

طراحی بهینه در تجدید سیم‌بندی استاتور موتور القایی سه‌فاز HV برای رسیدن به ولتاژ مجاز جدید به کمک الگوریتم ژنتیک

محمود یوسفیان*

مدرس دانشگاه فنی و حرفه‌ای، دانشکده شهید منتظری مشهد، خراسان رضوی

حبیب رجبی مشهدی

استاد گروه برق، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، خراسان رضوی

حسین ابوترابی زارچی

استادیار گروه برق، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، خراسان رضوی

تاریخ پذیرش نهایی: ۹۲/۱۲/۱۷

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۱۰/۴

چکیده

در این مقاله، فرایند طراحی بهینه در تجدید سیم‌بندی استاتور موتورهای^۱ برای رسیدن به ولتاژ مجاز جدید با استفاده از الگوریتم ژنتیک در کاربردی جدید ارائه می‌شود. امروزه بیش از ۹۰٪ موتورهای الکتریکی صنایع، انواع موتورهای سه‌فاز القایی بوده که همچنان در حال توسعه است. از این رو بهینه‌سازی این سیستم‌ها به‌عنوان پرمصرف‌ترین بار الکتریکی حایز اهمیت است.

وجود معادلات غیرخطی با متغیرهای مختلط، ناپیوستگی فضای حل، تنش‌های مغناطیسی و محدودیت‌های حرارتی، باعث شده در طراحی این موتورها به روش‌های کلاسیک، اغلب از مدل‌های خطی‌سازی شده استفاده شود که منجر کاهش دقت در طراحی می‌گردد. عدم نیاز به محاسبات پیچیده ریاضی از قبیل گرادیان و هسیان، مزیت مهم الگوریتم ژنتیک نسبت به تکنیک‌های^۲ NLP است. به همین جهت الگوریتم ژنتیک یک ابزار مناسب در طراحی بهینه یک موتور القایی است.

گاهی به‌علت تغییر ترانسفورماتورهای موجود در پست یک کارخانه صنعتی و به‌طور کلی به‌دلیل تغییر ولتاژ، تبدیل ولتاژ ورودی الکتروموتورهای موجود در واحد صنعتی نیاز است. در این حالت با فرض سالم بودن سیم‌پیچی روتور و هسته‌های استاتور و روتور الکتروموتور مذکور، به‌شرط رعایت استانداردهای بین‌المللی، تجدید سیم‌بندی استاتور مجاز است. شبیه‌سازی روی یک موتور القایی سه‌فاز ۲ قطب، ۵۰ هرتز، و ۲۶۰ کیلووات برای تبدیل ولتاژ ۶۶۰۰ به ۳۳۰۰ ولت انجام شده است. فرایند بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک برای حداقل‌سازی تابع هزینه انجام شده که در این مقاله حداقل‌سازی تابع هزینه به‌همراه نتایج شبیه‌سازی آورده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک در مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار طراحی ماشین SMART، حاکی از کاهش وزن نهایی سیم‌پیچی و کاهش هزینه است.

واژه‌های کلیدی

الگوریتم ژنتیک، تابع هزینه، کروموزوم، موتورهای القایی سه‌فاز HV و SMART.

* نویسنده مسوول مکاتبات: mahmoud.yousefian@yahoo.com

۱. مقدمه

با رشد صنایع، استفاده از انواع موتورهای القایی سه فاز توسعه می‌یابد. از این رو استفاده از تکنیک‌های پیشرفته جهت بهینه‌سازی این سیستم‌ها که یکی از پرمصرف‌ترین بارهای الکتریکی محسوب می‌شوند، حایز اهمیت است (Andreas, 1993).

استفاده از مدل‌های خطی‌سازی شده این سیستم‌ها باعث کاهش دقت در طراحی بهینه می‌گردد. امروزه الگوریتم ژنتیک یک ابزار مناسب جهت استفاده در طراحی بهینه یک موتور سه فاز القایی است. الگوریتم ژنتیک برای حل مساله نیازمند محاسبات پیچیده ریاضی نبوده و با سرعت مناسبی قادر است نقطه بهینه سراسری یا نزدیک به آن را بیابد. ضمن اینکه برای شروع الگوریتم لازم نیست حتماً مقادیر اولیه به مقادیر واقعی نزدیک باشند. در صنعت، موتورهای الکتریکی سه فاز القایی فشار قوی زیادی وجود دارند که در اثر مشکلات عایقی یا بر اثر یک خطا، سیم‌پیچی استاتور آن آسیب دیده و می‌سوزد. در چنین مواردی با توجه به اختلاف زیاد قیمت بین تجدید سیم‌بندی یا خرید الکتروموتور جدید، به فرض سالم بودن هسته، اکثر کارفرمایان تجدید سیم‌بندی را انتخاب می‌کنند.

برای مثال هزینه تجدید سیم‌بندی استاتور یک موتور القایی ۶ کیلوولت، ۸۰۰ کیلووات کمتر از ده درصد هزینه خرید الکتروموتور جدید با همان مشخصات است. تجدید سیم‌بندی از نظر علمی به شرط رعایت استاندارد، مجاز بوده و در کشورهای زیادی اجرا می‌شود. در این حالت فرض بر این است که سایر قسمت‌های الکتروموتور از قبیل سیم‌پیچی روتور و هسته‌های استاتور و روتور آسیب ندیده و سالم هستند.

