

طراحی بهینه موتور سنکرون مغناطیس دائم با سیم‌پیچی سه فاز دوگانه با قابلیت تحمل پذیری خطا

سعادت جمالی آرند^۱ جواد رحمانی فرد^۲

۱- استادیار- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه یاسوج - یاسوج - ایران

s.jamali@yu.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی قم- قم- ایران

rahmanifard@qut.ac.ir

چکیده: ماشینهای سه فاز دوگانه نسبت به ماشینهای چندفاز دارای مزایایی می‌باشند. این ماشین‌ها دارای دو سیم‌پیچی سه فاز شیار کسری هستند (تعداد شیار بر قطب بر فاز کسری است) که از دو اینورتر سه فاز متداول تغذیه می‌شوند. هرچند گشتاور خروجی در شرایط پس از خطا کاهش می‌یابد اما استراتژی‌های کنترل پس از خطای آنها ساده می‌باشد و عملکرد پس از خطای آنها پایدار است. بنابراین، تجاری سازی ماشین‌های سه فاز دو گانه در آینده بسیار امیدوار کننده است. در این مقاله ابتدا آرایش سیم‌بندی و ترکیب شیار و قطب‌های ممکن بررسی خواهد شد. عملکرد ساختارها با آرایشهای مختلف سیم‌بندی و ترکیب قطب شیارهای ممکن با هم مقایسه و ساختار بهینه انتخاب خواهد شد. سپس با استفاده از اصل برابری نیرو محرکه مغناطیسی، استراتژی کنترل در شرایط خطا بدست می‌آید و به بررسی قابلیت تحمل پذیری خطا در ماشین سه فاز دوگانه مغناطیس دائم خواهیم پرداخت. در نهایت عملکرد موتور در شرایط خطای مدار باز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی: موتور مغناطیس دائم، سیم پیچی متمرکز، طراحی بهینه، آنالیز المان محدود

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.2.97

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سعادت جمالی آرند

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- کهگیلویه و بویر احمد- یاسوج - خیابان دانشجو - دانشگاه یاسوج

۱- مقدمه

با توسعه اجتماعی و اقتصادی و توجه فزاینده به مسایل زیست محیطی و انرژی، تحقیقات در زمینه خودرو پاک و توسعه و گسترش آنها به یک موضوع داغ و محبوب در جهان تبدیل شده است. وسایل نقلیه الکتریکی با رانندمان بالا، سر و صدای کم، بهره وری بالا، عدم تولید گازهای گلخانه‌ای و تنوع انرژی و غیره، به موضوعات اصلی تحقیقات توسعه جهان تبدیل شده است. توسعه وسایل نقلیه الکتریکی وابسته به پیشرفت علم و فناوری است؛ به ویژه، نیاز به بهبود عملکرد سیستم قدرت که منجر به کاهش هزینه موتور می‌شود [۱].

قابلیت اطمینان و امنیت سیستم درایو الکتریکی، یک شاخص مهم برای اندازه‌گیری عملکرد وسایل نقلیه الکتریکی است. در یک موتور سه فاز، چه سیم پیچ موتور اتصال کوتاه، مدار باز، و یا در واحد کنترل الکترونیک قدرت مشکلی اتفاق بیفتد، گشتاور خروجی موتور به طرز چشمگیری کاهش، و یک لرزش قوی اتفاق خواهد افتاد، به طوری که دستگاه متوقف و یا آسیب خواهد دید و تهدیدی برای سیستم‌های امنیتی و سرنشینان خودرو خواهد داشت [۲]. در ملاحظات قابلیت اطمینان و ایمنی، قابلیت عملکرد موتور در شرایط خطا در هنگام طراحی موتور در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب که، هنگامی که موتور در شرایط خطا قرار می‌گیرد، ماشین الکتریکی به صورت لحظه-ای متوقف نمی‌شود بلکه شما می‌توانید بخشی و یا حتی تمام قابلیت‌های عملکرد را داشته باشید و عملکرد در شرایط خطا باعث صدمه به ماشین و یا بدتر شدن وضعیت خطا نمی‌شود. بنابراین در وسایل نقلیه الکتریکی طراحی شده با استفاده از یک سیستم مقاوم در برابر خطا، در صورت بروز خطا، اتومبیل‌های برقی می‌توانند تا رسیدن به یک مکان امن و تا زمانی که ماشین الکتریکی به درستی تعمیر شود به رانندگی ادامه دهند [۳].

در این مقاله یک موتور سه فاز دوگانه مغناطیس دائم به عنوان یک موتور شش فاز خاص مورد بررسی قرار می‌گیرد. هنگامی که در سیم پیچ موتور و یا کنترل درایو موتور خطایی اتفاق می‌افتد، با استفاده از سیستم تشخیص عیب، نوع خطا شناسایی می‌شود و حالت کنترلی همان خطا در مورد سیم پیچها اجرا می‌شود [۵].

اگر چه گشتاور خروجی موتور کاهش می‌یابد، اما تا زمانی که در یک محدوده قابل قبول باشد، ماشین الکتریکی قادر به عملکرد امن و پایدار خواهد بود. موتور سه فاز دوگانه مزایای موتورهای چند فاز مانند رپیل گشتاور کوچک، چگالی گشتاور بالا و گشتاور بزرگ در سرعت کم را دارد. از طرفی نیز بخاطر استفاده از منبع تغذیه اینورتر سه فاز استاندارد موجود در بازار، دارای کاربرد بسیار گسترده‌ای است [۶]. موتور سه فاز دوگانه از دو مجموعه سیم‌پیچ سه فاز ستاره تشکیل شده است و دارای مزایای زیر است [۵]:

(۱) قابلیت بالا تحمل‌پذیری خطا.

(۲) روش کنترلی ساده در شرایط خطا، محتوای هارمونیک پایینی دارد و موجب از بین رفتن کشش مغناطیسی نامتعادل می‌شود.

(۳) مشخصه عملکردی خوب در شرایط خطا. در این زمان، موتور می‌تواند اضافه بار را تحمل کند و ظرفیت خروجی موتور افزایش یابد.

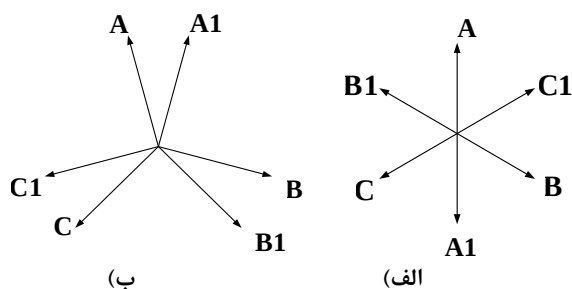
در سال ۱۹۹۶ اولین موتور تحمل‌پذیر خطا چند فاز با سیم‌پیچی شیار کسری متمرکز ارائه شد [۱]. در سال ۲۰۰۷، یک موتور ۸ قطب، kW ۱۶، شش فاز، ۱۳۰۰۰ دور بر دقیقه با قابلیت تحمل‌پذیری خطا در سیستم پمپ سوخت موتور جت مورد استفاده قرار گرفت [۲].

در سال ۲۰۰۳، کنترل‌برداری حلقه بسته موتور مغناطیس دائم تحمل‌پذیر خطا به منظور رسیدن به نتایج مورد نظر بهبود پیدا کرد. ساختار این کنترلر، ایزولاسیون بین فازها و ایزولاسیون حرارتی فازها، ایزولاسیون عایق الکتریکی و ایزولاسیون فیزیکی را ایجاد کرد، اما ایزولاسیون مغناطیسی را ایجاد نمی‌کند. هنگامی که یک فاز دارای انرژی می‌شود، قسمتی از شار تولید شده با فاز دیگر در ارتباط است، بنابراین اندوکتانس متقابل بین دو فاز وجود دارد. این برنامه دارای عملکرد خوب در خطای مدار باز می‌باشد، اما با توجه به وجود القای متقابل، ویژگی‌های خطای اتصال کوتاه مناسبی ندارد [۷].

در سال ۲۰۰۲ در دانشگاه شفیلد در انگلستان پروفیسور Howe و همکارانش یک روش تعیین تعداد قطبها و تعداد شیارها را برای یک موتور چند فاز ارائه دادند [۸]. قاعده کلی برای ماشین‌های الکتریکی چند فاز با سیم‌پیچ متمرکز شیار کسری استخراج شد و مشخصه گشتاور خروجی موتورهای چند فاز با تعداد فازهای مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. پس از آن پروفیسور zhu و همکارانش عملکرد یک موتور ۱۰ قطب و ۱۲ شیار را با سیم‌پیچی تک لایه و دو لایه را مقایسه کردند [۹].

