

# طراحی درایو موتور سویچ رلوکتانس با در نظر گرفتن بهترین ساختار موتور برای کاهش ریپل گشتاور با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش المان محدود

محمدرضا بسمی<sup>۱</sup>

۱. استادیار گروه برق - قدرت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد

besmi@shahed.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰

## چکیده

در این مقاله، ریپل گشتاور در موتورهای سویچ رلوکتانس، بررسی شده است. روش ارائه شده در این مقاله برای کاهش ریپل گشتاور، مبتنی بر انتخاب بهترین ساختار ماشیناز طریق الگوریتم ژنتیک و طراحی درایو مناسب است. در این مطالعه برای کاهش ریپل گشتاور بر اساس طراحی ساختار مناسب، ابتدا یک ماشین مرجع و سپس تعدادی از پارامترهای ماشین انتخاب شد که تغییر آنها تأثیری در مشخصات مکانیکی، توان نامی ماشین و حجم ماشین نداشته باشد. ماشین مورد نظر با نرم افزار المان محدود، شبیه سازی شد و بهترین مشخصه گشتاور ماشین برای ساختارهای مختلف ماشین، که کمترین ریپل گشتاور را داشته باشد، بر اساس الگوریتم ژنتیک استخراج شد. در واقع برای اولین بار از یک الگوریتم بسیار دقیق در پروسه طراحی مدار مغناطیسی ماشین به جای مدار معادل مغناطیسی در الگوریتم ژنتیک استفاده شده است و روش المان محدود، که قبلاً برای درستی طراحی انتخاب می شد، در این مقاله در یک پروسه طراحی تکرارپذیر مورد بهره برداری قرار گرفت. ساختار انتخاب شده از طریق الگوریتم ژنتیک برای تحریک یکی از فازها از هم محوری کامل تا غیرهم محوری کامل انجام شده است. با انتخاب بهترین ساختار برای ماشین، طراحی درایو موتور به گونه ای پیشنهاد شد تا مشخصه گشتاور حاصل از آن کمترین اختلاف را با ساختار انتخاب شده داشته باشد تا موتور، فاقد ریپل گشتاور شود.

**کلیدواژگان:** آنالیز حساسیت، الگوریتم ژنتیک، روش المان محدود، ریپل گشتاور، مدار معادل مغناطیسی.

## ۱. مقدمه

به منظور کاهش ریپل گشتاور، دو روش عمده وجود دارد: روش اول، موتور از نظر ساختار فیزیکی طوری طراحی شود تا مشخصه خوبی برای تولید گشتاور، کاهش ریپل گشتاور و مشخصه‌های مورد نظر دیگر را فراهم کند. روش دوم، طراحی درایو موتور به گونه‌ای باشد تا محدودیت‌های موجود در طراحی ساختار را بتوان توسط آن برطرف کرد؛ بنابراین در این مقاله هدف، کاهش ریپل گشتاور توسط طراحی مناسب ساختار و درایو ماشین است که بتوان ریپل گشتاور را تا حد امکان، کاهش داد؛ لذا ابتدا مروری بر مراجع ارائه شده روی ساختار و سپس درایو این ماشین‌ها خواهد شد.

آثار شکل‌های مختلف جلوی قطب روتور بر روی گشتاور مطالعه شد. در مرجع [۷] در سال ۱۹۹۱ میلادی توسط Torrey یک روند برای طراحی SRM برای کاربرد گشتاور- ریپل کم مطرح شد. توسط Finch و Faiz [۸] در سال ۱۹۹۲ طرح‌های اولیه پیشنهادی برای موتورهای SRM مجددا بررسی شد.

تغییر در قوس قطب استاتور و رتور و بهینه‌سازی پارامترهای موتور و نیز بهینه‌سازی شکل رتور و استاتور به صورت شیب‌دادن سطح قطب استاتور و رتور در مرجع [۹] مطالعه شده است. در مرجع [۱۰] روش طراحی شکل رتور برای مینیمم کردن ریپل گشتاور با استفاده از FEM استفاده شده است.

## ۱-۱. مروری اجمالی بر مراجع شکل ساختار ماشین‌های سویچ رلوکتانس

اولین نگاه دقیق به مسائل موجود در طراحی موتور توسط Lawrenson و همکارانش [۱] در سال ۱۹۸۰ میلادی صورت گرفت. در این مطالعه، محدودیت‌های حاکم بر تعداد قطب‌های روتور و استاتور، گام قطب‌ها، تعداد فازها، طول کمان قطب روتور و استاتور و مقادیر نامی درایو شرح داده شده است.

معادله خروجی و انتخاب ابعاد موتور توسط Krishnan و همکارانش [۲] در سال ۱۹۸۸ میلادی، ارزیابی شد. در مراجع [۳] و [۴] توسط Miller مجموعه‌ای کامل دربرگیرنده مسائل مطرح در طراحی SRM نحوه کنترل و تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد ماشین را نشان می‌دهد. در مرجع [۵] حساسیت گام قطب/ قوس قطب استاتور و روتور در عملکرد موتور بررسی شد. توسط Moallem [۶] در سال ۱۹۹۲ میلادی

## ۱-۲. مروری بر مقاله‌های طراحی درایو ماشین‌های سویچ رلوکتانس

طراحی درایو یکی از مسائل مهم در طراحی ماشین‌های SRM است. از آنجایی که هرچه تعداد فازها بیشتر می‌شود تعداد سوئیچ‌ها نیز افزایش می‌یابد و با افزایش تعداد سوئیچ‌ها هزینه ماشین از یک طرف بالا می‌رود و از طرف دیگر، فرکانس سوئیچینگ نیز افزایش می‌یابد و تلفات ناشی از آن نیز افزایش خواهد یافت، بنابراین مطالعات مناسبی به منظور کاهش تعداد سوئیچ‌های قدرت در این ماشین‌ها صورت گرفته است که بررسی‌های اولیه تا قبل از سال ۱۹۹۳ توسط Miller جمع‌آوری و در مرجع [۲] مطرح شده است. گروهی سعی کردند با کنترل زاویه آتش درایو موتور سوئیچ رلوکتانس به وسیله روش المان محدود، مشکل ریپل گشتاور را حل کنند [۱۱]. در مرجع [۱۲] توسط Ehsani علاوه بر ارائه یک کانورتور با اتصال ستاره، که برای موتورهای در ولتاژهای کم مناسب است، عملکرد

۲. همیشه عمل کموتاسیون بین دو فاز مجاور انجام می‌شود.