تعویض ترانسفورماتورهای پست یک کارخانه صنعتی با ولتاژ متفاوت و به طور کلی اعمال ولتاژ مجاز دیگری به موتور، عامل دیگری جهت تجدید سیم‌بندی استاتور موتورهای الکتریکی است. با توجه به توسعه تکنولوژی‌های جدید در تولید موتورهای الکتریکی، بهتر است هنگام تجدید سیم‌بندی از آنها بهره گرفت. در این صورت می‌توان با طراحی مناسب‌تر و بهینه سیستم عایق کاری، و تغییرات جزئی در پارامترهای مختلف موثر در تجدید سیم‌بندی استاتور، نسبت به عملکرد مناسب آن اطمینان حاصل نمود. اگرچه از الگوریتم ژنتیک در طراحی موتورهای القایی استفاده شده است (Benoudijit et al., 2010; Bianchi & Bolognani, 1998; Cunkas & Akkaya, 2006)، در این مقاله به عنوان یک روش کاربردی جدید در صنعت، هدف ما طراحی بهینه سیم‌بندی استاتور با توجه به تغییر ولتاژ ورودی الکتروموتور است که پژوهشی در این زمینه مشاهده

نمی‌شود. در این حالت سایر مشخصات موتور از قبیل شکل هندسی شیارها و ... مفروض است. بهینه‌سازی برای حداقل‌سازی تابع هزینه، حداقل‌سازی تلفات، حداکثرسازی گشتاور بار کامل و بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند انجام شود. در این مقاله حداقل‌سازی تابع هزینه برای طراحی بهینه در تجدید سیم‌بندی استاتور یک موتور القایی سه فاز دو قطب، ۵۰ هرتز، و ۲۶۰ کیلووات برای تبدیل ولتاژ ۶۶۰۰ ولت به ۳۳۰۰ ولت با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد پژوهش قرار گرفته است.

نتایج شبیه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک و نتایج حاصل از روش LP با استفاده از نرم‌افزار صنعتی SMART، به دست آمده که در ادامه، فرایند اجرای آن توضیح داده می‌شود.

۲. روش پیشنهادی طراحی بهینه با الگوریتم ژنتیک

در این بخش فرایند استفاده از الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه سیم‌بندی استاتور الکتروموتور مذکور بیان می‌شود.

۲-۱. تعریف متغیرهای کنترلی

- تعداد دور سیم‌بندی هر فاز استاتور

تغییر ولتاژ اعمال شده به استاتور تاثیر مستقیم در تغییر تعداد دور سیم‌پیچی استاتور در هر فاز دارد. تجربه نشان می‌دهد در موتورهای سه فاز القایی HV صنعتی مقدار آن بین ۶۰ تا ۳۰۰ می‌باشد، مقدار اولیه را ۸۰ و متغیر کنترلی x_1 را برابر با تعداد دور سیم‌بندی هر فاز در نظر می‌گیریم:

$$x_1 = T_{ph_s} \quad 1$$

- چگالی شار متوسط فاصله هوایی

مقدار متوسط چگالی شار در موتورهای سه فاز القایی صنعتی بین ۰/۴ تا ۰/۹ تسلا است. مقدار اولیه را ۰/۵ تسلا و متغیر کنترلی x_2 را برابر با چگالی شار متوسط فاصله هوایی در نظر می‌گیریم:

$$x_2 = \bar{B}_g \quad 2$$

- چگالی جریان هادی‌های استاتور

در موتورهای سه فاز القایی HV صنعتی مقدار چگالی جریان هادی‌های استاتور بین ۱/۸ تا ۴/۸ آمپر بر میلی‌متر مربع است. مقدار اولیه را ۲ آمپر بر میلی‌متر مربع و متغیر کنترلی x_3 را برابر چگالی جریان هادی‌های استاتور در نظر می‌گیریم:

$$x_3 = J_{cu_s} \quad 3$$

- بهینه‌سازی چندهدفه.

اگر هدف بهینه‌سازی هر یک از توابع هزینه، تلفات و گشتاور به تنهایی باشد، همان تابع مربوطه را به‌عنوان تابع هدف انتخاب می‌کنیم.

در بهینه‌سازی گشتاور چون ماکزیمم‌سازی گشتاور نامی اهمیت دارد، تابع $f(x) = \frac{1}{T_{FL}}$ را مینیمم می‌کنیم.

چنانچه بهینه‌سازی همزمان هر سه تابع هدف فوق مطرح باشد، در این صورت یک نوع بهینه‌سازی چندهدفه محسوب می‌شود.

در سال‌های اخیر یکی از الگوریتم‌های شاخص و پرکاربرد در زمینه بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب یا NSGA است.

نسخه اول این الگوریتم در سال ۱۹۹۵ ارایه شد. به‌علت حساسیت نسبتاً زیاد جواب‌های الگوریتم NSGA به پارامترهای اشتراک برانزدگی و سایر پارامترها، معرفی‌کنندگان این الگوریتم، در سال ۲۰۰۲ نسخه دوم آن را با نام NSGA-II ارایه نمودند (Deb et al., 2002).

به‌دلیل کارایی بالایی که NSGA-II دارد، می‌توان آن را الگوی شکل‌گیری بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه هوشمند دانست (Tomoiaga et al., 2013; Alsofyani et al., 2014).