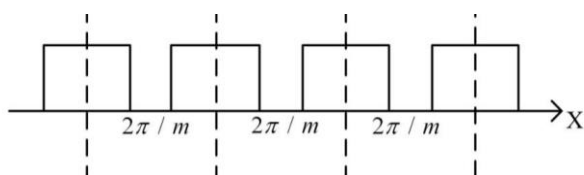
در سال ۲۰۰۵ پروفیسور Bianchi و همکارانش در دانشگاه پادووا، ایتالیا یک ماشین شیار کسری طراحی کردند. آنها با استفاده از روش متعارف تحلیل ستاره ای شیارها به بررسی سیم‌پیچی شیار کسری متمرکز پرداخته و اصول کلی سیم‌پیچی شیار کسری را ارائه کردند و ضریب سیم‌پیچی و اندوکتانس متقابل برای ترکیبهای مختلف سیم‌پیچی را محاسبه و بررسی نمودند [۱۰]. آنها همچنین نشان دادند، موتور شیار کسری با سیم‌پیچی متمرکز دارای تلفات مسی کوچکتر، گشتاور خروجی صافتر و قابلیت تحمل‌پذیری خطا بالاتر و قابلیت کنترل سرعت بهتر می‌باشد. با این حال هارمونیک‌های ایجاد شده ناشی از جریان‌های گردابی در نیرو محرکه مغناطیسی از معایب چنین ساختاری است [۱۱].

در سال ۲۰۰۹، در دانشگاه ویسکانسین مدیسون پروفیسور Bianchi یک موتور آهنربای دائم تحمل‌پذیر خطا با استفاده از مواد نرم مغناطیسی کامپوزیت (SMC) ارائه کرد، که هر فاز به صورت یک



شکل ۱: الف) آرایش متقارن شش فاز (ب) آرایش ستاره‌ای دوگانه با ۳۰ درجه اختلاف فاز

آرایش سیم‌پیچ متقارن شش فاز مانند یک موتور چند فاز است، که شش فاز به طور مساوی توزیع می‌شوند، هر یک از سیم‌پیچ‌ها با ۶۰ درجه اختلاف فاز الکتریکی تحریک می‌شود. آرایش شش فاز متقارن دارای ویژگی‌های مغناطیسی مشابه با آرایش سه فاز با کمربند فاز ۶۰ درجه است. از سوی دیگر، آرایش نامتقارن سه فاز با دو سیم‌پیچ سه فاز با ۳۰ درجه اختلاف فاز از نظر مغناطیسی با یک ماشین شبه دوازده فاز برابر است. تجزیه و تحلیل هارمونیک نیرو محرکه مغناطیسی ناشی از سیم‌پیچی چند فاز در شکل ۲ نشان داده شده است.



محور فاز سوم محور فاز دوم محور فاز اول

شکل ۲: محور هر فاز سیم‌پیچی و موقعیت MMF

در شکل ۲، تفاوت زاویه الکتریکی بین محورهای دو فاز $2\pi/m$ است. محور فاز A در موقعیت ۰ درجه است، نیرو محرکه مغناطیسی ناشی از فاز اول به صورت زیر است.

$$F_{1v} = \frac{2}{\pi v} k_{Nv} N i_1 \cos vx \quad (1)$$

که v مرتبه هارمونیک، F_{1v} هارمونیک v ام نیرو محرکه ناشی از فاز اول، N تعداد دور بر فاز، i_1 جریان سیم‌پیچی فاز اول، k_{Nv} ضریب سیم‌پیچی هارمونیک v ام، x فاصله از مبدأ می‌باشند. با توجه به اینکه سیم‌پیچ‌ها با اختلاف زمانی $2\pi/m$ درجه الکتریکی تحریک می‌شوند، برای فاز m ام می‌توان نوشت:

$$F_{mv} = \frac{2}{\pi v} k_{Nv} N \cos v \left(\alpha - (m-1) \frac{2\pi}{m} \right) \times \sqrt{2} I \sin \left(\omega t - (m-1) \frac{2\pi}{m} \right) \quad (2)$$

که در آن I جریان موثر هر فاز است. با استفاده از فرمول تبدیل ضرب به جمع مثلثاتی و جمع کردن همه فازها می‌توان نوشت:

واحد مستقل می‌باشد، یکسان بودن فازها باعث صرفه‌جویی در هزینه ساخت موتور می‌شود. در مقایسه با فرایند ساخت ماشین با ورقه فولاد سیلیکونی مواد کامپوزیت مغناطیسی قابل انعطاف‌تر است زیرا پس از خرابی یک واحد آن را با واحد دیگر میتوان جایگزین کرد و می‌تواند یک ضریب سیم پیچ بزرگتر ایجاد کند [۱۲].

در سالهای اخیر نیز تحقیقات گسترده‌ای در زمینه موتورهای ماشین‌های سه فاز دو گانه مغناطیس دائم صورت گرفته است.

در [۱۳] به مدل‌سازی خطای مدار باز و کنترل تحمل‌پذیر خطا در سه فاز دو گانه مغناطیس دائم پرداخته است و یک مدل جامع که در آن هم گشتاور آهنربای دائمی و هم گشتاور رلوکتانسی در نظر گرفته شده است را پیشنهاد می‌دهد. در [۱۴] با استفاده از روش المان محدود، تاثیر آرایش سیم‌بندی استاتور بر ویژگی‌هایی موتور سه فاز دو گانه مغناطیس دائم مانند گشتاور و بازده با تغییرات زاویه جریان در حالت پیش فاز و پس فاز مورد بررسی قرار گرفته و معیارهایی برای طراحی و انتخاب روش سیم‌بندی استاتور پیشنهاد شده است. در [۱۵] یک جابجایی زاویه ای غیر متعارف جدید (۱۵ درجه) بین دو مجموعه سیم‌پیچ سه فاز برای ماشین‌های سه فاز دو گانه مغناطیس دائم پیشنهاد شده است و نشان داده شد که در شرایط مدار باز سالم، پیکربندی پیشنهادی ۱۵ درجه دارای عملکرد الکترو مغناطیسی قابل مقایسه با پیکربندی ۳۰ درجه و عملکرد بهتری از همتای ۰ درجه خود است.

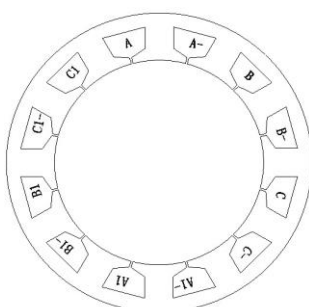
در این مقاله ابتدا آرایش سیم‌بندی و ترکیب شیار و قطب‌های ممکن بررسی خواهند شد. عملکرد ساختارها با آرایشهای مختلف سیم‌بندی و ترکیب قطب و شیارهای ممکن با هم مقایسه و ساختار بهینه انتخاب خواهد شد. سپس back-EMF با در نظر گرفتن کمانهای داخلی و خارجی نامساوی در حالت بی بار بهینه‌سازی می‌شود. در ادامه عملکرد تحمل‌پذیری خطا در شرایط اتصال کوتاه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت خطای مدار باز در موتور ارائه شده مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- آرایش سیم پیچی موتور سه فاز دو گانه

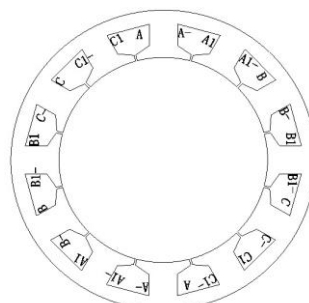
در این مقاله، ساختار سیم پیچی استاتور به صورت سیم‌پیچی شیار کسری متمرکز در نظر گرفته شده است در این مدل سیم‌بندی یک کوئل از طریق دو شیار مجاور به دور دندانه پیچیده می‌شود. این مدل سیم بندی دارای ایزولاسیون الکتریکی، مغناطیسی، ایزولاسیون حرارتی و قابلیت تحمل خطا بهتری است برای تحقق موتور سه فاز دوگانه مناسب می‌باشد. برای سیم‌بندی سه فاز دو گانه دو مدل سیم‌بندی وجود دارد که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند [۱۶، ۱۷].

۳- تعیین تعداد قطب ها و شیارها

در طراحی موتور سه فاز دوگانه فاز با سیم پیچی متمرکز شیارکسری هنگامی که سیم پیچ استاتور یک توزیع متقارن دارد (به عنوان مثال، یک تفاوت زاویه فاز ۶۰ درجه الکتریکی بین فازهای سیم پیچی)، تعداد شیارهای استاتور باید مضرب صحیحی از ۱۲ باشد و در آرایش دو سیم پیچ ۷ یا ۳۰ درجه اختلاف فاز نیز تعداد شیارهای استاتور باید مضرب صحیحی از ۱۲ باشد. تعداد زوج قطبهای روتور باید برابر با هارمونیک MMF استاتور انتخاب شود. در آرایش متقارن سیم پیچی استاتور تعداد زوج قطب های روتور می تواند ۱ و ۵ و ۷ و ۱۱ و ۱۳ و در آرایش ستاره ای با ۳۰ درجه اختلاف فاز می تواند ۱ و ۱۱ و ۱۳ و ۲۳ و ۲۵ انتخاب شود. چون در سیم پیچی شیار کسری متمرکز گام کوئل با گام دندان برابر است تعداد قطبهای روتور باید نزدیک به تعداد دندانه ها انتخاب شوند اینکار ضریب سیم پیچی بزرگ را تضمین می کند. از طرفی با توجه به اندازه موتور، به منظور اطمینان از استحکام مکانیکی موتور، تعداد قطب و شیار موتور نباید بیش از حد بزرگ انتخاب شود. به طور خلاصه ۳ ساختار برای موتور سه فاز دو گانه با آرایشهای ۱۲ شیار ۱۰ قطب (شش فاز متقارن)، ۱۲ شیار ۱۰ قطب (ستاره ای با ۳۰ درجه اختلاف فاز) و ۲۴ شیار ۲۲ قطب (ستاره ای با ۳۰ درجه اختلاف فاز) وجود دارد که به ترتیب در شکل های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده اند.



