

صرفه جویی در مصرف انرژی با جایگزینی به موقع موتور القایی سه فاز به کمک تخمین دقیق بازده آن توسط الگوریتم زنبور عسل اصلاح شده

مهدی بیگدلی^(۱) - داود عزیزیان^(۲) - محمد جمادی^(۳)

(۱) استادیار - گروه مهندسی برق، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

(۲) استادیار - گروه مهندسی برق، واحد ابهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ابهر، ایران

(۳) کارشناس ارشد - گروه مهندسی برق، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۲۴

خلاصه: امروزه بیشترین میزان مصرف انرژی در صنعت مربوط به موتورهای القایی است. بنابراین تعیین بازده موتورهای القایی به منظور انجام اقدامات پیشگیرانه، عملیات تعمیر و نگهداری و در نهایت جایگزینی آنها با موتورهای راندمان بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مقاله روشی کارآمد مبتنی بر الگوریتم زنبور عسل اصلاح شده برای تخمین بازده موتور القایی ارائه می‌کند. مهم‌ترین مزیت روش ارائه شده، تعیین راندمان موتور القایی بدون انجام هرگونه آزمایش تهاجمی است و یک روش بدون مزاحمت و با دقت بالا را ارائه می‌دهد. برای اثبات قابلیت‌های روش پیشنهادی، نتایج آن با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند مقایسه شده‌اند. پس از تخمین راندمان، یکی از کاربردهای مهم تخمین راندمان که جایگزینی موتور راندمان بالا به جای موتور راندمان معمولی می‌باشد، تشریح و در مورد میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی به واسطه دانستن راندمان موتور القایی، بحث می‌شود. نتایج حاصل از محاسبه میزان صرفه‌جویی انرژی نشان می‌دهد که در صورت جایگزینی موتور استاندارد در حال کار با یک موتور پربازده، صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی صورت خواهد گرفت.

کلمات کلیدی: الگوریتم زنبور عسل اصلاح شده، اندازه‌گیری، تخمین بازده، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، موتور القایی

Energy Saving by Timely Replacing Three-Phase Induction Motors with the Help of Accurate Estimation of its Efficiency Using Modified Artificial Bee Colony Algorithm

Mehdi Bigdeli⁽¹⁾ - Davood Azizian⁽²⁾ - Mohammad Jamadi⁽³⁾

(1) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran
mehdi.bigdeli@iauz.ac.ir

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Abhar Branch, Islamic Azad University, Abhar, Iran
d.azizian@abhar.ac.ir

(3) M.Sc - Department of Electrical Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran
m.jamadi@iauz.ac.ir

Today, most energy consumption in industry is related to induction motors. Evaluation of induction motor's efficiency is an important issue for life estimation, extending the life and energy saving managements. Using the estimated efficiency of the induction motor, its performance can be judged and replacing the existing low efficiency motor by a high efficiency motor could be decided. In this paper, a novel and efficient method based on Modified Artificial Bee Colony (MABC) algorithm is presented for efficiency estimation in the induction motors. The main advantage of the proposed method is efficiency evaluation of induction motor without any intrusive test. In order to demonstrate the capabilities of the proposed method, a comparison with other intelligent optimization algorithms is performed. Then, one of the important applications of efficiency estimation, which replaces the high efficiency induction motors instead of conventional motors, is discussed. The results of the calculation of energy savings show that if a standard motor is replaced with a high efficiency motor, energy savings will be significant.

Index Terms: Efficiency Estimation, Energy Saving, Induction Motor, Measurement, Modified Artificial Bee Colony (MABC) Algorithm

نویسنده مسئول: مهدی بیگدلی، استادیار، گروه مهندسی برق، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران. mehdi.bigdeli@iauz.ac.ir

۱- مقدمه

موتورهای الکتریکی بیش از ۶۵ درصد انرژی الکتریکی تولیدی یا حدود ۵۰ درصد از کل انرژی دنیا را مصرف می نمایند و این میزان در صنایع به بیش از ۷۵ درصد انرژی الکتریکی کل مصرفی می رسد. موتورهای الکتریکی دارای انواع بسیار گسترده بوده و با توجه به توان خروجی، سرعت، گشتاور و سایر مشخصه ها در کاربردهای متفاوتی قرار می گیرند [۱-۲]. در میان این موتورها، موتورهای الکتریکی القایی، معمول ترین نوع بوده به طوری که اغلب موتورهای مورد استفاده در کاربردهای صنعتی از این نوع می باشند. گستردگی استفاده از موتورهای الکتریکی القایی به دلیل ارزان بودن، هزینه نگهداری پایین، سادگی ساختمان و قابلیت اطمینان نسبتاً بالای آن ها است. تخمین صحیح راندمان این موتورها از اهمیت به سزایی برخوردار است؛ زیرا اطلاع صحیح از راندمان موتور القایی موجب تعویض صحیح موتور القایی کم بازده می شود. ضمناً با استفاده از راندمان تخمینی، مزایا، معایب و هزینه های انجام این تعویض و نیز زمان بازگشت سرمایه قابل محاسبه خواهد بود. بنابراین اولین گام در ارزیابی وضعیت موتورهای القایی سه فاز که می تواند تأثیر چشم گیری بر میزان مصرف انرژی آن داشته باشد، تخمین دقیق بازده موتور است.

روش های معمول جهت تعیین راندمان موتورهای القایی، زمان بر و پرهزینه هستند. برای غلبه بر این مشکل، در سال های اخیر تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده است. خواندن اطلاعات پلاک موتور، کم هزینه ترین روش ارزیابی راندمان است. در این روش فرض می شود که بازده موتور ثابت و برابر با مقدار پلاک است. این کار زمانی خوب جواب می دهد که منحنی راندمان- بار صاف باشد [۱]. در [۲] روش های زیادی جهت تخمین راندمان موتور القایی بررسی شده است که همه ی آن ها دارای خطا و مزاحمت در اندازه گیری^۱ راندمان می باشند. در حالی که در سال های اخیر، روش های غیرتهاجمی^۲ از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و بیشتر به آن ها پرداخته شده است [۳-۴]. استاندارد IEEE [۵]، یک تکنیک مناسب بر مبنای تعیین پارامترهای مدار معادل ارائه کرده است که نیاز به انجام آزمون های بی باری، روتور قفل شده، DC و اندازه گیری تلفات پراکندگی در این روش، سبب دشواری آن می شود. در عین حال، این روش، یک روش تهاجمی است که نیاز به بی بار کردن موتور در هنگام عملکرد آن دارد. روش دیگر، روش گشتاور محور می باشد. روش های گشتاور محور دو نوع اند: اندازه گیری گشتاور محور [۱-۲] و روش بر پایه گشتاور شکاف فاصله هوایی [۶]. روش اول نیازمند اندازه گیری گشتاور محور خروجی و سرعت موتور به طور مستقیم است. اندازه گیری گشتاور مستلزم تجهیزات گران قیمت است که امکان آن در همه جا وجود ندارد. همچنین یک روش تهاجمی در تعیین بازده می باشد. برخلاف این شیوه، روش گشتاور شکاف هوایی یک روش بدون مزاحمت در اندازه گیری است که بدون خروج موتور از مدار و در حالت برخط و فقط با استفاده از اطلاعات پلاک نامی و پایانه موتور، بازده آن تعیین

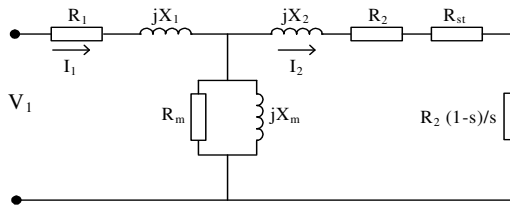
می شود. البته به جای نتایج آزمایش بی باری از یک سری اطلاعات تجربی استفاده می شود که باعث کاهش دقت آن در مقایسه با سایر روش ها می شود. علاوه بر این، در این روش مقاومت استاتور می بایست به طور دقیق اندازه گیری شود که مستلزم به کارگیری تجهیزاتی گران قیمت است.

