh and M. Dunnigan, "Parameter estimation of an induction machine using advanced particle swarm optimisation algorithms", IET electric power applications, Vol. 4, No. 9, pp. 748-760, 2010.
- [24] V. Sakthivel, R. Bhuvaneswari, and S. Subramanian, "Bacterial foraging technique based parameter estimation of induction motor from manufacturer data", Electric Power Components and Systems, Vol. 38, No. 6, pp. 657-674, 2010.
- [25] R. K. Ursem and P. Vadstrup, "Parameter identification of induction motors using stochastic optimization algorithms", Applied Soft Computing, Vol. 4, No. 1, pp. 49-64, 2004.
- [26] N. Benaidja and N. Khenfer, "Identification of asynchronous machine parameters by evolutionary techniques", Electric Power Components and Systems, Vol. 34, No. 12, pp. 1359-1376, 2006.
- [27] F. Duan, R. Živanović, S. Al-Sarawi, and D. Mba, "Induction motor parameter estimation using sparse grid optimization algorithm", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 12, No. 4, pp. 1453-1461, 2016.
- [28] J.-W. Kim and S. W. Kim, "Parameter identification of induction motors using dynamic encoding algorithm for searches (DEAS)", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 1, pp. 16-24, 2005.
- [29] J. J. Guedes, M. F. Castoldi, A. Goedel, C. M. Agulhari, and D. S. Sanches, "Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution", Electric Power Systems Research, Vol. 154, pp. 204-212, 2018.
- [30] Y. He, Y. Wang, and Y. Feng, "Parameter identification of an induction machine at standstill using the vector constructing method", IEEE transactions on power electronics, Vol. 27, No. 2, pp. 905-915, 2010.
- [31] J. Pedra, I. Candela, and L. Sainz, "Modelling of squirrel-cage induction motors for electromagnetic transient programs", IET electric power applications, Vol. 3, No. 2, pp. 111-122, 2009.
- [32] E. R. Farias, E. P. Cari, I. Erlich, and F. Shewarega, "Online Parameter Estimation of a Transient Induction Generator Model Based on the Hybrid Method", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 33, No. 3, pp. 1529-1538, 2018.
- [33] J. J. Guedes, M. F. Castoldi, and A. Goedel, "Temperature influence analysis on parameter estimation of induction motors using differential evolution", IEEE Latin America Transactions, Vol. 14, no. 9, pp. 4097-4105, 2016.
- electrical power & energy systems, Vol. 23, No. 4, pp. 251-262, 2001.
- [8] H. A. Toliyat, E. Levi, and M. Raina, "A review of RFO induction motor parameter estimation techniques", IEEE transactions on Energy conversion, Vol. 18, No. 2, pp. 271-283, 2003.
- [9] S. Yamamoto, H. Hirahara, A. Tanaka, and T. Ara, "A simple method to determine double-cage rotor equivalent circuit parameters of induction motors from no-load and locked-rotor tests", IEEE Transactions on industry applications, Vol. 55, no. 1, pp. 273-282, 2018.
- [10] M. Akbaba, M. Taleb, and A. Rumeli, "Improved estimation of induction machine parameters", Electric Power Systems Research, Vol. 34, No. 1, pp. 65-73, 1995.
- [11] M. Haque, "Determination of NEMA design induction motor parameters from manufacturer data", IEEE transactions on Energy conversion, Vol. 23, No. 4, pp. 997-1004, 2008.
- [12] I. Perez, M. Gomez-Gonzalez, and F. Jurado, "Estimation of induction motor parameters using shuffled frog-leaping algorithm", Electrical Engineering, Vol. 95, No. 3, pp. 267-275, 2013.
- [13] P. Nangsue, P. Pillay, and S. E. Conry, "Evolutionary algorithms for induction motor parameter determination", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 447-453, 1999.
- [14] V. Sakthivel, R. Bhuvaneswari, and S. Subramanian, "Multi-objective parameter estimation of induction motor using particle swarm optimization", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 23, No. 3, pp. 302-312, 2010.
- [15] V. Sakthivel, R. Bhuvaneswari, and S. Subramanian, "Artificial immune system for parameter estimation of induction motor", Expert Systems with Applications, Vol. 37, No. 8, pp. 6109-6115, 2010.
- [16] H. R. Mohammadi and A. Akhavan, "Parameter estimation of three-phase induction motor using hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization", Journal of Engineering, Vol. 2014, 2014.
- [17] A. Nikranajbar, M. Ebrahimi, and A. Wood, "Parameter identification of a cage induction motor using particle swarm optimization", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 224, no. 5, pp. 479-491, 2010.
- [18] M. Gomez-Gonzalez, F. Jurado, and I. Perez, "Shuffled frog-leaping algorithm for parameter estimation of a double-cage asynchronous machine", IET Electric Power Applications, Vol. 6, No. 8, pp. 484-490, 2012.
- [19] A. G. Abro and J. M. SALEH, "Multiple-global-best guided artificial bee colony algorithm for induction motor parameter estimation", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 22, No. 3, pp. 620-636, 2014.
- [20] A. İ. Çanakoğlu, A. G. YETGİN, H. Temurtaş, and M. Turan, "Induction motor parameter estimation using metaheuristic methods", Turkish