شکل (۳): آرایش شش فاز متقارن ۱۲ شیار و ۱۰ قطب



شکل (۴): آرایش ستاره ای دوگانه با ۳۰ درجه اختلاف فاز، ۱۲ شیار و ۱۰ قطب

$$F_v = F_{1v} + F_{2v} + F_{3v} + \dots + F_{mv} = \frac{\sqrt{2}}{\pi v} k_{Nv} NI \times \left\{ \sin(\omega t - vx) + \dots + \sin\left(\omega t - vx + (m-1)(v-1)\frac{2\pi}{m}\right) + \sin(\omega t + vx) + \dots + \sin\left(\omega t + vx - (m-1)(v-1)\frac{2\pi}{m}\right) \right\} = F_{v+} + F_{v-} \quad (3)$$

در فرمول بالا F_{v+} مولفه مستقیم نیروی محرک مغناطیسی و F_{v-} مولفه معکوس نیروی محرک مغناطیسی است. دامنه مولفه مستقیم نیروی محرک برابر است با:

$$F_{v+} = m \frac{\sqrt{2}}{\pi v} k_{Nv} NI k_{v+} \quad (4)$$

$$k_{v+} = \frac{\sin m \frac{1}{2}(v-1) \frac{2\pi}{m}}{m \sin \frac{1}{2}(v-1) \frac{2\pi}{m}} = \frac{\sin(v-1)\pi}{m \sin \frac{(v-1)\pi}{m}} \quad (5)$$

دامنه مولفه معکوس نیروی محرک برابر است با:

$$F_{v-} = m \frac{\sqrt{2}}{\pi v} k_{Nv} NI k_{v-} \quad (6)$$

$$k_{v-} = \frac{\sin m \frac{1}{2}(v+1) \frac{2\pi}{m}}{m \sin \frac{1}{2}(v+1) \frac{2\pi}{m}} = \frac{\sin(v+1)\pi}{m \sin \frac{(v+1)\pi}{m}} \quad (7)$$

بنابراین تنها هارمونیکهایی که می توانند وجود داشته باشند وقتی است که:

$$n = \frac{(v \pm 1)}{m} \quad (8)$$

و $n=1, 2, 3, \dots$ می باشد.

سیم پیچی ستاره ای دوگانه با ۳۰ درجه اختلاف فاز دارای هارمونیک های $v=12k \pm 1=1, -11, 13, \dots$ می باشد و آرایش شش فاز متقارن دارای هارمونیک های $v=6k \pm 1=1, -5, 7, -11, 13, \dots$ می باشد. در ترکیبات با شیار و قطب بالا، مولفه اصلی MMF که با طول گام قطب برابر است دارای مرتبه بالا می باشد این در حالی است که هارمونیکهایی با مرتبه پایین و بالاتر وجود دارند. از آن جایی که سرعت چرخش مولفه های هارمونیک به طور معکوس متناسب با مرتبه آن است، پایین ترین مرتبه هارمونیک حداکثر سرعت چرخش نسبت به PM های روتور را دارد. بنابراین جریان های گردابی القایی در PM ها قابل ملاحظه می باشد. تلفات آهنربا دائمی می تواند منجر به افزایش بیش از حد دما شود، که ممکن است باعث آسیب جدی به موتور شود، به عنوان مثال می تواند باعث مغناطیس زدایی برگشتناپذیر آهنربای دائم شود، که یک خطا جدی برای موتور است.

با توجه به این مطالب انتخاب آرایش سیم بندی برای موتور سه فاز دو گانه تنها از طریق محتوی هارمونیک قابل قبول نبوده و باید اندازه هارمونیکها و سرعت نسبی آنها با روتور را نیز در نظر گرفت.

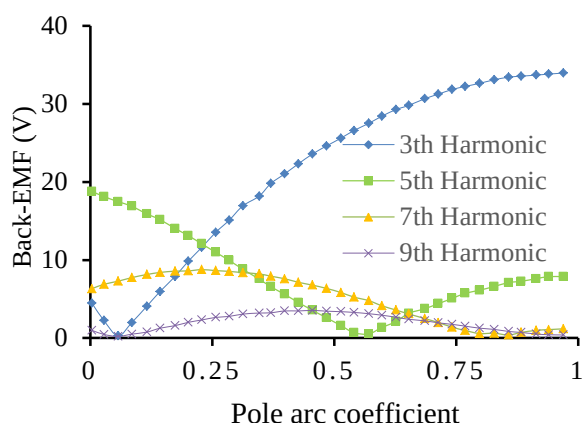
بنابراین نوسانات گشتاور بزرگ می‌شود. بنابراین ساختار نهایی ۲۴ شیار ۲۲ قطب با سیم‌بندی تک لایه با ۳۰ درجه اختلاف فاز انتخاب می‌شود.

۴- بهینه‌سازی back-EMF بی‌باری

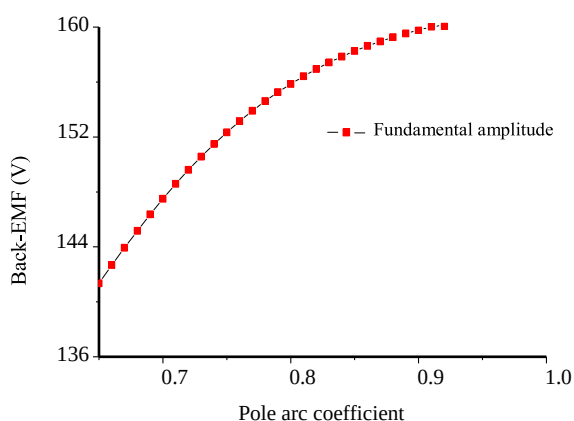
به منظور بهینه‌سازی back-EMF از دو روش بهینه‌سازی ضریب قوس قطب و نابرابر سازی کمان داخلی و خارجی آهن ربا استفاده می‌کنیم.

۴-۱- بهینه‌سازی ضریب قوس قطب

ضریب قوس قطب نسبت کفشد قطب به گام قطب تعریف می‌شود. چون در ماشین سه فاز دوگانه تعداد شیارها و قطبها نزدیک به هم هستند گام قطب (نسبت شیار به قطب) تقریباً یک است. با تغییر ضریب قوس قطب مولفه اصلی و محتوای هارمونیک back-EMF تغییر می‌کند که در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

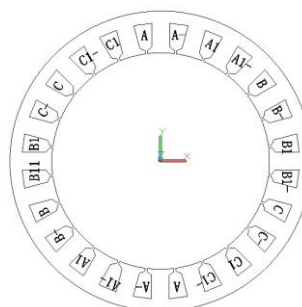


شکل (۶): دامنه زیر هارمونیکها بر حسب ضریب قوس قطب



شکل (۷): دامنه مولفه اصلی بر حسب ضریب قوس قطب

همانطور که از شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان دید، با افزایش ضریب قوس قطب دامنه مولفه اصلی back-EMF افزایش می‌یابد. بعد از رسیدن به ۰٫۹ تقریباً ثابت می‌شود. مولفه سوم در ۰٫۶۷ و مولفه پنجم در ۰٫۸۵



شکل (۵): آرایش ستاره‌ای دوگانه با ۳۰ درجه اختلاف فاز، ۲۴ شیار و ۲۲ قطب

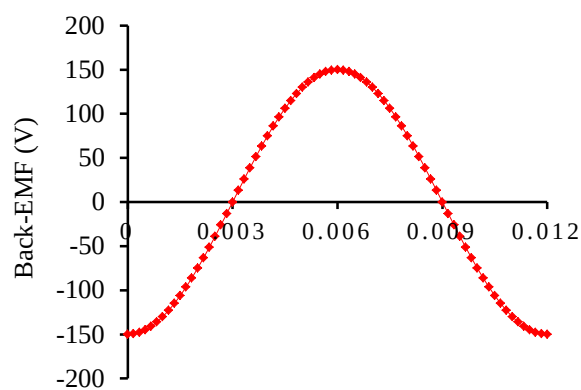
برای مقایسه عملکرد این سه موتور پارامترهای اساسی آنها یکسان در نظر گرفته می‌شود. این پارامترها شامل حجم آهنربا، قطر استاتور، طول فاصله هوایی، طول محوری، جریان نامی و تعداد دور در هر فاز می‌باشد. سایر پارامترها استخراجی این سه موتور در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): مقایسه‌ی پارامترهای سه موتور

