

طراحی بهینه موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم زنبور و آنالیز اجزای محدود

رضا ایلکا^۱، سید اصغر غلامیان^۲ و سپیده ولی الهی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی- بابل- ایران

Ilka@stu.nit.ac.ir

۲- عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی- بابل- ایران

Gholamian@nit.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی- بابل- ایران

S.valiollahi@stu.nit.ac.ir

چکیده: موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک در بسیاری از کاربردها نقش اساسی ایفا می‌کنند. چگالی توان و بازده دو عامل مورد توجه در طراحی این موتورها هستند. در این مقاله رویکرد نوینی برای طراحی موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک بر اساس ترکیبی از چگالی توان و بازده پیشنهاد شده است. این مقاله ابتدا به ارائه معادلات مربوط به طراحی و ابعاد موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک می‌پردازد، سپس طراحی بهینه بر اساس الگوریتم زنبور (BA) با هدف افزایش چگالی توان و بازده ارائه می‌شود. در نهایت با استفاده از تحلیل اجزای محدود، کارایی روش پیشنهادی تأیید می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم زنبور، تحلیل اجزای محدود، چگالی توان، موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک

۱- مقدمه

در تجهیزات مخابراتی، الکترونیکی و صنعتی هستند [1-3]. موتورهای DC بدون جاروبک شبیه به موتورهای سنکرون AC هستند، با این تفاوت که موتورهای سنکرون نیروی ضد محرکه الکتریکی سینوسی و موتورهای DC بدون جاروبک نیروی ضد محرکه الکتریکی مستطیلی یا دوزنقه‌ای تولید می‌کنند. هر دو نوع این موتورها دارای میدان‌های مغناطیسی گردان استاتور هستند که باعث تولید گشتاور در رتور می‌گردد [2-5]. شکل ۱ ساختار موتور DC بدون جاروبک سه فاز را نشان می‌دهد. سیم پیچی‌های استاتور شبیه به موتور AC چند فاز بوده و آهنرباها بر روی رتور قرار می‌گیرند [3].

طراحی موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک با چگالی توان بالا، موضوع مهمی است که توجه محققان را به سمت خود جلب کرده است [3-8]. در این مقاله روشی جدید برای طراحی موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک

خواص مطلوب موتورهای DC باعث شده است که به عنوان سرو موتورها در صنعت به کار گرفته شوند، اما این موتورها نیاز به کموتاتور و جاروبک دارند که این امر فرسایش و تعمیرات دوره‌ای را در پی دارد. با ظهور کلیدهای حالت جامد بجای کموتاتور و جاروبک، موتورهای DC جدیدی، موسوم به موتورهای DC بدون جاروبک وارد عرصه شدند که دارای کاربردهای متنوعی

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۹/۶/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۱۰/۵

نام نویسنده‌ی مسئول: رضا ایلکا

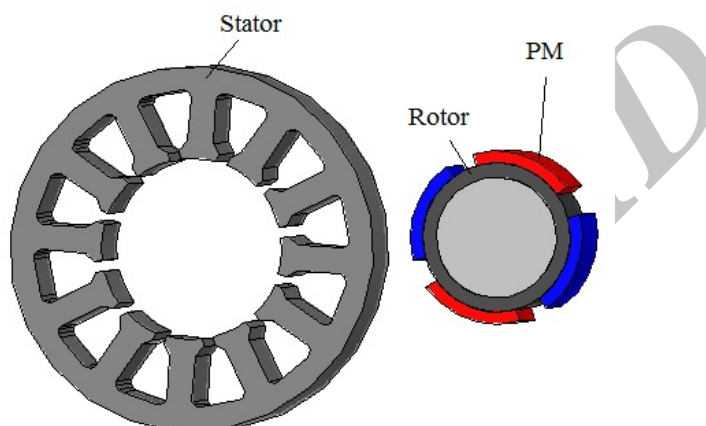
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - بابل - دانشگاه صنعتی

نوشیروانی - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

که به کار گیری آن، کارایی روش بهینه سازی را مشخص می‌کند. باقی مقاله به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

بخش ۲ معادلات طراحی را توضیح می‌دهد. در بخش ۳ به ارائه الگوریتم زنبور پرداخته می‌شود و بخش ۴ نتایج بهینه سازی را ارائه می‌کند. تحلیل اجزای محدود در بخش ۵ ارائه شده است و در نهایت، مقاله در بخش ۶ با نتیجه گیری پایان می‌یابد.

ارائه می‌شود. در این روش، چگالی توان و بازده به صورت ترکیبی بهینه می‌گردد. برای این منظور، از الگوریتم زنبور که روش بهینه سازی موثری است، استفاده می‌کنیم. روش‌های بهینه سازی دیگر مانند GA و ... برای بهینه سازی موتورهای بدون جاروبک به کار رفته اند [9-11]. ولی از روش الگوریتم زنبور تاکنون جهت بهینه سازی این موتورها استفاده نشده است. در ضمن به منظور تأیید ابعاد بهینه شده موتور، از تحلیل اجزای محدود استفاده می‌شود



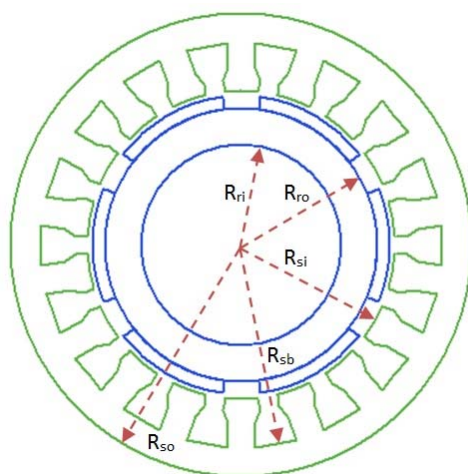
شکل (۱): ساختار موتور dc بدون جاروبک سه فاز

توصیف کننده شار مغناطیسی است. توپولوژی دو بعدی موتور مورد نظر در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۳) ساختار دندانه و شیار این نوع توپولوژی موتور را نشان می‌دهد.