## ۲. طراحی ساختار ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس از طریق الگوریتم ژنتیک به منظور کاهش ریپل گشتاور

در بخش قبل، مراجع مطرح شده در خصوص طراحی ساختار ماشین برای کاهش ریپل گشتاور، مورد مطالعه قرار گرفت. از آنجایی که تعداد پارامترهای ماشین، زیاد است، لذا باید تعدادی از پارامترهای مؤثر در طراحی ساختار ماشین به منظور بررسی دقیق‌تر، مورد توجه قرار گیرد. برای این منظور یک ماشین مبنا، اساس کار طراحی را تشکیل خواهد داد و پارامترهای مورد نظر در یک محدوده مشخص ارزیابی خواهد شد. در نهایت، بهترین پارامترها برای طراحی ساختار ماشین به منظور کمترین ریپل گشتاور ارائه خواهد شد. در این مقاله، محاسبات الکترومغناطیسی بر اساس روش المان محدود، پایه‌گذاری شده و می‌توان ادعا کرد گشتاور محاسبه شده و به دنبال آن ریپل گشتاور با دقت بالایی به دست می‌آید. از آنجایی که کلیه محاسبات مربوط به گشتاور در الگوریتم ژنتیک بر اساس المان محدود است، لذا این روش با توجه به مقایسه روش‌های مطرح شده در این خصوص جدید است و نتایج حاصله از دقت بالایی برخوردار خواهد بود.

اطلاعات پارامترهای ماشین مبنا در جدول (۱) ارائه شده است و در این بخش، هدف کاهش ریپل گشتاور بر اساس طراحی ساختار مناسب ماشین است.

## ۲-۱. معرفی نرم‌افزار طراحی ماشین سوئیچ رلوکتانس

به منظور طراحی مناسب ساختار ماشین سوئیچ رلوکتانس نرم‌افزاری در محیط MATLAB با استفاده از

درایورهای سنتی را برای ولتاژهای کم بررسی کرده و نشان داده است که این درایورها برای ولتاژهای کم مناسب نیست. در مرجع [۱۳] در سال ۱۹۹۳ Krishna یک کانورتر که به ازای هر فاز از یک سوئیچ استفاده می‌کند و برای کاربردهای با عملکرد کم مناسب است را طراحی کرد. این کانورتر دارای حداقل تعداد سوئیچ است و از یک سیم‌پیچ ساده استفاده می‌کند.

برخی از محققان، اخیراً از روش‌های شبکه‌های عصبی برای افزایش کارایی سیستم کنترل درایو استفاده کرده‌اند [۱۴] و [۱۵].

ریپل گشتاور به صورت نسبت اختلاف گشتاور ماکزیمم و مینیمم به گشتاور متوسط تعریف می‌شود و به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{av}} \quad (1)$$

اساس کاهش ریپل، ایجاد جریان لحظه‌ای مناسب در سیم‌پیچ فاز بر اساس پروفیل توزیع گشتاور است. در مقاله [۱۶]، کلیه توابع توزیع، تحلیل و اثر آن‌ها روی ریپل گشتاور بررسی شده است. در مقاله [۱۷]، تأثیر تحریک هم‌زمان دو فاز با هم بررسی شده و نتیجه به این صورت شده است که در تحریک دایمی دو فاز، نه تنها ریپل گشتاور بهبود می‌یابد، THD جریان نیز نسبت به حالت تحریک یک فاز کاهش یافته است.

به منظور کاهش ریپل گشتاور در موتورهای سوئیچ رلوکتانس باید شکل موج جریان اعمالی به فاز موتور متناسب با ساختار و مشخصه‌های فیزیکی موتور تغییر کند و برای هر ماشین خاص، می‌توان یک شکل موج جریان متناسب به دست آورد و بر اساس آن، جریان تزریقی به فاز ماشین را تغییر داد؛ بنابراین همیشه دو فاز با رعایت نکات زیر تحریک می‌شود:

۱. هیچ‌گاه فازی را که در موقعیت ایجاد گشتاور منفی قرار دارد، تحریک نکند.

نوشته شده برای رسیدن به هدف تعیین شده این مقاله، که کاهش ریبیل گشتاور است، در ادامه مطرح می شود.

## الگوریتم کاهش ریبیل گشتاور به روش الگوریتم ژنتیک

این الگوریتم شامل سه برنامه به صورت زیر است:  
الف) برنامه اول، تحلیل ماشین با اطلاعات الکترومغناطیسی مشخص.

ب) برنامه دوم، استخراج پارامترهای مناسب ماشین به منظور طراحی.

ج) برنامه سوم، طراحی درایو مناسب با ساختار انتخاب شده. برنامه های اول و دوم در ادامه همین بخش توضیح داده می شوند و برنامه سوم در بخش ۳ توضیح داده خواهد شد.