پارامترها	۲۴ شیار / ۲۲ قطب	۱۲ شیار / ۱۰ قطب (Y30deg)	۱۲ شیار / ۱۰ قطب
ضریب سیم پیچی	۰٫۹۹۱	۰٫۹۹۶	۰٫۹۶۶
گشتاور متوسط (N.m)	۲۵۴٫۷	۲۱۳٫۶	۲۲۰٫۶
ریپل گشتاور (%)	۲٫۱	۱۱٫۷	۱۵٫۹
پیک جریان اتصال کوتاه (A)	۲۵٫۴	۷۶٫۷	۴۸٫۵
حجم استیل (m3)	۲٫۳۷×۳-۱۰	۲٫۵۴×۳-۱۰	۲٫۵۴×۳-۱۰
تلفات آهن (W)	۱۵۲٫۰۱	۱۱۴٫۵۱	۹۵٫۹۸
تلفات آهنربای دائم (W)	۸۰٫۵۶	۹۵٫۶۸	۱۰۰٫۵۷

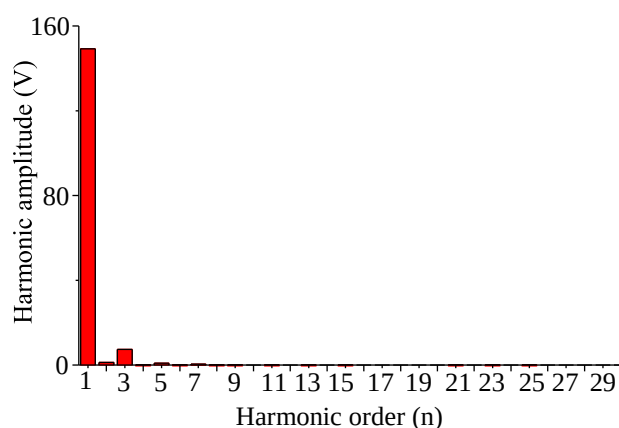
از مقایسه‌ی جدول بالا می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد:

(۱) موتور سه فاز دو گانه ۲۴ شیار ۲۲ قطب با سیم‌بندی تک لایه دارای تلفات استاتور و روتور بیشتر می‌باشد اما از سایر جهات مانند گشتاور متوسط، ریپل گشتاور، جریان اتصال کوتاه دارای برتری می‌باشد.
(۲) در ساختار ۱۲ شیار ۱۰ قطب، بدون در نظر گرفتن آرایش سیم‌بندی، قطر روتور و استاتور نسبت به ساختار ۲۴ شیار ۲۲ قطب به طور قابل ملاحظه‌ای باید افزایش یابد زیرا تعداد قطبها کاهش یافته است. همچنین یوغ روتور نیز افزایش می‌یابد. از آنجا که تعداد جفت قطبها کاهش یافته است، هارمونیک نیرو محرکه مغناطیسی استاتور بیشتر با هارمونیک نیرو محرکه مغناطیسی روتور تداخل می‌کنند،



Times (s)

(الف)



(ب)

شکل (۱۰): (الف) شکل موج **back-EMF** بی باری با نابرابر سازی کمان

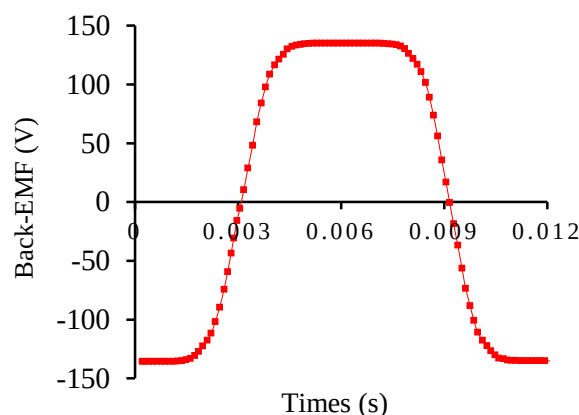
داخلی و خارجی آهن ربا (ب) طیف هارمونیک **back-EMF**

همانطور که ملاحظه می شود شکل موج سینوسی بوده و تنها مقدار کمی هارمونیک سوم دارد. برای بررسی عملکرد موتور با این شکل آهن ربا تغییر یافته آن را با یک موتور متداول مغناطیس دائم سطحی مقایسه می کنیم. برای این مقایسه پارامترهای اساسی آنها را یکسان در نظر می گیریم این پارامترها شامل قطر خارجی استاتور، طول فاصله هوایی، طول محوری، جریان نامی، تعداد دور بر فاز می باشند. جدول ۲ مقایسه عملکرد این دو موتور را نشان می دهد.

جدول (۲): مقایسه تاثیر شکل آهن ربا

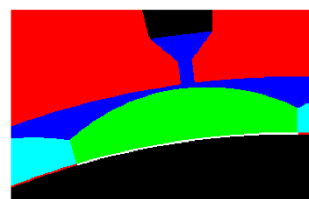
پارامترها	آهن ربا با کمانهای نامساوی	آهن ربا معمولی
گشتاور متوسط (N.m)	۲۱۱،۱	۲۵۴،۷
ریپل گشتاور (%)	۰،۲۴	۲،۱
Back-EMF بی باری (V)	۱۵۰،۱	۱۵۹،۷۵
THD	۲،۴	۱۲،۸
تلفات آهن (W)	۱۴۱،۵	۱۵۲،۰۱
حجم آهن ربا (m3)	۲،۶۸×۴-۱۰	۲،۶۱×۴-۱۰

به حداقل مقدار خود می رسند. مولفه اصلی باعث تولید گشتاور می شود و سایر مولفه های هارمونیک باعث لرزش و تولید تلفات می شوند. وقتی ضریب قوس قطب از ۰،۹ به ۱ افزایش می یابد مقدار مولفه اصلی **back-EMF** از ۱۵۹،۷۹ به ۱۶۰،۸۹ می رسد یعنی ۰،۶۳ درصد افزایش می یابد که افزایش قابل توجهی نمی باشد در حالیکه مقدار آهن ربا ۱۰ درصد افزایش پیدا کرده است. با توجه به مباحث بالا ضریب قوس قطب بهینه برابر ۰،۹ می باشد که شکل موج **back-EMF** به ازای این مقدار در شکل ۸ رسم شده است.

شکل (۸): شکل موج **back-EMF** به ازای ضریب قوس قطب ۰،۹

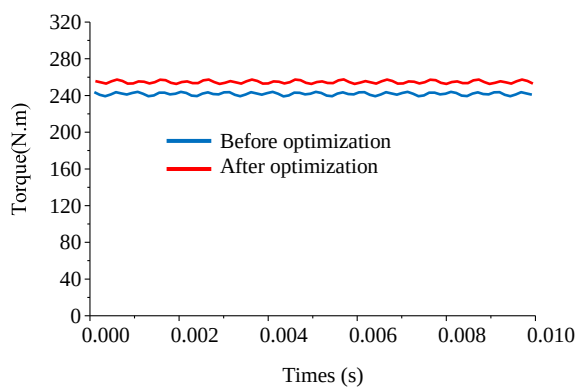
۴-۲- نابرابر سازی کمان داخلی و خارجی آهن ربا

نابرابر سازی کمان داخلی و خارجی آهن ربا باعث می شود طول فاصله هوایی یکنواخت نباشد. لذا شار فاصله هوایی دیگر یک موج تخت نبوده و به شکل موج سینوسی نزدیک می شود. بنابراین شکل موج **back-EMF** سینوسی می شود. اما بدلیل کاهش مقدار آهن ربا مقدار **back-EMF** نیز کاهش می یابد. تفاوت در کمان داخلی و خارجی آهن ربا در شکل ۹ نشان داده شده است.

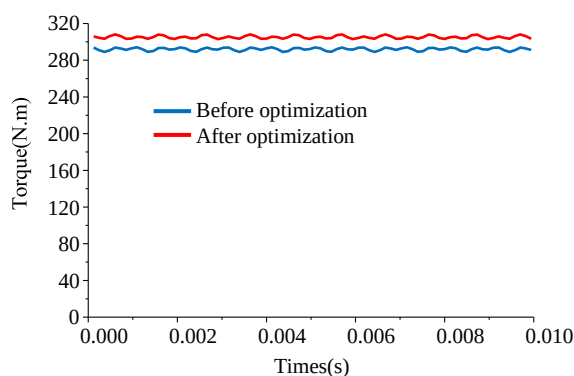


شکل (۹): نابرابر سازی کمان داخلی و خارجی آهن ربا

وقتی که تفاوت در شعاع داخلی و خارجی آهن ربا ۸۶ mm است، **back-EMF** بی باری سینوسی ترین حالت ممکن می باشد که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



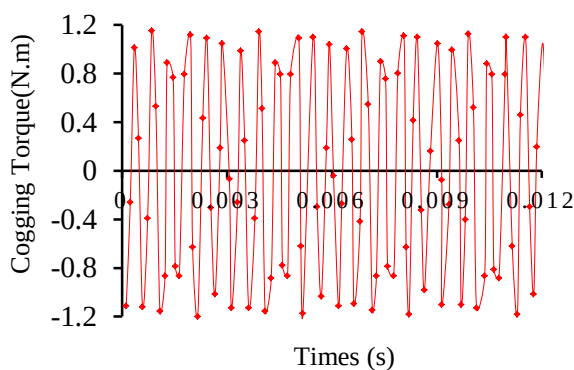
(الف)



(ب)

شکل (۱۱): گشتاور خروجی الف) گشتاور نامی ب) گشتاور حداکثر

گشتاور دندانه‌ای و تلفات آهنی موتور در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده‌اند. گشتاور دندانه‌ای یکی از مشکلات این موتورها است که از برهمکنش بین آهن‌رباهای روتور و دندانه‌های استاتور به وجود می‌آید. این گشتاور باعث ایجاد لرزش و صدا در حرکت موتور می‌گردد [۱۷]. پیک گشتاور دندانه‌ای ۱,۲ نیوتن متر است که تقریباً ۰,۵ درصد گشتاور نامی می‌باشد. همچنین تلفات آهن در گشتاور نامی ۱۵۲ W است.



