

تئوری مدلاسیون میدان **air gap** (فضایی بین استاتور و روتور در یک دینام)

برای ماشین‌های الکتریکی

حسین حاجیان - استاد برق دانشگاه آزاد اسلامی بستان hosseinhajian12@gmail.com

رضا اسلامی استاد گروه برق دانشگاه صنعتی تبریز eslami@sut.ac.ir

چکیده:

در این مقاله، یک تئوری کلی مدولاسیون میدان برای ماشین‌های الکتریکی توسط معرفی اپراتور مدلاسیون نیروی محرک مغناطیسی برای توصیف سیم‌پیچ اتصال کوتاه، مقاومت مغناطیسی قابل تغییر و هدایت شار مغناطیسی به نیروی محرکه‌ی مغناطیسی اولیه ایجاد شده توسط تابع سیم‌پیچ میدان زیاد شده با جریان میدان در طول **airgap** پیرامونی پیشنهاد می‌شود. استاتور (قسمت ثابت ماشین) یا روتور بطور مغناطیسی ناهمسانگرد، مانند تعدیل کننده برای تولید یک طیف هارمونیک میدان عمل می‌کند و القاگر پیچی نقش یک فیلتر خاص را برای استخراج میدان هارمونیک برای مشارکت پیوستگی شار مربوطه و برای القای نیروی محرکه‌ی مغناطیسی بازی می‌کند. تئوری توسعه یافته‌ی مدولاسیون میدان نه تنها تجزیه و تحلیل اصول ماشین‌های الکتریکی مختلف از جمله ماشین DC معمولی، ماشین القایی، ماشین سنکرون (همزمان) که حالت خاصی از ماشین‌های عمومی مدوله‌ی میدان می‌باشند، بنابراین حذف کننده‌ی تئوری قطعه قطعه شدن ماشین می‌باشند، را یکپارچه می‌سازد بلکه یک یک آنهارا همای قدرتمند برای اختراع توپولوژی ماشین‌های جدید می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: **air gap**، مدل تجزیه و تحلیلی، ماشین الکتریکی، فیلتر، میدان مغناطیسی، مدولاسیون، تبدیل

توان، تجزیه و تحلیل طیفی و نظریه‌ی کلی

۱. مقدمه

ماشین‌های الکتریکی، دستگاه‌های فیزیکی برای تخمین تبدیل انرژی میدان الکترومغناطیسی از طریق جفت شدن میدان الکتریکی یا مغناطیسی هستند. با توجه به این واقعیت که چگالی مواد الکتریکی کمتر از چگالی مواد مغناطیسی می‌باشد، تقریباً تمام ماشین‌ها، جفت شدگی میدان مغناطیسی را اتخاذ می‌کنند. از آنجایی که ژاکوبی، اولین ماشین جریان مستقیم را در ۱۸۳۴ اختراع کرد و فراری و تسلا اولین ماشین القائی را در اواخر دهه‌ی ۱۸۸۰ اختراع کردند، ماشین‌های الکترومغناطیس، یک منبع اصلی توان مکانیکی/الکتریکی با محدوده‌ی توان از چند نانوات تا هزاران‌ها مگاوات برای قرن گذشته شده‌اند. بعلاوه IM، DCM و ماشین سنکرون (SM) با تنوع بسیار زیادی نسبت به ماشین‌های دیگر مانند ماشین‌های مقاومتی سنکرن (همزمان)، (SynRM)، ماشین‌های بدون جاروبک مغناطیسی (PMBL)، ماشین ورنیر، ماشین مقاومتی دو تغذیه‌ی بدون جاروبک (BDFRM)، ماشین شار عرضی (TFM)، ماشین مقاومتی سوئیچ کننده (SRM)، ماشین PM- استاتور با ساختار برجسته‌ی دوگانه، ماشین ورنیر پارامغناطیس (PMV)، ماشین بطور مغناطیسی دنده‌دار و دنده مغناطیسی (MGM)، ماشین دو پورت مکانیکی (DMP)، و برای رسیدن به عملکردهای مختلف ظهور یافته‌اند. هم‌اکنون، تئوری‌های تحلیلی متفاوتی برای تجزیه و تحلیلی اصول عملیات اساسی و عملکرد الکترومغناطیس این ماشین‌ها توسعه یافته است، مانند تئوری تابع سیم‌پیچ، نظریه‌ی یکپارچه‌ی تولید گشتاور بر اساس مسیر اتصال شار فاز در مقابل جریان فازی $[i-\psi]$ ، تئوری میدان چرخشی و تئوری میدان عرضی برای ماشین‌های ac، تئوری دو واکنشی خوب شناخته شده برای SM، تئوری کلی بر اساس مدل اولیه‌ی ماشین دو محوری و تئوری کلی با استفاده از مدارها یا اتصالات مغناطیسی معادل. اگرچه تمام این تئوری‌های تخمین زده، تجزیه و تحلیل و طراحی آسان ماشین‌های معمولی مانند DCM، IM، SM و غیره را به ارمغان می‌آورند، آنها ضعیفی را در تجزیه و تحلیل موثر یک بخش بزرگی از ماشین‌های نوظهور با ویژگی‌های چند هارمونی و چند پورته‌ی مانند BDFIM، BDFRM و ماشین‌های PM استاتور و غیره نشان می‌دهند. برای مثال تئوری کلی Adkins بر اساس مدل ایده‌ال ماشین، تنها برای ماشین‌های AC معتبر و دقیق هستند، اما برای ماشین‌های DC معتبر نمی‌باشند. تئوری کلی با

استفاده از مدارها یا اتصالات مغناطیسی معادل، هم برای ماشین‌های AC و هم DC معتبر می‌باشند اما آن نمی‌تواند مکانیسم تبدیل انرژی را در عرض **airgap** روشن سازد.

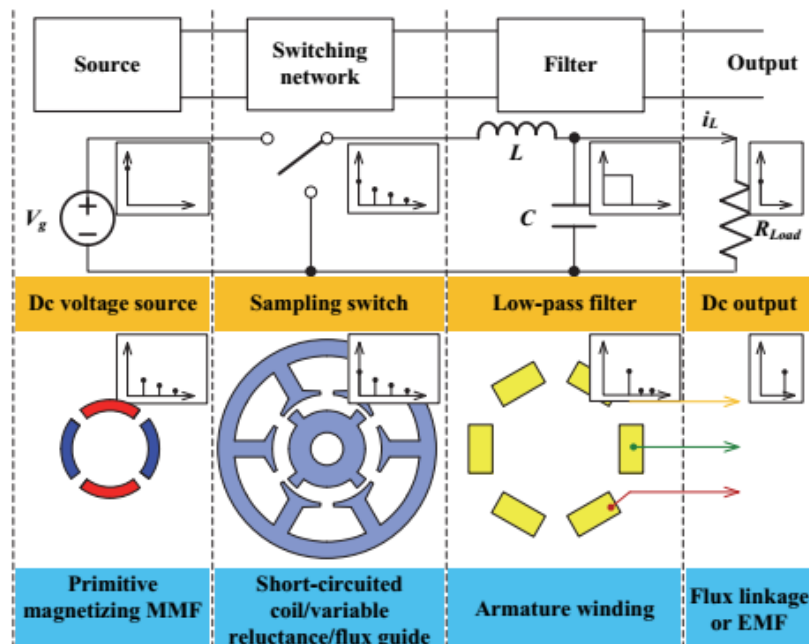
با حمله‌ی بی‌سابقه‌ی ساختارهای الکتریکی جدید برای برق‌رسانی به جهان در طول دهه‌های گذشته، تئوری‌ها و روش‌های تحلیل مکانیسم عملیات، محاسبه‌ی عملکرد و اصل طراحی و غیره، در حال تبدیل شدن بیشتر و بیشتر ماشین خاص و قطعه قطعه شده می‌باشند. بنابراین، آن برای ایجاد توضیح نظری و سیستماتیک و راهنمایی اختراع، تحلیل و طراحی توپولوژی‌های جدید ماشین برای جلوگیری از دانش بی‌بصیرت، احتمالی و بسیار دل‌گرم‌کننده، یک کار مهم و فوری می‌شود.