جعبه ابزار GUIDE طراحی شد. صفحه اصلی این نرم افزار در شکل (۱) نشان داده شده است. توسط این نرم افزار کلیه پارامترهای ابعادی که برای رسم ساختار ماشین، مورد نیاز است، در نظر گرفته شده و لیست کامل پارامترها در جدول (۱) ارائه شده است. توسط این برنامه می توان هر ساختاری را که از پارامترهای تعریف شده تبعیت می کند به برنامه وارد و سپس آن را اجرا کرد. با توجه به اینکه هدف، به دست آوردن بهترین ساختار برای ماشین است، لذا پارامترهای انتخاب شده برای ابعاد اصلی نظیر طول ماشین و قطر خارجی ماشین در این ساختار تغییر نخواهد کرد تا ابعاد اصلی ماشین، ثابت باقی بماند. این برنامه قادر است با دریافت مشخصات ساختاری، الکتریکی و مغناطیسی، ماشین مورد نظر را در هر موقعیت تحلیل کند. برنامه های

The screenshot shows the 'Besmi\_SRM\_90' software interface with the following specifications:

Rotor Specifications		Stator Specifications	
Rotor Shaft Radius	0.014	Stator inner Arc	18
Rotor inner Radius	0.08	Length of Stator Pole	0.0827
Rotor outer Radius	0.0498	Stator outer Arc	10.984
Rotor inner Arc	36.82	Length of Yoke	0.012
Rotor outer Arc	22	Number of Stator Poles	6
Number of Rotor Poles	4	Air Gap	0.0005
		Stack Length	0.2
Animation Specification		Circuit Specifications	
Primary Angle	0	Phase Winding Turns	100
Final Angle	0	Current	10
step	5		
Play Repeat	5		
Frame Per Second	10		

Buttons at the bottom: View Animation, Apply, Exit

جدول (۱). پارامترهای ماشین مینا

پارامتر	تعریف متغیر	تعریف متغیر	مقدار متغیرها
P(1)	شعاع شفت روتور	Rotor Shaft Radius	0.014 (m)
P(2)	شعاع داخلی روتور	Rotor inner Radius	0.03 (m)
P(3)	شعاع خارجی روتور	Rotor outer Radius	0.0498 (m)
P(4)	کمان داخلی روتور	Rotor inner Arc	36.52 (m)
P(5)	کمان خارجی روتور	Rotor outer Arc	22 (deg)
P(6)	تعداد قطب‌های روتور	Number of Rotor Poles	4
P(7)	کمان داخلی استاتور	Stator inner Arc	18 (deg)
P(8)	طول قطب استاتور	Length of Stator Pole	0.0327 (m)
P(9)	کمان خارجی استاتور	Stator outer Arc	10.984 (deg)
P(10)	طول یوغ استاتور	Length of Yoke	0.012 (m)
P(11)	تعداد قطب‌های استاتور	Number of Stator Poles	6
P(12)	فاصله هوایی	Air Gap	0.0005 (m)
P(13)	طول ماشین	Stack Length	0.2 (m)
P(14)	جریان	Current	100 (A)
P(15)	تعداد دور سیم‌پیچ	Phase Winding Turns	10

نوشته شده و تحلیل ماشین.

## ۲-۱-۱. برنامه تحلیل ماشین با اطلاعات

### الکترومغناطیسی مشخص

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، برنامه مورد نظر برای تحلیل ماشین مطابق شکل (۱) و شامل مراحل زیر است:

- وارد کردن اطلاعات ابعادی و الکتریکی ماشین از طریق جعبه ابزار GUIDE در محیط نرم‌افزار MATLAB

- تبدیل اطلاعات ورودی توسط برنامه نوشته شده با MATLAB به کدهای مناسب برای تحلیل ماشین با نرم‌افزار FEMM4.2

- تحلیل ماشین با نرم‌افزار FEMM4.2 توسط کدهای

- استخراج داده‌های مورد نظر بعد از تحلیل ماشین.

- تحلیل نتایج حاصل از ماشین با نرم‌افزار.

## ۲-۱-۲. برنامه استخراج پارامترهای

### مناسب ماشین با استفاده از الگوریتم ژنتیک

برای به دست آوردن طراحی ساختار مناسب ماشین به منظور کاهش ریبیل گشتاور، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، پارامترهای یک ماشین مینا برای تحلیل‌های مورد نظر انتخاب می‌شود.

شکل (۲). نمایش پارامترهای  $P(1)$  تا  $P(10)$  ماشین سویچ رلوکتانس

در شکل (۲) تعدادی از پارامترهای ماشین، نمایش داده شده است. در این مقاله برای الگوریتم ژنتیک پنج پارامتر تعریف شده فوق، که تشکیل یک کروموزوم خواهند داد، را در نظر می‌گیریم. هر کروموزوم رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$CHROMOSOME = [P(1), P(2), P(3), P(4), P(5)] \quad (2)$$

(۲) تعداد کروموزوم‌های جمعیت اولیه در این الگوریتم ۲۰ کروموزوم در نظر گرفته شده است؛ بنابراین در این الگوریتم ۲۰ کروموزوم به طور تصادفی از میان رنج تغییرات در نظر گرفته شده، برای پنج متغیر تشکیل دهنده هر کروموزوم انتخاب می‌شود. محدوده تغییرات پارامترهای مورد نظر، به صورت روابط (۳) الی (۷) می‌شوند:

$$P_{min}(1) \leq P(1) \leq P_{max}(1) \quad (3)$$

$$P_{min}(2) \leq P(2) \leq P_{max}(2) \quad (4)$$

$$P_{min}(3) \leq P(3) \leq P_{max}(3) \quad (5)$$

$$P_{min}(4) \leq P(4) \leq P_{max}(4) \quad (6)$$

$$P_{min}(5) \leq P(5) \leq P_{max}(5) \quad (7)$$

محدوده تغییرات هر پارامتر را می‌توان از طریق آنالیز حساسیت هر پارامتر تعیین کرد تا الگوریتم ژنتیک در هنگام اجرای برنامه متغیرهای معتبر را انتخاب نماید. در این مقاله، نتایج حاصل از آنالیز حساسیت از پژوهش انجام شده در دانشگاه شاهد استفاده شده است [۱۸]. و به دلیل طولانی بودن روش انجام شده از ارائه آن در این مقاله اجتناب می‌شود و صرفاً از نتایج به دست آمده استفاده