شکل (۱۲): گشتاور دندانه‌ای

از آنجا که هنگام استفاده از آهنربای دائم با کمان‌های داخلی و خارجی نامساوی ضریب قوس قطب را به منظور افزایش مقدار آهنربای دائم باید افزایش داد، شار ناشی بین قطبها افزایش می‌یابد. لذا منجر به کاهش back-EMF بی‌باری می‌شود و گشتاور خروجی موتور را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

اگرچه موتور با این شکل آهن‌ربا رپل گشتاور کمی دارد ولی توان تولیدی آن نیز کاهش می‌یابد. از آنجایی که رپل گشتاور به خودی خود مقصود و هدف ما نیست لذا ساختار نهایی موتور ۲۴ شیار ۲۲ قطب با آرایش ستاره‌ای با ۳۰ درجه اختلاف فاز و شکل آهنربای معمولی است. ابعاد نهایی ماشین اصلی در جدول ۳ نشان داده شده است

جدول (۳): پارامترها موتور

پارامترها	مقدار
قطر خارجی استاتور (mm)	۳۵۰
قطر داخلی استاتور (mm)	۱۷۰
طول محوری (mm)	۱۰۹
طول فاصله هوایی (mm)	۰,۶
ضخامت آهنربای دائم (mm)	۵
ضریب قوس قطب	۰,۹
شیار / قطب	۲۴/۲۲
تعداد دور در هر شیار	۸۰
سطح شیار (mm ²)	۴۲۰

۵- تجزیه و تحلیل عملکرد موتور سه فاز دوگانه

وقتی موتور در شرایط عادی عمل می‌کند، گشتاور موتور، حداکثر گشتاور، حداکثر سرعت، حداکثر قدرت بهره‌وری و ویژگی‌های خروجی مانند آن از شاخص‌های عملکردی موتور می‌باشند. پارامترهای عملکرد نامی موتور در جدول ۴ نشان داده شده است. با استفاده از شبیه‌سازی امان محدود در نرم افزار ماکسول این مقادیر بررسی می‌شوند. گشتاور نامی و حداکثر گشتاور موتور سه فاز دوگانه در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

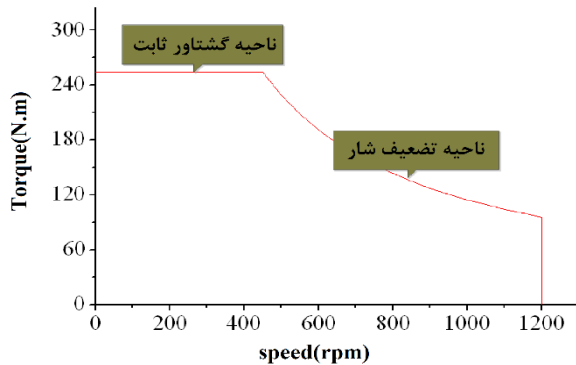
جدول (۴): پارامترهای عملکردی موتور سه فاز دوگانه

تعداد فازها	ولتاژ نامی
۲۸۸ V	توان نامی
۱۲ kW	توان حداکثر
۲۴ kW	سرعت نامی
۴۵۰ Rpm	سرعت ماکزیمم
۱۲۰۰ Rpm	گشتاور ماکزیمم
۳۰۰ N.m	بیشترین راندمان
٪۹۴	راندمان در بیشتر از ۸۰٪ ناحیه عملکردی
≤ ٪۶۵	

وقتی مقدار موثر جریان ۲۰ آمپر باشد گشتاور نامی حاصل می‌شود و برای رسیدن به گشتاور حداکثر جریان موثر ۲۳,۶ آمپر است.

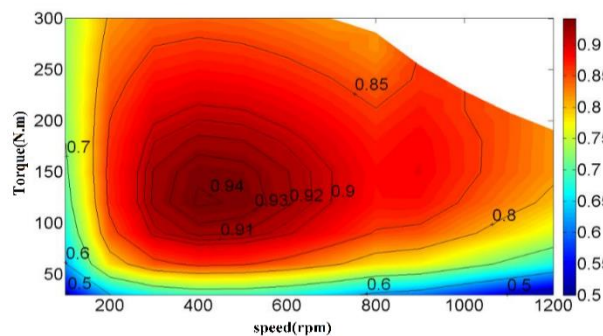
$$\psi_m^{new} = \begin{cases} \psi_m, & n_r \leq n_r^N \\ \frac{n_r^N}{n_r} \psi_m, & n_r^N \leq n_r \leq n_r^{max} \end{cases} \quad (12)$$

که ψ_m^{new} مقدار شار در ناحیه تضعیف شار، n_r^N سرعت نامی و برابر با 450 rpm و n_r^{max} سرعت ماکزیمم موتور مورد مطالعه و برابر با 1200 rpm می باشد. منحنی سرعت-گشتاور در ناحیه تضعیف شار در موتور سه فاز دو گانه با استفاده از شبیه سازی ماکسول به صورت شکل ۱۴ استخراج شده است.



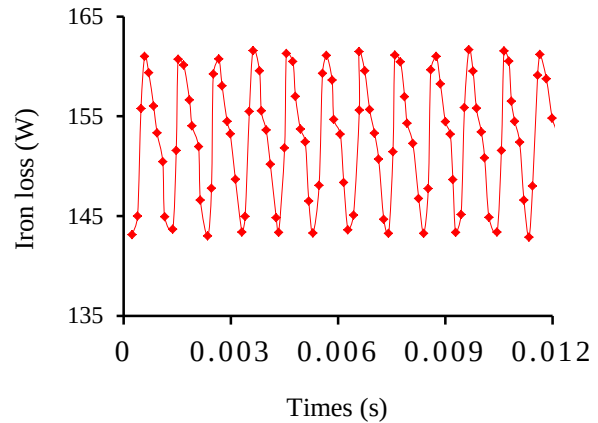
شکل (۱۴): منحنی سرعت گشتاور

این منحنی ها برای تعیین استراتژی های مناسب برای کنترل موتور بکار می روند. با توجه به محدودیت های طراحی $V_{max}=208V$ می باشد. در کمتر از سرعت نامی $i_d=0$ و در سرعت های بیشتر از سرعت نامی از استراتژی تضعیف شار استفاده می شود. محدودیت راندمان به گونه است که لازم است در بیشتر از ۸۰ درصد نواحی کار راندمان بیشتر از ۶۵ درصد باشد. نقشه راندمان موتور در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل (۱۵): نقشه راندمان موتور

همانطور که از شکل ۱۵ دیده می شود، حداکثر راندمان موتور ۹۴٫۳٪ است، که بیشتر از ۹۴٪ است و در بیشتر از ۸۰٪ از ناحیه کار راندمان موتور در حدود ۷۱٪ است، که بیشتر از ۶۵٪ است. بنابراین ملاحظات طراحی را در برمی گیرد. راندمان موتور در نقطه کار نامی در حدود ۹۰٪ است.



شکل (۱۳): تلفات آهنی

در یک وسیله نقلیه الکتریکی، سرعت یک شاخص مهم از عملکرد موتور می باشد، در موتور آهنربای دائم شار روتور ثابت است و نمی توان با کاهش جریان میدان شار مغناطیسی را کاهش داد.