روش دیگر، روش تلفات مجزا^۳ است [۷] که در آن، پنج تلفات مهم شامل تلفات مسی استاتور، تلفات مسی روتور، تلفات هسته، تلفات پراکندگی بار و تلفات اصطکاک تخمین زده می شوند. این روش بر اساس اندازه گیری و جداسازی تلفات مختلف در یک ماشین می باشد که در آن دو آزمون شامل روتور جدا شده و چرخش معکوس، جهت اندازه گیری مستقیم تلفات پراکندگی انجام می شوند. بنابراین با توجه به نیاز به انجام دو آزمایش تهاجمی، روش مناسبی برای تعیین راندمان موتور القایی نیست. در [۸-۹] از آزمایش بی باری جهت تعیین راندمان در بار نامی استفاده شده است. اشکال این روش، جدا کردن موتور از بار برای انجام آزمایش بی باری است. در [۱۰] بر پایه روش آزمایش لغزش، راندمان موتور تعیین شده که دارای خطای قابل توجهی است (بیش از ۱۰ درصد). در [۱۱] وسیله ای معرفی شده که قادر است برای اندازه گیری توان ورودی موتور جهت تعیین راندمان، بدون خروج از مدار، به کار رود. وسیله به کاررفته، تحلیل گر توان^۴ نام دارد که بسیار گران قیمت است. بنابراین استفاده از آن در تخمین راندمان موتورهای القایی کوچک، مقرون به صرفه نیست.

در سال های اخیر با پیشرفت الگوریتم های بهینه سازی هوشمند و توسعه کاربرد آن ها در زمینه های مهندسی، روش های متعددی در زمینه تخمین بازده موتورهای القایی ارائه گردیده است [۱۲-۲۴]. در این روش ها از اطلاعات موجود و قابل اندازه گیری مانند جریان، ولتاژ، توان ورودی، سرعت و ضریب توان استفاده می شود. با استفاده از این اندازه گیری ها، پارامترهای موتور القایی تخمین زده می شوند و با استفاده از پارامترهای تخمینی، راندمان در هر شرایطی از کار موتور به دست می آید. استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA)^۵ جزء اولین روش های ارائه شده در این زمینه بوده است [۱۸-۱۲]. مهم ترین مشکل این روش، سرعت و دقت پایین آن است. روش دیگر استفاده از الگوریتم تراکم ذرات (PSO)^۶ است [۲۰-۱۹]. مهم ترین مزیت الگوریتم PSO نسبت به GA، سرعت بالای آن بوده و مهم ترین مشکل آن خروج از فضای جستجو است که برای به دست آوردن جواب نهایی، باید چندین بار اجرای الگوریتم را تکرار کرد. در [۲۴-۲۱] از الگوریتم غذایی باکتری^۷ برای تعیین راندمان استفاده شده است. از مهم ترین معایب آن، تعداد زیاد پارامترهای خود الگوریتم است که روش مشخص و قابل اطمینانی برای تعیین آن ها وجود ندارد. بنابراین ارائه یک روش با سرعت همگرایی بالا، نیاز به تعداد تکرار کم تر، دقت بالا، سادگی محاسبات و تعداد کم پارامترهای کنترلی، که بتواند پارامترهای موتور القایی را تخمین بزند دارای اهمیت فراوانی است.

برای غلبه بر مشکلات الگوریتم های فوق، در مرجع [۲۵] الگوریتم

V_1 : ولتاژ استاتور، I_1 : جریان استاتور، R_1 : مقاومت استاتور، R_2 : مقاومت روتور، R_m : مقاومت تلفات هسته، X_1 : راکتانس پراکندگی استاتور، X_2 : راکتانس پراکندگی روتور، X_m : راکتانس مغناطیس کنندگی، s : لغزش، I_2 : جریان روتور، I_m : جریان مغناطیس کنندگی، P_{in} : توان ورودی موتور، $\frac{R_2(1-s)}{s}$: مقاومت مربوط به توان خروجی موتور.



شکل (۱): مدار معادل موتور القایی
Fig. (1): Equivalent circuit of induction motor

تلفات پراکندگی نیز با اضافه کردن یک مقاومت سری به مدار روتور (R_{st}) مدل می‌شود که در استاندارد IEEE 112F پیشنهاد شده است [۵]. مقاومت پراکندگی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۵]:

$$R_{st} = \frac{0.018(1 - s_{fl})}{s_{fl}} \quad (1)$$

در رابطه فوق، s_{fl} لغزش موتور در بار کامل است.

به کمک مدار معادل شکل (۱) ادمیتانس طرف استاتور و روتور را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$Y_1 = \frac{1}{R_1 + jX_1} \quad (2)$$

$$Y_2 = \frac{1}{(R_2/s) + jX_2 + R_{st}} \quad (3)$$

به طریق مشابه، ادمیتانس شاخه موازی مدار معادل نیز از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$Y_m = \frac{1}{R_m} - \frac{j}{X_m} \quad (4)$$

در نهایت امپدانس کل مدار معادل را می‌توان با سری-موازی کردن ادمیتانس‌های فوق به صورت زیر بیان کرد:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 + \frac{1}{Y_2 + Y_m} \quad (5)$$