پارامترهای این ماشین در جدول (۱) ارائه شده است. تعداد پارامترهای ماشین مبنا مطابق جدول (۱) پانزده پارامتر است. از آنجایی که هدف، به دست آوردن ریبل گشتاور کمتر برای ماشین مبنا و مقایسه نتایج حاصله با ماشین مبناست، لذا باید به سه نکته توجه کرد: اولاً، توان ماشین مورد نظر باید تغییر نکند؛ ثانیاً، ابعاد خارجی ماشین یا به عبارتی حجم ماشین طراحی شده از حجم ماشین مبنا بیشتر نشود و ثالثاً، مشخصات مکانیکی ماشین نیز تغییر نکند. برای دستیابی به سه شرط ذکر شده، اولاً آمپر دور ماشین را ثابت فرض می‌کنیم، ثانیاً برای ثابت ماندن ابعاد خارجی ماشین، ابعاد تأثیرگذار روی ابعاد ماشین نظیر طول قطب استاتور، یوغ استاتور و طول ماشین را ثابت فرض می‌کنیم و ثالثاً برای ثابت ماندن مشخصات مکانیکی ماشین طول فاصله هوایی و قطر شفت ماشین ثابت فرض می‌شود؛ بنابراین پارامترهایی که در الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار خواهند گرفت، عبارت‌اند از:  $P(2)$ ،  $P(4)$ ،  $P(5)$ ،  $P(7)$  و  $P(9)$  که در شکل (۲) نمایش داده شده‌اند و عبارت‌اند از:

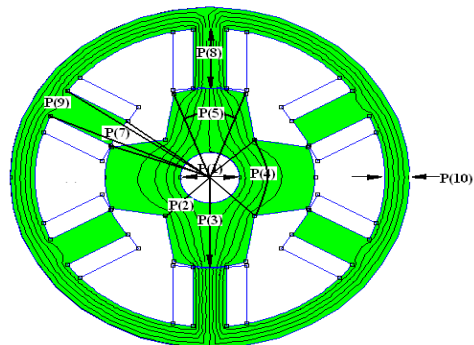
•  $P(2)$  = شعاع داخلی روتور؛

•  $P(4)$  = کمان داخلی روتور؛

•  $P(5)$  = کمان خارجی روتور؛

•  $P(7)$  = کمان داخلی استاتور؛

•  $P(9)$  = کمان خارجی استاتور.



۱۸۰۰۰ تحلیل می‌توان به جواب مطلوب دست یافت؛ به عبارت دیگر، در این مقاله ماشین مورد نظر ۱۸۰۰۰ بار توسط روش المان محدود تحلیل می‌شود. روشی که تاکنون در طراحی ماشین‌های الکتریکی در مقالات مشاهده نشده است و توسط این روش، که قبلاً توسط مدار معادل مغناطیسی انجام می‌شد، می‌توانیم به جواب دقیق و دلخواه دست یابیم.

لازم به ذکر است که هر تحلیل، کمتر از چند ثانیه زمان لازم دارد و تحلیل ۱۸۰۰۰ بار کمتر از ۲۰ ساعت با توجه به سرعت پردازش‌گر می‌تواند به پایان برسد و این زمان برای رسیدن به یک ساختار مناسب ماشین زمان بسیار کمی خواهد بود. با توجه به اینکه این روش طراحی تاکنون مورد استفاده محققان قرار نگرفته، لذا مقایسه‌ای در این خصوص نمی‌توان انجام داد. روش‌های مطرح شده در مقالات برای رسیدن به طراحی ساختار ماشین معمولاً بر اساس مدار معادل مغناطیسی است که دقت آن بر اساس روش‌های المان محدود تعیین می‌شود و یا اگر طراحی بر اساس المان محدود ارائه شود، صرفاً برای درستی نتایج طراحی روی یک ماشین با ساختار ثابت با تغییرات محدود روی بعضی از اجزای ماشین است که در یک پروسه طولانی و تکراری انجام خواهد شد؛ بنابراین روش مطرح شده در این مقاله برای آنالیز ماشین سوئیچ رلوکتانس می‌تواند به طراحی دقیق‌تر این ماشین منجر شود. در روش‌های قبلی طراحی و تحلیل ماشین‌های الکتریکی که تاکنون محققان از آن استفاده می‌کردند، طراحی ماشین با استفاده از مدار معادل مغناطیسی ماشین بود و این روش‌ها معمولاً بر مبنای الگوبرداری از نرم-افزارهای المان محدود برای پیدا کردن مدار معادل مغناطیسی ماشین به‌کار می‌رفت. ایراد عمده مدار معادل‌های مغناطیسی صدق‌نکردن آن‌ها با تغییر ابعاد

شده است. جمعیت اولیه، شامل ۲۰ کروموزوم است و متغیرهای تشکیل‌دهنده هر کروموزوم به صورت تصادفی از محدوده تغییرات تعیین شده انتخاب می‌شوند. جمعیت اولیه را می‌توان به صورت رابطه (۸) تعریف کرد:

(۸)

$$CHROMOSOME(i)=[P_i(1),P_i(2),P_i(3),P_i(4),P_i(5)], \\ i=1:20$$

هر کروموزوم انتخاب شده، معرف یک ساختار تصادفی از موتور سوئیچ رلوکتانس است. در واقع در الگوریتم ژنتیک متغیرها به جای اینکه توسط کاربر انتخاب شوند، این متغیرها به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و در واقع هر کروموزوم به عنوان اطلاعات ورودی یک ماشین خاص، به عنوان ورودی به برنامه اول وارد می‌شود. عیناً همان روند برنامه اول تکرار خواهد شد تا پروفیل گشتاور برای محدوده مشخص شده موتور از هم‌محوری کامل تا غیرهم‌محوری کامل به دست آید. در این برنامه برای دقت مناسب در استخراج پروفیل گشتاور، نتایج گشتاور به ازای هر درجه گردش روتور نسبت به استاتور به دست آمده است؛ یعنی برای موتور  $\frac{3}{4}$  که زاویه هم‌محوری تا غیرهم‌محوری ۴۵ درجه است، نیاز است تا هر ماشین انتخاب شده ۴۵ بار توسط نرم‌افزار FEMM4.2 تحلیل شود. در واقع در هر نسل که شامل ۲۰ کروموزوم است، نیاز است تا ۹۰۰ بار ماشین توسط نرم‌افزار FEMM4.2 تحلیل شود و نتایج آن به منظور تحلیل‌های مورد نظر استفاده شود. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد با ۲۰ نسل می‌توان به نتایج مطلوب و ساختار مورد نظر دست یافت. در این برنامه برای تولید هر نسل از الگوریتم ژنتیک ساده استفاده شده است؛ یعنی نسل بعدی از روش تقاطع کروموزوم‌ها و جهش در متغیرهای کروموزوم‌ها در محدوده تعیین شده استفاده شده است. اگر برای جواب مطلوب ۲۰ نسل مورد نظر باشد، مشاهده می‌شود با

**گام پنجم-** برای جمعیت اولیه ۲۰ کروموزوم از متغیرهای مورد نظر به طور تصادفی در دامنه تغییرات در نظر گرفته شده، انتخاب می شوند.

