ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در تخمین پارامترهای ساختاری موتور القایی قفسه سنجابی

مهران تقی‌پور گرجی کلایی[1] محسن فرشاد[2] سیّد محمّد رضوی[3]

۱- استادیار- گروه الکترونیک- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند – ایران
mtaghipour@birjand.ac.ir

۲- دانشیار- گروه الکترونیک- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند – ایران
mfarshad@birjand.ac.ir

۳- دانشیار- گروه الکترونیک- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند – ایران
smrazavi@birjand.ac.ir

چکیده: با توجه به اهمیت فراوان موتورهای القایی در صنعت، نگهداری و محافظت از آن‌ها امری ضروری و حیاتی می‌باشد. یکی از راه‌های نگهداری از چنین موتورهایی بررسی مداوم سلامت آنها می‌باشد که از طریق مونیتورینگ مداوم مقادیر پارامترهای ساختاری آن میسر می‌شود. بروز کوچکترین مشکلی در موتور القایی قفسه سنجابی تأثیر قابل توجهی بر مقادیر پارامترهای ساختاری آن مانند مقاومت‌های استاتور و روتور، اندوکتانس‌های استاتور و روتور و اندوکتانس متقابل می‌گذارد، از طرف دیگر، تخمین درست و دقیق پارامترهای ساختاری، کمک شایان توجهی به کنترل وضعیت موتور نیز خواهد کرد. در این مقاله برای تخمین پارامترهای ساختاری موتور القایی از رویکرد شناسایی جعبه خاکستری استفاده شده است. با استفاده از داده‌های استخراج شده از موتور که عبارتند از مقادیر مؤثر جریان استاتور و ضریب توان و با کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری که عبارتند از بهینه‌سازی جمعیت ذرات، بهبود یافته بهینه‌سازی جمعیت ذرات، جستجوی گرانشی، بهبود یافته جستجوی گرانشی، جستجوی هارمونی و تبرید شبیه‌سازی شده، مدلی از موتور القایی قفسه سنجابی مورد مطالعه تخمین زده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند، الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توانند گزینه مناسبی برای تخمین پارامترهای موتور القایی باشند. ارزیابی‌ها نشان می‌دهند، می‌توان با مصلاحه‌ای بین سرعت، دقت و قابلیت اطمینان با توجه به نیاز کاربر در بین الگوریتم‌های فراابتکاری بهترین گزینه را انتخاب کرد.

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات، الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، الگوریتم جستجوی گرانشی، الگوریتم جستجوی هارمونی، رویکرد شناسایی جعبه خاکستری، موتور القایی قفسه سنجابی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول: مهران تقی‌پور گرجی‌کلایی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – خراسان جنوبی – بیرجند – دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه الکترونیک

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.10.1]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

۱- مقدمه

موتور القایی یکی از پرکاربرد ترین و مهمترین ابزار در صنعت برق به شمار می آید. در بسیاری از موارد کاربرد حساس این نوع از ماشین های الکتریکی منجر به توجه بیشتر به آن می‌شود. دانستن و ردیابی پارامترهای موتور القایی می‌تواند کمک شایان توجه ای به عملکرد موتور در چرخه مصرف داشته باشد، چرا که براساس بررسی‌های صورت گرفته به وضوح نشان داده می‌شود که وقتی خطایی در یک ماشین الکتریکی رخ می‌دهد پارامترهای ساختاری آن دستخوش تغییر می‌شوند. از سویی در بسیاری از موارد، کاربرد کنترلی موتور القایی مد نظر می‌باشد که دانستن پارامترهای ساختاری آن به طراحی بهتر کنترلر منجر خواهد شد [۱-۲]. در [۲] روشی کنترلی مطرح شده است که با دنبال کردن مقادیر پارامترهای ساختاری موتور القایی، آن را کنترل می‌کند؛ چرا که وقوع خطا در موتور القایی باعث تغییراتی در مقادیر پارامترهای ساختاری (از جمله مقاومت استاتور یا روتور) می-شود.

تاکنون روش‌های گوناگونی برای تخمین پارامترهای ساختاری موتور القایی ارائه شده است که می‌توان آنها را به دو گروه عمده روش‌های کلاسیک و هوشمند (فراابتکاری) تقسیم نمود. از روش‌های کلاسیک می‌توان به روش تقریب حداقل مربعات [۳-۵] اشاره کرد که به کرات در مسائل تقریب مدل و تخمین پارامتر مورد استفاده قرار گرفته است. در مقاله [۳] از سه روش کلاسیک برای تخمین پارامتر موتور القایی سه فاز استفاده کرده است که عبارتند از روش استقرایی، روش تقریب حداقل مربعات و روش مبتنی بر تخمینگر درست نمایی ماکزیمم. براساس یافته‌های مقاله، روش سوم روشی دقیق‌تر و کامل‌تر است اما همانطور که می‌دانیم چنین روش‌هایی هم هزینه محاسباتی بالایی دارند و هم در ابعاد بالا و مسائل پیچیده‌تر کارایی خود را از دست می-دهند. معمولاً روش‌های تخمین پارامتر روش‌هایی مبتنی بر تکرار هستند که گاه از آنجایی که نیاز است در مسائل بر خط مورد استفاده قرار گیرند از لحاظ سرعت نیز باید قابل قبول باشند. برای مثال در مقاله [۶] از الگوریتم حداقل مربعات برای تخمین پارمترهای موتور القایی قفسه سنجابی استفاده شده است. اما نوآوری این مقاله در نحوه استخراج داده‌های آموزشی است که در آن از آزمایشات فرکانس متغیر برای پوشش حالات مختلف عملکردی موتور القایی استفاده شده است. روش‌های مبتنی بر طبقه‌بندی کننده‌ها نیز کاربرد گسترده‌ای در تخمین پارامترهای موتور القایی دارند. شبکه‌های عصبی مصنوعی مانند شبکه عصبی پرسپترون، شبکه عصبی چندلایه پرسپترون، شبکه عصبی آدلاین و شبکه تدریج بردار یادگیری از ابزارهای پرکاربرد در تخمین پارامترهای موتور القایی هستند [۷ -۸]. همچنین در مقاله [۹] از ماشین بردار پشتیبان برای تخمین پارمترهای موتور القایی استفاده شده است. اگرچه ماشین بردار پشتیبان عموماً برای طبقه‌بندی استفاده می‌شود، در این مقاله با ترکیب چندین طبقه‌بندی کننده SVM مدلی برای تقریب استفاده شد و از آن برای تخمین پارامترهای موتور القایی استفاده شده است. مطرح شدن روش‌های هوشمند ابتکاری گامی مهم در جهت افزایش دقت، کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت بوده است. مبحث تخمین پارامتر نیز از این قاعده مستثنا نبوده و محققین متعددی در این زمینه کارهای گوناگونی ارائه داده‌اند. الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از معروف‌ترین روش‌های تکاملی کاربرد فراوانی در تخمین پارامتر موتورهای القایی داشته است [۱۰- ۱۲]. برخی از این مقالات مانند مقاله‌های [۱۱] و [۱۲] تنها از منظر کاربرد الگوریتم ژنتیک در تخمین پارامتر این مسئله را مورد بررسی قرار دادند و تنها در ویژگی‌های مورد استفاده در تخمین پارامتر با یکدیگر متفاوت بوده‌اند. اما گاهی نیز به منظور ارائه مدلی دقیق برای اهداف کنترلی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که مقاله [۱۰] از آن جمله می باشد. در این مقاله با استفاده از تخمین پارامتر و ارائه مدلی مناسب به محاسبه گشتاور گذرا می‌پردازد. کاربرد روش‌های ابتکاری به الگوریتم ژنتیک محدود نمی‌شود، مقاله [۱۳] از یکی دیگر روش‌های تکاملی بنام سیستم ایمنی مصنوعی برای تخمین پارامترهای ساختاری موتور القایی استفاده کرده است. در مقاله [۱۴] از ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی جمعیت ذرات برای تخمین پارامترهای موتور القایی استفاده شده است. در الگوریتم پیشنهادی، در هر تکرار با استفاده از رویکرد الگوریتم ژنتیک در انتخاب والدین برای تولید جواب‌های ممکن در مرحله بعد، ذرات والد انتخاب شده و ذرات بچه در مرحله بعد در کنار ذرات بهینه شده توسط الگوریتم PSO قرار گرفته و مجموعه جواب‌های ممکن در تکرار بعد مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقاله [۱۵] نیز مقایسه‌ای جامع بین برخی روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری مانند جستجوی محلی، استراتژی تکامل، الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی جستجوی ذرات انجام داده است. در این مقاله نشان داده می‌شود که علاوه بر روش‌های تکاملی، از روش‌های ابتکاری هوشمند دیگری مانند بهینه‌سازی جستجوی ذرات نیز می‌توان در تخمین پارامتر استفاده نمود.