بعد از محاسبه ادمیتانس‌ها، با استفاده از قوانین کیرشهف می‌توان روابط مورد نیاز برای محاسبه راندمان را به صورت زیر بیان کرد:

$$I_{1e} = \left| \frac{V_1 Y_1 (Y_2 + Y_m)}{Y_1 + Y_2 + Y_m} \right| \quad (6)$$

$$I_{2e} = \left| \frac{V_1 Y_1 Y_2}{Y_1 + Y_2 + Y_m} \right| \quad (7)$$

$$\cos \phi_e = \frac{\text{Re}(I_{1e})}{I_{1e}} \quad (8)$$

$$P_{ine} = 3(I_1^2 R_1 + I_2^2 (R_2/s + R_{st}) + I_m^2 R_m) \quad (9)$$

$$P_{oute} = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (10)$$

$$\eta = \frac{P_{oute}}{P_{ine}} \quad (11)$$

زنبورعل (ABC) ارائه شده است. این الگوریتم بسیار سریع بوده و نیاز به تنظیم پارامترهای کمتری دارد. ضمن اینکه کارایی آن در مقایسه با سایر الگوریتم‌های هوشمند به اثبات رسیده است [۲۷-۲۵]. بنابراین در تحقیق حاضر برای تخمین پارامترهای مدار معادل موتور القایی و نهایتاً تعیین بازدهی آن از الگوریتم ABC استفاده می‌شود. اما مشکل عمده الگوریتم ABC کلاسیک، انتخاب تصادفی مکان زنبورهای پیشاهنگ است. این عمل باعث کاهش کارایی الگوریتم می‌شود. برای حل این مشکل، نسخه جدیدی از الگوریتم ABC (MABC) پیشنهاد می‌شود. در الگوریتم MABC یک راهبردد جدید در عملکرد زنبورهای پیشاهنگ پیشنهاد شده تا کارایی الگوریتم افزایش یابد. الگوریتم پیشنهادی برای تخمین بازده موتور القایی به کار رفته و نتایج آن با نتایج الگوریتم ABC کلاسیک و همچنین سایر الگوریتم‌های هوشمند مقایسه می‌شود. نتایج حاصل، نشان از دقت و سرعت بالای الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها دارد. بنابراین می‌تواند در صنعت به عنوان یک روش مطمئن در تخمین بازده موتورهای القایی به کار رود. در انتها بر اساس نتایج تخمین بازده، جایگزینی موتور در حال کار با موتورهای پربازده^۱ مورد بررسی قرار گرفته و میزان صرفه‌جویی و مدت زمان بازگشت سرمایه محاسبه می‌شود.

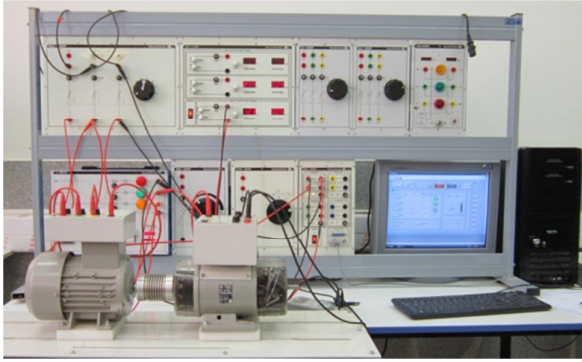
۲- تخمین بازده

برای تخمین راندمان موتور القایی در ابتدا باید چندین نمونه‌گیری از سیگنال‌های ورودی موتور القایی همچون اندازه‌گیری‌هایی از جریان، سرعت، ضریب توان و توان ورودی در دسترس باشد. از این رو در ابتدا آزمایش‌های لازم بر روی یک موتور القایی نمونه انجام می‌شود. سپس با استفاده از مدل مدار معادل موتور القایی در حالت دائمی، تابع هدف ایجاد می‌شود. برای استخراج تابع هدف مناسب جهت تعیین راندمان، از سه نوع تابع هدف متفاوت استفاده می‌شود. در تشکیل تابع هدف جریان تخمینی، ضریب توان تخمینی و توان ورودی تخمینی به کار گرفته می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، پارامترهای مدار معادل به گونه‌ای تخمین زده می‌شود که خطای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر تخمینی حداقل شود. با داشتن پارامترهای موتور که همان تلفات موتور است و تعیین مقاومت روتور که سبب به دست آمدن توان خروجی موتور می‌شود، بازده موتور القایی بدون هیچ‌گونه دخالتی در اندازه‌گیری و فقط با داشتن سیگنال‌های ورودی، تعیین می‌شود.

۳- تشریح مسئله و روابط موردنیاز

همان‌طور که عنوان شد، برای تخمین بازده از پارامترهای مدار معادل استفاده می‌شود. مدار معادل حالت ماندگار موتور القایی در شکل (۱) نشان داده شده است.

که در شکل ۱:



شکل (۲): مدار اندازه‌گیری در آزمایشگاه
Fig. (2): Experimental setup

جدول (۱): مقادیر اندازه‌گیری شده برای یک موتور ۲Hp

Table (1): Measured values for typical 2Hp induction motor

بازده	(W) P _{out}	(W) P _{in}	PF	(A) I _l	میزان بار برحسب بار کامل
۵۱/۷۰	۳۸۲/۰۱	۷۳۸/۹	۰/۴۱۲	۲/۷۱	٪۲۵
۶۶/۰۰	۷۵۳/۵۲	۱۱۴۱/۷	۰/۵۷۳	۳/۰۱	٪۵۰
۷۱/۳۶	۱۱۱۰/۱	۱۵۵۵/۶	۰/۶۸۲	۳/۴۴	٪۷۵
۷۳/۱۸	۱۴۶۳/۱	۱۹۹۹/۵	۰/۷۵۱	۳/۹۹	٪۱۰۰

۶- الگوریتم ABC کلاسیک

الگوریتم زنبور عسل برای اولین بار در سال ۲۰۰۵ توسط Karaboga معرفی شد [۲۵]. در الگوریتم ABC زنبورهای مصنوعی موجود در کلونی به سه دسته تقسیم می‌شوند: زنبورهای مشغول به کار^{۱۱}، زنبورهای تماشاگر^{۱۲} و زنبورهای پیشاهنگ^{۱۳}. در کلونی زنبور عسل نیمی از زنبورها، زنبورهای کارگر و نیمی دیگر، از زنبورهای تماشاگر تشکیل شده‌اند. هر منبع غذایی انتخاب شده بیانگر یک جواب ممکن در مسئله است [۲۶-۲۷]. در این الگوریتم ابتدا بردارهای جواب به طور تصادفی از دامنه مسئله انتخاب می‌شود. برای این منظور بردار موقعیت $X_n = [x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nm}]$ (n=1, 2, ..., SN) به صورت X_n در نظر گرفته می‌شود [۲۵] (SN تعداد زنبور عسل، m تعداد متغیرهای مسئله و بردار X_n نیز اعداد تصادفی از دامنه مسئله می‌باشند).