**گام ششم-** کروموزوم های مورد نظر، که هر کروموزوم معرف یک ماشین است، توسط فم تحلیل شده و از بین این کروموزوم ها بهترین کروموزوم انتخاب می شود و به عنوان بهترین کروموزوم معرفی می شود.

**گام هفتم-** نسل های بعدی نیز بر اساس الگوریتم ژنتیک انتخاب و مراحل ۲ و ۶ در مورد آنها اعمال می شود تا الگوریتم به آخرین تولید نسل خود نایل شود.

**گام هشتم-** نتایج حاصل از الگوریتم برای گشتاور، ریپل گشتاور، راندمان و اندوکتانس برای نسل های مختلف مقایسه می شوند.

**گام نهم-** نتایج حاصل از بهترین ساختار انتخاب شده حاصل از الگوریتم با ماشین مبنا مقایسه می شود.

**گام دهم-** پایان الگوریتم.

با توجه به الگوریتم ارائه شده، الگوریتم ژنتیک بر روی ماشین مبنا اعمال شد. نتایج حاصل از الگوریتم بر روی پارامترهای تعیین شده برای کروموزوم ها یا آخرین نسل در جدول (۲) ارائه شده است.

ماشین است. لذا در روش های قدیمی، مدار معادل مغناطیسی مطرح شده، تنها برای یک ساختار ثابت از ماشین صادق بودند و با تغییر ساختار مدار معادل مغناطیسی نمی تواند از دقت لازم برخوردار باشد. در این مقاله، تحلیل المان محدود در پروسه طراحی استفاده شده است و این روش می تواند به طراحی ماشین های الکتریکی دقت بیشتری ببخشد؛ روشی که تاکنون در مقاله ها مشاهده نشده است. این الگوریتم به صورت زیر معرفی می شود:

### الگوریتم کاهش ریپل گشتاور بر مبنای طراحی ساختار ماشین با استفاده از الگوریتم ژنتیک

**گام اول-** ابتدا ابعاد اولیه ای برای ماشین مبنا در نظر گرفته می شوند. این ابعاد عبارت اند از: ۱. فاصله هوایی؛ ۲. شعاع داخلی روتور؛ ۳. شعاع خارجی روتور؛ ۴. کمان داخلی روتور؛ ۵. کمان خارجی روتور؛ ۶. کمان داخلی استاتور؛ ۷. ضخامت برجستگی قطب؛ ۸. کمان خارجی استاتور؛ ۹. ضخامت یوغ؛ ۱۰. طول ماشین.

**گام دوم-** تحلیل ماشین با استفاده از فم به منظور استخراج مشخصات الکترومغناطیسی نظیر گشتاور، ریپل گشتاور و راندمان انجام می شود تا بتوان مبنای مقایسه های بعدی باشد.

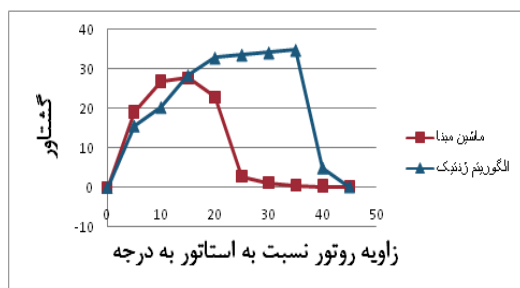
**گام سوم-** شروع الگوریتم ژنتیک.

**گام چهارم-** پارامترهای مورد نظر که در الگوریتم ژنتیک قرار است تغییر کنند، انتخاب می شوند و دامنه تغییرات آنها با توجه به آنالیز حساسیت روی پارامترهای ماشین مبنا به دست می آید.



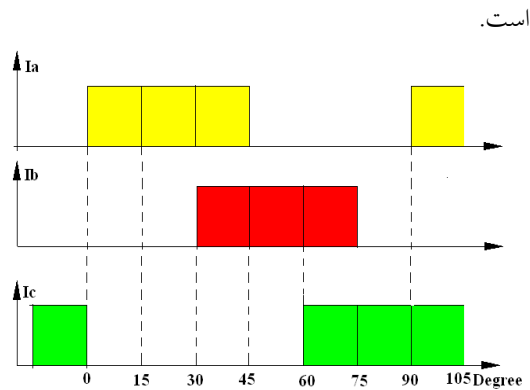
جدول (۲). نتایج الگوریتم ژنتیک بر روی آخرین نسل به نظورتعیین کمترین ریپل گشتاور

Ch	P(2)	P(4)	P(5)	P(7)	P(9)	Tav	Tr
1	0.04	77.40	26.80	33.52	20.58	18.23	0.42
2	0.03	74.01	27.56	36.13	23.58	19.66	0.42
3	0.04	77.17	37.37	35.94	21.00	19.65	0.43
4	0.02	65.55	35.37	38.08	24.80	19.65	0.43
5	0.03	69.42	32.86	39.99	24.78	18.77	0.43
6	0.04	79.70	37.76	36.48	20.37	19.23	0.44
7	0.04	68.99	27.12	32.91	23.54	20.59	0.44
8	0.05	65.60	27.87	35.71	24.66	18.72	0.44
9	0.04	74.01	27.14	39.84	24.88	20.50	0.44
10	0.03	73.87	27.93	33.46	24.78	20.49	0.44
11	0.03	79.52	36.22	36.07	22.14	19.37	0.45
12	0.04	61.53	27.14	39.84	24.88	19.37	0.45
13	0.03	76.17	32.86	39.99	24.78	18.47	0.45
14	0.04	77.17	37.37	35.94	21.00	18.47	0.45
15	0.03	61.53	33.84	32.69	21.51	18.47	0.45
16	0.03	68.99	27.12	32.91	23.54	18.47	0.45
17	0.05	66.25	25.74	34.69	20.29	20.78	0.45
18	0.03	73.87	27.93	33.46	22.14	18.33	0.45
19	0.03	61.53	33.84	32.69	21.51	18.33	0.45
20	0.05	61.86	33.13	31.27	20.48	18.33	0.45