از آنجاییکه الگوریتم‌های فراابتکاری از موفق‌ترین روش‌های مطرح شده در این حوزه می‌باشند، لذا در این مقاله، ارزیابی عملکرد مطرح‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری هدف اصلی می‌باشد. در ابتدا یک موتور القایی قفسه سنجابی ۳HP در محیط شبیه‌سازی نرم افزار متلب توسط ولتاژ مستقیم در گشتاورهای مختلف تحریک شد تا دانش مورد نیاز برای تخمین پارامترهای ساختاری این موتور براساس رویکرد شناسایی جعبه خاکستری بدست آید. در مرحله بعد ۵۰٪ از دانش استخراج شده، توسط الگوریتم‌های فراابتکاری مورد مطالعه به منظور تخمین پارامترهای مدلی که براساس حالت دائمی موتور القایی قفسه سنجابی ارائه می‌شود به کار گرفته شد. نتایج بدست آمده حکایت از عملکرد قابل قبول روش ارائه شده دارد.

در ادامه مقاله، شرح مختصری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری مورد نظر در بخش دوم ارائه می شود. فرموله‌بندی مسئله در بخش

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.10.1]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

سوم و نتایج بدست آمده و بحث بر روی نتایج در بخش چهارم مطرح می گردد. نتیجه‌گیری از روش ارائه شده نیز در بخش پنجم ارائه می گردد.

۲- الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری

بصورت کلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری[۱] را می‌توانیم به دو گروه عمده روش‌های تکاملی[۲] و هوش جمعی تقسیم کنیم. بعنوان الگوریتم های تکاملی می‌توان از الگوریتم ژنتیک[۳]، الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی[۴] و الگوریتم جستجوی هارمونی[۵] نام برد. همچنین از الگوریتم‌های هوش جمعی می‌توان به الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات[۶]، الگوریتم جستجوی گرانشی[۷] و الگوریتم کلونی مورچگان[۸] اشاره کرد. در این مقاله سعی برآن است عمکرد رویکردها و گروه‌های مختلف الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری را در مسئله تخمین پارامتر، مخصوصاً تخمین پارامتر موتور القایی قفسه سنجابی سه فاز، مورد تحلیل و بررسی قرار دهیم. از الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) انتخاب شد [۲۱-۲۲]، چرا که الگوریتم ژنتیک در این حوزه بارها استفاده شده است ولی برای اولین بار است که در این مقاله از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده می‌گردد، از طرفی در برخی از کاربردهای مرتبط مشاهده شده است الگوریتم جستجوی هارمونی در شرایط یکسان عملکرد مطلوب‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک داشته است [۱۶]. از الگوریتم‌های هوش جمعی، به جهت حفظ تنوع در رویکردها، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جمعیت ذرات [۱۷]، بهبود یافته الکوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات [۱۸]، الگوریتم جستجوی گرانشی [۲۰]، بهبود یافته الگوریتم جستجوی گرانشی و تبرید شبیه‌سازی شده [۲۳] استفاده شده است. شایان ذکر است، از آنجایی که الگوریتم جستجوی گرانشی بدون حافظه می‌باشد، لذا در برخی از کاربردها دچار مشکل شده و نمی‌تواند به جواب بهینه برسد. برای گریز از این مشکل راه‌حلی که به نظر می‌رسد اضافه کردن حافظه به این الگوریتم می‌باشد. همانند الگوریتم PSO، یک P_{best} یعنی بهترین جوابی که هر عامل تاکنون به آن رسیده است و یک G_{best} یعنی بهترین جوابی که تاکنون از سوی تمام عوامل بدست آمده است؛ برای GSA تعریف و به عبارت محاسبه سرعت اضافه شده است. رابطه (۱) این اصلاح مختصر را نشان می‌دهد.

$$v_i^d(t+1) = rand \times v_i^d(t) + a_i^d(t+1) + \dots + rand \times C_1 \times (x(t) - x_{pbest}) + \dots + rand \times C_2 \times (x(t) - x_{gbest}) \quad (۱)$$

۳- فرمولبندی مسئله

چنانچه خوب به مسئله مطرح شده در این مقاله نگاه کنیم متوجه خواهیم شد که مسئله مورد بررسی در واقع یک مسئله بهینه‌سازی است. همانطور که از رویکرد شناسایی جعبه خاکستری می‌دانیم؛ چنانچه x متغیر ورودی ما به سیستم تحت شناسایی و y خروجی آن باشد می‌توانیم مدلی مبتنی بر قوانین حاکم برای سیستم مورد مطالعه ارئه دهیم که حاوی پارامترهای ساختاری (فیزیکی) است. حال، با تحریک هم‌زمان سیستم واقعی و مدل پارامتری و متعاقباً تنظیم پارامترها (با هدف کاهش اختلاف بین خروجی واقعی و خروجی مدل پارامتری)، مدلی بدست خواهد آمد که در شرایط تحریک مشابه مانند سیستم واقعی عمل خواهد کرد.