هدف از این مقاله، ارائه‌ی اصل عملیاتی و مکانیسم تولید گشتاور تمام ماشین‌های الکتریکی در یک مسیر یکپارچه با آغاز از پدیده‌ی مدولاسیون گسترده‌ی میدان می‌باشد. تئوری کلی، تجزیه و تحلیل توپولوژیکی را در روش تحلیلی استاندارد تمام ماشین‌های الکتریکی، تسهیل‌کننده‌ی حل مسائل توپولوژی مانند ترکیب **pole/slot**، پیکربندی سیم-پیچ، اریب‌سازی و تقسیم‌بندی را معرفی می‌کند. آن همچنین موضوعاتی در ارتباط با طراحی مانند بارگذاری‌های الکترومغناطیسی خاص و ارائه‌ی استاندارد از معادلات چگالی گشتاور را برای اندازه‌گیری اولیه و مقایسه‌ی کمی ایجاد می‌کند. بعلاوه، آن می‌تواند بعنوان یک ابزار قدرتمند در ابداع توپولوژی جدید، همچنین ارزیابی امکان‌پذیری مربوطه بکار گرفت شود.

II. نظریه‌ی مدولاسیون میدان

یک ماشین معمولی، معمولاً یک **airgap** دارد، که یک لایه‌ی نازکی از هوا و ساندیچ شده توسط یک بخش ثابت، استاتور، و بخش حرکت‌کننده/چرخش‌کننده، روتور می‌باشد. هم روتور و هم استاتور، هر دو از یک مدهای مغناطیسی نرم با ویژگی نفوذپذیری به نسبت زیاد نسبت به هوا ساخته شده‌اند. **PMS** یا سیم‌پیچ‌های میدان بر روی استاتور یا روتور برای ایجاد میدان مغناطیسی نصب شده‌اند در حالی که سیم‌پیچ‌های آرمیچری (میله‌ی فلزی) برای القای نیرو محرکه‌ی الکتریکی از طریق برش خطوط مغناطیسی بر روی استاتور یا روتور نصب شده‌اند. بعنوان یک تبدیل-کننده‌ی میدان الکترومغناطیس، ماشین الکتریکی شباهت قابل توجهی را با مبدل سوئیچ‌کننده نشان می‌دهند

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. طیف‌های مربوطه، همچنین برای نشان دادن شباهت محدوده‌ی فرکانسی داده شده‌اند. بر اساس مقایسه، یک ماشین الکتریکی، بصورت توالی از سه بخش ابتدایی است، این سه بخش، مغناطیس‌سازی اولیه‌ی نیرومحرکه‌ی مغناطیسی (MMF) (منبع)، هدایت شار/مقاومت مغناطیسی قابل تغییر/سیم‌پیچ اتصال کوتاه (مدول‌کننده) و سیم‌پیچ آرمیچر یا میله‌ی فلزی (فیلتر) می‌باشند. مغناطیس‌سازی اولیه، MMF، یک توزیع MMF را با هارمونیک‌های فضایی ممکن در طول airgap فیزیکی انجام می‌دهد. هدایت شار/مقاومت مغناطیسی متغیر/سیم‌پیچ اتصال کوتاه، توزیع MMF را برای تولید طیفی از مولفه‌های هارمونیک MMF، برای اینکه آنها بعنوان مدول‌کننده اتلاق می‌شوند مدوله می‌کند. تمام مولفه‌های MMF، ترکیبات میدان مغناطیسی مربوطه در airgap را تولید می‌کنند. سیم‌پیچ آرمیچر، نقش یک فیلتر فضایی را با انتخاب هارمونیک‌های موثر میدان airgap برای تولید اتصال شار یا EMF بازی می‌کند سپس بار الکتریکی را در حالت تولید تغذیه می‌کند و یا جریان همزمان را برای فراهم کردن خروجی مکانیکی در حالت رانندگی دریافت می‌کند. مولفه‌ی MMF که می‌تواند هارمونیک‌های موثر میدان airgap را تولید کند بعنوان مولفه‌ی MMF موثر تلقی می‌شود.



شکل ۱. مقایسه‌ی بین ماشین الکتریکی و مبدل سوئیچ‌کننده

برای ساده‌سازی مدل ریاضی، برخی از مفروضات پایه‌ایی باید در نظر گرفته شوند مانند موارد زیر:

PM ها بعنوان سیمپیچ‌های متمرکز تک فاز عمل می‌کنند که در اطراف یک ماده‌ای با نفوذپذیری مشابه با نفوذپذیری آهنربا پیچیده شده‌اند.

هسته‌ی آهنی، نفوذپذیری مغناطیسی بی‌نهایت دارد.

هادی‌ها، در هر شیار در نقطه‌ی میانی شیار باز متمرکز می‌شوند.

خطوط شار تولید شده توسط مغناطیس‌شدن MMF در airgap، عمود بر پیرامون می‌باشند.

نشت شار و طول معین محوری صرف نظر می‌شوند.

کاهش MMF در آهن ماشین‌ها به دلیل اشباعیت، بعنوان یک نزول ثابت در airgap MMF در نظر گرفته می‌شود.

A. تابع سیمپیچ

طرح سیمپیچ، یک تاثیر قابل توجهی بر MMF تاسیس شده و EMF القایی دارد و می‌تواند بطور کامل با استفاده از

تابع سیمپیچ (z امین فاز) $W_j(\theta, \phi)$ بدست آورده شده از توزیع دقیق سیمپیچ در طول یک یک airgap صاف

معادل توصیف می‌شود و

$$W^j(\theta, \phi) = \tau^j(\theta, \phi) - \frac{\int_0^{2\pi} g^{-1}(\theta) \tau^j(\theta, \phi) d\theta}{\int_0^{2\pi} g^{-1}(\theta) d\theta} \quad (1)$$

در این فرمول $\tau^j(\theta, \phi)$ تابع تبدیل لامین فاز می‌باشد، θ زاویه‌ی مکانیکی در امتداد محیط در چهارچوب مرجع

ثابت می‌باشد. ϕ موقعیت زاویه‌ای روتور مکانیکی با در نظر گرفتن استاتور ثابت می‌باشد و g طول airgap می‌باشد.