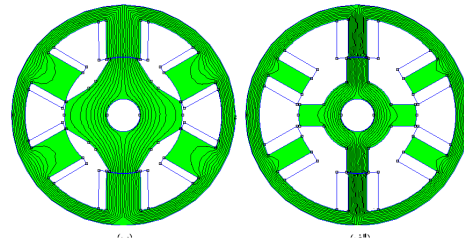
شکل (۳). نتایج الگوریتم ژنتیک در مقایسه با ماشین مبنا

همان‌گونه که مشاهده می‌شود از طریق الگوریتم ژنتیک می‌توان به بهترین ساختار که کمترین ریپل گشتاور را داشته باشد، دست یافت. شکل (۳) مقایسه پروفیل گشتاور ماشین مبنا را با ماشین حاصل از الگوریتم ژنتیک و شکل (۴) ساختارهای آن‌ها را به ترتیب نشان می‌دهند.



شکل (۵). تحریک فازهای a, b و c بر حسب موقعیت قطب‌های روتور و استاتور

همان‌گونه که از شکل (۵) مشاهده می‌شود، اگر روتور یک گردش کامل انجام دهد، مشخصه‌های هر فاز ۴ بار تکرار خواهد شد؛ به عبارت دیگر از هر ۹۰ درجه چرخش روتور می‌توان نتایج مورد نظر را استخراج کرد و نیازی به گردش یک دور کامل روتور برای استخراج نتایج نیست. در این بخش با توجه به نتایج مشاهده‌شده از برنامه دوم با دقت خوب می‌توان نتیجه گرفت که تحریک فازها روی هم‌دیگر اثری ناچیز دارند و می‌توان از آن صرف نظر کرد؛ زیرا به دلیل هم‌پوشانی دو فاز متوالی به اندازه ۱۵ درجه مشاهده می‌کنیم که این اتفاق، زمانی حاصل می‌شود که عمل کموتاسیون فازها رخ می‌دهد و در این ناحیه فاز تحریک‌شده قبلی ۱۵ درجه تا هم-محوری کامل فاصله دارد و فاز جدید شروع از غیرهم-محوری کامل است. در این ناحیه، چگالی شار بسیار ناچیز است؛ بنابراین عملکرد دو فاز با هم در این ناحیه مشخصه ماشین را به حالت اشباع نمی‌برد.



شکل (۴). ساختار ماشین ناشی از پارامترها یا الگوریتم ژنتیک و

آنالیز حساسیت و ماشین مینا

(الف) ماشین مینا، (ب) الگوریتم ژنتیک.

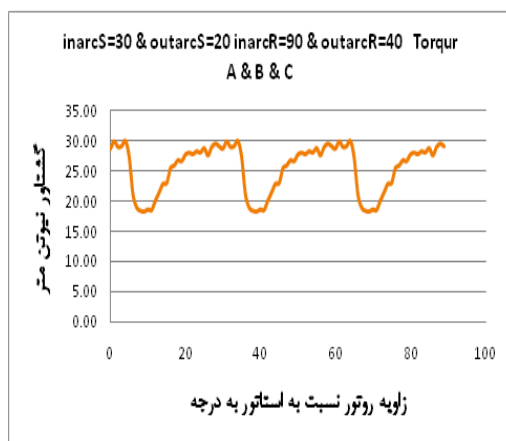
### ۳. طراحی درایو ماشین برای مشخصه گشتاور بدون ریپل

در بخش قبل، طراحی ساختار ماشین به منظور بهبود ریپل گشتاور از طریق الگوریتم ژنتیک روی پارامترهای ماشین ارائه شد. در طراحی انجام‌شده، مشخصه ریپل گشتاور و گشتاور ماکزیمم صرفاً برای تحریک یکی از فازها از هم-محوری کامل تا غیرهم‌محوری کامل به دست آمد. در این بخش می‌خواهیم اثر ساختار به دست آمده از الگوریتم ژنتیک را روی درایو ماشین وقتی فازهای ماشین فعال است، بررسی کنیم. از آنجایی که ماشین مورد مطالعه ماشین ۶/۴ است، جریان تحریک هر فاز از هم‌محوری کامل تا غیرهم‌محوری کامل ۴۵ درجه خواهد شد و میزان هم‌پوشانی فازها ۱۵ درجه است؛ بنابراین جریان تحریک فازها را در یک گردش کامل روتور به صورت شکل (۵) می‌توان نشان داد. لازم به ذکر است که در نرم‌افزار المان محدود استفاده‌شده FEMM در این مقاله، ارتباط درایو با ماشین وجود ندارد و لذا این مقاله به دنبال استخراج و معرفی جریان مورد نیاز برای تحریک سیم‌پیچ‌های فازهای ماشین است. طراحی درایو بر اساس جریان استخراج‌شده نیاز به مطالعه مستقلی دارد که خارج از بحث این مقاله

درایو مورد نظر انتخاب می‌شود. نتایج حاصل از آن در جدول (۳) ارائه شده است. لازم به ذکر است طراحی درایو مورد نظر برای کسب ریپل گشتاور صفر قابل اعمال روی هر ساختار ماشین خواهد بود؛ اما اگر ساختار بهینه انتخاب نشود، مشخصه جریان مطلوبی حاصل نخواهد شد. شکل (۶) گشتاور ماشین را برای ساختار تعیین شده در جدول (۳) نشان می‌دهد.