۲- معادلات طراحی

۲-۱- توصیف پارامتری

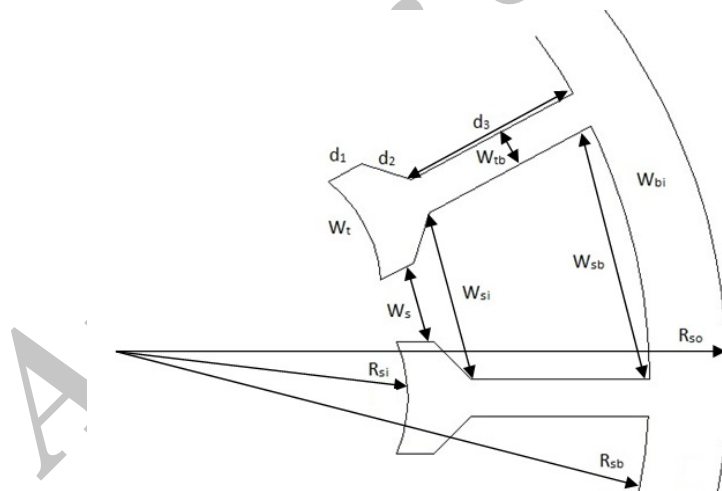
پارامترهای اصلی موتور در جدول ۱ و توپولوژی مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده اند [3-5]. گام مهم در طراحی، محدودیت‌های هندسی موتور و مدل مغناطیسی



شکل (۲): نمایش مشخصات هندسی توپولوژی موتور

جدول (۱): توصیف پارامتر

سمبل	توصیف پارامتر	واحد
P	توان	Hp
T	گشتاور نامی	N.m
S _r	سرعت نامی	rpm
E _{max}	ماکزیمم نیرو محرکه القایی اندازه گیری شده	V
J _{max}	ماکزیمم چگالی جریان شیار	A/m ²
N _{ph}	تعداد فازها	
N _m	تعداد قطب‌های آهنربا	
g	طول شکاف هوایی	m
L _{pm}	طول آهنربا	m
R _{so}	حداکثر شعاع استاتور	m
R _{ro}	حداکثر شعاع روتور	m
L	طول محوری موتور	m
K _{st}	ضریب تورق پشته	
K _{cp} B _r	ضریب انباشتگی هادی پسماند مغناطیسی	T
μ _r B _{max}	نفوذپذیری نسبی آهنربا ماکزیمم چگالی شار الکتریکی فولاد	T



شکل (۳): هندسه شیار برای توپولوژی موتور

۲-۲- پارامترهای هندسی

گام قطب در سطح داخلی استاتور مربوط به گام قطب زاویه‌ای است.

$$\tau_p = R_{si} \theta_p \quad (۲)$$

که در آن $\theta_p = 2\pi/N_m$ گام قطب زاویه‌ای به رادیان مکانیکی است و گام پیچک در شعاع داخلی روتور برابر است با:

$$\tau_c = \alpha_{cp} \tau_p \quad (۳)$$

با متغیرهای نشان داده شده در شکل (۲) و (۳) می‌توان پارامترهای هندسی مهم را تعیین نمود. شعاع‌های موتور در بخش‌های مختلف به صورت زیر به دست می‌آیند [2]:

$$\begin{aligned} R_{sb} &= R_{so} - w_{sy} \\ R_{si} &= R_{sb} - d_s = R_{ro} + g \\ R_{ri} &= R_{ro} - L_{pm} - w_{ry} \end{aligned} \quad (۱)$$

می‌گردد، بنابراین، یوغ باید نصف شار فاصله هوایی را تأمین کند؛ یعنی شار یوغ برابر است با:

$$\phi_{bi} = \phi_g / 2 \quad (11)$$

اگر چگالی شار مجاز در یوغ از جدول مقادیر ثابت برابر B_{max} باشد آنگاه معادله زیر بیانگر عرض یوغ است.

$$w_{bi} = \phi_g / 2 B_{max} K_{st} L \quad (12)$$

که در آن K_{st} ضریب تورق است، از آنجایی که در هر گام مغناطیس دائم تعداد $N_{sm} = N_{spp} / N_{ph}$ شیار و دندانانه داریم، شار فاصله هوایی هر مغناطیس دائم از N_{sm} دندانانه عبور می‌کند، بنابر این هر دندانانه باید حاوی $1 / N_{sm}$ شار فاصله هوایی باشد. اگر چگالی شار مجاز در دندانانه هم B_{max} باشد، عرض دندانانه مورد نیاز برابر است با:

$$w_{ib} = (2 / N_{sm}) w_{bi} \quad (13)$$

با استفاده از معادلات ۱۲ و ۱۳ تمام پارامترهای هندسی

تعیین می‌گردد.