در مرحله اول زنبورهای مشغول به کار با جستجو پیرامون منبع غذایی واقع در نقطه X_n به دنبال منابع غذایی احتمالاً بهتری که در موقعیت جدیدی نظیر V_n قرار دارند، می‌گردند. برای تعیین این موقعیت جدید می‌توان از رابطه‌ی (۱۵) استفاده کرد:

$$V_{ni} = X_{ni} + \phi_{ni} (X_{ni} - X_{ki}) \quad (15)$$

که k یک عدد تصادفی صحیح در بازه ۱ تا SN و ϕ_{ni} یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [۱، -۱] است. پس از تعیین موقعیت منبع غذایی جدید، باید میزان بهینگی (تناسب) آن محاسبه شود. میزان تناسب بردار موقعیت زنبور n به صورت زیر تعریف می‌شود:

۴- ایجاد تابع هدف

برای تخمین بازده، در اولین گام باید پارامترهای مدار معادل شناسایی شوند. روش تخمین پارامترهای مدار معادل، توابع هدف مختلفی معرفی می‌شوند. روش استاندارد برای این منظور، تخمین پارامترهای مجهول به‌گونه‌ای است که مجموع مربعات خطای بین اطلاعات مستخرج از مدل و نتایج اندازه‌گیری حداقل شود. البته به شرطی که محدودیت‌های مسئله نیز برآورده شود. برای دستیابی به یک نتیجه جامع، توابع هدف مختلفی تعریف می‌شوند. در کارهای تحقیقاتی گذشته از جریان، توان و گشتاور برای این منظور استفاده شده است [۲۴-۲۱]. در این مقاله در یک کار جدید، ترکیبی از این داده‌ها به عنوان توابع هدف در روابط (۱۲) تا (۱۴) پیشنهاد شده‌اند.

$$F_1(x) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{I_{1ej}}{I_{mj}} - 1 \right)^2 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{PF_{ej}}{PF_{mj}} - 1 \right)^2 \quad (12)$$

$$F_2(x) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_{inej}}{P_{inmj}} - 1 \right)^2 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{I_{1ej}}{I_{mj}} - 1 \right)^2 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{PF_{ej}}{PF_{mj}} - 1 \right)^2 \quad (13)$$

$$F_3(x) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_{inej}}{P_{inmj}} - 1 \right)^2 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{I_{1ej}}{I_{mj}} - 1 \right)^2 \quad (14)$$

در روابط فوق منظور از پانویس‌های e و m به ترتیب مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده می‌باشد. I: جریان، P_{in}: توان ورودی، PF: ضریب توان و n نیز تعداد نقاط نمونه‌برداری است.

۵- نتایج اندازه‌گیری

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، برای تعیین راندمان موتور القایی بدون اخلاص در عملکرد موتور، باید تلفات آن تخمین زده شود. جهت تخمین پارامترهای موتور القایی به صورت برخط باید نمونه‌برداری‌هایی از آن انجام شود. همان‌طور که می‌دانیم با تغییر گشتاور بار، سرعت موتور، جریان و ضریب توان تغییر می‌کنند. نمونه‌برداری از جریان، ضریب توان و سرعت در ۲۵ تا ۱۰۰ درصد بار کامل انجام می‌شود. دلیل اندازه‌گیری این تعداد داده، افزایش دقت استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است؛ زیرا به هر میزان تعداد نقاط نمونه‌برداری زیاد باشد، الگوریتم می‌تواند جستجوی بهتری در دامنه‌ی مسئله داشته باشد. شکل (۲) نمایی از مدار اندازه‌گیری در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. در جدول (۱) نیز مقادیر اندازه‌گیری برای یک موتور ۲Hp در فرکانس ۵۰Hz و ولتاژ نامی ۲۲۰/۳۸۰V آورده شده است.

$$SF = \omega_{\max} - \left(\frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\text{iter}} \right) \text{iter}_{\max} \quad (19)$$

در رابطه بالا، ω_{\max} و ω_{\min} به ترتیب برابر ۱ و ۰/۷ در نظر گرفته می‌شوند.

طبق بحث‌های مطرح شده، فلوجارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۳ آورده شده است.

۸- نتایج تخمین بازده

برای نشان دادن کارایی الگوریتم MABC پیشنهادی و تأیید نتایج آن، این مسئله با چندین الگوریتم دیگر (GA, PSO, ABC و کلاسیک) نیز حل و راندمان موتور القایی با تمامی این الگوریتم‌ها و توسط توابع هدف مختلف تعیین شده است. نتایج مربوطه در ادامه آورده می‌شود.

۸-۱- استفاده از رابطه (۱۲) به عنوان تابع هدف

با استفاده از رابطه (۱۲) و توسط نرم‌افزار نوشته شده، پارامترهای موتور تخمین زده شده و بعد از تخمین پارامترها، راندمان آن از رابطه (۱۱) محاسبه و نتایج آن در جدول (۲) نشان داده شده است. جدول (۳) نیز خطای بین راندمان‌های تخمینی توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی با مقادیر واقعی را نشان می‌دهد.

جدول (۲): نتایج حاصل از تخمین راندمان برای تابع هدف (۱۲)

Table (2): The results of efficiency estimation for objective function of Eq. (12)

مقدار واقعی	MABC	ABC	PSO	GA	میزان بار
۵۱/۷۰	۵۲/۱۸	۵۲/۵۶	۵۳/۹۲	۵۵/۷۴	۲۵٪ بار کامل
۶۶/۰۰	۶۵/۰۱	۶۵/۶۰	۶۷/۴۴	۶۹/۵۳	۵۰٪ بار کامل
۷۱/۳۶	۷۲/۱۲	۷۲/۳۶	۷۲/۴۷	۷۴/۵۲	۷۵٪ بار کامل
۷۳/۱۸	۷۳/۳۴	۷۳/۷۵	۷۴/۰۱	۷۶/۱۷	۱۰۰٪ بار کامل

از جدول (۲) مشخص است که نتایج الگوریتم MABC در سه نقطه ۲۵٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ بار به مقدار اندازه‌گیری شده، نزدیک است و فقط در ۵۰٪ بار، مقدار راندمان اندازه‌گیری به راندمان تخمینی در الگوریتم ABC نزدیک‌تر است.

برای بررسی سرعت الگوریتم‌ها در رسیدن به پاسخ بهینه، در شکل (۴) نمودار تابع هزینه برحسب تعداد تکرارها آورده شده است. چنانچه مشخص است، در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، الگوریتم پیشنهادی در عین همگرایی سریع‌تر، جوابی با تابع هدف کوچک‌تر (بهتر) به دست می‌دهد.

$$\text{fit}(x_n) = \begin{cases} \frac{1}{1 + f(x_n)} & f(x_n) \geq 0 \\ 1 + \text{abs}(f(x_n)) & f(x_n) < 0 \end{cases} \quad (16)$$

که در آن $f(x_n)$ مقدار تابع هدف زنبور نام است. احتمال انتخاب x_n توسط یک زنبور تماشاگر (P_n) با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$P_n = \frac{\text{fit}(x_n)}{\sum_{k=1}^{SN} \text{fit}(x_k)} \quad (17)$$

پس از آنکه تمام زنبورهای تماشاگر با استفاده از قوانین فوق یکی از منابع غذایی به دست آمده در هر تکرار را انتخاب کردند، موقعیت منبع غذایی همسایه (موقعیت جدید) با استفاده از (۱۵) محاسبه شده و سپس میزان تناسب آن با معادله (۱۶) تعیین می‌شود. موقعیت‌های جدید پس از تولید و برآزش^۴، با موقعیت‌های قدیم مقایسه شده و اگر دارای کیفیت بهتری باشند (میزان تناسب بیشتر) جایگزین آن‌ها خواهند شد.