شکل (۱) را در نظر بگیرید. y خروجی اندازه‌گیری شده از محیط واقعی (یا شبیه‌سازی) است. $\hat{y}$ خروجی محاسبه شده توسط مدل پارامتری است که می توان رابطه (۱۷) را برای آن در نظر گرفت. براساس رابطه (۲)، مقدار خروجی مدل پارامتری، با توجه به قوانین حاکم بر سیستم، به مقدار ورودی تحریک x و مقدار پارامترهای ساختاری سیستم $\hat{\theta}$ وابسته است. حال چنانچه روشی را استفاده کنیم که در طی آن اختلاف بین خروجی اندازه‌گیری شده و خروجی محاسبه شده توسط مدل پارامتری (به رابطه (۳) توجه کنید) به صفر یا حداقل مقدار ممکن برسد؛ با توجه به اینکه ورودی تحریک برای دو حالت یکی است؛ لذا مقادیری که برای پارامترها از این طریق برای مدل بدست می‌آیند قاعدتاً نزدیک‌ترین مقادیر به پارامترهای واقعی سیستم است.

$$\hat{y} = f(\hat{\theta}, x) \quad (۲)$$

$$E = \| y - \hat{y} \| \quad (۳)$$

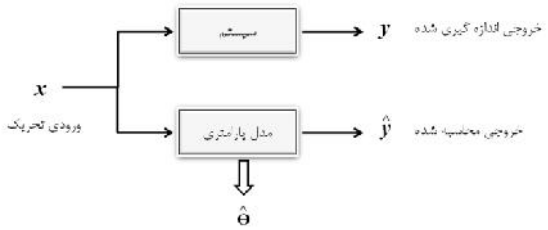
بنابراین هدف در اینجا کمینه کردن مقدار E می‌باشد. بعبارتی هر چقدر روش ارئه شده بتواند این اختلاف را کمتر کند در تخمین پارامترها موفق‌تر عمل کرده است.

۳-۱- شبیه‌سازی موتور القایی سه فاز 3 HP

موتوری که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد دارای مشخصات ارائه شده در جدول (۱) است. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود این موتور توسط یک منبع سه فاز تحریک شده و با تغییر گشتاور بار می‌توانیم مقادیر مختلفی برای جریان استاتور و ضریب توان داشته باشیم. جدول (۲) دانش استخراج شده از شبیه-سازی را به ازای گشتاورهای مختلف نشان می‌دهد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

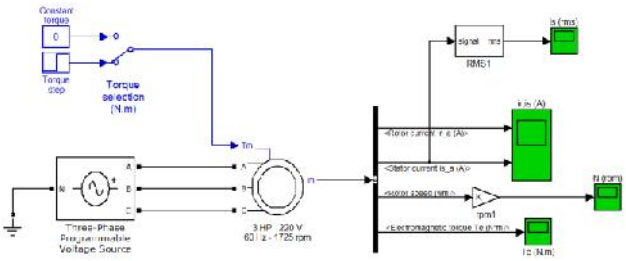
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.10.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017



شکل (۱): بلوک دیاگرام رویکرد جعبه خاکستری برای تخمین پارامتر

جدول (۱): مشخصات فنی و پارامترهای ساختاری موتور القایی قفسه سنجابی مورد مطالعه

مشخصات فنی	توان نامی (VA)	۲۲۳۸ ولت آمپر
	ولتاژ خط به خط (V)	۲۲۰ ولت
	فرکانس (Hz)	۶۰ هرتز
	سرعت نامی (rpm)	۱۷۲۵ دور در دقیقه
	اینرسی (J (kg.m^2))	۰/۰۸۹ کیلوگرم متر مربع
	ضریب بار (F (N.m.s))	۰
	جفت قطب (P)	۲
پارامترهای ساختاری	مقاومت استاتور (Rs)	۰/۴۳۵ اهم
	اندوکتانس استاتور (Ls)	۴ میلی هانری (mH)
	مقاومت روتور (Rr)	۰/۸۱۶ اهم
	اندوکتانس روتور (Lr)	۲ میلی هانری (mH)
	اندوکتانس متقابل (Lm)	۶۹/۳۱ میلی هانری (mH)



شکل (۲): شبیه سازی موتور القایی قفسه سنجابی تحت تحریک سینوسی

جدول (۲): دانش استخراج شده از شبیه‌سازی موتور القایی مورد مطالعه تحت گشتاورهای مختلف با تحریک سینوسی

Torque (گشتاور)	Stator current (rms) (مقدار مؤثر جریان استاتور)	Slip (لغزش)	Power Factor (ضریب توان)
۴۰	۲۷/۲۴	۰/۲۲۳۹	۰/۸۱۸۷
۳۸	۲۵/۰۸	۰/۱۹۸۹	۰/۸۳۴۵
۳۶	۲۳/۱۹	۰/۱۷۸۸	۰/۸۴۶۲
۳۴	۲۱/۴۹	۰/۱۶۱۷	۰/۸۵۵۱
۳۲	۱۹/۹۲	۰/۱۴۶۶	۰/۸۶۱۸
۳۰	۱۸/۴۵	۰/۱۳۳۱	۰/۸۶۶۶
۲۸	۱۷/۰۶	۰/۱۲۰۸	۰/۸۶۹۵
۲۶	۱۵/۷۳	۰/۱۰۹۳	۰/۸۷۰۶
۲۴	۱۴/۴۶	۰/۰۹۸۶	۰/۸۶۹۷
۲۲	۱۳/۲۴	۰/۰۸۸۶	۰/۸۶۶۴
۲۰	۱۲/۰۷	۰/۰۷۹۰	۰/۸۶۰۳
۱۸	۱۰/۹۴	۰/۰۶۶۹	۰/۸۵۰۶
۱۶	۹/۸۵	۰/۰۶۱۲	۰/۸۳۵۹
۱۴	۸/۸۲	۰/۰۵۲۸	۰/۸۱۴۴
۱۲	۷/۸۴	۰/۰۴۴۷	۰/۷۸۲۹
۱۰	۶/۹۲	۰/۰۳۶۸	۰/۷۳۶۸
۹	۶/۴۹	۰/۰۳۲۹	۰/۷۰۶۱
۸	۶/۰۹	۰/۰۲۹۱	۰/۶۶۸۹
۷	۵/۷۲	۰/۰۲۵۳	۰/۶۳۳۶
۶	۵/۳۷	۰/۰۲۱۶	۰/۵۶۹۰
۵	۵/۰۷	۰/۰۱۷۹	۰/۵۰۳۵
۴	۴/۸۸	۰/۰۱۴۳	۰/۴۲۶۱
۳	۴/۶۰	۰/۰۱۰۶	۰/۳۳۶۵
۲	۴/۴۵	۰/۰۰۷۱	۰/۲۳۵۸
۰	۴/۳۳	۰	۰/۰۱۲۹