جدول (۳). نتایج آنالیز حساسیت با تغییر کمان داخلی و خارجی روتور و کمان داخلی و خارجی استاتور به طور هم‌زمان بر روی گشتاور کل

inarcR=90 & outarcR=40 & inarcS=30 & outarcS=20,	
Tav	25.52
Tmax	30.08
Tmin	18.24
Ripple	0.46



شکل (۶). نتایج آنالیز حساسیت تغییر کمان داخلی و خارجی روتور و کمان داخلی و خارجی استاتور بر روی گشتاور کل از جدول (۳) مشاهده شد. ماشین مورد نظر، ریپل

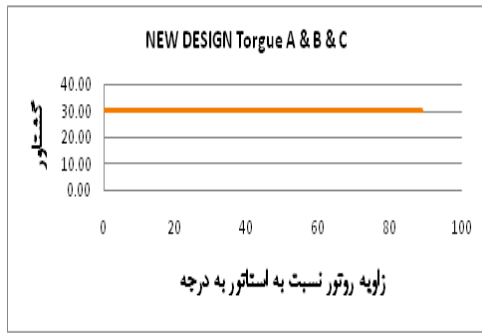
### ۳-۱. برنامه طراحی درایو ماشین

همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، به منظور کاهش ریپل گشتاور دو روش عمده وجود دارد: روش اول، ماشین از نظر ساختار فیزیکی طوری طراحی شود تا مشخصه خوبی برای تولید گشتاور، کاهش ریپل گشتاور و مشخصه‌های مورد نظر دیگر را فراهم کند. روش دوم، طراحی درایو موتور به گونه‌ای باشد تا کمبودهای موجود در طراحی ساختار را بتوان توسط آن برطرف کرد؛ بنابراین در این بخش، هدف، کاهش ریپل گشتاور توسط طراحی مناسب درایو است که بتوان ریپل گشتاور را در حد ممکن کاهش داد.

### الگوریتم طراحی درایو ماشین سویچ رلوکتانس

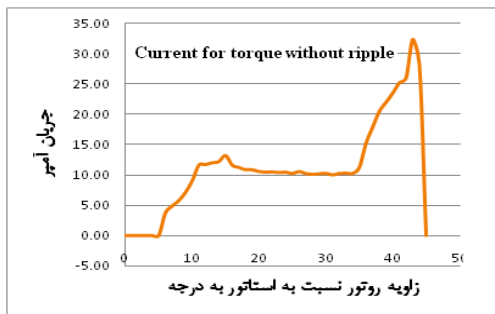
گام اول- ساختار حاصل از الگوریتم ژنتیک با کمترین ریپل گشتاور انتخاب می‌شود.  
گام دوم- گشتاور یکی از فازها از هم‌محوری کامل تا غیرهم‌محوری کامل به دست می‌آید.  
گام سوم- مشخصه گشتاور ایده‌آل که به صورت ذوزنقه‌ای شکل متقارن است را طوری انتخاب می‌کنیم که بر مشخصه حاصل از گام دوم کمترین اختلاف را داشته باشد تا ترکیب گشتاورهای سه فاز با ریپل صفر شود.  
گام چهارم- با توجه به مشخصه گشتاور حاصل از گام سوم، جریان تحریک فاز به گونه‌ای انتخاب می‌شود تا این گشتاور حاصل شود.  
گام پنجم- درایو ماشین با توجه به موقعیت روتور نسبت به استاتور باید به گونه‌ای طراحی شود تا جریان تحریک هر فاز به صورت گام چهارم شود.

با توجه به نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک برای تعیین بهترین ساختار، یک ساختار نزدیک به آن برای طراحی



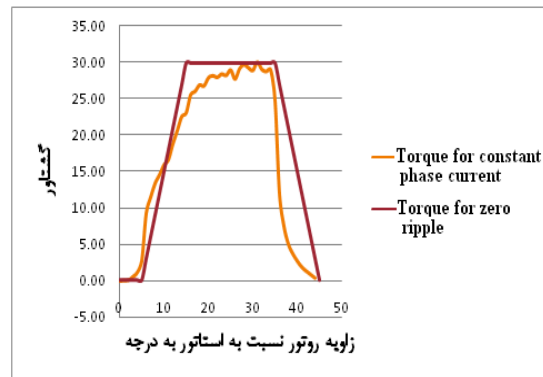
شکل (۹). مشخصه گشتاور کل ماشین با در نظر گرفتن گشتاور ایده‌آل برای هر فاز

برای نزدیک شدن به مشخصه گشتاور از طریق طراحی درایو با در نظر گرفتن ساختار انتخاب شده فوق باید جریان تحریک به گونه‌ای به دست آید تا مشخصه گشتاور مورد نظر کسب شود. برای این منظور بر طبق مشخصه گشتاور ایده‌آل، جریان تحریک باید به گونه‌ای باشد تا گشتاور مورد نظر در هر موقعیت تعیین شده روتور نسبت به استاتور تأمین شود؛ بنابراین با در نظر گرفتن هر نقطه  $(T, \theta)$  که معرف (زاویه، گشتاور) برای هر فاز است، جریان تحریک مورد نظر را به دست می‌آوریم. جریان به-دست‌آمده برای مشخصه گشتاور ایده‌آل برای ساختار انتخاب شده مطابق جدول (۳) در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

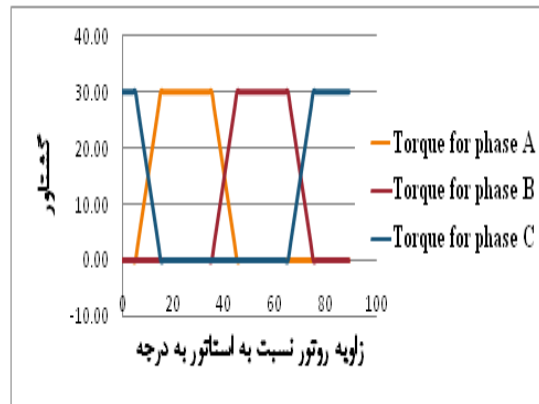


شکل (۱۰). مشخصه جریان برای تولید گشتاور ایده‌آل برای ساختار جدول (۳)

گشتاور خوب و گشتاور متوسط بالایی دارد. مشخصه گشتاور ایده‌آل با ملاحظه گشتاور حاصل شده از جدول (۳) در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، مشخصه گشتاور ایده‌آل فازها به گونه‌ای انتخاب می‌شود تا برآیند کل گشتاور ماشین ثابت باقی بماند؛ به عبارت دیگر، ریبیل گشتاور صفر خواهد شد.