تابع سیمپیچ دوبرابر می‌باشد: برای تولید MMF اولیه با ضرب تابع سیمپیچ با جریان و برای تولید اتصال شار با

انتگرال‌گیری تابع سیمپیچ ضرب شده با چگالی شار airgap. مهمترین ویژگی‌های تابع سیمپیچ، تعداد زوج قطب

اصلی p (PPN) و فاکتور سیمپیچ هر هارمونیک k_{wv} می‌باشند. PPN یک سیمپیچ داده شده بعنوان تعداد زوج

قطب مولفه‌ی هارمونیک تابع سیمپیچ تعریف می‌شود که بزرگترین دامنه‌ی نسبی را دارد. با این تعریف، زوج قطب p

می‌تواند بزرگترین مولفه‌ی MMF را تولید کند و می‌تواند بزرگترین مولفه‌ی هارمونیک میدان زوج قطب p را برای تولید

اتصال شار و EMF بیشتر استخراج کند. بیان تابع سیمپیچ در شکلی از سری‌های فوریه، یک شاخص عملکردی، با

استفاده‌ی بسیار آسان را تولید می‌کند که فاکتور پیچشی k_{wv} می‌باشد. بعلاوه توزیع و گام سیم‌پیچ که با فاکتور سیم‌پیچ در نظر گرفته شده‌اند، ترکیب بین فازهای مختلف، همچنین تاثیرات MMF و EMF خط به خط که با ترکیب فاکتور k_{wv} مشخص می‌شوند. بعلاوه قطعه شدن محوری یا اریب‌سازی (اریب‌سازی ناپیوسته)، قرارگیری میدان $airgap$ در جهت محوری و تشکیل یک اثر توزیعی را تغییر می‌دهد که می‌تواند توسط فاکتور چولگی k_{sv} مشخص شود. در نظر گرفتن ۳ فاکتور منجر به بیان مختصری از MMF می‌شود بصورت

$$F(\theta, t) = \int_{-\delta/2}^{\delta/2} \left\{ \sum_{j=1}^m \underbrace{\left[W^j(\theta + \Delta\theta, t) i^j(t) \right]}_{k_{wv}} \right\} d(\Delta\theta) \quad (2)$$

$$= \sum_{v=1}^{\infty} F_v \cos(v\theta + \varphi_v)$$

که در این فرمول m تعداد فاز و δ زاویه‌ی چولگی می‌باشد. F_v v امین دامنه‌ی هارمونیک MMF و φ_v زاویه‌ی فاز متناظر می‌باشد. رابطه‌ی بین F_v و (یا اتصال شار خط به خط/EMF) مرتبه‌ی هارمونیک کلی v هست:

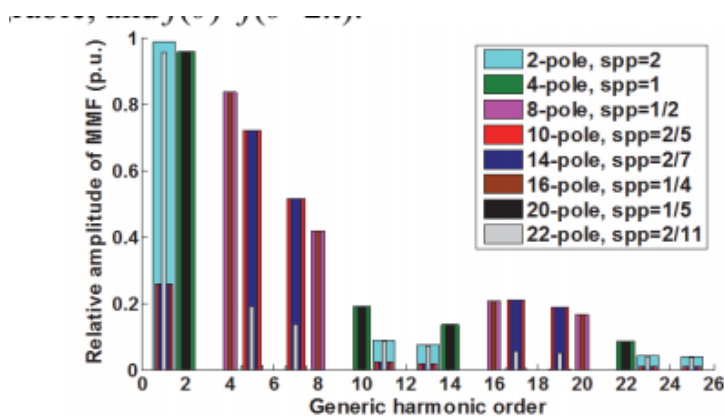
$$F_v \propto k_{sv} k_{cv} \frac{k_{wv}}{v} \quad (3)$$

برای درک بهتر ویژگی انتخاب فرکانس فضایی سیم‌پیچ، یک مقایسه از سه فاز متغیر و متعادل سیم‌پیچ برای ۱۲ شیار در شکل ۲ نشان داده شده است. که در آن spp تعداد شیار هر قطب هر فاز می‌باشد و دامنه‌ی MMF در p.u. با توجه به اولین دامنه‌ی هارمونیک محاسبه می‌شود. پوشش مقدار مطلق تابع سینوسی خوب شناخته شده می‌باشد که تبدیل فوری‌ی زمان پیوسته‌ی یک موج مربعی دوره‌ای متقارن در پردازش سیگنال می‌باشد. که نشان‌دهنده‌ی طبیعت فیلترسازی سیم‌پیچ می‌باشد.

B. اپراتور (عملگر) مدولاسیون

عملگرهای ریاضی، که نگاشت را از توزیع MMF اولیه تا توزیع MMF نهایی منعکس می‌کنند برای توصیف رفتارهای مدولاسیون مدوله‌کننده‌های (تعدیل‌کننده‌های) فیزیکی مختلف استفاده می‌شوند. در اینجا توزیع MMF اولیه، توزیع

MMF در طول airgap استوانه‌ای صاف ساختگی می‌باشد در حالی که توزیع MMF نهایی، توزیع airgap MMF واقعی می‌باشد. تابع توزیع اولیه MMF $f(\theta)$ ، بطور پیوسته مشتق‌پذیر و قابل انتگرال است و $f(\theta)=f(\theta+2\pi)$.



شکل ۲. طیف‌های سیم‌پیچ‌های ۳ فاز ۱۲ شیار متغیر

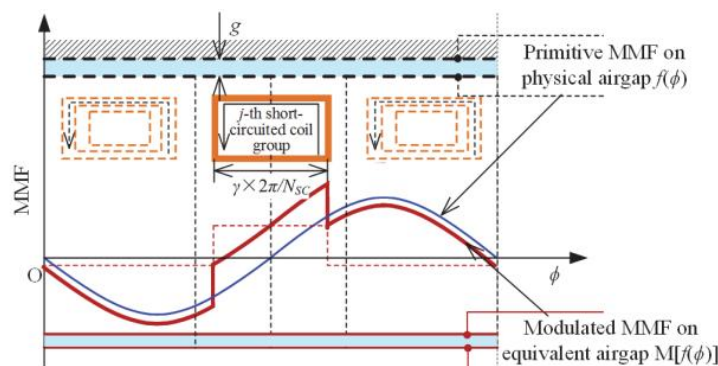
۱. سیم‌پیچ‌های اتصال کوتاه

در IMهای قفس سنجابی (SCIMs) و BDFIMs، روتورها به تعدادی از سیم‌پیچ‌های اتصال کوتاه قرار گرفته بطور معادل برای اصلاح توزیع MMF اولیه‌ی متغیر با زمان مجهز می‌شوند. سیم‌پیچ اتصال کوتاه یک دستگاه غیر فعال می‌باشد که بر فرکانس لغزشی بین توزیع اولیه‌ی MMF مغناطیسی (یا توزیع چگالی شار اولیه) و تعدیل‌کننده برای القای جریان در سیم‌پیچ تکیه دارد. در مثال داده شده، جریان در ژامین سیم‌پیچ اتصال کوتاه، یک MMF مغناطیسی مازاد را ایجاد می‌کند، همانطور که توسط خط چین در شکل ۳ مشخص شده است. در نتیجه MMF مغناطیسی شدن نهایی از مجموع MMF مغناطیسی شدن اولیه و تمام MMFهای مازاد ایجاد شده توسط سیم‌پیچ اتصال کوتاه تولید می‌شود همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است. رفتار مدولاسیون می‌تواند با استفاده از عملگر مدولاسیون $M(NSC)$ مشخص شود.