طول PM، L_{pm} بصورت زیر محاسبه می‌شود

$$L_{PM} = (\mu_r B_g / (B_r - ((K_f / K_d) B_g))) K_c g \quad (14)$$

که در آن μ_r نفوذ پذیری نسبی پس نشست، B_r چگالی شار باقیمانده ماده PM، K_d ضریب نشتی شار، K_c ضریب کارتر، $K_f = B_{gpk} / B_g$ مقدار ماکزیمم ضریب تصحیح شده چگالی شار فاصله هوایی در موتور است که این ضرایب با استفاده از تحلیل FEM به دست می‌آیند. این ضرایب (K_c, K_d, K_f) ابتدا مقادیر ثابتی فرض شده و در روند طراحی محاسبه و با مقدار اولیه مقایسه می‌گردند. [6-8]

۲-۴- پارامترهای الکتریکی

برای یافتن پارامترهای الکتریکی باید ارتباط بین گشتاور و دیگر پارامترهای موتور مشخص شود، در حالتی که $N_{spp} = 1$ است گشتاور یک فاز برابر است با:

$$T = 2 N_{ph} B_g L I R_{ro} \quad (15)$$

که در آن α_{cp} بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\alpha_{cp} = \frac{\text{int}(N_{spp})}{N_{spp}} \quad (4)$$

N_{spp} تعداد شیار بر قطب بر فاز است. گام شیار در شعاع داخلی رتور برابر است با:

$$\tau_s = R_{st} \theta_s \quad (5)$$

که $\theta_s = 2\pi / N_s$ است. θ_s گام شیار زاویه‌ای به درجه مکانیکی است. با دانستن مقدار دهانه شیار، عرض دندانانه در سطح استاتور به دست می‌آید.

$$w_t = \tau_s - w_s \quad (6)$$

عرض ته شیار بصورت زیر تعیین می‌گردد:

$$w_{sb} = R_{sb} \theta_s - w_{tb} \quad (7)$$

با داشتن $d_s = d_1 + d_2 + d_3$ و

$$d_1 + d_2 = w_{tb} \cdot \alpha_{sd} \quad (8)$$

عمق شیارهای برابر است با $d_3 = d_s - \alpha_{sd} w_{tb}$. بعلاوه، عرض شیار در بالای کفشک‌ها از معادله زیر به دست می‌آید:

$$w_{si} = (R_{si} + \alpha_{sd} w_{tb}) \theta_s - w_{tb} \quad (9)$$

مطابق شکل ۳ دندانانه استاتور بصورت موازی است در حالی که شیارها چین نیستند (البته، وضعیتی که شیارها موازی و دندانانه‌ها غیر موازی اند هم معتبر است). ناحیه شیار با شکل دوزنقه‌ای باعث حداکثر شدن فضای در دسترس سیم پیچی می‌شود [2]. از طرف دیگر شیار موازی بدون کفشک‌ها برای حالتی که سیم پیچی کاملاً قبل از قرار گیری در شیار شکل گرفته باشد، به کار می‌رود. در معادلات زیر، عرض یوغ رتور و استاتور w_{bi} نامشخص است، با داشتن این دو بعد دیگر تمام ابعاد ماشین قابل محاسبه است. در حالت خاص عمق کامل شیار از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$d_s = R_{sb} - R_{ro} - g \quad (10)$$

۲-۳- پارامترهای مغناطیسی

شار هر مغناطیس دائم به طور مساوی در یوغ رتور و استاتور پخش شده و با مغناطیس‌های دائم مجاور کوپل

طبیعت اشاره می‌شود و سپس الگوریتم زنبور شرح داده می‌شود.

کلونی زنبور جستجوی غذا را با فرستادن زنبورهای دیده بان به منظور جستجوی تصادفی منابع غذایی امیدبخش آغاز می‌کند. کلونی برای بهره برداری از منابع غذایی می‌تواند تا مسافت‌های طولانی (۱۴ کیلومتر) و همزمان در جهت‌های مختلف پرواز کنند، با این ترتیب بهره برداری از تعداد زیادی منبع غذا تضمین می‌شود [13].

14. طی فرآیند جستجوی غذا همواره تعدادی از زنبورهای کلونی به عنوان زنبور دیده‌بان در نظر گرفته می‌شوند [14]. اگر کیفیت شهد جمع آوری شده از یک منبع غذا از آستانه معیاری بالاتر باشد، زنبور دیده بان آن را در کندو ذخیره می‌کند و آن منبع غذا را در رقص قرقره‌ای تبلیغ می‌نماید [13]. رقص قرقره‌ای برای ارتباطات کلونی حیاتی است و تمام اطلاعات لازم از بیرون کندو را شامل می‌شود [13, 15]. زنبورهای کندو منابع غذا را با توجه به اطلاعات به دست آمده از رقص‌های قرقره‌ای در مورد کیفیت آنها انتخاب می‌کنند. بنابراین، زنبورهای بیشتری منابع غذایی امیدبخش را بازدید می‌کنند [15, 16]. این امر به فرآیند جستجوی غذا کارآمد منجر می‌گردد. اعزام زنبورهای بیشتر به یک منبع غذایی امیدبخش تا زمانی که برآزش آن منبع غذا از آستانه‌ی معیاری بالاتر باشد، ادامه می‌یابد.

پارامترهای قابل تنظیم الگوریتم زنبور عبارتند از: تعداد زنبورهای دیده بان (N)، تعداد منابع غذایی منتخب از N منبع غذایی بازدید شده (M)، تعداد منابع غذایی برگزیده از M منبع (E)، تعداد زنبورهای اعزام شده به E منبع برگزیده (Nre)، تعداد زنبورهای اعزام شده به سایر (M-E) منبع منتخب (Nsp)، اندازه‌ی جستجوی همسایگی (ngh) و معیار توقف. گام‌های اصلی الگوریتم به شرح زیر هستند:

- ۱) جمعیتی اولیه به طور تصادفی تشکیل شود.
- ۲) برآزش جمعیت محاسبه شود.
- ۳) تعداد مشخصی از بهترین زنبورها معین و مکان آنها برای جستجوی همسایگی انتخاب شود.
- ۴) تعداد مشخصی زنبور به مکان‌های انتخاب شده فرستاده شوند و برآزش آنها محاسبه شود.