شکل (۷). مشخصه گشتاور ماشین با تحریک همه فازها و مقایسه آن با مشخصه گشتاور ایده‌آل



شکل (۸). مشخصه گشتاور ایده‌آل ماشین برای تحریک هر فاز

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله، روند طراحی یک ماشین به منظور کاهش ریپل گشتاور بر اساس ابعاد اولیه یک ماشین مبنا توسط سه برنامه نوشته شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. اولین برنامه طراحی شده، تحلیل هر ماشین با ابعاد داده شده را توسط نرم افزار المان محدود، بررسی کرد. برنامه دوم، از روش الگوریتم ژنتیک که مبتنی بر برنامه اول بود، یک ساختار مناسب برای ماشین برای حداقل ریپل گشتاور ارائه داد. برنامه سوم، برای طراحی درایو ماشین، مشخصه گشتاور را به گونه ای در نظر گرفت که بر مشخصه واقعی ماشین با جریان ثابت بیشترین انطباق را داشته باشد و در ضمن، ریپل گشتاور ماشین صفر شود. مشاهده شد که امکان کاهش ریپل گشتاور به صفر امکان پذیر است، به شرطی که جریان تحریک فازها به گونه ای باشد تا پروفیل گشتاور مورد نظر را تأمین کند؛ بنابراین اگر بتوان مدار درایو ماشین را به گونه ای طراحی کرد تا جریان استخراج شده را تأمین کند به یک ماشین بدون ریپل گشتاور دست خواهیم یافت.

#### ۵. منابع

- [5] Arumugam, R.; Lindsay, J.F.; Krishnan, R., "Sensitivity of pole arc/pole pitch ratio on switched reluctance motor performance", Industry Applications Society Annual Meeting, 1988., Conference Record of the 1988 IEEE , 1988 , Page(s): 50 -54 vol.1
- [6] Moallem, M.; Ong, C.M.; Unnewehr, L.E., "Effect of rotor profiles on the torque of a switched reluctance motor", Industry Applications Society Annual Meeting, 1990., Conference Record of the 1990 IEEE , 1990 , Page(s): 247 - 253 vol.1
- [7] Tormey, D.P.; Torrey, D.A., "A comprehensive design procedure for low torque-ripple variable-reluctance motor drives", Industry Applications Society Annual Meeting, 1991, Conference Record of the 1991 IEEE , 1991 , Page(s): 244 -251 vol.1
- [8] Finch, J.W.; Faiz, J.; Metwally, H.M.B., "Design study of switched reluctance motor performance", Industry Applications Society Annual Meeting, 1992., Conference Record of the 1992 IEEE , 1992 , Page(s): 242 - 248 vol.1
- [9] N. K. Sheth and K. R. Rajagopal, "Optimum Pole Arcs for a Switched Reluctance Motor for Higher Torque With Reduced Ripple", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 39, NO. 5, SEPTEMBER 2003
- [10] Jin Woo Lee, Hong Seok Kim, Byung Il Kwon, and ByungTaek Kim, "New Rotor Shape Design for Minimum Torque Ripple of SRM Using FEM", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 40, NO. 2, MARCH 2004
- [11] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, and N. C. Cheung, "Evaluation of Torque Sharing Functions for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motor Drives in Electric Vehicles", 2008 Australasian Universities Power
- [1] Miller, T.J.E., Brushless permanent magnet and reluctance motor, Oxford University, New York, 1989
- [2] Miller, T.J.E., Switched reluctance motor and their control, Oxford University, New York, 1993
- [3] Lawrenson, P.J., Stephson, J.M., "Variable-speed switched reluctance motor", IEE Proc. Pt. B, Vol. 127, No,4, pp.253-265, 1980
- [4] Krishnan, R.; Arumugan, R.; Lindsay, J.F., "Design procedure for switched-reluctance motors", Industry Applications, IEEE Transactions on Volume: 24 3 , May-June 1988, Page(s): 456 -461

- purposes using self organizing”, neural networks X. Proc. Of the 1st IEEE Conf. On Control of Applications (Dayton. OH), Vol. 2, pp.944-942, 1992.
- [16] L.Ho, X.D Xue, K.W.E cheng, “Optimization and evaluation of torque sharing functions for torque ripple minimization in switched reluctance motors drive”, IEEE transactions on power electronics, vol .24, no.2, SEPTEMBER 2009.
- [17] Alkhazendar M. A., Kader F.M.A., Hawwas Y. A., Kalas, A. E., “Performance Analysis & realization of Bipolar Current Waveform for a Switched Reluctance Motor”, 12<sup>th</sup> International Middle-East Power System Conference, ME PCON 2008, 12-15 March 2008, pp. 387-391.
- [18] M. R. Besmi, “Torque ripple Reduction in a switched reluctance motor by Genetic Algorithm”, Reserch in Shahed University, 2011.
- Engineering Conference
- [12] Ehsani, M.; Husain, I.; Ramani, K.R.; Galloway, J.H., “Dual-decay converter for switched reluctance motor drives in low-voltage applications”, Power Electronics, IEEE Transactions on Volume: 8 2 , April 1993 , Page(s): 224 -230
- [13] Krishnan, R.; Materu, P.N., “Analysis and design of a low-cost converter for switched reluctance motor drives”, Industry Applications, IEEE Transactions on Volume: 29 2 , March-April 1993 , Page(s): 320 -327
- [14] J. J., Ruchti, R. H. and Feng, “Nonlinear estimation of torque in switched reluctance motor using grid locking and preferential”, training techniques of self organizing neural networks.Garsida, X.IEEE Int. Joint Conf. On Neural Networks(Baltimore, MD), pp.II.811-816, June 1992.
- [15] Garsida, J. J., Ruchti, R. H. and Feng, “Modeling torque in switched reluctance motor for Adaptive control