جواب‌های نامغلوب به‌دست آمده از حل مساله بهینه‌سازی چندهدفه، غالباً به‌نام جبهه پارتو شناخته می‌شوند.

با استفاده از روش ضرایب وزنی و با تعریف زیر می‌توان مساله بهینه‌سازی فوق را حل نمود:

$$\begin{cases} \min f(x) = \omega_1 \cdot f_1(x) + \omega_2 \cdot f_2(x) + \omega_3 \cdot f_3(x) \\ \sum_{i=1}^3 \omega_i = 1, f_1(x) = C_{total}, f_2(x) = \Delta P, f_3(x) = \frac{1}{T_{FL}} \end{cases} \quad 4$$

که در آن $f_1(x)$ تابع هزینه، $f_2(x)$ تابع تلفات و $f_3(x)$ تابع معکوس گشتاور بار کامل است.

با محاسبه جبهه پرتو می‌توان طرح بهینه را انتخاب نمود. همچنین می‌توان با توجه به اهمیت هر کدام از توابع هزینه، تلفات و گشتاور بار نامی، وزن‌های ω_1 ، ω_2 و ω_3 را مشخص نموده و مساله بهینه‌سازی را به‌صورت تک‌هدفه حل نمود. در این صورت مقادیر ω_1 ، ω_2 و ω_3 به ترتیب برای $\omega_1 = 0/3$ ، $\omega_2 = 0/4$ و $\omega_3 = 0/3$ انتخاب مناسبی خواهد بود.

با محاسبه سه متغیر اصلی فوق، سایر متغیرهای وابسته (متغیرهای x_4 تا x_{11} در جدول ۱) محاسبه می‌شوند (Deshpande, 1990). یادآوری می‌گردد برخی از پارامترهای مورد نیاز در طراحی مانند ابعاد هندسی شیار و طول فاصله هوایی ثابت و مشخص‌اند.

۲-۲. محدودیت‌های طراحی

محدودیت‌های طراحی برای موتور القایی سه‌فاز صنعتی HV مورد بحث، در جدول ۱ نشان داده شده است (Raghuram & Shashikala, 2013; Krishnamoorthy & Dharmalingam, 2009; Sivaraju et al., 2012).

جدول ۱. محدودیت‌های طراحی

نام پارامتر	نماد	قید نامساوی
تعداد دور در هر فاز	T_{phs}	$60 \leq x_1 \leq 300$
چگالی شار متوسط gap	\bar{B}_g	$0.4 \leq x_2 \leq 0.9$
چگالی جریان هادی‌ها	Jcu_s	$1.8 \leq x_3 \leq 4.8$
لغزش بار نامی	S_{FL}	$x_4 \leq 0.02$
چگالی فلوی طوقه استاتور	B_{sy}	$x_5 \leq 1.4$
چگالی فلوی طوقه روتور	B_{ry}	$x_6 \leq 1.4$
چگالی فلوی دندانه استاتور	B_{st}	$x_7 \leq 1.8$
نسبت جریان راه‌اندازی به جریان نامی	$\frac{I_{st}}{I_n}$	$x_8 \leq 7$
نسبت گشتاور ماکزیمم به گشتاور نامی	$\frac{T_{max}}{T_n}$	$x_9 \geq 1.9$
ضریب قدرت بار نامی	$\cos \varphi_n$	$x_{10} \geq 0.82$
ضریب بهره بار نامی	η_n	$x_{11} \geq 0.9$

حال با توجه به محدودیت‌های طراحی فوق می‌توان توابع محدودیت را نوشت. این توابع در جدول ۲ داده شده است.

جدول ۲. توابع محدودیت

$g_1(x) = x_1 - 300 \leq 0$	$g_8(x) = x_5 - 1.4 \leq 0$
$g_2(x) = 60 - x_1 \leq 0$	$g_9(x) = x_6 - 1.4 \leq 0$
$g_3(x) = x_2 - 0.9 \leq 0$	$g_{10}(x) = x_7 - 1.8 \leq 0$
$g_4(x) = 0.4 - x_2 \leq 0$	$g_{11}(x) = x_8 - 7 \leq 0$
$g_5(x) = x_3 - 4.8 \leq 0$	$g_{12}(x) = 1.9 - x_9 \leq 0$
$g_6(x) = 1.8 - x_3 \leq 0$	$g_{13}(x) = 0.82 - x_{10} \leq 0$
$g_7(x) = x_4 - 0.02 \leq 0$	$g_{14}(x) = 0.9 - x_{11} \leq 0$

۳-۲. تابع هدف

تابع هدف را می‌توان یکی از موارد زیر در نظر گرفت:

- حداقل‌سازی تابع هزینه؛

- حداقل‌سازی تلفات (ماکزیمم شدن راندمان)؛

- حداکثر‌سازی گشتاور بار کامل؛

w_{cus} : وزن مس به کار رفته در سیم‌بندی استاتور (kg)

cu_{cost} : هزینه یک کیلوگرم مس (\$/kg)

k_1 : ضریب دشواری ساخت سیم

C_{1kg} : هزینه ساخت و نوارزنی یک کیلوگرم سیم به مقطع ۳۰ میلی‌متر مربع (\$/kg)

C_{CONST} : هزینه‌های ثابت (\$/kg)