که حاصلضرب نیروی ناشی از تقابل N_m قطب‌های مغناطیسی تأمین کننده چگالی شار فاصله هوایی B_g است و هر قطب که n_s هادی دارد، شامل جریان B_g در طول L است. در این وضعیت که ممکن است بیش از یک شیار در قطب و فاز وجود داشته باشد n_s باید با تعداد دور بر قطب و فاز $N_{pp} = N_{spp} n_s$ جایگزین گردد که به رابطه زیر برای گشتاور منتهی می‌شود

$$T = N_m B_g L I R_{ro} N_{spp} n_s \quad (16)$$

اگر $N_{spp} > 1$ باشد، چگالی شار فاصله هوایی باید با ضریب توزیع و ضریب گام اصلاح گردد، علاوه بر این، اگر مغناطیس‌های دائم به صورت مورب باشند ضریب انحراف داده شده در معادله ۱۷ هم باید لحاظ گردد.

$$K_s = 1 - \theta_{se} / 2\pi \quad (17)$$

در نظر گرفتن این سه عبارت به معادله نهایی گشتاور به صورت زیر می‌رسیم:

$$T = N_m K_w K_s B_g L I R_{ro} N_{spp} n_s \quad (18)$$

در این معادله، میزان جریان I با توجه به سطح مفید شیار و چگالی جریان مجاز محاسبه شده است و ماشین به صورت ۲ لایه فرض شده است.

اکنون با استفاده از معادله ۱۸ و ارتباط توان ورودی و خروجی $T \cdot \omega = e_b \cdot i$ نیروی ضد محرکه الکتریکی در سرعت نامی ω_m برابر رابطه زیر به دست می‌آید

$$e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = T_e W_m \quad (19)$$

۳- الگوریتم زنبور

الگوریتم‌های گروهی در حل مسایل بهینه سازی چند متغیره بسیار کارآمد هستند. الگوریتم زنبور، ارابه شده توسط فام و همکارانش در سال ۲۰۰۵ [12]، الگوریتم گروهی نوظهوری است که از رفتار جستجوی غذای زنبور عسل تقلید می‌کند. در این مقاله الگوریتم زنبور برای بهینه سازی مقادیر پارامترهای موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک به کار گرفته می‌شود. این امر مستلزم بهینه سازی توابع چند متغیره است. در ادامه، ابتدا به رفتار زنبورها در

نسل بعدی انتخاب می‌شود. سایر زنبورها برای جستجوی تصادفی در نظر گرفته می‌شوند (گام ۴). این گام‌ها تا برقراری شرط توقف تکرار می‌شوند.

در این مطالعه، هر زنبور نماینده چهار پارامتر طراحی است که عبارتند از: چگالی شار فاصله هوایی (B_g)، شعاع داخلی روتور (R_{fi})، طول محور موتور (L) و طول فاصله هوایی (g). در آغاز الگوریتم این متغیرها به طور تصادفی در بازه‌ای معین مقدار دهی می‌شوند:

$$\begin{aligned} 0.4T < B_g < 0.8T \\ 40\text{mm} < L < 250\text{mm} \\ 15\text{mm} < R_{fi} < 100\text{mm} \\ 1\text{mm} < g < 2.5\text{mm} \end{aligned}$$

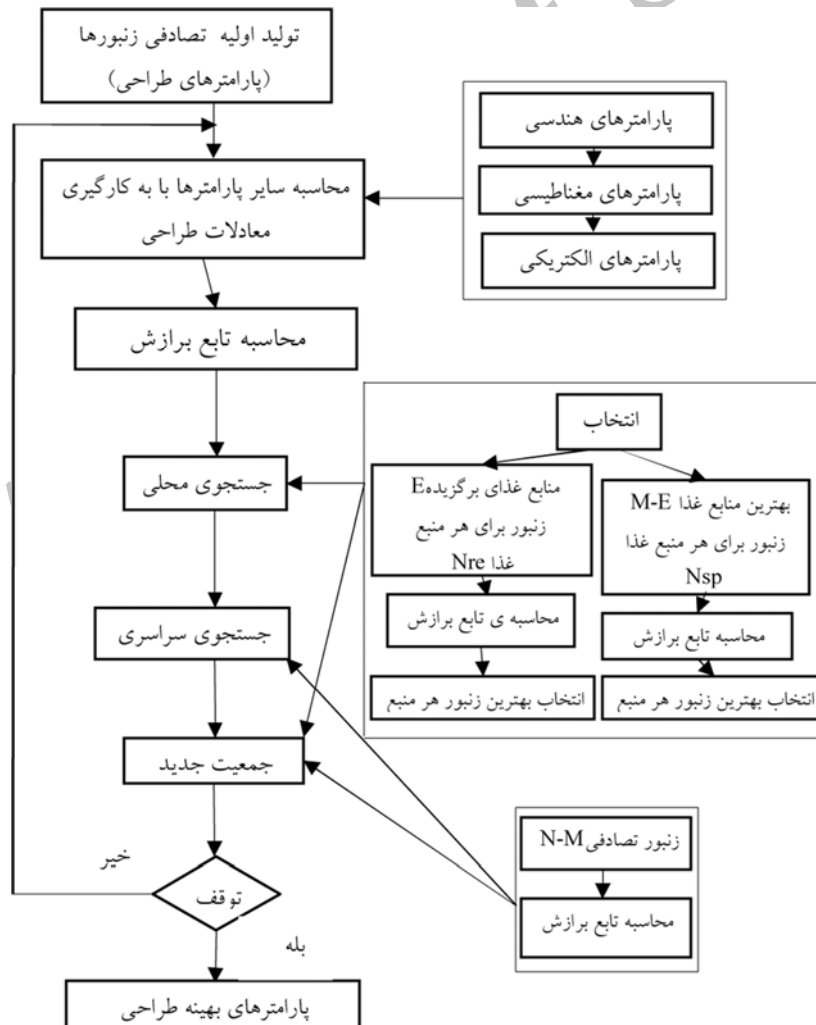
سایر پارامترهای طراحی از طریق معادلات توصیف شده در بخش ۲ به دست می‌آیند. ساختار روش پیشنهاد شده در فلوچارت شکل (۴) آمده است.