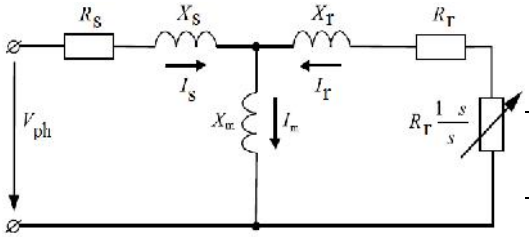
۳-۲- طراحی مدل پارامتری برای موتور القایی قفسه سنجابی

مدار معادل T شکل موتور القایی بدون در نظر گرفتن تلفات هسته در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود مدار پیشنهاد شده دارای شش پارامتر مجهول می‌باشد. مقدار پارامتر لغزش بر اساس دانش استخراج شده در اختیار ما قرار دارد (به جدول (۲) توجه شود)؛ اما پنج پارامتر دیگر همان پارامترهای ساختاری موتور می‌باشند که باید تخمین زده شوند (به رابطه (۴) توجه شود.). توجه به این نکته ضروری است که $L = X/(2\pi f)$، لذا از آنجاییکه در حل این مسئله به مدار معادل از دیدگاه فازوری نگاه می‌شود باید رابطه بین اندوکتانس و رأکتانس در نظر گرفته شود.

$$\bar{\theta} = [R_s, X_s, R_r, X_r, X_m] \qquad (۴)$$

با توجه به شکل (۴) برای جریان استاتور داریم:

$$I_s(rms) = \frac{V_{ph}(rms)}{|Z_{eq}|} = \frac{V_{ph}(rms)}{\sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}} \qquad (۵)$$



شکل (۳): مدار معادل T شکل موتور القایی بدون در نظر گرفتن تلفات هسته برای یک فاز

که در رابطه فوق I_s و V_{ph} بترتیب جریان مؤثر استاتور و ولتاژ مؤثر یک فاز استاتور می‌باشند. R_{eq} و X_{eq} نیز مقادیر مقاومت معادل و رأکتانس معادل از دو سر یک فاز استاتور می‌باشند که به ترتیب براساس روابط (۶) و (۷) قابل بیان هستند.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.10.1]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

$$R_{eq} = R_s + \frac{\frac{X_m^2 R_r}{S}}{\left(\frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_r + X_m)^2} \quad (۶)$$

$$X_{eq} = X_s + \frac{\left(\frac{R_r}{S}\right)^2 X_m + X_r X_m (X_r + X_m)}{\left(\frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_r + X_m)^2} \quad (۷)$$

همچنین با داشتن روابط فوق ضریب توان را می‌توان طبق رابطه (۸) محاسبه نمود.

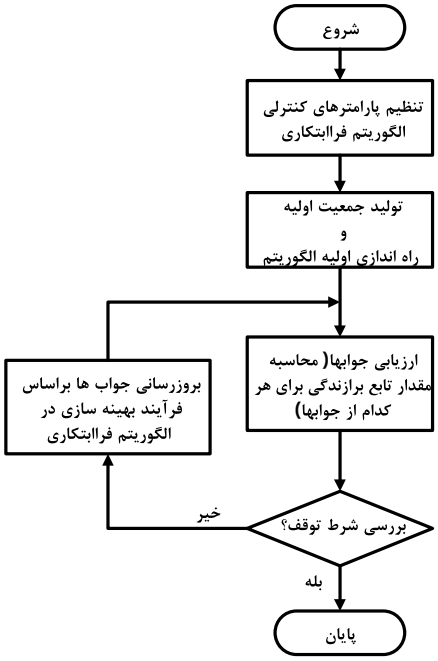
$$\cos\varphi = \cos\left(\tan^{-1}\frac{X_{eq}}{R_{eq}}\right) \quad (۸)$$

۳-۳- روش پیشنهادی برای تخمین پارامترهای ساختاری موتور القایی

طبق بررسی‌های صورت گرفته، بهترین خروجی‌های موجود که با پارامترهای ساختاری موتور القایی ارتباط مناسبی دارند؛ مقدار مؤثر جریان یک فاز استاتور و ضریب توان موتور القایی است که نحوه محاسبه آنها در روابط (۵) و (۸) ارائه گردید. اما نکته حائز اهمیت در اینجا تابع هزینه مورد استفاده در بحث بهینه‌سازی مسئله است. همانطور که در رابطه (۹) ملاحظه می‌شود؛ براساس آنچه در رابطه (۳) ذکر شد، مقدار متوسط مربعات خطا بعنوان معیاری جهت ارزیابی کاهش اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده مورد استفاده قرار گرفت.

$$E = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}\left(Is_i - \hat{Is}_i\right)^2 + \sum_{i=1}^{n}\left(PF_i - \hat{PF}_i\right)^2\right) \quad (۹)$$

در رابطه فوق، Is و PF بترتیب مقادیر مؤثر جریان و ضریب توان هستند. ضریب n نیز تعداد داده‌های آموزشی مورد استفاده است. بنابراین الگوریتم بهینه‌سازی موظف است تا آنجا که می‌تواند مقدار E را به حداقل مقدار ممکن خود برساند. فلوچارت شکل (۴) روند کار تخمین پارامتر را بیان می‌دارد. همانطور که مشاهده می‌شود، قدم اول انجام تنظیمات اولیه می‌باشد. شایان ذکر است برای تمامی الگوریتم-های فراابتکاری مورد بررسی، بهترین مقادیر پارامترهای کنترلی مربوطه استفاده شده است که از روی سعی و خطا و چندین بار اجرا مجزای برنامه بدست آمده است. مرحله بعدی، تولید جمعیت اولیه است که همانطور که در رابطه (۴) نیز نشان داده شد این مسئله داری پنج پارامتر مجهول می‌باشد. یعنی جواب‌ها در یک فضای جستجوی پنج بعدی قرار می‌گیرند بصورتیکه هر بعد آن بیانگر یکی از پارامترهای ساختاری موتور القایی است. در مراحل بعدی، در هر تکرار، بر اساس رویکرد الگوریتم فراابتکاری مورد بررسی مقادیر جواب‌ها تغییر می‌کند. سپس، مقدار تابع برازندگی E (رابطه (۸)) محاسبه می‌گردد. چنانچه مقدار E به حد نصاب مورد نظر برسد و یا تعداد تکرارها تمام شود الگوریتم متوقف خواهد شد.