لازم به ذکر است که در مرحله زنبورهای پیشاهنگ، اگر زنبور کارگر به شرط خاتمه^{۱۵} رسیده باشد، تبدیل به زنبور پیشاهنگ شده و موقعیت آن زنبور پیشاهنگ، متروکه اعلام شده و موقعیتی جدید و کاملاً تصادفی بر اساس تابع هدف ایجاد می‌شود. اگر تعداد زنبورهای پیشاهنگ بیشتر از یک باشد فقط یکی از آن‌ها به عنوان زنبور پیشاهنگ انتخاب می‌شود [۲۷].

۷- الگوریتم ABC پیشنهادی

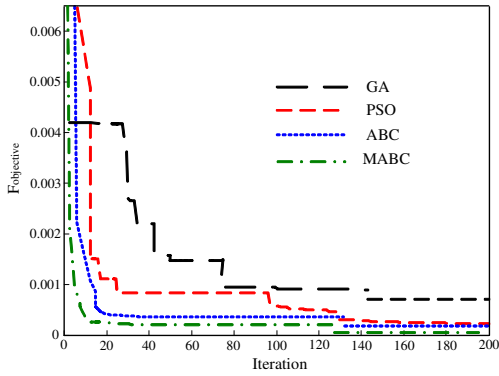
الگوریتم پیشنهادی (MABC) در این مقاله دو تغییر زیر نسبت به الگوریتم ABC کلاسیک دارد:

۱- انتخاب تصادفی منابع جدید توسط زنبور پیشاهنگ، موجب کم شدن کارآمدی الگوریتم می‌شود. چرا که برای زنبوری که به شرط خاتمه رسیده باشد یک موقعیت جدید انتخاب شده و این امکان وجود دارد که با اتمام تعداد تکرارها، فرصتی برای بهتر شدن موقعیت زنبور پیشاهنگ وجود نداشته باشد. در روش ارائه شده، موقعیت بهترین زنبوری که تاکنون به دست آمده (X_{best}) جایگزین موقعیت زنبور پیشاهنگ می‌شود. یعنی:

$$X_{scout} = X_{best} (1 + \text{rand}) \quad (18)$$

روشن است که استفاده از تعریف بالا برای زنبورهای پیشاهنگ به جستجوی بیشتری حول بهترین جوابی که تاکنون به دست آمده است (X_{best})، منجر می‌شود.

۲- اخیراً روش‌های زیادی برای اصلاح رابطه (۱۵) پیشنهاد شده‌اند. به خصوص در مرجع [۲۸] پیشنهاد شده که φ_{ni} در بازه $[SF - SF]$ انتخاب شود. که SF با استفاده از قاعده Rechenberg در طول جستجو تعیین می‌شود. اما در این مقاله برای تعیین SF، رابطه (۱۹) پیشنهاد می‌شود که به نوعی از الگوریتم PSO الهام گرفته شده است.



شکل (۴): تغییرات تابع هدف (۱۲) برحسب تعداد تکرارها
Fig (4): Convergence characteristics of various algorithms for objective function of Eq. (12)

۸-۲- استفاده از رابطه (۱۳) به عنوان تابع هدف

در ایجاد این تابع هدف از توان، ضریب توان و جریان ورودی استفاده شده است. در جدول (۴) نتایج حاصل از الگوریتم‌های مختلف جهت تخمین بازده آورده شده‌اند. جدول (۵) نیز خطای حاصل از محاسبه راندمان توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، میانگین خطای الگوریتم‌های ABC و MABC در این حالت نسبت به تابع هدف اول افزایش داشته اما هنگام استفاده از همین تابع هدف برای الگوریتم‌های PSO و GA، خطا کاهش یافته است. با این حال خطای روش پیشنهادی باز هم از سایر الگوریتم‌ها کمتر است.

در شکل (۵) نمودار تابع هزینه برحسب تعداد تکرارها آورده شده است. با وجود آن که نتایج الگوریتم ABC و الگوریتم PSO تقریباً یکسان‌اند، ولی الگوریتم ABC از همگرایی سریع‌تری برخوردار است و برای رسیدن به پاسخ بهینه، به تعداد تکرارهای کمتری نسبت به الگوریتم PSO نیاز دارد. همچنین نتایج شکل (۵) نشان از همگرایی سریع الگوریتم MABC و همگرایی کند GA دارد. زیرا در تعداد تکرار کم، الگوریتم GA نتایج چندانی خوب نبوده و برای کارایی بیشتر آن باید تعداد تکرارها را زیاد کرد [۱۴]. اما برای مقایسه بهتر، همه شرایط مساوی فرض شده است.

۸-۳- استفاده از رابطه (۱۴) به عنوان تابع هدف

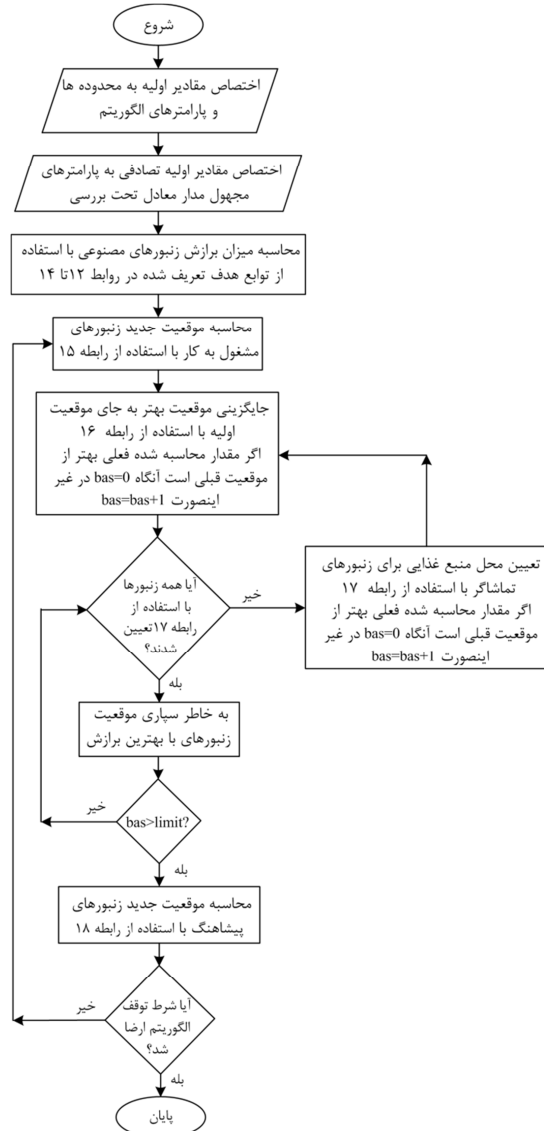
برای ایجاد تابع هدف در این بخش، فقط جریان و توان ورودی به کار گرفته شده است. نتایج حاصل از تخمین بازده در جدول (۶) نمایش داده شده است.