در واقع k_1 ضریب افزایش هزینه به علت سخت‌تر شدن ساخت سیم می‌باشد که مقدار آن را می‌توان از رابطه ۶ انتخاب کرد.

$$k_1 = \begin{cases} 1 & A_{cu} = 30 \text{ mm}^2 \\ 1.04 & 30 > A_{cu} \geq 25 \text{ mm}^2 \\ 1.07 & 25 > A_{cu} \geq 20 \text{ mm}^2 \\ 1.1 & 20 > A_{cu} \geq 15 \text{ mm}^2 \\ 1.12 & A_{cu} < 15 \text{ mm}^2 \end{cases} \quad \epsilon$$

وزن مس به کار رفته در سیم‌بندی استاتور برابر است با:

$$w_{cus} = v_{cus} \cdot \rho_{cus} \quad \gamma$$

که در آن داریم:

w_{cus} : وزن مس به کار رفته در سیم‌بندی استاتور (kg)

v_{cus} : حجم مس به کار رفته در سیم‌بندی استاتور (m^3)

ρ_{cus} : جرم حجمی مس (kg/m^3)

و v_{cus} از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v_{cus} = 2 \times 1.5 (A_{cu1} \cdot L_s \cdot Z_s \cdot Z_{st1}) \\ = 2 \times 1.5 \left(\frac{A_{cus} \cdot T_{phs}}{2P \cdot q} \cdot L_s \cdot Z_s \right) \quad \delta$$

که در آن داریم:

A_{cus} : سطح مقطع هادی‌های استاتور (m^2)

T_{phs} : تعداد دور سیم‌پیچی استاتور در هر فاز

L_s : طول شیار استاتور (m)

Z_s : تعداد شیارهای استاتور

$2P$: تعداد قطب‌های استاتور

q : تعداد شیار در قطب در فاز

ملاحظه می‌شود در بهینه‌سازی تابع هزینه فوق، متغیرهای تاثیرگذار، سطح مقطع هادی و تعداد دور هر فاز می‌باشد.

۴-۲. روند اجرای الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک ابزار قدرتمندی مبتنی بر جست‌وجوی تصادفی و برگرفته از تئوری تکامل است. در هر نسل از این الگوریتم، موجودات مصنوعی جدیدی شامل بهترین افراد نسل گذشته تولید و مقدار

در این مقاله چون فقط تغییرات در طراحی سیم‌بندی استاتور برای رسیدن به ولتاژ مجاز جدید مطرح است، تابع هدف را حداقل‌سازی تابع هزینه در نظر می‌گیریم.

۱-۳-۲. حداقل‌سازی تابع هزینه

همه هزینه‌های مواد مصرفی در موتور الکتریکی مذکور، به جز هزینه‌های مربوط به سیم‌بندی استاتور معلوم است. بنابراین حداقل‌سازی کل هزینه‌های تجدید سیم‌بندی استاتور هدف بهینه‌سازی خواهد بود. این هزینه‌ها شامل هزینه مس استفاده شده، ساخت سیم با ابعاد مورد نیاز، آنیل کردن سیم‌ها، عایق روی سیم، کوئل‌سازی، جوشکاری لیدها و سرسیم‌های خروجی و عایق‌کاری آن، عایق‌کاری اصلی کوئل‌ها، عایق‌کاری نهایی با سیستم R.R یا VPI^۴ و هزینه‌های اضافی مانند فیبرهای کف، میانی و نوار نیمه‌هادی است.

تغییر طراحی سیم‌بندی با توجه به تغییر ولتاژ، در تغییر برخی از هزینه‌ها بی‌تاثیر است و می‌توانیم هزینه‌های آنیل کردن، عایق‌کاری نهایی، جوشکاری لیدها، سرسیم‌های خروجی، عایق‌کاری آن، کوئل‌سازی و هزینه‌های اضافی را ثابت در نظر بگیریم. همچنین عایق‌کاری اصلی هر کوئل به ولتاژ اعمال شده به استاتور وابسته است. مثلاً در ولتاژ ۶۰۰۰ ولت می‌توان از هر طرف کوئل به میزان ۱/۲ میلی‌متر از عایق مناسب سامیکاپور استفاده نمود. از این رو برای طراحی با ولتاژ معین، آن را ثابت در نظر می‌گیریم.

از طرفی هر چقدر ابعاد سیم در یک طرح مشخص کمتر شود، هزینه ساخت سیم با ابعاد مناسب و هزینه عایق‌کاری روی سیم افزایش می‌یابد. مجموع هزینه ساخت سیم با ابعاد مورد نیاز و عایق روی سیم را می‌توان برای هر کیلوگرم مس و در طرح‌های ابعادی سیم تخت مورد نیاز، متفاوت در نظر گرفت. با یک تقریب مناسب می‌توان هزینه عایق روی سیم و هزینه ساخت سیم با ابعاد مورد نیاز را به مقطع سیم تخت وابسته نمود.

در یک طرح مشخص با کاهش مقطع سیم تخت، آرایه سیم تغییر نموده و یا اینکه تعداد هادی‌های موازی جریان افزایش می‌یابد. در این صورت می‌توان گفت هزینه افزایش می‌یابد.