(۵) بهترین زنبور هر مکان برای تشکیل جمعیت جدید انتخاب شود.

(۶) زنبورهای باقی مانده برای جستجوی تصادفی اختصاص داده شوند و برازش آنها محاسبه شود.

(۷) اگر شرط توقف برقرار شد، پایان. در غیر این صورت، به گام ۳ برو.

منابع غذای منتخب که برازش بالایی دارند، برای جستجوی همسایگی در گام ۳ انتخاب می‌شوند. جستجوی همسایگی منابع منتخب در گام‌های ۴ و ۵ انجام می‌شود. همسایگی E منبع برگزیده با دقت بیشتری نسبت به سایر منابع جستجو می‌شود، به این طریق که زنبورهای بیشتری به منابع برگزیده اعزام می‌شوند. این مکانیزم جستجو به همراه دیده بانی ویژگی‌های عمده الگوریتم زنبور محسوب می‌شوند. در گام ۵ بهترین زنبور از هر مکان برای انتقال به



شکل (۴): ساختار روش پیشنهاد شده

۴- نتایج بهینه سازی

در این بخش نتایج به دست آمده از بهینه سازی پارامترهای موتور مغناطیس دائم توسط الگوریتم زنبور ارایه می شود. تمامی شبیه سازی های با استفاده از نرم افزار MATLAB 2010 (Mathworks) انجام شده اند. پارامترهای نامی طراحی و محدودیت های مربوطه در جدول (۲) آمده اند.

جدول (۲): پارامترهای نامی طراحی موتور

پارامتر	مقدار
Voltage	220 V
Output power	1 KW
Number of poles	6
Number of phases	3
number of slots	21
Slot fill factor	0.9
Slot per Pole per Phase	1
flux density in stator	1.5 T
flux density in rotor	1.5 T
Residual flux density of PM	1.2 T

الگوریتم زنبور برای بهینه سازی سه تابع هدف به کار گرفته شد: چگالی توان، توان خروجی به حجم موتور (F_1)، بازده، توان خروجی به توان ورودی (F_2) و ترکیبی از این دو تابع $F = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2$ که در آن $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$. مقادیر بهینه هر یک از این توابع پس از تنظیمات پارامترهای الگوریتم زنبور به دست آمدند.

هفت پارامتر الگوریتم زنبور را می توان برای تنظیم به چهار گروه دسته بندی نمود:

۱. N, E, M که اندازه جمعیت را تعیین می کنند.
۲. Nre, Nsp که تعداد همسایگی های منابع غذای مورد جستجو هستند.
۳. Ngh که اندازه جستجوی همسایگی را مشخص می کند.
۴. $Iteration$ که تعداد تکرارهای الگوریتم و همان شرط توقف است.

از نتایج به دست آمده پس از تنظیم پارامترهای هر گروه مشاهده شد که مناسب ترین مقادیر پارامترهای الگوریتم زنبور از نظر مقادیر بهینه توابع هدف، همگرایی

فرآیند بهینه سازی و همواری نمودار تغییرات خروجی (مقادیر توابع هدف) به شرح زیر است (جدول ۳):

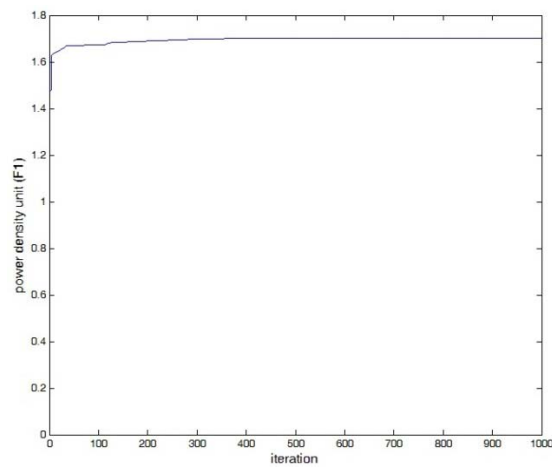
جدول (۳): مقادیر پارامترهای الگوریتم زنبور

پارامترهای الگوریتم زنبور	مقدار
N	۶۰۰
M	۵۷۰
E	۳۷۰
Nre	۱۰۰
Nsp	۵۰
ng	۱۰۰۰۰ / محدود
iteration	۱۰۰۰

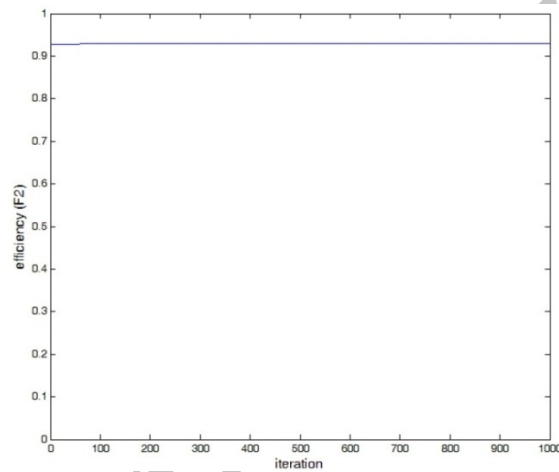
تأثیرات حاصل از تغییر پارامترهای هر گروه را بر روی نتایج خروجی می توان به صورت زیر بیان کرد:

- اندازه ی جمعیت (N, E, M) باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا همگرایی و همواری نمودار خروجی را تضمین کند در حالیکه مقدار بسیار بزرگ آن بیهوده است.
- اندازه جستجوی همسایگی (ng) باید به اندازه کافی کوچک باشد تا مقدار بهینه تابع هدف پیدا شود در حالی که مقدار بسیار کوچک آن ممکن است به بروز پله های در نمودار خروجی منجر شود.
- تعداد همسایگی های مورد جستجو (Nre, Nsp)، باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا همگرایی و همواری نمودار خروجی تضمین شود.
- تعداد تکرارها ($iteration$) باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا همگرایی تضمین شود در حالی که مقدار بسیار بزرگ آن بیهوده است.