$$M(N_{SC}, \gamma)[f(\theta)] = f(\phi) + \sum_{j=1}^{N_{SC}} W^j i^j, \phi \in [0, 2\pi] \quad (4)$$

در این فرمول، N_{sc} تعداد گروه سیم پیچ اتصال کوتاه است که حالت سوئیچ کردن (تعویض) مدوله کننده (تعدیل کننده) هر چرخ را منعکس می کند. γ فاکتور ظرفیت سیم پیچ خاص می باشد و i جریان در لامین سیم پیچ می باشد W^d تابع پیچشی لامین سیم پیچ می باشد. ϕ موقعیت زاویه ایی در چارچوب مرجع مدوله کننده ی ثابت می باشد و

$$\phi = \theta - \omega_r t.$$



شکل ۳. اصل مدولاسیون سیم پیچ اتصال کوتاه

یک نوع BDFIM معمولی با میدان زوج-قطب-pf پیچشی، آرمیچر جفت-قطب-pa پیچشی و گروه های سیم پیچ اتصال کوتاه تک لایه NCS با طول سیم پیچ مشابه $\gamma \times 2\pi / N_{sc}$ بعنوان یک مثال داده شده است. هنگامی که آن با استفاده از یک واحد زوج-قطب-pf MMF مغناطیسی اولیه ی کسینوسی برانگیخته می شود، توزیع MMF نهایی شامل هارمونیک هایی می شود که زوج قطب آنها pf و $IN_{sc} \pm pf$ می باشد، جایی که I یک عدد صحیح مثبت است. دامنه های نسبی هر هارمونیک می تواند بطور تحلیلی توسط ضرایبی که به میزان زیادی با ترکیب زوج قطب و طول سیم پیچ در ارتباط می شوند تعیین و مشخص شوند که می توانند برای بررسی تاثیر ترکیب زوج قطب و طول یا محدوده ی سیم پیچ برای عملکردی مانند توانایی جفت شدگی عرضی، چگالی گشتاور و غیره استفاده شوند. این فرایند مدولاسیون و جابه جایی طیفی در شکل ۴الف و ب به ترتیب نشان داده شده است.

۲. مقاومت مغناطیسی متغیر

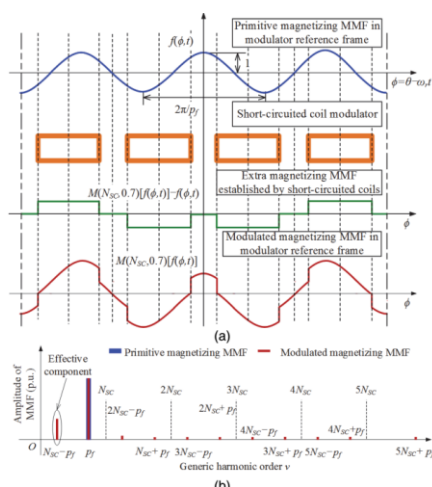
قطب های برجسته ی روتور و استاتور، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، متغیر متناوبی از مقاومت مغناطیسی را برای مدولاسیون در یک توزیع MMF اولیه ی اختیاری (حتی از نوع یکنواخت) استفاده می کنند و می توانند توسط

عملگر مدولاسیون استاتور $[\cdot]M(NST, \varepsilon ST)$ و عملگر مدولاسیون روتور $[\cdot]M(NRT, \varepsilon RT)$ مشخص شوند که $[\cdot]M(NST, \varepsilon ST)$ و $[\cdot]M(NRT, \varepsilon RT)$ بصورت نگاشت‌هایی از یک تابع اختیاری با یک دوره‌ی $\pi 2$ برای تابع تکه‌ای در $[\cdot, \pi 2]$ تعریف می‌شوند.

$$M(N_{ST}, \varepsilon_{ST})[f(\theta)] = \begin{cases} f(\phi), & \phi \in C^S, \\ \kappa(o_s/t_{ds})f(\phi), & \phi \in [0, 2\pi] - C^S. \end{cases} \quad (5)$$

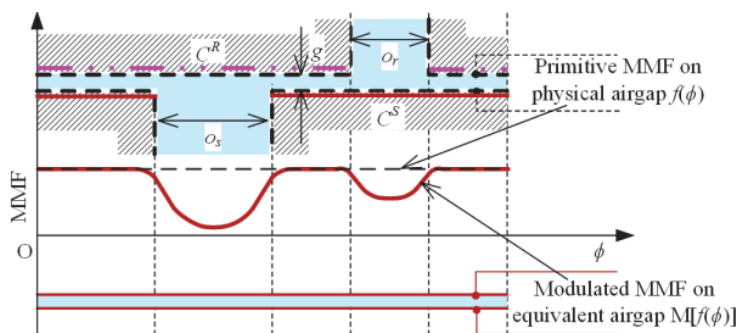
$$M(N_{RT}, \varepsilon_{RT})[f(\theta)] = \begin{cases} f(\phi), & \bar{\theta} \in C^R, \\ \kappa(o_r/t_{dr})f(\phi), & \phi \in [0, 2\pi] - C^R. \end{cases} \quad (6)$$

در اینجا، CS و CR به ترتیب فواصل ناپیوسته اشغال شده توسط دندانه‌های استاتور و روتور در رادیان‌های مکانیکی هستند. NST و NRT به ترتیب تعداد دندانه‌های استاتور و روتور می‌باشند. k تابعی از o/td برای در نظر گرفتن افت MMF در تمام شیار باز می‌باشد. که در آن o و td عرض شیار باز و گام دندانه برحسب رادیان می‌باشند. زیر وند S و r به ترتیب استاتور و روتور را نشان می‌دهد. دهانه‌های بزرگ ($o/td \geq 0.3$) معمولاً در روتورهای قطب برجسته‌ی $SynRM$ ، $BDFRM$ ، MGM و MG ، قطب استاتور برای DCM و هر دو قطب استاتور و روتور ماشین‌های استاتور- PM برای مدولاسیون میدان اتخاذ می‌شوند. تحت بیشتر شرایط، روتور/استاتور شیار ریز ($o/td < 0.3$) می‌توانند بصورت استوانه‌ای عمل کنند به جزء حالتی که تاثیرات شیار کوچک بر چنین مطالعه‌ی فقدان‌های هارمونیک در $SCIM$ ، گشتاور دنده‌ای در $PMSM$ و غیره تمرکز دارد. حالت خاص جایی است که هیچ شیار نیست و یا می‌توان از تاثیر شیار بعنوان مدولاسیون واحد صرف نظر کرد، که آن بدان معنی است که هیچ تغییری در توزیع MMF ایجاد نمی‌شود و مدول کننده‌ی متناظر، واحد می‌باشد.