جدول (۴): نتایج حاصل از تخمین راندمان برای تابع هدف (۱۳)

Table (4): The results of efficiency estimation for objective function of Eq. (13)

مقدار واقعی	MABC	ABC	PSO	GA	میزان بار
۵۱/۷۰	۵۲/۲۴	۵۲/۷۷	۵۲/۶۸	۵۲/۰۷	۲۵٪ بار کامل
۶۶/۰۰	۶۷/۰۸	۶۷/۳۳	۶۷/۲۱	۶۹/۷۲	۵۰٪ بار کامل
۷۱/۳۶	۷۲/۷۸	۷۳/۰۹	۷۲/۸۶	۷۴/۵۹	۷۵٪ بار کامل
۷۳/۱۸	۷۵/۰۶	۷۵/۱۹	۷۵/۰۱	۷۶/۱۲	۱۰۰٪ بار کامل

بر اساس نتایج جدول (۳) می‌توان گفت که خطای تخمین راندمان در این تابع هدف نسبتاً زیاد است. با این وجود، نتایج به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی بهتر از سایر الگوریتم‌هاست.



شکل (۳): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

Fig (3): Flowchart of the proposed algorithm

جدول (۳): خطای حاصل از تخمین راندمان (برحسب درصد) برای تابع هدف (۱۲)

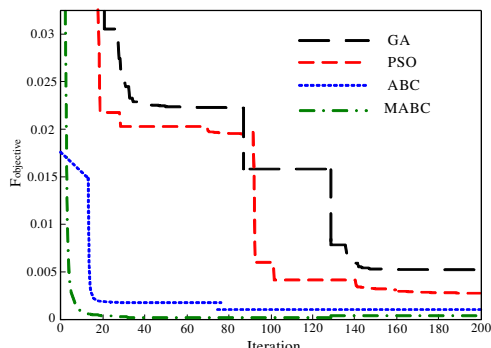
Table (3): The error of efficiency estimation for objective function of Eq. (12)

MABC	ABC	PSO	GA	میزان بار
۰/۹۳	۱/۶۶	۴/۲۹	۷/۸۲	۲۵٪ بار کامل
۱/۵۰	۰/۶۰	۲/۱۸	۵/۳۵	۵۰٪ بار کامل
۱/۰۶	۱/۴۰	۱/۵۶	۴/۴۳	۷۵٪ بار کامل
۰/۲۱	۰/۷۸	۱/۱۱	۴/۰۹	۱۰۰٪ بار کامل
۰/۹۲	۱/۱۱	۲/۲۸	۵/۴۲	میانگین خطا

جدول (۷): خطای حاصل از تخمین راندمان (برحسب درصد) برای تابع هدف (۱۴)

Table (7): The error of efficiency estimation for objective function of Eq. (14)

MABC	ABC	PSO	GA	میزان بار
۰/۴۸	۱/۶۴	۲/۰۹	۳/۳۷	۲۵٪ بار کامل
۰/۸۰	۰/۹۲	۱/۷	۲/۵۶	۵۰٪ بار کامل
۰/۳۱	۰/۵۲	۱/۶۸	۲/۳۴	۷۵٪ بار کامل
۰/۴۱	۰/۵۳	۱/۷۶	۲/۴۵	۱۰۰٪ بار کامل
۰/۵۰	۰/۹۱	۱/۸	۲/۶۸	میانگین خطا



شکل (۶): تغییرات تابع هدف (۱۴) برحسب تعداد تکرارها

Fig (6): Convergence characteristics of various algorithms for objective function of Eq. (14)

در بین الگوریتم‌های هوشمند نیز الگوریتم MABC از خطای کمتری در تخمین راندمان برخوردار است و تقریباً در تمامی نقاط با مقادیر واقعی برابر است. علاوه بر این، الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، کمترین مقدار تابع هزینه را نتیجه می‌دهد و بسیار سریع نیز همگرا می‌شود. بنابراین به کارگیری تابع هدف سوم (رابطه (۱۴)) به همراه الگوریتم MABC به عنوان یک روش مناسب برای تخمین راندمان موتورهای القایی معرفی می‌شود.

علاوه بر نتایج بسیار مناسبی که در تخمین راندمان حاصل شد، آزمایش DC (که معمولاً جهت تخمین مقاومت استاتور انجام می‌شود) حذف و مقاومت استاتور جزء پارامترهای تخمینی در نظر گرفته شده است. همچنین در کارهای تحقیقاتی گذشته [۱۶-۱۴]، تخمین راندمان برای موتورهایی با راکتانس استاتور و روتور برابر (کلاس A) انجام شده است؛ در حالی که در این مقاله این دو راکتانس متفاوت در نظر گرفته شده‌اند تا تخمین راندمان برای هر موتوری با هر کلاس عایقی قابل اجرا باشد.

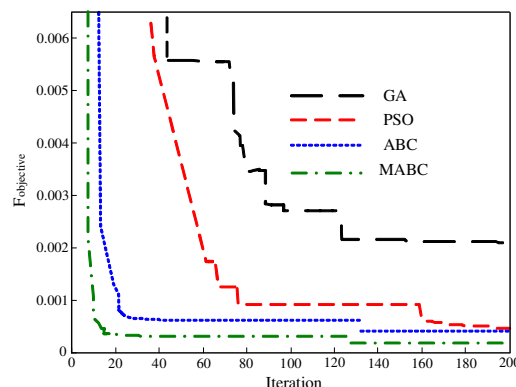
۱۰- جایگزینی موتورهای در حال کار با موتورهای پربازده

امروزه جایگزین نمودن موتورهای جدید که با عنوان موتورهای راندمان بالا در بازار شناخته می‌شوند بجای موتورهای استاندارد موجود، یکی از راهکارهایی است که توسط متخصصان مدیریت انرژی توصیه می‌گردد. اختلاف راندمان موتورهای جدید در مقایسه با موتورهای استاندارد موجود و افزایش روزافزون بهای انرژی، جایگزین نمودن این موتورها را

جدول (۵): خطای حاصل از تخمین راندمان (برحسب درصد) برای تابع هدف (۱۳)

Table (5): The error of efficiency estimation for objective function of Eq. (13)

MABC	ABC	PSO	GA	میزان بار
۱/۰۴	۲/۰۷	۱/۸۹	۰/۷۱	۲۵٪ بار کامل
۱/۶۳	۲/۰۲	۱/۸۳	۵/۶۴	۵۰٪ بار کامل
۱/۹۹	۲/۴۲	۲/۱۰	۴/۵۳	۷۵٪ بار کامل
۲/۵۷	۲/۷۵	۲/۵۰	۴/۰۲	۱۰۰٪ بار کامل
۱/۸۱	۲/۳۱	۲/۰۸	۳/۶۸	میانگین خطا



شکل (۵): تغییرات تابع هدف (۱۳) برحسب تعداد تکرارها

Fig (5): Convergence characteristics of various algorithms for objective function of Eq. (13)

جدول (۶): نتایج حاصل از تخمین راندمان برای تابع هدف (۱۴)

Table (6): The results of efficiency estimation for objective function of Eq. (14)