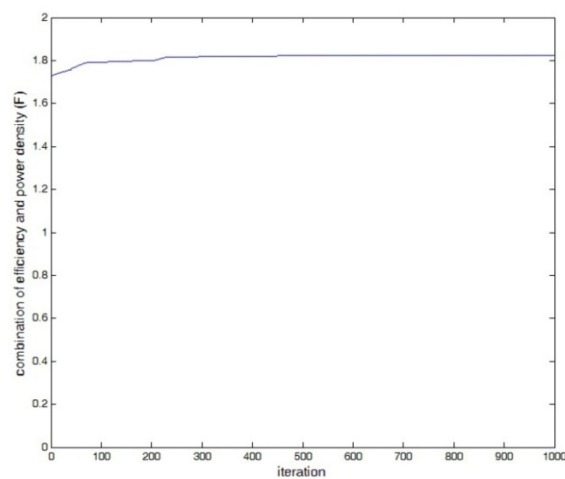
شکل (۵) چگالی توان (F_1) را بر حسب تعداد تکرارها نشان می دهد. مقدار بهینه به دست آمده برای چگالی توان $1/70 (W/cm^3)$ است. شکل (۶) بازده (F_2) را بر حسب تعداد تکرارها نشان می دهد. مقدار بهینه به دست آمده برای بازده $92/90$ است. شکل (۷) ترکیبی از بازده و چگالی توان (F) را بر حسب تعداد تکرارها نشان می دهد. ابعاد بهینه موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک در جدول ۴ آمده اند.



شکل (۵): چگالی توان (F_1) بر حسب تعداد تکرارها



شکل (۶): بازده (F_2) بر حسب تعداد تکراره



شکل (۷): ترکیب چگالی توان و بازده (F) بر حسب تعداد تکرارها

تحلیل واقع می‌شود، اما امروزه با پیشرفت روز افزون کامپیوترها نیازی به این امر نیست. در اکثر موارد معمولاً تمام هندسه ماشین در فرآیند تحلیل بررسی می‌گردد.

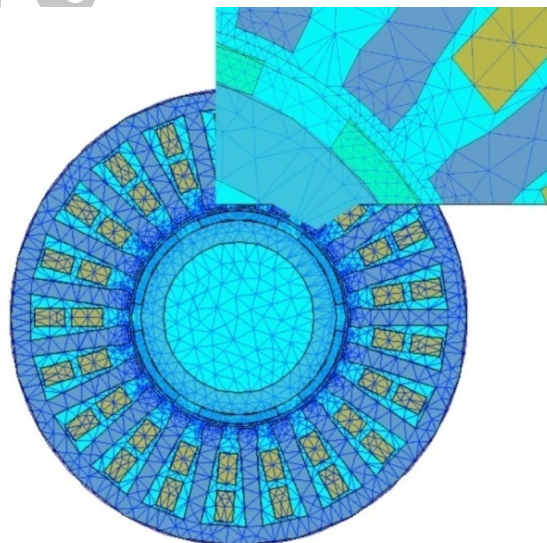
در این مقاله، به منظور آنالیز الکترومغناطیسی طراحی بهینه حاصل شده از نرم افزار Maxwell2D استفاده شده است. برای استاتور و رتور این موتور Steel 1008 به کار رفته است. مغناطیس‌های دائم از جنس NdFe35 با چگالی شار پسماند ۱/۲ تسلا هستند. با مشخص کردن تنظیمات و اجرای برنامه، کمیت‌های خروجی مطلوب به دست می‌آیند. تعداد کل مش‌های به کار رفته در این تحلیل ۵۸۶۰ عدد است. شکل (۸) مش بندی موتور PM بدون جاروبک را نشان می‌دهد. در این شکل مش بندی در فاصله هوایی به صورت بزرگ نمایی شده نیز نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، تعداد مش‌های فاصله هوایی بیشتر است زیرا تغییرات میدان در این ناحیه بیشتر از دیگر نقاط می‌باشد. در شکل (۹) توزیع چگالی شار موتور طراحی شده، نشان داده شده است که حداکثر مقدار آن در گوشه‌های دندانه اتفاق می‌افتد. در شکل (۱۰) توزیع خطوط شار، نشان داده شده است. خطوط شار بر روی استاتور و رتور و از بین فاصله هوایی عبور می‌کنند. منحنی‌ها نشان می‌دهند که مقادیر کاری در فاصله‌های هوایی از سطح مناسبی برخوردار هستند.

جدول (۴): ابعاد بهینه موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک

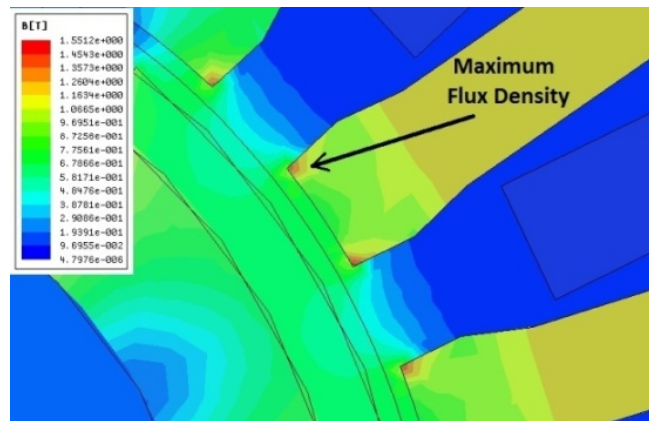
پارامترهای طراحی	مقدار
Bg	۰/۵۵ T
R _{ri}	۱۵ mm
G	۱ mm
L	۹۰/۹ mm
L _{PM}	۱/۹ mm
R _{ro}	۲۱/۵ mm
N _{ph}	۱۰۰۲
W _{ry}	۴/۶ mm
R _{so}	۴۵/۴ mm
d _s	۱۸/۴ mm
W _s	۳/۲ mm
R _{si}	۲۲/۵ mm
W _{si}	۶/۳ mm
R _{sb}	۴۰/۹ mm
W _{tb}	۲/۲ mm
Power density	۱/۷۰ W/cm ³
Efficiency	% ۹۲/۹۰