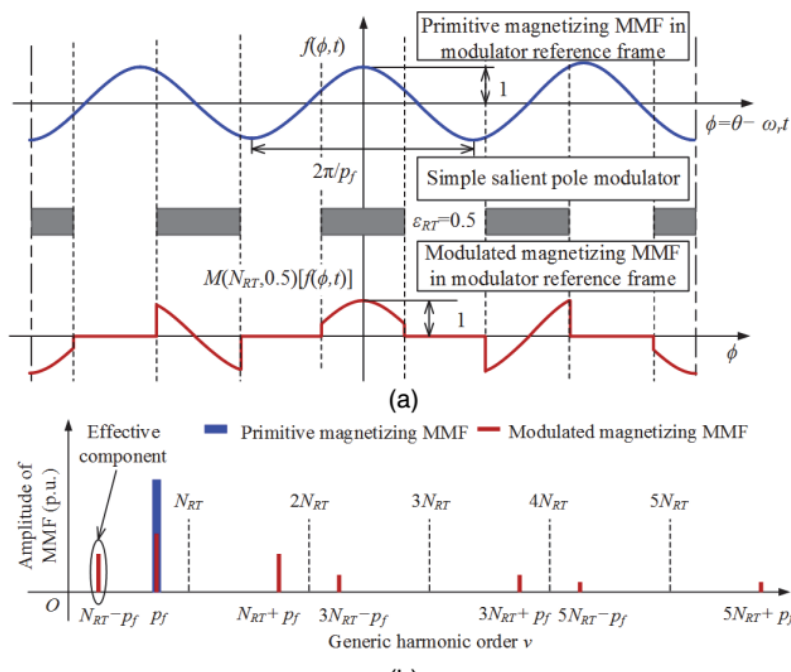
شکل ۴. مدولاسیون مدول کننده‌ی اتصال کوتاه در یک BDFIM. $(p=3, p_a=1, N_{sc}=4)$ (a) فرایند مدولاسیون

(b) جابه‌جایی طیف



شکل ۵. اصل مدولاسیون قطب‌های برجسته و یا نمایان ساده

برای مثال BDFRM معمولی با روتور قطب برجسته‌ی ساده، مدوله کننده‌ی روتور قطب برجسته‌ی ساده، همچنین، هارمونیک‌هایی با تعداد زوج قطب PF و $INRT \pm pf$ را در پاسخ به MMF مغناطیسی اولیه‌ی کسینوسی واحد زوج-قطب pf تولید می‌کند. این فرایند مدولاسیون دقیق مدوله کننده‌ی روتور قطب برجسته‌ی ساده در شکل ۶ الف نشان داده شده است و جابه‌جایی طیف متناظر در شکل ۶ ب نشان داده شده است.



شکل ۶ مدولاسیون مدوله‌کننده‌ی روتور قطب-برجسته‌ی ساده در BDFRM معمولی ($p=3$, $p_a=1$, $N_{RT}=4$)

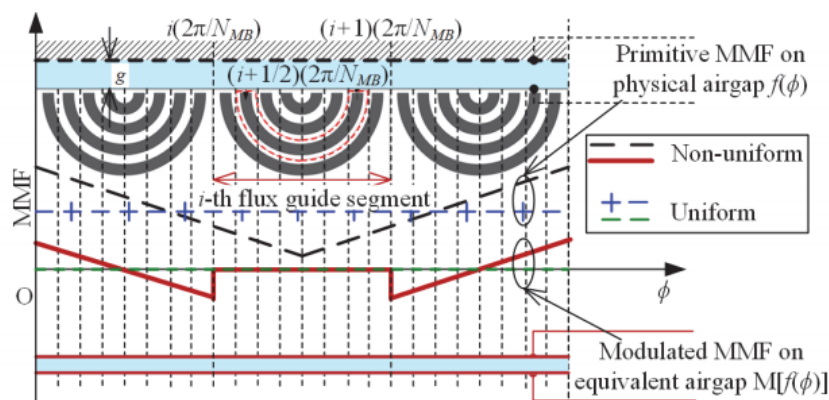
(الف) فرایند مدولاسیون (ب) جابه‌جایی طیف

۳ هدایت شار

هدایت شار، همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است MMF اولیه‌ی غیر یکنوخت را (یعنی MMF اولیه، یک مقدار ثابتی از dc نمی‌باشد) با تعریف مسیر خطوط شار مدوله می‌کند. راهنماهای شار معمولاً بایکدیگر به شکل قطعه راهنمای شار، قرار داده می‌شوند، قطعات همچنین، بعنوان قطعات مانع شار نامیده می‌شوند. هر قطعه راهنمای شار شامل لایه‌های چند لایه‌ای است که بطور مغناطیسی با مواد غیر مغناطیسی عایق شده است. بنابراین هر لایه مانند یک لوله‌ی شار عمل می‌کند که تنها خطوط شار را به ورود و خروج از دو نقطه‌ی متقارن اطراف خط مرکزی هر قطعه راهنمای شار $(i+1/2)2\pi/NMB$ میسر می‌سازد. اگر airgap یکنواخت فرض شود که معمولاً این حالت می‌باشد، در آن صورت MMF در مسیر بسته از طریق دو نقطه با airgap در دو نقطه بطور معادل سهیم می‌شود. راهنما یا هدایت شار می‌تواند با استفاده از یک عملگر $M(NMB)[\cdot]$ بصورت زیر مشخص شود.

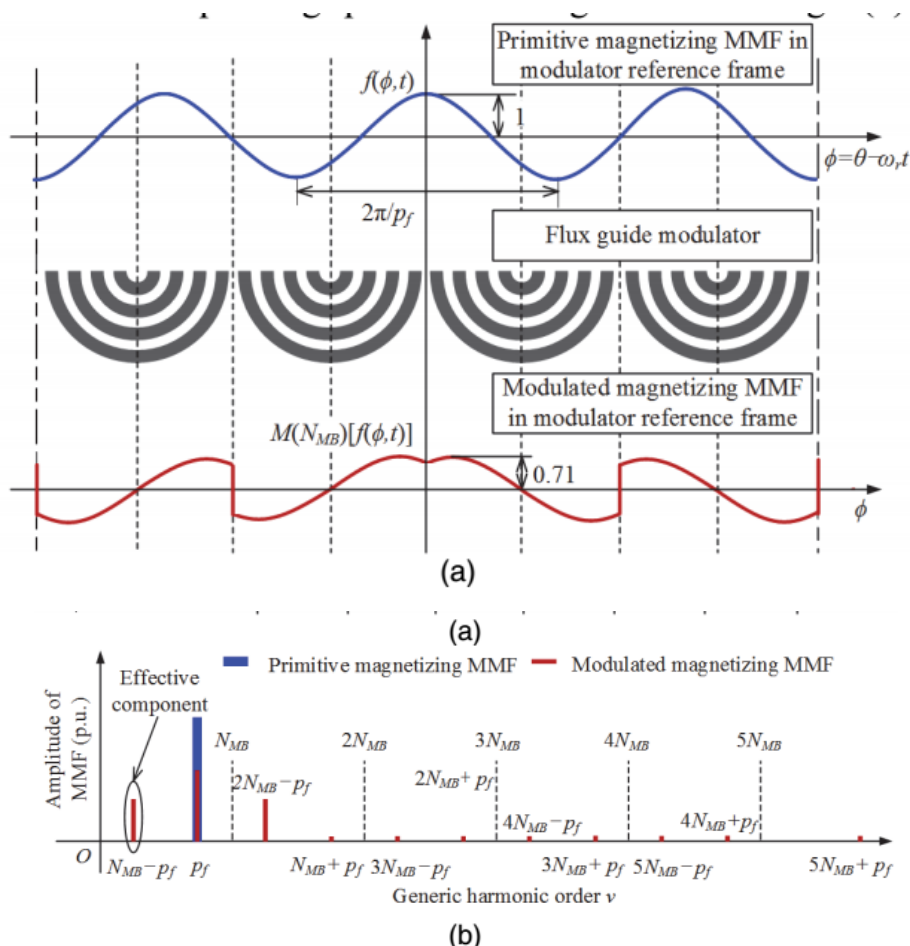
$$M(N_{MB})[f(\phi)] = \frac{1}{2} \left[f(\phi) - f\left((2i+1)\frac{2\pi}{N_{MB}} - \phi\right) \right], \quad \phi \in \left(\frac{2\pi i}{N_{MB}}, \frac{2\pi(i+1)}{N_{MB}} \right) \quad (7)$$

در این فرمول NMB تعداد قطعه‌ی راهنمای شار می‌باشد که همچنین تعداد حالت سوئیچ‌کننده‌ی (تعویض کننده) مدوله کننده را در هر چرخه شان می‌دهد. هدایت ایده‌آل شار با ساختار ناهمسانگرد (ALA) لایه لایه شده بطور محوری مشخص می‌شود. معمولاً برای سهولت تولید، ساختار چند سدی اتخاذ می‌شود.