مقدار واقعی	MABC	ABC	PSO	GA	میزان بار
۵۱/۷۰	۵۱/۹۵	۵۲/۵۵	۵۲/۷۸	۵۳/۴۴	۲۵٪ بار کامل
۶۶/۰۰	۶۶/۵۳	۶۶/۶۱	۶۷/۱۲	۶۷/۶۹	۵۰٪ بار کامل
۷۱/۳۶	۷۱/۵۸	۷۱/۷۳	۷۲/۵۶	۷۳/۰۷	۷۵٪ بار کامل
۷۳/۱۸	۷۳/۴۸	۷۳/۵۷	۷۴/۴۷	۷۴/۹۷	۱۰۰٪ بار کامل

علاوه بر این، جدول (۷) مقدار خطای تخمین راندمان نسبت به مقدار واقعی با به کارگیری تابع هدف سوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطای ناشی از به کارگیری این تابع هدف در هر چهار الگوریتم بسیار کمتر از دو تابع قبلی است. شکل (۶) نیز نمودار تابع هدف برحسب تعداد تکرارها را نشان می‌دهد. مشخص است که الگوریتم MABC به کمترین مقدار تابع هزینه دست یافته و در عین حال خیلی سریع نیز به همگرایی می‌رسد.

۹- جمع‌بندی نتایج

نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم‌های مختلف توسط هر سه تابع هدف نشان می‌دهد که تابع هدف سوم (رابطه (۱۴)) با دقت و سرعت بیشتری به پاسخ بهینه منجر می‌شود. همان‌طور که در جدول ۶ دیده می‌شود، راندمان تخمینی توسط هر چهار الگوریتم بسیار به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک بوده و میزان خطای حاصل از تخمین راندمان در هر چهار الگوریتم در مقایسه با دو تابع هدف قبلی بسیار کمتر است.

موتور می‌شوند. با این وجود ۲۰ تا ۳۰ درصد از اضافه هزینه اولیه با کاهش هزینه‌های عملیاتی جبران می‌شود. عده زیادی موتورهای پربازده را بدون اینکه درصدد توجیه برگشت هزینه آن باشند، استفاده می‌کنند. در حالی که ابتدا باید هزینه بازگشت سرمایه محاسبه شده و در صورت مقرون به صرفه بودن، از این موتورها استفاده شود. لازمه محاسبه دقیق میزان بازگشت سرمایه، تخمین دقیق بازده موتور القایی در حال کار است که در این کار تحقیقاتی به آن پرداخته شد.

۱۰- نتیجه‌گیری

بیشترین میزان برق در مراکز صنعتی توسط موتورهای القایی مصرف می‌شود و با گذر عمر این موتورها، راندمان آن‌ها کاهش یافته و مصرف انرژی آن‌ها افزایش می‌یابد. یکی از بهترین روش‌ها جهت کاهش مصرف انرژی در موتورهای القایی، جایگزینی آن‌ها با یک موتور پربازده است. البته باید این تعویض به موقع باشد تا باعث اتلاف انرژی نشود. از این رو در این مقاله با استفاده از نسخه اصلاح شده الگوریتم زنبور عسل (MABC) و به کارگیری توابع هدف مختلف، ابتدا پارامترهای موتور القایی محاسبه شدند. سپس عمل تخمین بازده موتور توسط پارامترهای محاسبه شده، انجام شد. در انتها برای اثبات توانایی روش پیشنهادی، نتایج آن با الگوریتم‌های ABC کلاسیک، PSO و GA مقایسه شدند. نتایج حاصل از مقایسه نشان داد که تخمین راندمان با کمک الگوریتم MABC از خطای بسیار کمتری در قیاس با سایر روش‌ها برخوردار بوده و به مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک است. در عین حال، این الگوریتم بسیار سریع‌تر به پاسخ بهینه همگرا می‌شود. بنابراین با توجه به سرعت و دقت بالا، الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک روش مطمئن در زمینه تخمین دقیق بازده موتورهای القایی به کار گرفته شود. در انتها به عنوان یکی از کاربردهای مهم تخمین راندمان، صرفه‌جویی ناشی از جایگزینی موتورهای با راندمان بالا به جای موتورهای در حال بهره‌برداری، مطرح شد.

پی‌نوشت:

1. Intrusive
2. Non-Intrusive
3. Segregated Losses
4. Power Analyzer
5. Genetic Algorithm
6. Particle Swarm Optimization
7. Bacterial Foraging Algorithm
8. Artificial Bee Colony
9. Modified Artificial Bee Colony
10. High Efficiency
11. Employed Bees
12. Onlooker Bees
13. Scout Bees
14. Fitness
15. Limit

توجیه پذیر می‌نماید. جهت محاسبات صرفه جویی انرژی باید محاسبات صرفه جویی ناشی از این جایگزینی انجام شوند. برای این منظور ابتدا باید هزینه سالیانه انرژی مطابق با رابطه (۲۰) محاسبه شود که برای این کار راندمان تخمینی موتورها در بخش قبل مورد نیاز می‌باشد.

$$A = \frac{P_{out} L h_r C_e}{\eta} \quad (20)$$

در رابطه فوق داریم:

C_e : نرخ انرژی بر حسب کیلووات بر ساعت، h_r : مدت زمان کارکرد موتور بر حسب ساعت، L : درصد بار، P_{out} : توان خروجی موتور بر حسب کیلووات و η : راندمان موتور بر حسب درصد
میزان صرفه جویی هزینه سالیانه انرژی ناشی از جایگزینی یک موتور استاندارد با موتور راندمان بالا نیز از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود:

$$A_{saving} = A_e - A_{ee} = P_{out} L h_r C_e \left[\frac{100}{\eta_e} - \frac{100}{\eta_{ee}} \right] \quad (21)$$

که در آن:

η_e : راندمان موتور القایی استاندارد و η_{ee} : راندمان موتور القایی پربازده

راندمان موتور القایی استاندارد نوعی ۲hp در این مقاله با دقت خوبی توسط الگوریتم MABC تخمین زده شد و در بار کامل (η_e) مقدار ۷۳/۴۸ درصد برای آن به دست آمد. حال اگر فرض کنیم نرخ انرژی ۴۰ تومان باشد و راندمان موتور القایی پربازده (η_{ee}) برای توان خروجی ۱/۵ کیلووات، ۸۵ درصد در نظر گرفته شود، صرفه جویی حاصل از این جایگزینی در طی کارکرد ۴۸۰۰ ساعت در سال توسط رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

با جایگذاری مقادیر فوق در رابطه (۲۱)، میزان صرفه جویی در هزینه سالیانه انرژی برابر ۵۱۱۰۳ تومان به دست می‌آید؛ یعنی با جایگزینی موتور استاندارد در حال کار با موتور پربازده، سبب صرفه جویی به میزان ۵۱۱۰۳ تومان خواهد شد. حال اگر یارانه برق برداشته شود با هزینه انرژی ۳۰۰ تومان، این جایگزینی اثر خود را بهتر نشان خواهد داد. در این صورت میزان صرفه جویی انرژی معادل ۳۸۳۲۷۲ تومان خواهد بود. به عبارتی اگر هزینه خرید یک موتور القایی پربازده با توان ۱/۵ کیلووات، ۸۰۰۰۰۰ تومان باشد در طی تقریباً ۲ سال بازگشت سرمایه صورت خواهد گرفت.