با توجه به توضیحات فوق رابطه زیر را تعریف می‌کنیم:

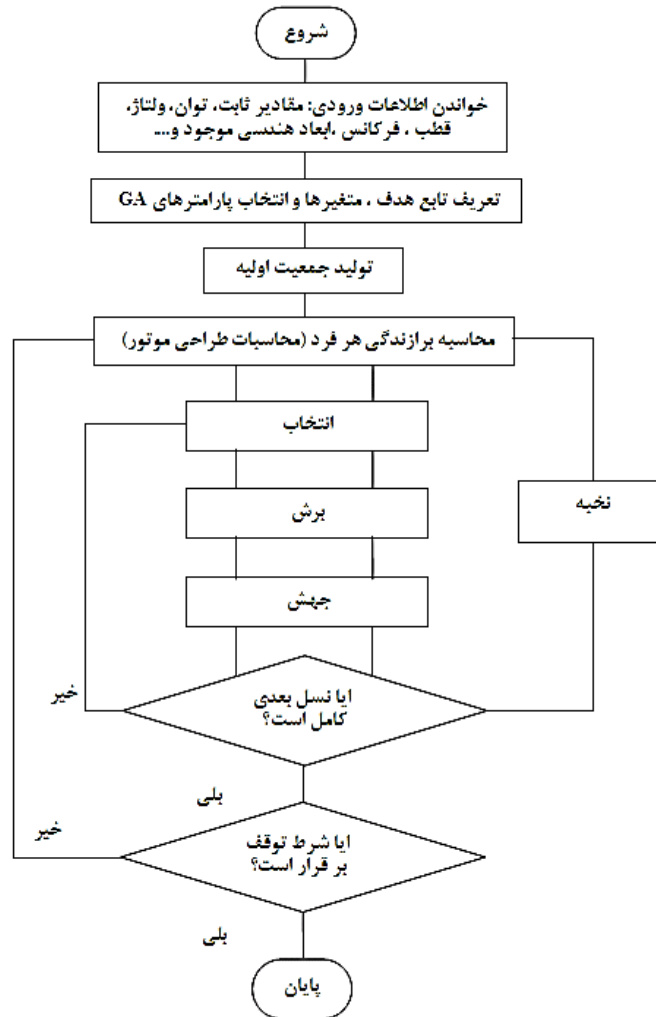
$$C_{total} = w_{cus}(cu_{cost} + k_1 \cdot C_{1kg} + C_{CONST}) \quad \delta$$

که در آن داریم:

C_{total} : کل هزینه تجدید سیم‌بندی استاتور (\$)

می‌رسد. پس از محاسبه بهترین جواب‌ها، طراحی بهینه شده و GA (Genetic Algorithm) با در نظر گرفتن تمامی قیود و محدودیت‌ها به یک طرح مناسب با حداقل هزینه، همگرا شده و الگوریتم متوقف می‌شود. در شکل ۱، مراحل عملکرد GA جهت طراحی بهینه موتور الکتریکی مذکور نشان داده شده است (Uler et al., 1995; Gen & Cheng, 2000; Haupt & Haupt, 2004).

برازندگی جدیدی به عنوان معیار بهبود کیفی آنها، به بوته آزمایش گذاشته می‌شود. سادگی و عدم نیاز به اطلاعات قبلی، از ویژگی‌های مهم این الگوریتم است. طراحی براساس بهینه کردن تابع برازندگی انجام می‌شود. ابتدا الگوریتم، جمعیت مناسبی از تمام فضای جست‌وجو گرد هم آورده و به هر فرد جمعیت یک مقدار برازندگی اختصاص می‌دهد. سپس برای تولید جمعیت جدید از عملگرهای تکثیر، ترکیب و جهش استفاده کرده و در نهایت به جمعیت مطلوب



شکل ۱. روند اجرای الگوریتم ژنتیک

مقاله از single point crossover با احتمال $\rho_c = 0.7$ استفاده شده است.

- عملگر **Mutation**: جهش درواقع یک نوع تغییرات ژنتیکی است. یعنی یک تغییر تصادفی از ژن‌ها طی فرایند تکامل یک کروموزوم از یک نسل به نسل دیگر.

- عملگر **Selection**: افراد با توجه به میزان برازندگی خود انتخاب می‌شوند. در این مقاله از احتمال انتخاب به روش انتخاب چرخ گردان^۵ به فرم زیر می‌شود (Cunkas & Akkaya, 2006):

$$p_j = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{14} f_j} \quad ۹$$

- عملگر **Crossover**: قدرتمندترین اپراتور الگوریتم ژنتیک عملگر برش می‌باشد که معمول‌ترین آن برش تک‌نقطه‌ای است. در این

$$fitness = \min f'(x) \\ = \min [f(x) + P(g_j(x), r)] \quad , \quad j=1,2,3, \dots, 14 \quad ۱۲$$

$$P(g_j(x), r) = \sum_{j=1}^{14} r_j [\max(0, g_j)] \quad ۱۳$$

که در آن ضریب پناستی قید زام و $g_j(x)$ تابع قید زام است. هنگامی که قیدهای نامساوی برقرار و ارضاء شوند، تابع جریمه غیرفعال می‌شود. در واقع جست‌وجوی بهینه در ناحیه‌شدنی تلاش می‌کند تا جریمه به خاطر عدم رعایت قیود را به حداقل برساند، در این صورت بهینه‌سازی با ارضاء محدودیت‌ها در ناحیه‌شدنی به بهترین راه‌حل منجر خواهد شد. نقض قیدها تخلف محسوب شده و در تابع جریمه لحاظ می‌شود.