شکل ۷. اصل مدولاسیون هدایت شار

مدوله کننده‌ی هدایت شار، معمولاً در SynRM، BDFRM، ماشین FSPM و غیره استفاده می‌شود. مشابه با این حالات، با استفاده از مدوله کننده‌ی سیم پیچ اتصال کوتاه و مدوله کننده‌ی قطب برجسته‌ی ساده، مدولاسیون همچنین توسط هدایت شار، ۳ نوع هارمونیک را ایجاد می‌کند که زوج قطب آن pn و $INMB \pm pn$ می‌باشد. فرایند مدولاسیون دقیق مدوله کننده‌ی هدایت شار در یک BDFRM معمولی با یک روتور چند سدی، در شکل ۸ (الف) نشان داده شده است و جابه‌جایی طیف، در شکل ۸ (ب) نشان داده شده است.



شکل ۸ مدولاسیون مدوله‌کننده‌ی شار در یک BDFRM معمولی با یک روتور چند سدی ($p=3$, $p_a=1$, $N_{MB}=4$).

(الف) فرایند مدولاسیون (ب) جابه‌جایی طیف

۴ ویژگی عملکرد مدولاسیون

تمام مدولاسیون‌ها در چارچوب مرجع مدوله‌کننده‌ی ثابت دستکاری می‌شوند جایی که مدول‌کننده بصورت ثابت برای حذف اثرات حرکت نسبی مکانیکی در نظر گرفته می‌شود. برای مثال، برای تجزیه و تحلیل FSPM، مدوله‌کننده‌ی استاتور، میدان مغناطیسی ایستای تولید شده توسط PM را مدوله می‌کند در حالی که مدوله‌کننده‌ی روتور، میدان مغناطیسی ایستا را در سیستم مختصات چرخشی سرعت روتور مدوله می‌کند. مانند یک عملکرد ریاضی، عملکرد مدولاسیون یک ویژگی‌هایی دارد.

(الف) خطی بودن

عملگر مدولاسیون خطی است، که بصورت زیر می‌باشد

$$M[\alpha f(\theta) + \beta g(\theta)] = \alpha M[f(\theta)] + \beta M[g(\theta)], \alpha, \beta \in \mathbf{R} \quad (8)$$

ب) قانون جابه‌جایی پذیر

عملگرهای مدولاسیون، قانون جابه‌جایی‌پذیری را برآورده می‌سازد که هست:

$$M_1[M_2[f(\theta)]] = M_2[M_1[f(\theta)]] \quad (9)$$

ج) دیفرانسیل

MMF اولیه‌ی مدوله شده قابل دیفرانسیل است

د) توان

مرتبه‌های اختیاری مدولاسیون با مدوله‌کننده‌ی مقاومت متغیر یا مدوله‌کننده‌ی هدایت شار معادل با یک مدولاسیون تک می‌باشد، اما مدوله‌کننده‌ی سیم پیچ اتصال کوتاه یک استثنا است.

$$\underbrace{M[...M[M[f(\theta)]]]}_{k \text{ times}} = M[f(\theta)] \quad (10)$$

C. فاکتور مدولاسیون

شایان ذکر است که هر چند مدولاسیون میدان **airgap**، خطوط طیفی ناحیه‌ی فرکانس MMF اولیه‌ی دوره‌ای را جابه‌جا می‌کنند، محتوای توان کلی، تغییر نخواهد داده شد صرف نظر از اینکه چه نوع مدولاسیونی استفاده می‌شود. یک فاکتور مدولاسیون میدان، می‌تواند بعنوان نسبت توان اجزای MMF موثر توزیع MMF نهایی به توان اجزای MMF موثر MMF ابتدایی برای توصیف کارامدی یا بهره‌وری مدولاسیون تعریف شود یعنی

$$MF = \sqrt{\sum_{\mu \in E} |F_{\mu}|^2 / \sum_{v=1}^{\infty} |F_v|^2} = \sqrt{\sum_{\mu \in E} |F_{\mu}|^2 / \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [f(\theta)]^2 d\theta \right\}} \quad (11)$$

در این فرنول E مرتبه‌هایی از اجزای موثر MMF مدوله شده است. بر اساس معادله‌ی ۱۱، فاکتور مدولاسیون میدان سیم‌پیچ اتصال کوتاه تک لایه در شکل ۴، قطب روتور برجسته‌ی ساده در شکل ۶، روتور چند سدی در شکل ۸ به ترتیب 0.27، 0.318 و 0.318 می‌باشند.

D. مدل Airgap معادل

با معرفی عملگر مدولاسیون، airgap فیزیکی با سیم‌پیچ‌ها، شیارها، یا راهنماهای شارها به یک airgap یکنواخت و

معادل با MMF مدوله شده‌ی $M[F_f(\theta, t)]$ و $M[F_a(\theta, t)]$ همانطور که بیان شد تبدیل خواهد شد

$$M[F_{f(a)}(\theta, t)] = M_n \left[\dots M_2 \left[M_1 \left[F_{f(a)}(\theta, t) \right] \right] \right] \quad (12)$$

در این معادله، $F_f(\theta, t)$ MMF مغناطیسی ابتدایی و $F_a(\theta, t)$ MMF آرمیچر نهایی می‌باشند.

$$F_{f(a)}(\theta, t) = \sum_{j=1}^m \left[W_{f(a)}^j(\theta, t) \times i_{f(a)}^j(t) \right] \quad (13)$$

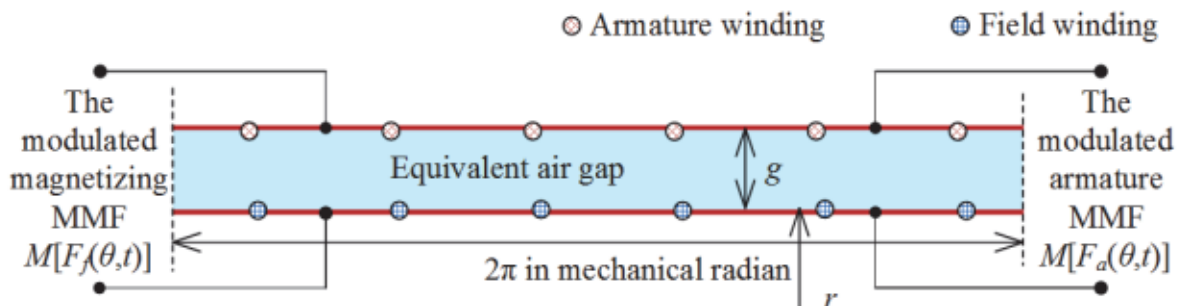
در این فرمول، W_f و W_a به ترتیب تابع پیچشی سیم‌پیچ میدان و سیم‌پیچ آرمیچر (القایر) می‌باشند. i_f و i_a

به ترتیب جریان مغناطیسی شدن و جریان آرمیچر می‌باشند.