سازندگان معمولاً موتورهای با طراحی استاندارد و قیمت تمام شده کمتر را عرضه می‌کنند. به خاطر رقابت شدید، این نوع موتورها بازده کمی دارند. آن‌ها ضریب قدرت پایین تری دارند، قابل تعمیر نبوده و نمی‌توان به راحتی سیم پیچ آن‌ها را مجدداً پیچید. در موتورهای پربازده، با استفاده از ورقه‌های استیل نازک تر در استاتور و روتور، استفاده از استیل با خواص الکترومغناطیسی بهتر، استفاده از فن‌های کوچک تر با بازده بیشتر و بهبود طراحی شکاف روتور، بازده افزایش یافته است. تمام این اصلاحات سبب افزایش مصرف مواد اولیه و در نتیجه افزایش هزینه مواد یا هزینه‌های ساخت و نهایتاً قیمت تمام شده

References

- [1] J.S. Hsu, J.D. Kueck, M. Olszewski, D.A. Casada, P. J. Otaduy, "Comparison of induction motor field efficiency evaluation methods", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, No. 1, pp. 117-125, Jan./Feb. 1998.
- [2] B. Lu, T.G. Habetler, R.G. Harley, "A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 42, No. 4, pp. 924-933, July/Aug. 2006.
- [3] C.S. Gajjar, J.M. Kinyua, M.A. Khan, P.S. Barendse, "Analysis of a non-intrusive efficiency estimation technique for induction machines compared to the IEEE 112B and IEC 34-2-1 standards", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 51, No. 6, pp. 4541-4553, 2006.
- [4] M. Chirindo, M. A. Khan, P. S. Barendse, "Considerations for non-intrusive efficiency estimation of inverter-fed induction motors", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Early Access, Published Online, 2015.
- [5] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112, IEEE power Engineering society, New York, 1996.
- [6] B. Lu, T.G. Habetler, R.G. Harley, "A nonintrusive and in-service motor-efficiency estimation method using air-gap torque with considerations of condition monitoring", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 44, No. 6, pp. 1666-1674, 2008.
- [7] Y. El-Ibiary, "An accurate low cost method for determining electric motor's efficiency for the purpose of plant energy management", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 39, No. 4, pp. 12-19, 2003.
- [8] A.G. Siraki, P. Pillay, P. Angers, "Full load efficiency estimation of refurbished induction machines from no-load testing," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 28, No. 2, pp. 317-326, 2013.
- [9] M. Al-Badri, P. Pillay, P. Angers, "A novel algorithm for estimating refurbished three-phase induction motors efficiency using only no-load tests", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 30, No. 2, pp. 615-625, 2015.
- [10] V. Dlamini, R. Naidoo, M. Manyage, "A non-intrusive method for estimating motor efficiency using vibration signature analysis", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 45, No. 1, pp. 384-390, 2013.
- [11] J. R. Holmquist, M. A. Rooks, "Richter practical approach for determining motor efficiency in the field using calculated and measured values", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 40, No. 1, pp. 242-248, 2004.
- [12] T. Phumiphak, C. Chat-Uthai, "Estimation of induction motor parameters based on field test coupled with genetic algorithm," Proceedings of the IEEE/ICPST, pp. 1199- 1203, Kunming, China, China, Oct. 2002.
- [13] A. Charette, J. Xu, A. Ba-Razzouk, P. Pillay, V. Rajagopalan, "The use of the genetic algorithm for in-situ efficiency measurement of an induction motor", Proceedings of the IEEE/PESW, pp. 392-397, Singapore, Singapore, Jan. 2000.
- [14] M. Cunkas, T. Sag, "Efficiency determination of induction motors using multi-objective evolutionary algorithms", Advances in Engineering Software, Vol. 41, No. 2, pp. 255-261, 2010.
- [15] P. Nangsue, P. Pillay, S. E. Conry, "Evolutionary algorithms for induction motor parameter determination", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 447-453, 1999.
- [16] B. Lu, C. Wenping, I. French, K. J. Bradley, T. G. Habetler, "Non-intrusive efficiency determination of in-service induction motors using genetic algorithm and air-gap torque methods", Proceedings of the IEEE/IAS, pp. 1186-1192, New Orleans, LA, USA, Sep. 2007.
- [17] M. Al-Badri, P. Pillay, P. Angers, "A novel in situ efficiency estimation algorithm for three-phase IM using GA, IEEE method F1 calculations, and pretested motor data", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 30, No. 3, pp. 1092-1102, 2015.
- [18] I. Kostov, V. Vasil Spasov, V. Rangelova, "Application of genetic algorithm for determining the parameters of induction motors", Technical Gazette, Vol. 16, No. 2, pp. 49-53, 2009.
- [19] V.P. Sakthivel, S. Subramanian, "On-site efficiency evaluation of three-phase induction motor based on particle swarm optimization", Energy, Vol. 36, No. 3, pp. 1713- 1720, 2011.
- [20] C.P. Salomon, W.C. Sant'Ana, L.E. Borges da Silva, G. Lambert-Torres, E.L. Bonaldi, L.E.L. Oliveira, J.G.B. Silva, "Motor efficiency evaluation using a new concept of stator resistance", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 64, No. 11, pp. 2908-2917, 2015.
- [21] V.P. Sakthivel, R. Bhuvaneswari, S. Subramanian, "Non-intrusive efficiency estimation method for energy auditing and management of in service induction motor using bacterial foraging algorithm", IET Electric Power Applications, Vol. 4, No. 8, pp. 579-590, 2010.
- [22] V.S. Santos, P.R.V. Felipe, J.R.G. Sarduy, N.A. Lemozy, A. Jurado, E.C. Quispe, "Procedure for determining induction motor efficiency working under distorted grid voltages", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 30, No. 1, pp. 331-339, 2015.
- [23] V.S. Santos, P.V. Felipe, J.G., Sarduy, "Bacterial foraging algorithm application for induction motor field efficiency estimation under unbalanced voltages", Measurement, Vol. 46, No. 7, pp. 2232-2237, 2013.
- [24] V. P. Sakthivel, R. Bhuvaneswari, S. Subramanian, "An accurate and economical approach for induction motor field efficiency estimation using bacterial foraging algorithm", Measurement, Vol. 44, No. 4, pp. 674-684, 2011.
- [25] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, Technical report", TR06, Turkey, Computer Engineering Department University, 2005.

- [26] D. Karaboga, B. Akay, "A Comparative Study of Artificial Bee Colony Algorithm", Appl Math Comput, Vol. 214, No.1, pp.108-132, 2009.
- [27] D. Karagoba, B. Basturk, "On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm", Applied Soft Computing, Vol. 8, No.1, pp. 687-697, 2008.
- [28] D. Karaboga, B. Akay, "A modified artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization", Inform Sciences, Vol. 192, pp. 120- 142, 2012.