۵- تحلیل اجزای محدود

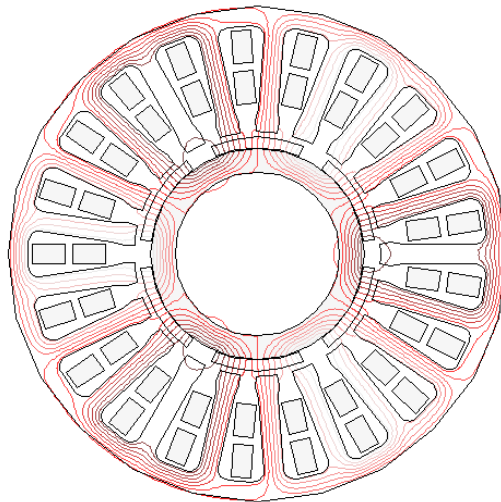
روش تحلیل اجزای محدود حدود سی سال است که وارد مهندسی برق شده است و برای بررسی و تحلیل اشکال غیر منظم و پیچیده بسیار مطلوب و کاراست. در گذشته، به دلیل توان پردازش پایین رایانه‌ها، ماشین مورد نظر بسته به هندسه آن در کسری از هندسه خود مورد



شکل (۸): مش بندی موتور PM بدون جاروبک



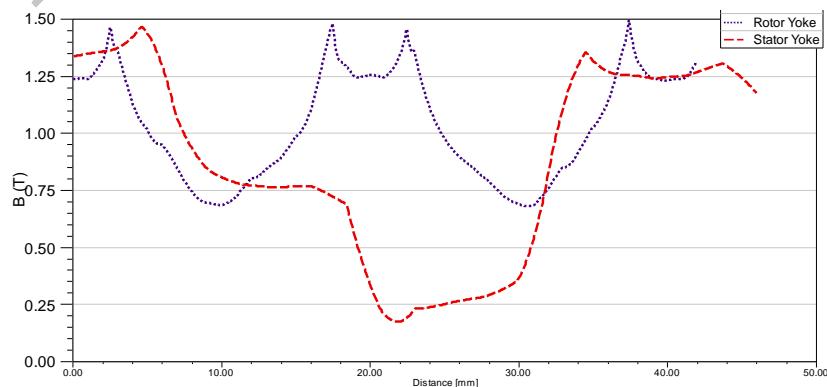
شکل (۹): توزیع چگالی شار موتور طراحی شده



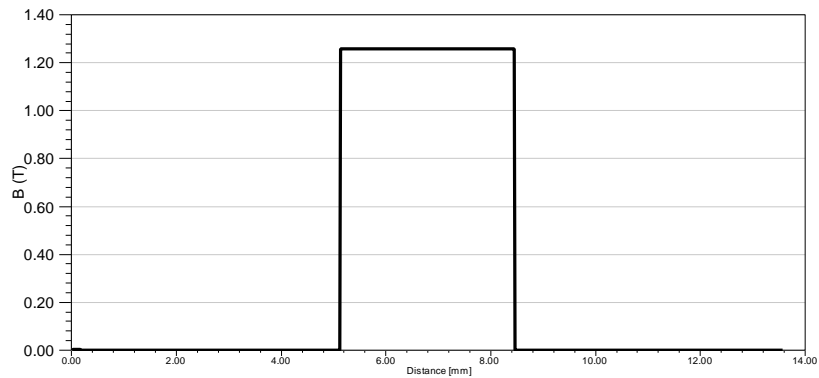
شکل (۱۰): توزیع خطوط شار موتور

توجه به شکل (۹)، از مقدار کمتری نسبت به گوشه‌های دندانه برخوردار است. چگالی شار فاصله هوایی به همراه مقدار متوسط آن در شکل (۱۳) ترسیم شده است. در شکل (۱۴) نمودار گشتاور بر سرعت نشان داده شده است.

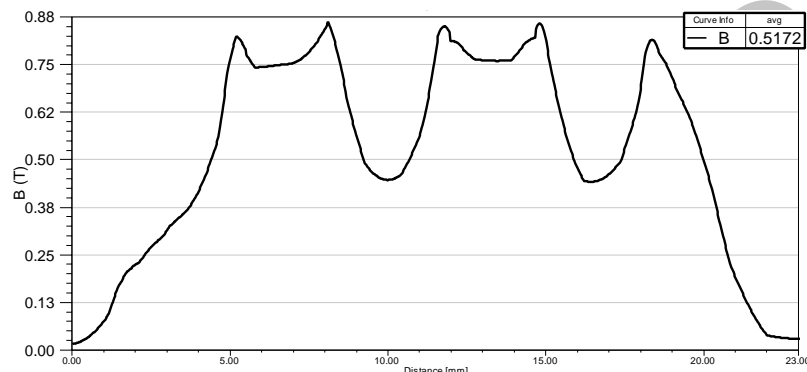
در شکل (۱۱) نمودار چگالی شار در یوغ استاتور و رتور موتور طراحی شده نشان داده شده است. شکل (۱۲) نشان دهنده چگالی شار در یک دندانه است. در این شکل چگالی شار در وسط دندانه رسم شده است که با