شکل (۴): روند کلی تخمین پارامتر توسط الگوریتم فراابتکاری

۴- آزمایش‌ها و ارزیابی نتایج

با توجه به رویکرد شناسایی مورد استفاده در این مقاله، داده‌های آموزشی استخراج گردید. سپس، مدل پارامتری طراحی و مطابق بخش (۳-۳)، پارامترهای ساختاری موتور القایی تخمین زده شدند. ۵۰٪ از داده های استخراج شده که در جدول (۲) قابل مشاهده‌اند به منظور تخمین پارامتر مورد استفاده قرار گرفتند. برای تخمین درست‌تر پارامترها و با توجه به ماهیت تصادفی الگوریتم‌های فراابتکاری، ۳۰ اجرای مجزا از هر الگوریتم انجام و در نهایت میانگین نتایج برای پارامترها گزارش گردیدند.

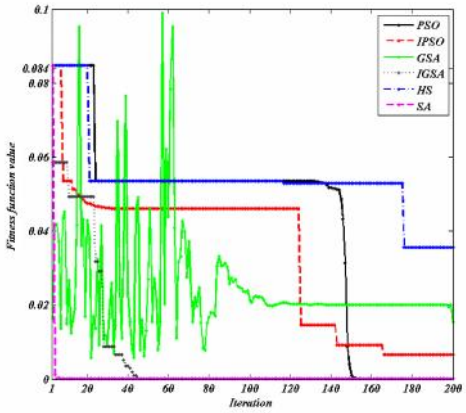
برای اینکه الگوریتم‌ها در یک فضای منصفانه مورد مقایسه قرار گیرند می‌بایست تا آنجا که امکان دارد شرایط را یکسان در نظر گرفت. در بین تمام الگوریتم‌های فراابتکاری مورد بررسی دو عامل (ماکزیمم تعداد تکرار و تعداد اعضای جمعیت) یکسان بوده است. تعداد اعضای جمعیت ۱۰۰ و تعداد ماکزیمم تکرار برای تمام الگوریتم‌ها ۲۰۰ لحاظ شده است. با ثابت بودن این دو عامل، مابقی عوامل کنترلی مختص هر الگوریتم آنقدر تغییر داده شده‌اند تا بهترین عملکرد از آنها برای تخمین پارامترهای ساختاری موتور القایی بدست آید. همچنین به منظور مقایسه منصفانه الگوریتم‌ها، نقاط شروع یا بعبارتی مقادیر اولیه برای پارامترهای ساختاری موتور یکسان درنظر گرفته شده است. در برخی موارد شاید بیش از ۵۰۰ بار آزمایش و بررسی صورت پذیرفت و حساسیت نتایج نسبت به تغییر عوامل کنترلی مورد تحلیل قرار گرفت. آنچه در جدول (۳) مشاهده می‌شود حاصل بررسی‌های فراوان و

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.10.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

انتخاب بهترین مقادیر برای عوامل کنترلی الگوریتم‌های فراابتکاری است. در مورد الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده باید به این نکته اشاره شود که nNeigh تعداد همسایگی‌هایی است که برای هر جواب در هر تکرار ایجاد می‌شود، S1 و μ بترتیب انحراف از معیار و میانگین تابع توزیع نرمال است که برای تولید همسایه‌ها استفاده شده است و ضریب T0 ماکزیمم دما و alpha نیز ضریب تبرید فرآیند است.

در شکل (۵)، میانگین منحنی همگرایی برای الگوریتم‌های PSO، IPSO، GSA، IGSA، HS و SA ارائه شده است. همچنین در جدول (۴) و برای **۳۰** بار اجرای مجزا، کمترین، بیشترین و میانگین زمان اجرای الگوریتم‌ها و بدترین، بهترین و میانگین مقدار نهایی برازندگی تابع هدف بعد از ۲۰۰ تکرار ارائه شده است. در جدول (۵) حداقل و حداکثر مقادیر تخمین زده شده پارامترهای ساختاری توسط الگوریتم-ها به همراه میانگین مقادیر تخمین زده شده برای هر پارامتر ارائه شده است. شایان ذکر است، مقادیر خطای محاسبه شده در جدول (۵) بیانگر خطای مقدار میانگین مقادیر تخمین زده شده در ۵۰ تکرار مجزا برای پارامترهای ساختاری در قیاس با مقادیر واقعی آنها می‌باشد و بصورت درصد بیان گردیده شد (به رابطه (۱۰) توجه کنید).

$$error(\%) = \left| \frac{Avg.calculated values - real\ value}{real\ value} \right| \times 100 \qquad (۱۰)$$



شکل (۵): میانگین نمودار همگرایی برای الگوریتم‌های فراابتکاری مورد بررسی برای ۳۰ بار تکرار مجزا

جدول (۳): مقادیر انتخاب شده برای عوامل کنترلی الگوریتم¬های فراابتکاری مورد بررسی

	C_1	C_2	W_{max}	W_{min}	G_0	α	ϕ	k	HMCR	PAR	BW	nNeigh	S_1	μ	alpha	T_0
PSO	۲	۲	۰/۹	۰/۰۵	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
IPSO	–	–	–	–	–	–	۷	۱	–	–	–	–	–	–	–	–
GSA	–	–	–	–	۴۰	۲۰	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
IGSA	۰/۷۵	۱/۲۵	–	–	۴۰	۲۰	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
HS	–	–	–	–	–	–	–	–	۰/۹۵	۰/۸	۰/۰۰۰۱	–	–	–	–	–
SA	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳۰	۰/۵	۰	۰/۵	۵۰۰۰۰

جدول (۴): زمان اجرا و مقادیر تابع هدف برای هر بار اجرای مجزا (هر الگوریتم ۵۰ بار بصورت مجزا اجرا شده است)

		PSO	IPSO	GSA	IGSA	HS	SA
زمان یک بار اجرای مجزای الگوریتم (ثانیه)	حداقل	۱۲	۱۳	۱۶	۱۶	۱۳	۴۲۵
	حداکثر	۱۶	۱۸	۲۰	۲۱	۱۸	۴۹۸
	میانگین	۱۴	۱۵	۱۸	۱۹	۱۵	۴۳۸
مقدار برازندگی تابع هدف	بدترین	۴/۷۸۱۲ e -۰۳	۴/۴۵۵۸ e -۰۲	۳/۵۴۵۸ e -۰۲	۵/۵۷۸۸ e -۰۲	۹/۱۲۵۶ e -۰۲	۴/۴۷۰۳ e -۰۴
	بهترین	۳/۶۳۷۸ e -۰۶	۶/۲۵۸۸ e -۰۶	۹/۷۸۵۶ e -۰۴	۶/۵۸۹۸ e -۰۴	۵/۴۵۲۵ e -۰۴	۳/۶۹۹۵ e -۰۶
	میانگین	۴/۳۵۸۴ e -۰۴	۲/۱۸۰۴ e -۰۳	۵/۶۳۵۶ e -۰۳	۹/۱۴۱۸ e -۰۳	۵/۳۳۳۸ e -۰۲	۵/۷۴۳۵ e -۰۵