اگر تابع جریمه صفر شود $f(x)$ برابر با $f'(x)$ خواهد شد و هیچ جریمه‌ای در ارتباط با این محدودیت‌ها وجود نخواهد داشت.

۲-۶. شرط توقف

برای در نظر گرفتن شرط توقف می‌توان حداکثر تعداد نسل تولید شده (G_{max}) و نیز عدم بهبود قابل توجه نتایج تا چند نسل جلوتر را در نظر گرفت.

۳. بررسی نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی روی یک الکتروموتور سه‌فاز القایی ۲ قطب ۵۰ هرتز ۲۶۰ کیلووات صنعتی برای تبدیل ولتاژ ۶۶۰۰ ولت به ۳۳۰۰ ولت انجام شده است.

نتایج خروجی روش LP با استفاده از نرم‌افزار SMART برای ولتاژ ۳۳۰۰ ولت در جدول ۴ نشان داده شده است. در این جدول مقادیر تعداد دور، سطح مقطع سیم، و وزن مس استفاده شده در سیم‌بندی به‌صورت مشخص نشان داده شده‌اند.

ملاحظه می‌شود تعداد دور سیم‌بندی هر فاز استاتور ($W1$) پس از تبدیل ولتاژ به ۳۳۰۰ ولت، ۱۴۴ دور شده، در حالی که با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقدار آن، ۱۴۰ دور به‌دست می‌آید.

در کدینگ باینری، معمولاً جهش تغییر یک بیت از صفر به یک و یا بالعکس می‌باشد. در اینجا از جهش معمولی یک بیتی با احتمال $\rho_m = 0.01$ استفاده می‌شود.

- جمعیت اولیه: جمعیت اولیه را ۱۰۰ در نظر گرفته‌ایم.
- تعداد حداکثر نسل: تعداد حداکثر نسل ۲۰۰ می‌باشد.
- نخبه‌گرایی: جهت بهبود همگرایی از عملگر Elitism استفاده می‌کنیم.
- Code کردن کروموزوم: برای code کردن متغیرهای طراحی، از جدول زیر استفاده می‌کنیم.

جدول ۳. کدینگ متغیرهای طراحی بهینه توسط GA

تعداد بیت	مقدار حداکثر متغیر	مقدار حداقل متغیر	تعریف متغیر طراحی
۹ BIT	۳۰۰	۶۰	$x_1 = T_{ph_s}$
۷ BIT	۰/۹	۰/۴	$x_2 = \bar{B}_g$
۹ BIT	۴/۸	۱/۸	$x_3 = J_{cu_s}$

برای تعریف یک کروموزوم به‌عنوان یک فرد از جمعیت در اینجا به تعداد ۲۵ بیت نیاز است.

$x_1 \rightarrow 9bit$	$x_2 \rightarrow 7bit$	$x_3 \rightarrow 9bit$
------------------------	------------------------	------------------------

- Decode کردن کروموزوم فوق: برای Decode کردن از رابطه زیر استفاده می‌کنیم.

$$\begin{cases} x_1 \longrightarrow x_1^{bin} \quad TO \quad x_1^{dec} \\ x_2 \longrightarrow x_2^{bin} \quad TO \quad x_2^{dec}/100 \\ x_3 \longrightarrow x_3^{bin} \quad TO \quad x_3^{dec}/100 \end{cases} \quad ۱۰$$

۲-۵. محاسبه fitness

با توجه به تابع هدف که حداقل‌سازی هزینه است، fitness بدون در نظر گرفتن قیود به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$fitness = \min f(x) \\ = \min C_{total} \\ = \min w_{cus}(cu_{cost} + k_1 \cdot C_{1kg} + C_{const}) \quad ۱۱$$

در محاسبه fitness از توابع محدودیت که در بخش ۲-۲ معرفی شد به‌صورت یک تابع جریمه استفاده شده و در روابط زیر نشان داده می‌شود. ضریب تابع جریمه برای هر یک از توابع جریمه بسته به اهمیت قید، در نظر گرفته شده و سپس پارامترهای طراحی موتور محاسبه می‌شوند (Cunkas & Akkaya, 2006; Raghuram, 2013).

جدول ۵. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش LP با نرم افزار SMART برای تبدیل به ولتاژ ۳۳۰۰ ولت

T_{phs}	A_{cus}	w_{cus}	C_{total}
تعداد دور	سطح مقطع سیم	وزن کل	هزینه کل
سیم پیچی هر فاز استاتور	مورد نیاز سیم پیچی استاتور (mm^2)	سیم پیچی استاتور (kg)	سیم پیچی استاتور (\$)
۱۴۴	۱۴/۰۸	۱۱۷	۲۰۴۰/۴۸

جدول ۶. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای تبدیل به ولتاژ ۳۳۰۰ ولت

T_{phs}	A_{cus}	w_{cus}	C_{total}
تعداد دور	سطح مقطع سیم	وزن کل	هزینه کل
سیم پیچی هر فاز استاتور	مورد نیاز سیم پیچی استاتور (mm^2)	سیم پیچی استاتور (kg)	سیم پیچی استاتور (\$)
۱۴۰	۱۳/۸۰	۱۱۵	۲۰۰۵/۶

۴. نتیجه گیری

در این مقاله فرایند بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک برای حداقل سازی تابع هزینه در تبدیل ولتاژ ۶۶۰۰ به ۳۳۰۰ ولت، را برای یک موتور الکتریکی سه فاز القایی ۲ قطب، ۵۰ هرتز، و ۲۶۰ کیلووات بررسی نمودیم. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک در مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش LP نشان می‌دهد وزن نهایی و هزینه کل سیم پیچی کاهش یافته است.