در سرعت هایی بالاتر از سرعت نامی، EMF القا شده از حداکثر ولتاژ ورودی تجاوز می کند و باعث می شود تزریق جریان به فازهای ماشین غیر عملی باشد. برای غلبه بر این وضعیت، EMF القا شده با تضعیف شار فاصله هوایی به ولتاژ اعمال محدود می شود. تضعیف شار به صورت معکوس متناسب با فرکانس استاتور است به طوری که EMF القا شده ثابت می ماند و با افزایش سرعت افزایش نمی یابد. برای عملکرد موتور در بیش از سرعت نامی، نیاز به یک ظرفیت خاص تضعیف شار دارد. ظرفیت تضعیف شار بستگی به ψ_m و $L_d i_s$ دارد [۱۹، ۱۸].

$$i_q = \frac{\sqrt{(u_{lim} / \omega)^2 - (L_d i_d + \psi_m)^2}}{L_q} \quad (9)$$

$$P = p i_q \omega (L_d i_d + \psi_m) \quad (10)$$

$$\omega = \frac{u_{lim}}{p(\psi_m - L_d i_d)} \quad (11)$$

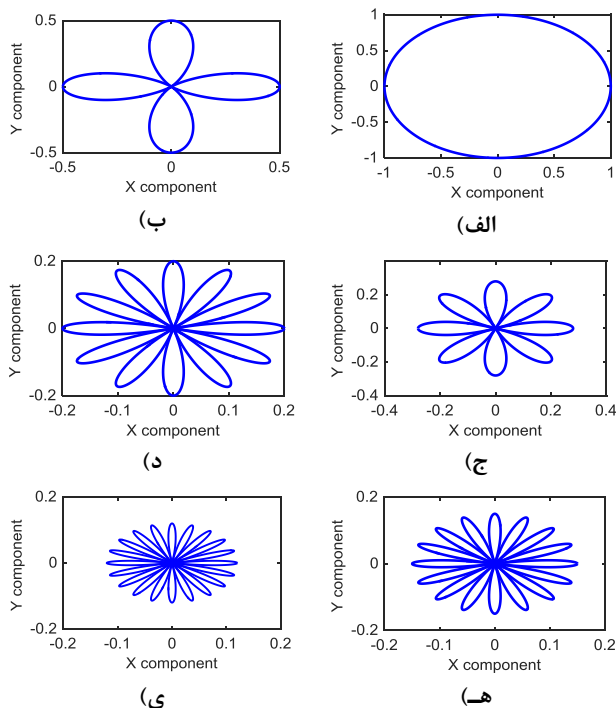
ψ_m شار روتور، L_d اندوکتانس محورهای d و q و i_d و i_q جریان محورهای q و d ، u_{lim} محدودیت ولتاژ، i_s محدودیت جریان، p تعداد جفت قطب روتور و ω سرعت زاویه ای است. هنگامی که $\psi_m \approx L_d i_s$ باشد، موتور بهترین قابلیت تضعیف شار را دارد. در این موتور $\psi_m = 3.384 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ ، $L_d = 1.5 \text{ mH}$ و $i_s = 2.3 \text{ A}$ در نتیجه $L_d i_s = 3.384 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ است. بنابراین از نظر تئوری این موتور در بهترین وضعیت تضعیف شار قرار دارد. در محدوده سرعت کمتر از سرعت نامی مقدار مرجع ψ_m برابر با مقدار نامی آن یعنی $\psi_m = 3.384 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ و در ناحیه تضعیف شار (سرعت موتور بزرگتر از سرعت نامی) ψ_m بصورت معکوس با سرعت تغییر می کند یعنی:

بهینه‌سازی را $f = x_n^2 + y_n^2$ در نظر می‌گیریم. لذا جریان‌های ۵ فاز به صورت زیر استخراج می‌شوند.

$$\begin{cases} I_a = 1.44I_m \cos(\omega t + 50.6^\circ) \\ I_b = 1.44I_m \cos(\omega t - 55.8^\circ) \\ I_c = 1.44I_m \cos(\omega t - 88.5^\circ) \\ I_d = 1.44I_m \cos(\omega t + 175.4^\circ) \\ I_e = 1.44I_m \cos(\omega t + 103^\circ) \end{cases} \quad (18)$$

با این جریان‌های به دست آمده در معادله (۱۸) می‌توان دید مقدار مؤلفه اصلی نیرومحرکه مغناطیسی قبل و بعد از خطا یکسان می‌شود ولی ممکن است هارمونیک‌های اضافی را تولید کند. شکل ۱۶ هارمونیک‌های نیرومحرکه مغناطیسی را در سیستم پریونیت نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل ۱۶ می‌توان دید حداکثر هارمونیک‌های ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ به ترتیب ۰.۴۶۱۷، ۰.۲۸۴، ۰.۲۰۴، ۰.۱۵۹، ۰.۱۳۱ و ۰ می‌باشند که باعث تولید ریبیل گشتاور می‌شوند. از تجزیه و تحلیل بالا می‌توان نتیجه گرفت با استراتژی تغییر دامنه و فاز در سیم‌پیچ‌های سالم موتور می‌توان نیرومحرکه مغناطیسی را جبران سازی کرده و به عملکرد یکسان قبل و بعد از خطا رسید اما برای این کار نیاز به محاسبات زیاد، پیچیده و زمان‌بری داریم. در این روش تغییرات در پارامترهای اندوکتانس بعد از جبران سازی در نظر گرفته نشده است. وقتی دو و یا تعداد بیشتری سیم‌پیچ مدار باز باشند با همین روش مشابه می‌توان اندازه و فازی که باعث ایجاد میدان گردان برابر با حالت سالم شود را برای جریان‌ها به دست آورد.



شکل (۱۶): هارمونیک‌های mmf در مختصات قطبی (الف) مؤلفه اصلی (ب) هارمونیک سوم (ج) هارمونیک پنجم (د) هارمونیک هفتم (ه) هارمونیک نهم (ی) هارمونیک یازده ام

۶- عملکرد تحمل‌پذیری خطا در شرایط اتصال کوتاه (اصل برابری MMF)

پس وقوع خطا در موتور سه فاز دوگانه نیرومحرکه مغناطیسی استاتور از نظر دامنه و فاز تغییر می‌کند برای اینکه موتور سه فاز دوگانه در شرایط قبل و بعد از خطا عملکرد یکسانی داشته باشد لازم است نیرومحرکه مغناطیسی در هر دو حالت برابر باشد [۲۰]. نیرومحرکه مغناطیسی در شرایط بدون خطا به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} F_6 = & NI_m \cos(\omega t) \cos(\alpha) \\ & + NI_m \cos(\omega t - 30^\circ) \cos(\alpha - 30^\circ) \\ & + NI_m \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\alpha - 120^\circ) \\ & + NNI_m \cos(\omega t - 150^\circ) \cos(\alpha - 150^\circ) \\ & + NI_m \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\alpha - 240^\circ) \\ & + NI_m \cos(\omega t - 270^\circ) \cos(\alpha - 270^\circ) \\ & = 3NI_m \cos(\omega t) \cos(\alpha) + 3NI_m \sin(\omega t) \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (13)$$

که I_m جریان هر فاز و N تعداد دور هر فاز است. فرض کنیم سیم‌پیچ C_1 در ماشین حذف شود، بنابراین نیرومحرکه مغناطیسی به صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned} F_5 = & NI_a \cos(\alpha) + NI_b \cos(\alpha - 30^\circ) \\ & + NI_c \cos(\alpha - 120^\circ) + NI_d \cos(\alpha - 150^\circ) \\ & + NI_e \cos(\alpha - 240^\circ) \\ & = \frac{N}{2} (2I_a + \sqrt{3}I_b - I_c - \sqrt{3}I_d - I_e) \cos(\alpha) \\ & + \frac{N}{2} (I_b + \sqrt{3}I_c + I_d - \sqrt{3}I_e) \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (14)$$

برای اینکه mmf در این دو حالت برابر شود باید داشته باشیم:

$$\begin{cases} 6I_m \cos(\omega t) = 2I_a + \sqrt{3}I_b - I_c - \sqrt{3}I_d - I_e \\ 6I_m \sin(\omega t) = I_b + \sqrt{3}I_c + I_d - \sqrt{3}I_e \end{cases} \quad (15)$$

که

$$I_n = x_n \cos(\omega t) + y_n \sin(\omega t) \quad n = a, b, \dots, e \quad (16)$$

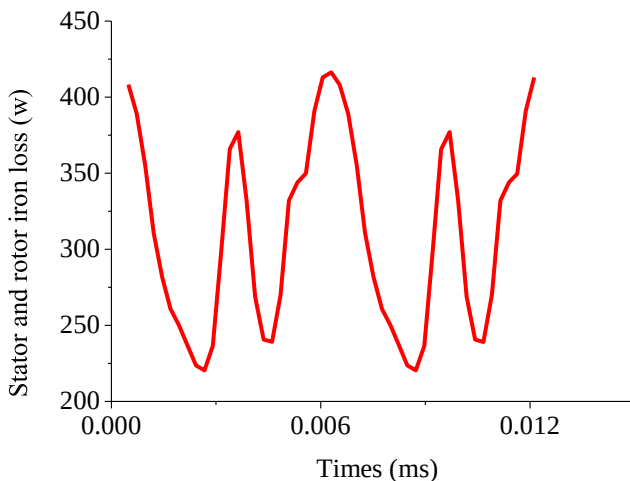
با فرض اینکه سیم نول در موتور وجود ندارد مجموع جریان سیم‌پیچ‌ها صفر می‌شود. با برابر قرار دادن معادلات (۱۳) و (۱۴) می‌توان نتیجه گرفت:

$$\begin{cases} 2x_a + \sqrt{3}x_b - x_c - \sqrt{3}x_d - x_e = 6I_m \\ 2y_a + \sqrt{3}y_b - y_c - \sqrt{3}y_d - y_e = 0 \\ x_b + \sqrt{3}x_c + x_d - \sqrt{3}x_e = 0 \\ y_b + \sqrt{3}y_c + y_d - \sqrt{3}y_e = 6I_m \\ x_a + x_b + x_c + x_d + x_e = 0 \\ y_a + y_b + y_c + y_d + y_e = 0 \end{cases} \quad (17)$$