توزیع چگالی شار airgap می‌تواند بصورت زیر بدست بیاید:

$$B_g(\theta, t) = \frac{\mu_0}{g} \left\{ M[F_f(\theta, t)] + M[F_a(\theta, t)] \right\} \quad (14)$$

در این فرمول، B_g چگالی شار airgap و μ_0 نفوذپذیری خلاء می‌باشد.



شکل ۹ مدل airgap معادل

توزیع چگالی شار airgap بدون بارگذاری بصورت زیر می‌باشد:

$$B_f(\theta, t) = \frac{\mu_0}{g} M[F_f(\theta, t)] \quad (15)$$

اتصال شار بدون بارگذاری هر فاز متصل شده توسط سیم پیچ ارمیچر بصورت زیر بدست می آید:

$$\psi_a^j(t) = \mu_0 \frac{r_g L_{stk}}{g} \int M[F_f(\theta, t)] \times W_a^j(\theta, t) d\theta \quad (16)$$

دری فرمول، r_g شعاع airgap می باشد، L_{stk} طول بسته می باشد.

EMF بدون بارگذاری در هر فاز در سیم پیچ ارمیچر می تواند با استفاده از دیفرانسیل اتصال شار بدست آورده شود:

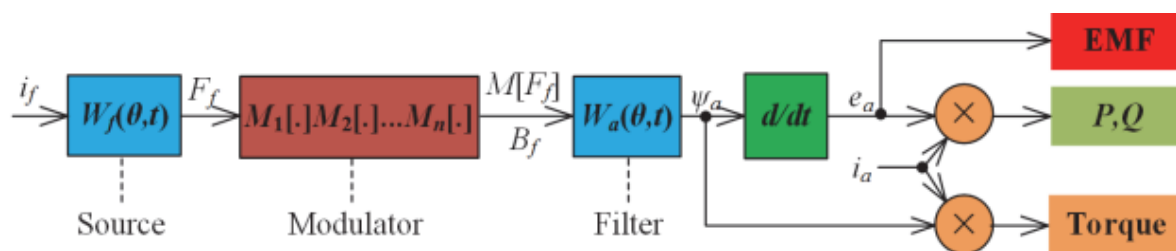
$$e_a^j(t) = -\frac{d}{dt} \left[\mu_0 \frac{r_g L_{stk}}{g} \int M[F_f(\theta, t)] \times W_a^j(\theta, t) d\theta \right] \quad (17)$$

و گشتاور الکترومغناطیس هست:

$$T_{em}(t) = -\frac{\mu_0 r_g^2 L_{stk}}{2g} \frac{\partial}{\partial \phi} \int_0^{2\pi} \{M[F_f(\theta, t)] + M[F_a(\theta, t)]\}^2 d\theta \quad (18)$$

E جریان سیگنال

جریان سیگنال یک ماشین الکترومغناطیس در شکل ۱۰ نشان داده شده است. و می توان متوجه شد که عملکرد یک ماشین الکتریکی به میزان قابل توجهی بستگی به ترکیبی از سه عنصر: منبع، مدول کننده (تعدیل کننده) و فیلتر دارد.



شکل ۱۰. جریان سیگنال یک ماشین الکتریکی

از نقطه نظر تبدیل انرژی الکترومکانیکی، حداقل یکی از سه عنصر حرکت دارد و در کل، (۱-۳) ترکیب قابل دسترس برای یک ماشین الکتریکی استاندارد با یک سیم پیچ ت میدانک، یک مدوله کننده ی تک و سیم پیچ ارمیچر تک وجود خواهد داشت. به نظر می رسد که مدول کننده می تواند هم با MMF (ارمیچر) مغناطیسی ابتدایی که بعنوان

مدولاسیون (همزمان) استاتیک (ایستا) مشخص می‌شود هماهنگ شود و هم نسبت به MFF (ارمیچر) مغناطیسی ابتدایی که بعنوان مدولاسیون (همزمان) دینامیک (پویا) مشخص می‌شود حرکت کند. در حقیقت، مدولاسیون استاتیک یا ایستا می‌تواند بعنوان حالت خاصی از مدولاسیون دینامیک در نظر گرفته شود جایی که سرعت نسبی بین MMF مغناطیسی ابتدایی و مدوله کننده صفر می‌باشد. رفتار هر دو مدولاسیون می‌تواند در ماشین‌های الکتریکی نوظهور و مرسوم مشاهده شود و مقایسه‌ای بین مدولاسیون ایستا و پوی در جدول ۱ ورده شده است.

جدول ۱ مقایسه‌ی بین مدولاسیون پویا (دینامیک) و ایستا (استاتیک)

مدولاسیون استاتیک (ایستا) (همزمان)	مدولاسیون دینامیک (پویا) (غیر همزمان)	نوع مدولاسیون
آسایش	حرکت یا جنبش	سرعت نسبی بین MMF مغناطیسی اولیه و مدوله کننده
منظم (سینوسی و مستطیلی)	نامنظم	توزیع میدان
تک یا محدود (توزیع میدان سینوسی یا مستطیلی)	محدود، حداقل دو هارمونیک	تعداد هارمونیک‌های فضایی
بسیار منطبق	مطابقت نسبت دور یا نزدیک (EMF بزرگ و یا گشتاور بزرگتر)	ترکیب زوج قطب سیم‌پیچ میدان و سیم‌پیچ آرماتور

III. بحث‌ها

این بخش، اثربخشی و برتری تئوری یا نظریه‌ی مدولاسیون میدان **airgap** را در کاربردهای معمولی از جمله، تجزیه و تحلیل توپولوژی ساختار ماشین موجود، مشتق‌گیری تحلیلی معادلات طراحی و تولید موثر توپولوژی‌های نوآورانه‌ی ماشین نشان می‌دهد البته تنها به ایت کاربردها محدود نمی‌شود.

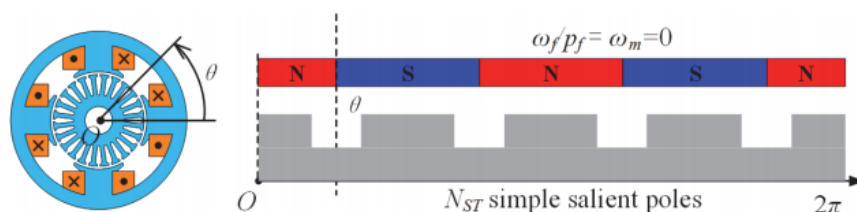
A. تجزیه و تحلیل توپولوژی

انواع ماشین‌های رایج در تحقیقات جامع گذشته و امروز، از منظر مکانیسم مدولاسیون میدان **aiirgap** بررسی می‌شوند، اما تنها به دلیل محدودیت فضا فقط مثال‌های معمول در اینجا بررسی می‌شوند. در تجزیه و تحلیل زیر، p_f و pa به ترتیب به PPPN سیم‌پیچ میدان و سیم‌پیچ آرماتور اشاره دارند. ω_m و ω_f به ترتیب، به فرکانس زاویه‌ای

MMF مغناطیسی ابتدایی و سرعت مکانیکی روتور اشاره دارند. مثبت و منفی در جلوی تعداد زوج قطب برای تشخیص جهت چرخش هارمونیک‌های میدان استفاده می‌شوند.