توجه به این نکته اهمیت دارد که در این مقاله ما فقط نشان دادیم GA می‌تواند به عنوان یک ابزار سودمند در طراحی ماشین‌های الکتریکی استفاده شود، و به مباحث تکنیکی اجرای سیم‌بندی استاتور نپرداختیم. برای مثال چنانچه در تجدید سیم‌بندی استاتور مورد بحث، بخواهیم به جای تعداد ۱۴۴ دور سیم، از ۱۴۰ دور سیم استفاده کنیم، بایستی از نظر تکنیکی قابلیت اجرا داشته باشد. زیرا مشخصات هسته استاتور ثابت است. به عبارت دیگر باید راه‌کاری برای اجرای طرح مذکور پیاده نماییم. در این صورت با توجه به نتایج حاصل، مقدار ۲ کیلوگرم (۱/۷۴ درصد) در وزن مس مصرفی و حدود ۳۵ دلار در هزینه کل سیم‌بندی (۱/۷۵ درصد) صرفه‌جویی می‌شود. همچنین پاسخ‌های به دست آمده توسط GA یکی از انتخاب‌های طراح خواهد بود که با مقایسه پارامترهای طراحی به دست آمده از سایر روش‌ها، و تحلیل نتایج می‌تواند طرح مناسب را انتخاب کند.

جدول ۴. نتایج خروجی روش LP با استفاده از نرم افزار SMART برای ولتاژ ۳۳۰۰ ولت

LEISTUNG 260.0		NETZSPG. 3300.0		POLZAHL 2		FREQUENZ 50.0	
ERW.:	MA/MN= .95	IA/IN=	5.50	MK/MN=	2.30		
GER.:	MA/MN= .91	IA/IN=	5.26	MK/MN=	2.19		
ETA %=	95.00	C-PHI=	.880	STD. TEMP.=	75.0		
ETA %=	94.67	C-PHI=	.880	STD. TEMP.=	69.7		
DA 1=	550	TKD11=		NJA 1008 MAGN	BZF 1=	16.83	
DI 1=	310	LLD11=		B =	11.10	BZM 1=	13.43
L.M.L=		TKD12=		T =	52.00	BZK 1=	8.85
L.O.L=	400	LLD12=		S 1 =	11.9	BZMIN=	6.67
LFT.S=	3.2	TKD13=		H =	2.40	DJ 1=	488.40
NZ 1=	48	LLD13=		A =	4	HJ 1=	61.60
TAUN1=	20.29	B =		S =	11.5	HJ* 1=	61.60
TAUP =	486.95	B 1 =		B X =		LJ 1=	54.67
TAUP* =	588.73	H/T =		H X =		LZ 1=	10.40
SlE =	4.62						
DA 2=	303.6	TKD21=	196.4	NLG 1097		BZA 2=	17.79
DI 2=	150	LLD21=		S =		BZAI2=	
DI-GL=		TKD22=		A =	.80	BZKI2=	7.62
L.M.L=		LLD22=		D =	5.50	BZMI2=	7.61
L.O.L=	400	TKD23=		S 1 =	3.50	BZFI2=	7.60
NZ 2=	40	LLD23=		A 1 =	3.50	LZA 2=	.96
TAUN2=	23.84	B =	8.00	B =	13.60	LZI 2=	2.68
SCHR =		B 1 =	10.00	B 1 =	10.00	LJ 2=	23.45
LSPE =	3.23	H =	16.0	T =	26.00	HJ 2=	17.80
S2E =	3.51	AZK =	40			HJ* 2=	55.00
S3E =	3.77	BSTEG=	5.17			DJ 2=	214.20
SAE =		NAT 1025					
S2EN =	.85						
EMK =	1845.0	BETA =	8.00	W.KL. F		WICKL=	1
FLUSS=	3.485	ZN =2X9		B BLI=	7.6	GCU1=	117.00
BJ 1=	15162	P.L11=	1	H BLI=	1.9		
BF 1=	6289	L.I.R=	1	B ISI=	8.15	LS 1=	685
BM 1=	7839	P.SP =	1	H ISI=	2.45	A SP1=	265
BK 1=	11692	M.S.W=	16.00	Q 11=	14.08	R ZH=	30
B MAX=	15515	W 1=	144.0	UMPR.=	1.30	A SCH=	5.00
BL =	5620	WI.F =	.8276	NKB 1=	10.70	WIDU =	489
		IS.T:4.35.84		NKO 1=	23.30	O 1 =	1.166
		IS:FGLB/04		NKU 1=	23.30	HAE 1=	80.00
		TRAS : 9113		FSTR =	1.100		
BA 2=	6522	O 2=	.526	L ST =	400	B R =	45
BAI 2=		HAE 2=	135.0	Q ST =	329.37	H R =	50.14
BKI 2=	15233	TEMP2=	84.1	K ST =	22.39	O R =	2256.30
BMI 2=	15244	K1 =	.42	TEMP2=	85.0	K R =	22.39
BPI 2=	15254	K2 =	.35	MAT: G-AL99.5			
BJ 2=	16067	K3 =	.30	G ST =	14.23		
E % =	40	K4 =	.50	G R =	9.70		

نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک با استفاده از نرم افزار MATLAB با نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از روش LP که با نرم افزار طراحی ماشین SMART انجام گرفته، مقایسه شده و در جداول ۵ و ۶ آمده است.