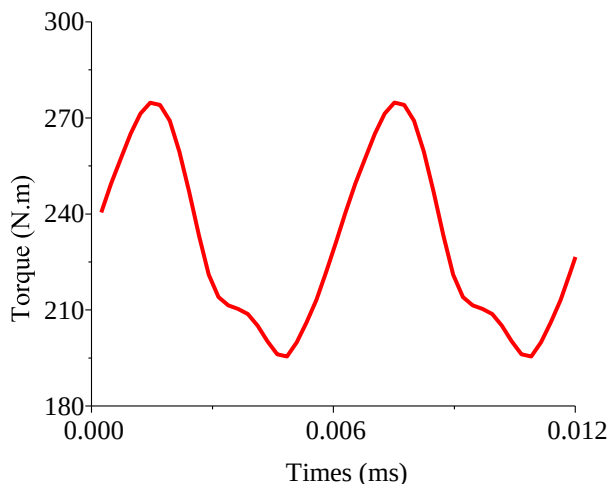
در دستگاه معادله (۱۷) شش معادله و ۱۰ مجهول وجود دارد؛ بنابراین این دستگاه بیشمار جواب دارد. چون توان مبدل‌ها یکسان است بنابراین جریان‌ها را یکسان در نظر می‌گیریم و آن‌ها را حداقل می‌کنیم و با این کار تلفات را نیز حداقل کرده‌ایم. بنابراین تابع هدف

$$\min(\text{error}(k_h, k_c, k_e)) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \quad (20)$$

که m تعداد منحنی‌هایی تلفات، n_i تعداد نقاط در i امین منحنی و $p_{vij} = f(f_i, B_{mij})$ یک جدول جست و جو دو بعدی برای تلفات در فرکانسهای مختلف می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی المان محدود مربوط به گشتاور، تلفات آهنی در نرم‌افزار ماکسول با جریان‌های به‌دست‌آمده در شکل ۲۰ رسم شده‌اند.



الف



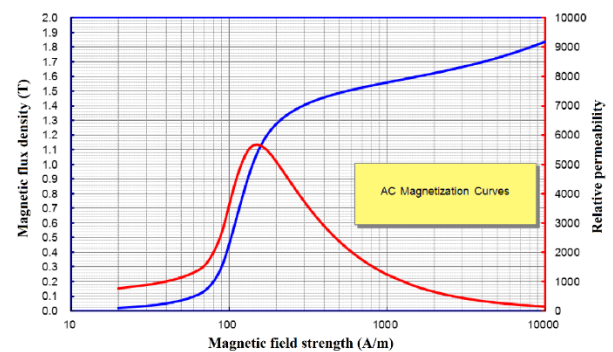
ب

شکل (۱۹): نتایج شبیه‌سازی المان محدود الف) گشتاور ب) تلفات آهنی

همان‌طور که می‌توان دید، با تزریق جریان‌های به‌دست‌آمده از اصل برابری mmf:

۱) گشتاور متوسط موتور ۹٫۵ نیوتن متر بوده و به مقدار تئوری یعنی ۱۰ نیوتن متر نمی‌رسد. ریبِل گشتاور ۱۷٫۲۴٪ بوده که یک مقدار بزرگ است. چون جریان‌ها ۱٫۴۴ برابر جریان نامی می‌باشند یک اشباع نسبتاً شدید در موتور اتفاق می‌افتد که باعث می‌شود مؤلفه اصلی

تلفات در ماشینهای مغناطیس دائم شامل تلفات مسی تلفات جریان گردابی آهنربا و تلفات آهنی هسته استاتور و روتور می‌باشد. به دلیل محتوای هارمونیک توزیع چگالی شار فاصله‌ی هوایی، مقداری تلفات جریان گردابی در آهنرباهای دائم ایجاد می‌شود. معمولاً از این تلفات جریان گردابی چشم‌پوشی می‌شود، به این دلیل که مؤلفه‌ی اصلی میدان فاصله‌ی هوایی به صورت سنکرون با روتور می‌چرخد و هارمونیک‌های زمانی شکل موج جریان و هارمونیک‌های فضایی توزیع سیم‌پیچی در حالت کلی کوچک می‌باشند. تلفات آهنی دارای سه بخش است: تلفات هیستریزیس p_h ، تلفات جریان گردابی p_c و تلفات اضافی p_e . مشخصات ماده استفاده شده برای محاسبه تلفات ضروری است. جنس هسته از استیل ۱۰۱۰ می‌باشد که دارای دو ویژگی کیفیت بالا و در دسترس بودن است. مشخصات $B-H$ و منحنی‌های تلفات برای این هسته در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است.

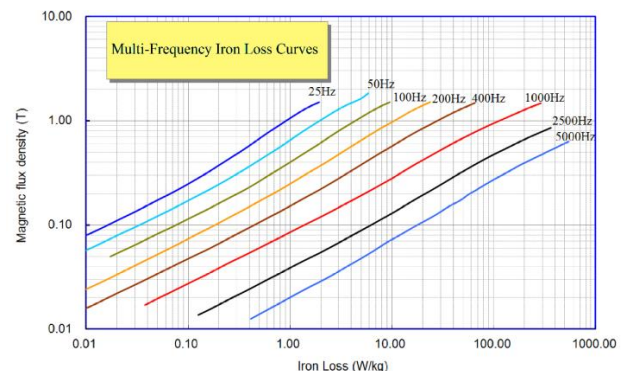


شکل (۱۷): منحنی $B-H$ هسته

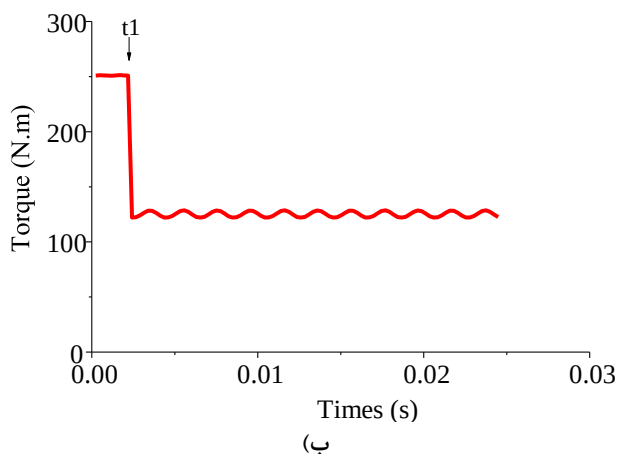
تلفات آهنی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$p_v = p_h + p_c + p_e = k_h f B_m^2 + k_c (f B_m)^2 + k_e (f B_m)^{1.5} \quad (19)$$

که k_h ، k_c و k_e به ترتیب ضرایب تلفات هیستریزیس، تلفات جریان گردابی و تلفات اضافی می‌باشند. در این رابطه مقدار پیک چگالی شار مغناطیسی می‌باشد. ضرایب k_h ، k_c و k_e مستقیماً از روش حداقل سازی مربعات بدست می‌آیند.



شکل (۱۸): منحنی‌های تلفات هسته در فرکانسهای مختلف



شکل (۲۰): گشتاور خروجی (الف) یک فاز مدار باز (ب) یک مجموعه سیم پیچی سه فاز مدار باز

۸- نتیجه گیری

در مقایسه با ماشینهای الکتریکی معمولی، ماشین های الکتریکی مغناطیس دائم سه فاز دوگانه دارای مزایای بیشتری مانند قابلیت بالا تحمل پذیری خطا، روش کنترلی ساده در شرایط خطا، مشخصه عملکردی خوب در شرایط خطا می باشند. در این مقاله دو آرایش سیم بندی (ستاره ای با ۳۰ درجه اختلاف فاز و شش فاز متقارن) برای موتور سه فاز دوگانه مورد بررسی قرار گرفت. براساس تجزیه و تحلیل هارمونیک قوانین انتخاب ترکیب قطب و شیار استخراج شد و مقایسه ای بین بهترین حالت های ممکن انجام شد و نشان داده شد که ساختار ۲۴ شیار و ۲۲ قطب با سیم بندی ستاره ای با ۳۰ درجه اختلاف فاز دارای برتری نسبت به سایر ترکیبها می باشد. سپس back-EMF بی باری بهینه سازی شد. نتایج نشان می داند که استفاده از آهنربا با کمانهای داخلی و خارجی نامساوی هر چند شکل موج back-EMF را سینوسی می کند ولی باعث کاهش گشتاور و توان موتور می شود. در ادامه با استفاده از اصل برابری نیرو محرکه مغناطیسی استراتژی ارایه شد که در شرایط خطا نیز گشتاور برابر با گشتاور نامی حاصل شود. اما در این حالت ریبیل گشتاور و تلفات بیشتر می شود. در انتها شرایط خطای مدار باز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