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.10.1]

جدول (۵): مقادیر تخمین زده شده پارامترهای ساختاری موتور القایی قفسه سنجابی سه فاز

الگوریتم بهینه سازی		پارامترهای ساختاری	Rs (Ω)	Ls (mH)	Rr (Ω)	Lr (mH)	Lm (mH)
		مقدار واقعی	۰/۴۳۵	۴	۰/۸۱۶	۲	۶۹/۳۱
PSO	مقادیر تخمین زده شده	حداقل	۰/۱۲۵	۲/۸۴۹	۰/۷۶۹	۰/۳۱۵	۶۴/۶۹۴
		حداکثر	۰/۸۶۵	۵/۴۵۸	۰/۸۶۲	۲/۵۹۸	۷۸/۴۹۰
		میانگین	۰/۴۷	۳/۵۹۹	۰/۸۱۹	۲/۱۷۲	۷۳/۵۵۶
		قدر مطلق میزان خطا (٪)	**۸/۰۴**	**۱۰/۰۲**	**۰/۳۶**	**۸/۶**	**۶/۱۲**
IPSO	مقادیر تخمین زده شده	حداقل	۰/۱۰۹	۳/۰۹۴	۰/۷۴۶	۰/۳۴۹	۶۴/۹۸۳
		حداکثر	۰/۸۲۲	۴/۸۱۷	۰/۸۶۷	۲/۸۹۴	۷۷/۶۹۱
		میانگین	۰/۴۶۰	۳/۶۵۸	۰/۷۹۷	۲/۳۰۲	۷۲/۱۵۰
		قدر مطلق میزان خطا (٪)	**۵/۷۴**	**۸/۵۵**	**۲/۳۲**	**۱۵/۱**	**۴/۰۹**
GSA	مقادیر تخمین زده شده	حداقل	۰/۱۶۸	۳/۱۳۶	۰/۷۷۸	۰/۵۲۹	۶۴/۳۹۱
		حداکثر	۰/۵۸۰	۴/۱۹۲	۰/۸۶۱	۲/۶۴۴	۷۵/۵۱۹
		میانگین	۰/۴۸۰	۳/۶۰۷	۰/۸۵۸	۲/۱۷۵	۷۳/۴۷۶
		قدر مطلق میزان خطا (٪)	**۱۰/۳۴**	**۹/۸۲**	**۵/۱۴**	**۸/۷۵**	**۶/۰۱**
IGSA	مقادیر تخمین زده شده	حداقل	۰/۴۳۳	۳/۵۲۱	۰/۷۹۵	۲/۲۷۳	۷۳/۵۵۵
		حداکثر	۰/۵۰۴	۳/۹۹۳	۰/۸۲۳	۲/۶۶۲	۷۴/۱۰۵
		میانگین	۰/۴۷۴	۳/۶۰۱	۰/۸۱۷	۲/۳۰۰	۷۳/۸۲۱
		قدر مطلق میزان خطا (٪)	**۸/۲۲**	**۹/۹۷**	**۰/۱۲**	**۱۵**	**۶/۵۰**
HS	مقادیر تخمین زده شده	حداقل	۰/۰۳۳	۱/۷۹۹	۰/۷۴۴	۰/۱۰۹	۶۳/۷۸۳
		حداکثر	۰/۸۹۸	۵/۸۹۹	۰/۸۶۶	۲/۶۶۹	۷۹/۴۸۹
		میانگین	۰/۴۳۳	۳/۶۰۶	۰/۸۱۵	۲/۳۰۷	۶۸/۴۳۶
		قدر مطلق میزان خطا (٪)	**۰/۴۵**	**۹/۸۵**	**۰/۱۲**	**۱۵/۳**	**۱/۲۶**
SA	مقادیر تخمین زده شده	حداقل	۰/۳۲۲	۳/۳۹۴	۰/۶۵۵	۰/۹۳۳	۶۵/۹۹۱
		حداکثر	۰/۹۱۴	۵/۱۰۸	۰/۸۴۹	۲/۷۲۸	۷۹/۲۳۶
		میانگین	۰/۴۷۴	۳/۶۰۲	۰/۸۱۷	۲/۳۰۲	۷۳/۴۷۶
		قدر مطلق میزان خطا (٪)	**۸/۹۶**	**۹/۹۵**	**۰/۱۲**	**۱۵/۱**	**۶/۰۰**

با توجه به شکل (۵) و جداول (۴) و (۵) می‌توان الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده را از چند منظر مورد تحلیل و بررسی قرار داد که عبارتند از: قدرت همگرایی، سرعت اجرا، قابلیت اطمینان و بالاخره دقت در نتایج بدست آمده. با توجه به شکل (۸)، همگرایی الگوریتم SA بهتر از الگوریتم‌های IPSO و IGSA و خیلی بهتر از الگوریتم HS است. شکل فوق نشان می‌دهد که الگوریتم SA بسیار سریع‌تر از سایر الگوریتم‌ها به جواب نهایی همگرا می‌شود اما توجه به این نکته نیز حائز اهمیت است که هر تکرار این الگوریتم طولانی‌تر از سایرین است. با توجه به قسمت بالایی جدول (۴) به وضوح قابل مشاهده است که تحت شرایطی یکسان، الگوریتم SA بسیار کندتر از دیگر الگوریتم‌ها است، اگرچه قدرت همگرایی بالاتری دارد. از سویی همانطور که مشاهده می‌شود براساس میانگین زمان برای ۵۰ اجرای مجزای الگوریتم‌ها، الگوریتم HS نسبت به مابقی الگوریتم‌ها سریع‌تر است. اما بدلیل نزدیکی زمان اجرای الگوریتم HS به الگوریتم PSO یا IPSO و البته همگرایی بهتر آنها، می‌توان گفت سریع‌ترین الگوریتم‌ها PSO یا IPSO هستند.

نتایج بدست آمده را می‌توان از سه منظر مورد تحلیل و بررسی قرار داد؛ سرعت، دقت و قابلیت اطمینان.

از منظر سرعت با توجه به جدول (۴)، می‌توان الگوریتم‌های PSO، IPSO و HS را نسبت به مابقی الگوریتم‌ها تندتر و الگوریتم SA را کندترین الگوریتم معرفی نمود.

از منظر دقت با توجه به جداول (۴) و (۵)، الگوریتم‌های IGSA و SA از عملکرد مطلوبتری برخوردار هستند. البته در برخی موارد مانند مقاومت استاتور الگوریتم HS از خطای کمتری برخوردار است.