نتایج شبیه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک حاکی از کاهش وزن نهایی سیم پیچی و کاهش هزینه است.

مشاهده می‌شود GA با در نظر گرفتن همه محدودیت‌ها به خوبی توانسته به جواب قابل قبولی برسد.

در محاسبه هزینه کل سیم پیچی استاتور، هزینه مس ۸/۲ دلار بر کیلوگرم، هزینه ساخت و نوارزنی یک کیلوگرم سیم مس تخت ۲ دلار و سایر هزینه‌های ثابت ساخت کوئل ۷ دلار بر کیلوگرم بوده و سود سازنده محاسبه نشده است. (هزینه‌ها مربوط به فروردین سال ۱۳۹۲ شمسی است.)

new adaptive genetic algorithm,” Electric power components and systems, Vol. 32, pp. 767–784.

4. Bianchi, B. & S. Bolognani (1998), **“Design optimization of electric motors by genetic algorithm,”** IEEE Proc. on electrical power appliances, Vol. 145, pp. 475-483.

5. Cunkas, M. & Akkaya, R. (2006), **“Design optimization of induction motor by genetic algorithm and comparison with existing motor,”** Mathematical and computational applications, Vol. 11, No. 3, pp. 193-203.

6. Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S. & Meyarivan, T. (2002), **“A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,”** IEEE transaction evolutionary computation, Vol. 6, pp. 182–197.

7. Deshpande, M.D. (1990), **“Design and testing of electrical machines,”** A.H. Wheeler & Co. Ltd, India.

8. Haupt, L.R. & Haupt, S.E. (2004), **“Practical genetic algorithms,”** John Wiley & Sons, New Jersey.

9. Gen, M. & Cheng, R. (2000), **“Genetic algorithms and engineering optimization,”** John Wiley & Sons, New York.

10. Krishnamoorthy, A. & Dharmalingam, K. (2009), **“Application of genetic algorithms in the design optimization of three phase induction motor,”** Journal of computer applications, Vol- II, No.4.

7. Raghuram, R. & Shashikala, V. (2013), **“Design and optimization of three phase induction motor using genetic algorithm,”** International journal of advances in computer science and technology, Vol. 2, No. 6, pp. 70–76.

8. Sivaraju, S.S.; Ferreira, F.J.T.E. & Devarajan, N. (2012), **“Genetic algorithm based design optimization of a three-phase multflux induction motor,”** 20th international conference on electrical machines, ICEM 2012, pp. 288-294.

10. Tomoiagă, B.; Chindriș, M.; Sumper, A.; Sudria-Andreu & Villafafila-Robles, R. (2013), **“Pareto optimal reconfiguration of power distribution systems using a genetic algorithm based on NSGA-II,”** Energies, pp. 1439-1455.

12. Uler, G.F.; Mohammed, A.O. Koh, C.S. (1995), **“Design optimization of electrical machines using genetic algorithms,”** IEEE transactions on magnetics, Vol. 31, No. 3, pp. 2008-2011.

نکته دیگر اینکه وزن کل مس مصرفی قبل از تبدیل، یعنی در ولتاژ ۶۶۰۰ ولت برای موتور الکتریکی مذکور ۱۱۱ کیلوگرم بوده که با تبدیل سیمبندی به ۳۳۰۰ ولت در صورت اجرای ۱۴۴ دور سیم برای هر فاز، به ۱۱۷ کیلوگرم افزایش می‌یابد و با توجه به حجم ثابت شیار استاتور، این به معنی کاهش حجم عایق‌بندی سیم‌پیچی استاتور است. اگرچه کاهش ولتاژ، اجازه کاهش عایق‌بندی را تا حدودی می‌دهد، اما در صورت عدم رعایت استاندارد می‌تواند خطر آفرین باشد. چنانچه بتوان سیم‌بندی را با ۱۴۰ دور سیم برای هر فاز اجرا نمود، سیستم به لحاظ عایقی نیز ایمن‌تر خواهد بود.

۵. تشکر و قدردانی

از مدیریت محترم و همکاران گروه صنعتی فن ژنراتور که با توجه به کمبود منابع در زمینه مورد پژوهش همکاری لازم را داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

پی‌نوشت‌ها

1. High Voltage (HV)
2. Non-Linear Programming (NLP)
3. Resin-Rich
4. Vacuum Pressure Impregnation (VPI)
5. Roulette wheel selection

عمر برازندگی

منابع

1. Alsofyani, I.M.; Idris, N.R.N.; Jannati, M.; Anbaran, S.A. & Alamri, Y.A. (2014), **“Using NSGA II multiobjective genetic algorithm for EKF-based estimation of speed and electrical torque in AC induction machines,”** IEEE 8th international power engineering and optimization conference (PEOCO), pp. 396 – 401.
2. Andreas, J. (1993), **“Energy efficient electric motors selection and application,”** Published by Marcel Dekker.
3. Benoudijit, B., Nait, N. & Abdelhadi, B. (2010), **“Identification of induction machine parameters using a**