مراجع

- [1] Kim, Tae Heoung. "The Characteristics Analysis of a PMSM with Current Angle Variations according to Stator Winding Arrangements", Journal of IKEEE 24, no. 2 (2020): 441-445.
- [2] Liu, Tianyi, Z. Q. Zhu, Zhan-Yuan Wu, David Stone, and Martin Foster. "A Simple Sensorless Position Error Correction Method for Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines", IEEE Transactions on Energy Conversion (2020).
- [3] Li, Yanxin, Zi-Qiang Zhu, Ximeng Wu, Arwyn Sean Thomas, and Zhanyuan Wu. "Comparative study of modular dual 3-phase permanent magnet machines with overlapping/non-overlapping windings", IEEE

نیرو محرکه مغناطیسی با حالت بدون خطا برابر نباشد بنابراین گشتاور کمتر از مقدار محاسبه شده است. همچنین به دلیل حضور هارمونیکهای فرد در نیرو محرکه مغناطیسی ریبیل گشتاور زیاد می شود زیرا این هارمونیکها با شار روتور تداخل می کنند و باعث تولید ریبیل گشتاور می شوند. به صورت کلی می توان گفت انجام کنترل موتور در شرایط خطا، کار پیچیده و مشکلی نیست ولی عملکرد عادی را نمی توان از ماشین به دست آورد.

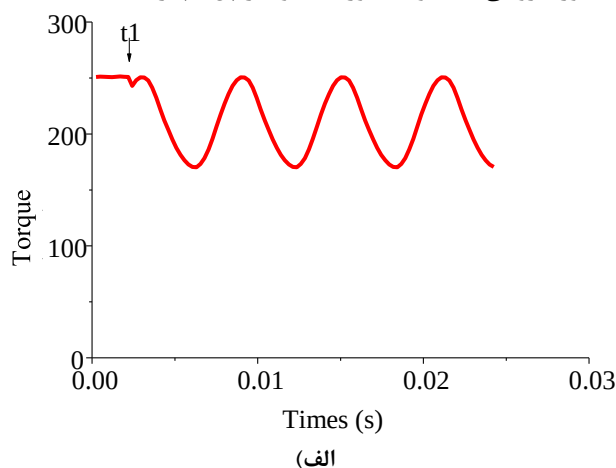
۲) به دلیل حضور هارمونیکهای نیرو محرکه مغناطیسی تلفات آهنی موتور به ۳۰ وات رسیده است که تقریباً در حدود دو برابر مقدار حالت سالم است. همچنین چون جریانها ۱,۴۴ برابر افزایش پیدا کرده اند تلفات آهنی تقریباً دو برابر می شود؛ بنابراین بازده ماشین بشدت تحت تأثیر قرار می گیرد و کاهش می یابد. همچنین افزایش تلفات باعث افزایش درجه حرارت و خسارات به عایق بندی سیم پیچ های ماشین می شود.

۷- تجزیه و تحلیل خطای مدار باز

هنگامی که در موتور خطای مدار باز رخ می دهد از آنجایی که بین سیم پیچها کوپلینگ مغناطیسی وجود ندارد سایر سیم پیچها می توانند عملکرد مناسبی را برای ماشین ایجاد کنند. البته در این حالت ریبیل گشتاور زیاد خواهد بود. همان طور که از نتایج شبیه سازی المان محدود در شکل ۲۱ (الف) دیده می شود ریبیل گشتاور برابر است با:

$$\Delta T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} + T_{min}} \times 100\% = \frac{12 - 7.4}{12 + 7.4} \times 100\% = 23.73\% \quad (21)$$

ریبیل گشتاور زیاد و توان خروجی کاهش یافته است. وقتی خطای مدار باز اتفاق می افتد حالت گذرا ایجاد نمی شود. اگر در دو فاز دیگر یک مجموعه سه فاز در موتور سه فاز دوگانه خطای مدار باز رخ دهد گشتاور خروجی مطابق شکل ۲۱ (ب) خواهد بود، که نشان می دهد گشتاور خروجی نصف و گشتاور صاف و با ریبیل ناچیز است.



- [۱۷] حریری، علی محمد. دامکی علی‌آباد، علی‌اکبر. "طراحی جامع و ساخت موتور سنکرون آهن‌ربای دائم با هدف دستیابی به کمترین گشتاور دندانه"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۷؛ ۱۵ (۱): ۱۱۳-۱۲۱
- [18] Yanqi. Wei, Si. Jikai, Cheng. Zhiping, Xu. Shuai, Dong. Lianghui, and Liang. Jing, "Design and characteristic analysis of a six-phase direct-drive permanent magnet synchronous motor with 60 phase-belt toroidal winding configuration for electric vehicle", IET Electric Power Applications 14, no. 13 (2020): 2659-2666.
- [۱۹] مویدی راد، حجت. شمسی نژاد، محمدعلی و فرشاد. محسن. "بهبود عملکرد درایو کنترل سرعت موتور القایی در محدودهی سرعت‌های پایین و بالا با جبران‌ساز شار روتور"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، صفحه ۶۴-۵۹، سال ۹، شماره ۲، پائیز و زمستان ۱۳۹۱.
- [20] Yashan. Hu, Feng. Yaojing, and Li. Xuefei, "Fault-tolerant Hybrid Current Control of Dual Three-phase PMSM with One Phase Open", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics (2020).
- Transactions on Industry Applications 55, no. 4 (2019): 3566-3576.
- [4] K. Wang, Z. Q. Zhu, Y. Ren, and Grzegorz Ombach. "Torque improvement of dual three-phase permanent-magnet machine with third-harmonic current injection", IEEE transactions on industrial electronics 62, no. 11 (2015): 6833-6844.
- [5] Li, Yanxin, Z. Q. Zhu, and Arwyn Thomas. "Generic Slot and Pole Number Combinations for Novel Modular Permanent Magnet Dual 3-Phase Machines With Redundant Teeth", IEEE Transactions on Energy Conversion 35, no. 3 (2020): 1676-1687.
- [6] Liu, Tianyi, Z. Q. Zhu, Zhan-Yuan Wu, David Stone, and Martin Foster. "A Simple Sensorless Position Error Correction Method for Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines", IEEE Transactions on Energy Conversion (2020).
- [7] M. Barcaro, N. Bianchi, F. Magnussen, Analysis and tests of a dual three-phase 12-slot 10-pole permanent magnet motor[C]. proceedings of the Energy Conversion Congress and Exposition, 2009 ECCE 2009 IEEE, F 20-24 Sept. 2009, 2009
- [8] Y. Demir, and M. Aydin. "Design, analysis and validation of a dual three-phase 72-slot, 12-pole permanent magnet synchronous motor", In 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 1598-1603. IEEE, 2016.
- [9] Dahaman Ishak, Z. Q. Zhu, David Howe. Comparison of PM Brushless Motors, Having Either All Teeth or Alternate Teeth Wound[C]. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2006, 21(1): 95-103
- [10] Chowdhury, Mazharul, Anant Singh, Raja Ramakrishnan, Mohammad Islam, and Abraham Gebregergis. "Performance analysis of dual wound permanent magnet synchronous machines under winding fault scenarios", In 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 693-700. IEEE, 2018.
- [11] Yuhua. Sun, Zhao. Wenxiang, Ji. Jinghua, Junqiang Zheng, and Yu Cheng. "Torque Improvement in Dual M-Phase Permanent-Magnet Machines by Phase Shift for Electric Ship Applications", IEEE Transactions on Vehicular Technology 69, no. 9 (2020): 9601-9612.
- [12] Jin. Xu, Odavic. Milijana, and Zhu. Ziqiang, "An Advanced Harmonic Compensation Strategy for Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines Considering Different Angle Displacements", In 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1797-1803. IEEE.
- [13] Guodong. Feng, Lai. Chunyan, Li. Wenlong, Tjong. Jimi, and C. Kar. Narayan, "Open-phase fault modeling and optimized fault-tolerant control of dual three-phase permanent magnet synchronous machines", IEEE Transactions on Power Electronics 34, no. 11 (2019): 11116-11127.
- [14] Tae Heung. Kim, "The Characteristics Analysis of a PMSM with Current Angle Variations according to Stator Winding Arrangements", Journal of IKEEE 24, no. 2 (2020): 441-445.
- [15] Peilin. Xu, et al. "Analysis of dual three-phase permanent-magnet synchronous machines with different angle displacements", IEEE Transactions on Industrial Electronics 65.3 (2017): 1941-1954.
- [16] Subhra. Paul, Mitra. Rakesh, Piña Ortega. Alejandro, Pramod. Prerit, and Islam. Rakib, "Drive response modeling of dual wound surface permanent magnet machines", In 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), pp. 1-8. IEEE, 2017.