از منظر قابلیت اطمینان با توجه به جدول (۵) و مقادیر گزارش شده برای کمینه، بیشینه و میانگین مقادیر تخمین زده شده، و همچنین دقت عملکرد الگوریتم‌ها، می‌توان گفت الگرویتم IGSA با قبلیت اطمینان مناسب‌تری پارامترها را تخمین زده است.

انتخاب الگوریتم مناسب تخمین بستگی به نگاه کاربر دارد که در عمل به کدام فاکتور اهمیت بیشتری می‌دهد. همانطور که مشاهده شد، الگوریتم SA تقریباً نسبت به مابقی الگوریتم‌ها از جهات مختلف برتری داشت، اما سرعت کند آن در قیاس با دیگر الگوریتم‌ها قابل صرفنظر کردن نیست. الگوریتم IGSA در اکثر موارد قابلیت اطمینان بالاتری را نشان می‌دهد، اما دقت کلی پایین این الگوریتم قابل صرفنظر کردن نیست. در اینجا به نظر می‌رسد می‌بایست مصالحه‌ای بین دقت، سرعت، قابلیت اطمینان و قدرت همگرایی برقرار کرد و از یک منظر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.10.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

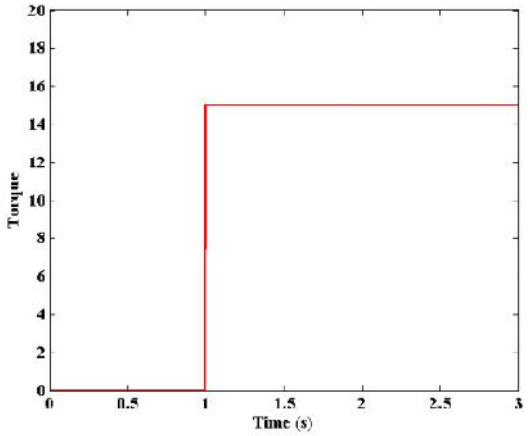
مهندسی به این نکات نگاه کرد. با کنار هم گذاشتن تمام موارد فوق می‌توان الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی جمعیت ذرات (IPSO) را با این وجود که در هیچ یک از موارد مورد بررسی بهترین نبوده است بعنوان بهترین الگوریتم برای تخمین پارامترهای موتور القایی قفسه سنجابی سه فاز معرفی کرد. از طرفی اگر سرعت را قربانی دقت و توانایی شناسایی کنیم که این کار در موارد برون خط* اشکالی ایجاد نمی‌کند؛ قاطعانه می‌توان گفت الگوریتم تبرید شبیه سازی شده (SA) بهترین الگوریتم برای تخمین پارامترهای موتور القایی است. شایان ذکر است، با توجه به ماهیت الگوریتم جستجوی هارمونی (HS)، این الگوریتم معمولاً برای رسیدن به جوابی مطلوب می‌بایست تعداد تکرارهای زیادی (برای مثال حدود ۲۰۰۰ الی ۳۰۰۰ تکرار) را سپری کند و بررسی‌های این تحقیق هم مؤید همین موضوع است. اما از آنجایی که هدف در این مقاله مقایسه عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در شرایط یکسان بوده است، لذا به ناچار شرایط سختی بر الگوریتم HS حاکم شد. با این وجود نتایج نشان می‌دهد در برخی موارد این الگوریتم حتی تحت همین شرایط نیز نسبت به مابقی الگوریتم ها بهتر عمل کرده است.

شایان ذکر است تمام شبیه‌سازی‌ها و برنامه نویسی‌های مربوط در نرم-افزار متلب نسخه 7.6 انجام پذیرفته است. همچنین مشخصات کامپیوتر مورد استفاده عبارتند از: پردازنده ۲ هسته‌ای ۲/۵۳ گیگاهرتز، گرافیک ۱ گیگ، حافظه رم ۳ گیگ و سیستم عامل ۳۲ بیتی.

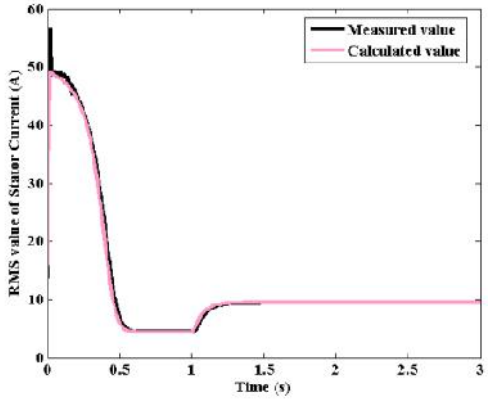
۴-۱- آزمایش مدل شناسایی شده برای موتور القایی ۳HP

با توجه به رویکرد جعبه خاکستری که در بخش ۳ مطرح شد و شکل (۱) و رابطه (۹)، چنانچه پارامترهای تخمین زده شده نسبتاً دقیق باشند باید بتوان مدلی مناسب برای موتور القایی مورد تحلیل نیز معرفی نمود. در این بخش همانطور که خواهیم دید با پارامترهای تخمین زده شده، مدل پارامتری شناسایی شده برای موتور القایی در کنار مدل اصلی قرار گرفته و عملکرد این دو در قبال مقادیر متغیرهای ضریب توان و جریان مؤثر استاتور مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. با توجه به دلایل ذکر شده در قسمت قبلی از مقادیر تخمین زده شده توسط الگوریتم IPSO استفاده شده است. در ابتدا، شبیه‌سازی با گشتاور صفر آغاز می‌شود و همانطور که شکل (۶) نشان می دهد در لحظه ۱ ثانیه گشتاور ۱۵ نیوتن- متر به موتور اعمال می‌شود. اشکال (۷) و (۸) که بترتیب بیانگر مقایسه‌ای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای مقدار مؤثر جریان استاتور و ضریب توان هستند، نشان می‌دهند که عملکرد مدل پارامتری شناسایی شده با دقت قابل قبولی مشابه عملکرد مدل اصلی است.