- Evaporation Rate Water Cycle Algorithm", *Mathematics*, Vol. 8, No. 6, p. 1024, 2020.
- [42] X. Weng et al., "Laplacian Nelder-Mead spherical evolution for parameter estimation of photovoltaic models", *Energy Conversion and Management*, Vol. 243, p. 114223, 2021.
- [43] H. Nguyen and X.-N. Bui, "A Novel Hunger Games Search Optimization-Based Artificial Neural Network for Predicting Ground Vibration Intensity Induced by Mine Blasting", *Natural Resources Research*, pp. 1-16, 2021.
- [44] L. Monjo, H. Kojooyan-Jafari, F. Córcoles, and J. Pedra, "Squirrel-cage induction motor parameter estimation using a variable frequency test", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 30, No. 2, pp. 550-557, 2014.
- [45] H. Kojooyan-Jafari, L. Monjo, F. Córcoles, and J. Pedra, "Using the instantaneous power of a free acceleration test for squirrel-cage motor parameters estimation", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 30, No. 3, pp. 974-982, 2015.
- [46] J. Benzaquen, J. Rengifo, E. Albáñez, and J. M. Aller, "Parameter estimation for deep-bar induction machines using instantaneous stator measurements from a direct startup", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 32, No. 2, pp. 516-524, 2017.
- [47] Y. Yang, H. Chen, A. A. Heidari, and A. H. Gandomi, "Hunger games search: Visions, conception, implementation, deep analysis, perspectives, and towards performance shifts", *Expert Systems with Applications*, Vol. 177, p. 114864, 2021.
- [48] C. J. Burnett et al., "Hunger-driven motivational state competition", *Neuron*, Vol. 92, No. 1, pp. 187-201, 2016.
- [34] L. Monjo, F. Córcoles, and J. Pedra, "Parameter estimation of squirrel-cage motors with parasitic torques in the torque-slip curve", *IET Electric Power Applications*, Vol. 9, No. 5, pp. 377-387, 2015.
- [35] A. Jaramillo-Matta, L. Guasch-Pesquer, L. Martinez-Salamero, and J. Barrado-Rodrigo, "Operating points estimation of three-phase induction machines using a torque-speed tracking technique", *IET Electric Power Applications*, Vol. 5, No. 3, pp. 307-316, 2011.
- [36] M. Haque, "Estimation of three-phase induction motor parameters", *Electric power systems research*, Vol. 26, No. 3, pp. 187-193, 1993.
- [37] J. M. C. Guimaraes, J. V. Bernardes, A. E. Hermeto, and E. da Costa Bortoni, "Parameter determination of asynchronous machines from manufacturer data sheet", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 29, No. 3, pp. 689-697, 2014.
- [38] D. Bhowmick, M. Manna, and S. K. Chowdhury, "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, 2018.
- [39] A. Bechouche, H. Sediki, D. O. Abdeslam, and S. Haddad, "A novel method for identifying parameters of induction motors at standstill using ADALINE", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 27, No. 1, pp. 105-116, 2011.
- [40] J. Pedra, "On the determination of induction motor parameters from manufacturer data for electromagnetic transient programs", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 4, pp. 1709-1718, 2008.
- [41] M. Calasan, M. Micev, Z. M. Ali, A. F. Zobia, and S. H. Abdel Aleem, "Parameter Estimation of Induction Machine Single-Cage and Double-Cage Models Using a Hybrid Simulated Annealing-

¹ Induction Motors (IM)

² Levenberg-Marquardt Algorithm (LMA)

³ Genetic Algorithm (GA)

⁴ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁵ Shuffled Frog-Leaping Algorithm (SFLA)

⁶ Modified Shuffled Frog Leaping Algorithm (MSFLA)

⁷ Simulated Annealing-Evaporation Rate Water Cycle Algorithm (SAERWCA)

⁸ Hunger Games Search (HGS)

⁹ Objective Function (OF)