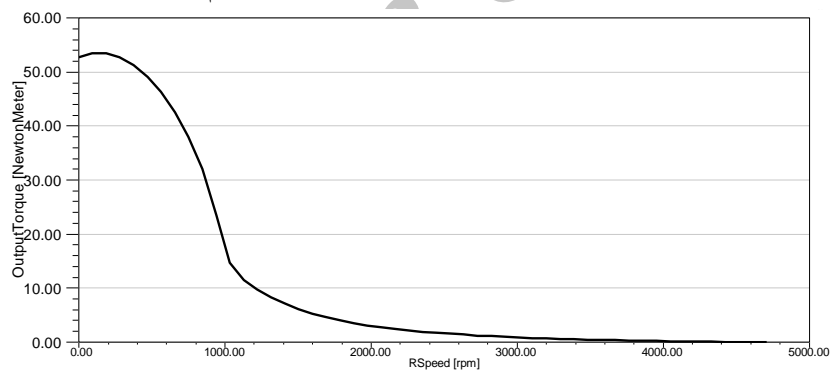
شکل (۱۱): نمودار چگالی شار یوغ استاتور و رتور



شکل (۱۲): نمودار چگالی شار در یک دندانه



شکل (۱۳): نمودار چگالی شار فاصله هوایی در یک گام قطب



شکل (۱۴): نمودار گشتاور بر سرعت موتور

شده‌اند. در این جدول، چگالی شار در استاتور و رتور مقدار ماکزیمم و در فاصله هوایی مقدار متوسط خود را دارا هستند.

همان طور که در شکل‌ها مشخص است، تحلیل اجزای محدود با دقت قابل قبولی ابعاد بهینه را تأیید می‌نماید. نتایج به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود و نتایج حاصل از بهینه سازی تحلیلی در جدول (۵) با هم مقایسه

جدول (۵): مقایسه نتایج تحلیلی و عددی

B_{ag}	B_{cr}	B_{cs}	
۰/۵۵	۱/۵	۱/۵	نتایج تحلیلی (T)
۰/۵۱۷	۱/۴۷	۱/۴۶	نتایج عددی (T)
۶	۲	۲/۵	خطا %

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش طراحی نوین و بهینه‌ای برای موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم زنبور پیشنهاد شد. هدف این تحقیق، یافتن مقادیر بیشینه توابع هدف بوده است: چگالی توان، بازده و ترکیبی از این دو تابع. در انتها مقادیر بهینه پارامترهای موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک حاصل از بهینه‌سازی ترکیب چگالی توان و بازده ارائه شد. به منظور تأیید کارایی روش بهینه‌سازی، از تحلیل اجزای محدود استفاده شده است. نتایج حاصل از آن با درصد خطای کمی (حداکثر ۶٪) با نتایج بهینه‌سازی مطابقت دارد.

مراجع

- [7] N. A. Rahim, H. W. Ping, M. Tadjuddin, "Design of Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Direct Drive of Electric Vehicle", *PES2007, IEEE*.
- [8] P. R. Upadhyay, K. R. Rajagopal, "FE Analysis and Computer-Aided Design of a Sandwiched Axial-Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, pp. 3401 – 3403, 2006.
- [9] P.R. Upadhyay, K.R. Rajagopal, Genetic algorithm based design optimization of a permanent magnet brushless DC motor, *Journal of Applied Physics* 97 (10) (2005) Article No. Q516.
- [10] S. Vivier, F. Gillon, P. Brochet, Optimization techniques derived from experimental design method and their application to the design of a brushless direct current motor, *IEEE Transactions on Magnetics* 37 (5) (2001) 3622–3626.
- [11] A. Rahideh, T. Korakianitis, P. Ruiz, T. Keeble, M.T. Rothman, Optimal brushless DC motor design using genetic algorithms, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322 (2010) 3680–3687.
- [12] D.T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koç, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi, "The Bees Algorithm – A Novel Tool for Complex Optimisation Problems", *Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, UK*.
- [13] K.Von Frisch, "Bees: Their Vision, Chemical Senses and Language", (*Revised edition*) *Cornell University Press, N.Y., Ithaca*, 1976.
- [14] TD.Seeley, "The Wisdom of the Hive: The Social Physiology of Honey Bee Colonies", *Massachusetts: Harvard University Press, Cambridge*, 1996.
- [15] S. Camazine, J. Deneubourg, NR. Franks, J. Sneyd, G. Theraula, E. Bonabeau, "Self-Organization in Biological Systems", *Princeton: Princeton University Press*, 2003.
- [16] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz, "Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems", *Oxford University Press, New York*, 1999.
- [1] R. Krishnan, "Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives", CRC Press; 1 edition, 2009.
- [2] W. Yeadon, A. Yeadon, *Handbook of Small Electric Motors*. McGraw-Hill Professional; 1 edition, 2001.
- [3] J.R. Hendershot, T.J.E. Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Machines*. Motor Design Books LLC: Second Edition, 2010.
- [4] S.A. Gholamian, M. Ardebili, K. Abbaszadeh, "Analytic and FEM Evaluation of Power Density for Various Types of Double-Sided Axial Flux Slotted PM Motors", *International Journal of Applied Engineering Research*, ISSN 0973-4562, vol.3, no.6, pp. 749–762, 2008.
- [5] M. Aydin, S. Huang, T.A Lipo, Optimum design and 3D finite element analysis of non-slotted and slotted internal rotor type axial flux PM disc machines", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 15-19 July 2001, vol. 3, pp. 1409 - 1416.
- [6] S. A. Gholamian, M. Ardebili. K. Abbaszadeh, "Selecting and Construction of High