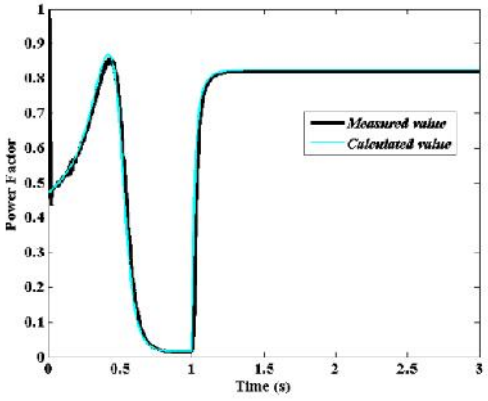
* Off-line



شکل (۶): اعمال گشتاور ۱۵ نیوتن- متر در لحظه ۱ ثانیه



شکل (۷): مقادیر اندازه‌گیری شده از شبیه‌سازی و محاسبه شده توسط مدل شناسایی شده برای جریان مؤثر استاتور



شکل (۸): مقادیر اندازه‌گیری شده از شبیه‌سازی و محاسبه شده توسط مدل شناسایی شده برای ضریب توان

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در تخمین پارامترهای موتور القایی قفسه سنجابی ۳HP سه فاز، از الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات (PSO) و بهبود یافته آن (IPSO)، الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) و بهبود یافته آن (IGSA)، الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.10.1]

(SA) استفاده شده است. هر کدام از الگوریتم‌های مذکور نماینده نوعی رویکرد از فرآیند جستجوی فضای جواب در بین الگوریتم‌های فراابتکاری هستند. الگوریتم‌های مورد استفاده از چهار منظر اصلی یعنی قدرت همگرایی، سرعت، دقت و قابلیت اطمینان مورد تحلیل و بررسی دقیق قرار گرفتند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که از منظر قدرت همگرایی و دقت بهترین الگوریتم، الگوریتم SA است. از منظر سرعت، با کمی ملاحظه، الگوریتم IPSO عملکرد بهتری داشته و از لحاظ قابلیت اطمینان، الگوریتم IGSA مطمئن‌ترین جواب‌ها با نوسانات کم را ارائه می‌دهد. قطعاً در یک بررسی جامع می‌بایست مصالحه‌ای بین عوامل فوق ایجاد گردد. با بررسی‌های صورت گرفته می‌توان الگوریتم IPSO را بعنوان یک الگوریتم هوشمند فراابتکاری مناسب برای تخمین پارامترهای موتور القایی قفسه سنجاب سه فاز پیشنهاد کرد.

با توجه به نکته‌ای که در مورد مصالحه بین موارد مورد ارزیابی ذکر شد، نویسندگان این مقاله در تحقیق بعدی، تخمین پارامتر چند هدفه را مورد بررسی قرار خواهند داد؛ به نحوی که بتوان بصورت همزمان دو فاکتور مهم دقت و قابلیت اطمینان را با یکدیگر بررسی نمود.

مراجع

[1] A. Bellini, and G. Figalli, “Adaptive control with parameter estimation for induction motor drives” Control Engineering Practice, Vol. 3, No. 2, PP. 181-188, February 1995.

[2] M.-R. Akbarzadeh-T, G. Faezian, H. Tabatabaei, and N. Sargolzaei, “A new variable structure control methodology for electronic/mechanical parameter estimation of induvtion motor” American control conference, vol. 5, PP. 4047-4052, 2003.

[3] S. R. Shaw, and S. B. Leep, “Identification of induction motor parameters from transient stator current measurements” IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 46, No. 1, February 1999.

[4] G. K. Stefopoulos, and A. P. S. Meliopoulos, “Numerical Parameter estimation procedure for three phase induction motor models” IEEE Lausanne power tech, PP. 1111-1116, 2007.

[5] Ch. Laughman, S. B. Leep, L. K. Norford, S. R. Shaw, and P. R. Armstrong, “A two-step method for estimating the parameters of induction machine models” Energy Converson Congress and Exposition, PP. 262-269, 2009.

[6] L. Monjo, H. Kojooyan-Jafari, and J. Pedra, “Squirrel-Cage Induction Motor Parameter Estimation Using a Variable Frequency Test” IEEE Transactions on Energy Conversion, V0l. 30, No. 2, pp. 550-557, 2015.

[7] P. Bilski, “Application of Support Vector Machines to the Induction Motor Parameters Identification” Measurement, Vol. 51, pp. 377-386, 2014.

[8] H. Sediki, A. Bechouche, D. OuldAbdeslam, S. Haddad, “ADALINE Approach for Induction Motor Mechanical Parameters Identification” Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 9, pp. 86-97, 2013.

[9] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, “Optimization by Simulated Annealing "SCIENCE, Vol. 220, No. 4598, PP. 671-680, 1983.

[10] P. Pillay, R. Nolan, and T. Haque, “Application of Genetic Algorithm to motor parameter determination for transient torque calculation” IEEE transaction on industry application, Vol. 33, No. 5, PP. 1273-1282.

[11] Z. Ferkova, L. Zboray, “Contribution to parameter identification of an induction motor by genetic algorithm” ActaElectrotechnica et Infromatica, Vol. 5, No. 2, PP. 1-4, 2005.

[12] S. Jangjit, and P. Laohachai, “Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor by using Genetic Algorithm” Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 4, No. 3, PP. 360-364, 2009.

[13] V. P. Sakthivel, R. Bhuvaneswari, and S. Subramanian, “Artificial immune system for parameter estimation of induction motor” Expert system with application, Vol. 37, No. 8, PP. 6109-6115, August 2010.

[14] J. M. Gutierrez-Villalobos, J. Rodriguez-Resendiz, E. A. Rivas-Arariza, V. H. Mucino, “A Review of Parameter Estimators and Controllers for Induction Motors Based on Artificial Neural Networks” NEUROCOMPUTING, Vol. 118, pp. 87-100, 2013.

[15] R. K. Ursem, and P. Vadstrup, “Parameter identification of induction motors using stochastic optimization algorithm” Applied Soft Computing, Vol. 4, No. 1, PP. 49-64, February 2004.

[16] ع. تقی لو و ع. تیموری، "الگوریتم جستجوی هارمونی و کاربرد مسائل بهینه سازی" چهاردهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق ایران، ۱۳۹۰

[17] Zh. Zhisheng, "Quantum-behaved particle swarm optimization algorithm for economic load dispatch of power system, "Expert Systems with Applications, Vol. 37, 2010, PP. 1800–1803.

[18] M. Clerc and J. Kennedy, The particle swarm–explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, IEEE Transaction on Evolutionary Computation, Vol. 6, 2002, PP. 58-73.

[19] S. H. Zahiri, “Swarm Intelligence and Fuzzy Systems”, Nova Publisher, USA, 2010.

[20] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, and S. Saryazdi, "GSA: A Gravitational Search Algorithm," Information Sciences, Vol. 179, 2009, PP. 2232–2248.

[21] Z.W. Geem, J.-H. Kim, G.V. Loganathan, A new heuristic optimizationalgorithm: harmony search, Simulation 76 (2) (2001) 60-68.

[22] Z.W.Gemm, Music-Inspired Harmony Search Algorithm, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

[23] 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, pp. 1-6, 2014.

زیرنویس‌ها

[1] Meta-Heuristic
[2] Evolutionary
[3] Genetic Algorithm
[4] Artificial Immune System
[5] Harmony Search
[6] Particle Swarm Optimization
[7] Gravitational Search Algorithm
[8] Ant Colony Optimization

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.10.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017