DCM(۱)

DCM اساساً یک ماشین ac با جابجاگر مکانیکی است. در DCM معمولی در شکل ۱۱، همراه با رفتار مدولاسیون میدان نشان داده شده است

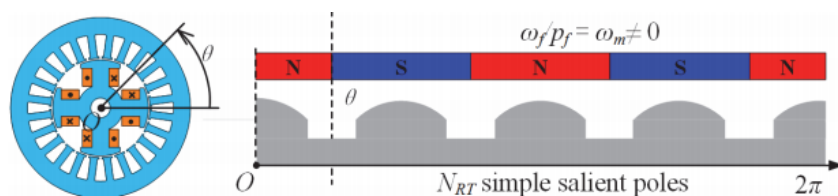


شکل ۱۱ DCM و مدولاسیون قطب‌های برجسته‌ی ساده

استاتور معمولاً قطب‌های برجسته را برای پیچاندن سیم‌پیچ میدان تک فاز اتخاذ می‌کند که یک MMF مغناطیسی ابتدایی مستطیلی را در airgap ایجاد می‌کند. عملکرد مدولاسیون استاتور که تاثیر قطب‌های استاتور را بر روی توزیع MMF غناطیس نهایی مشخص می‌کند شکلی از δ را می‌دهد و مدول کننده‌ی استاتیک بین MMF مغناطیسی ابتدایی و قطب‌های برجسته‌ی ساده استاتور رخ می‌دهد به دلیل اینکه هیچ حرکتی بین آنها انجام نمی‌شود. سپس MMF مغناطیسی مدوله شده توسط دداه‌های روتور غیر همزمان یا ناهمگام مدوله می‌شود. از آنجایی که روتور شکاف شده‌ی ریز می‌باشد در نتیجه تغییرت توزیع MMF مستطیلی صرف‌نظر می‌شود و می‌تواند بعنوان مدولاسیون واحد تحت بیشتر شرایط عمل کند. سیم‌پیچ ارمیچر در روتور قرار دارد و یک تعدادی از سیم‌پیچ‌های بطور کامل برپا شده یا تقریباً کامل برپا شده و متصل شده در سری‌ها می‌باشد که یک طیف وسیعی دارد و تمام اجزای هارمونیک فضایی را توسط MMF مغناطیسی مدولاسیون مستطیلی با عبور میسر می‌سازد بنابراین اتصال شار موج مثلی متصل خواهد شد و EMF مستطیلی در هر سیم‌پیچ روتور القا خواهد شد.

(۲) قطب برجسته‌ی SM

تحریک پیچش قطب برجسته SM که یک روتور قطب برجسته با قطب‌ها و سیم‌پیچ میدان dc مشخص می‌کند در شکل ۱۲ نشان داده می‌شود.



شکل ۱۲ قطب برجسته SM و مدولاسیون همزمان قطب‌های روتور برجسته

سیم‌پیچ‌های میدان dc یک MMF تنظیمی ابتدایی مستطیلی را در airgap ایجاد می‌کند که سپس بطور همزمان توسط قطب‌های روتور برجسته برای تولید یک توزیع MMF مغناطیسی سینوسی مدوله می‌شود. همچنین استاتوری باشیار ریز، مدولاسیون غیرهمزمان را بری توزیع MMF انجام می‌دهد. سیم‌پیچ آرمیچر بر روی استاتور قرار گرفته، پیچش همپوشانی چند فاز را ترجیح می‌دهد که تنها جزء هارمونیک فضایی یک PPPN خاص را برای عبور میسر می‌سازد. برای حداکثر سازی اتصال شار و EMF، جفت قطب سیم‌پیچ آرمیچر معادل باید معادل با جفت قطب MMF مغناطیسی مدوله شده شود.

B. معادله‌ی چگالی گشتاور الکترومغناطیس

گشتاور الکترومغناطیس ایجاد شده از طریق الکترومغناطیس می‌تواند در دو نوع شکل از فرمولاسیون ادغام شده‌ی ۱۸ با توجه به موقعیت‌های نسبی پیچش میدان و آرمیچر مشتق شود. در بیشتر حالات سیم‌پیچ میدان و پیچش آرمیچر بر روی استاتور و روتور بطور جداگانه (نوع A) مانند این حالت در DCM و SM قرار داده می‌شود. ب این وجود آنها می‌توانند در روتور و استاتور مشابه (نوع B) مانند این حالت در IM, SynRM و بیشتر ماشین‌های نوظهور قرار بگیرند. دو نوع تولید گشتاور باعث اختلافات مشخص در محاسبه‌ی گشتاور می‌شود، بنابراین در ابتدا تجزیه‌ی گشتاور باید برای تجزیه و تحلیل مکانیسم تولید گشتاور از دیدگاه مدولاسیون میدان airgap محاسبه شود.

(۱) تجزیه‌ی گشتاور

نوع A: اگر سیم پیچ میدان و آرمیچر یا آرماتور بر روی استاتور و روتور بطور جداگانه قرار بگیرد تنها MMF مغناطیسی مدوله شده بستگی به موقعیت روتور با توجه به سیستم مختصات مشابه خواهد داشت و فرمول ۱۸ بصورت زیر بیان می شود:

$$T_{emA}(t) = T_{Mff} + T_{Maf} \quad (19)$$

where

$$T_{Mff} = -\frac{\mu_0 r_g^2 L_{stk}}{g} \int_0^{2\pi} M[F_f(\theta, t)] d[F_f(\theta, t)] \quad (20)$$

$$T_{Maf} = -\frac{\mu_0 r_g^2 L_{stk}}{g} \int_0^{2\pi} M[F_a(\theta, t)] d[F_f(\theta, t)] \quad (21)$$

T_{Mff} صرفاً با استفاده از برهمکنش بین MMF مغناطیسی مدوله و خود آن تولید می شود. یک مثال نوعی از این جزء گشتاور دنده چرخ (دنده ایی) در PMSM می باشد که هیچ مشارکتی در گشتاور میانگین ندارد ولی سبب پالسی شدن دوره ایی می شود. T_{Maf} توسط برهمکنش بین MMF مغناطیسی مدوله شده و MMF آرمیچر مدوله شده تولید می شود که دلیل اکثریت گشتاور الکترومغناطیس می باشد.

نوع B: اگر هر دو سیم پیچ میدان و آرمیچر در روتور و استاتور مشابه قرار بگیرند، هر دو MMF آرمیچر و مغناطیسی مدوله شده بستگی به موقعیت روتور، با در نظر گرفتن سیستم مختصات مشابه خواهند داشت و ۱۸ می تواند بصورت زیر بیان شود:

$$T_{emB}(t) = T_{Mff} + T_{Maf} + T_{Mfa} + T_{Maa} \quad (22)$$

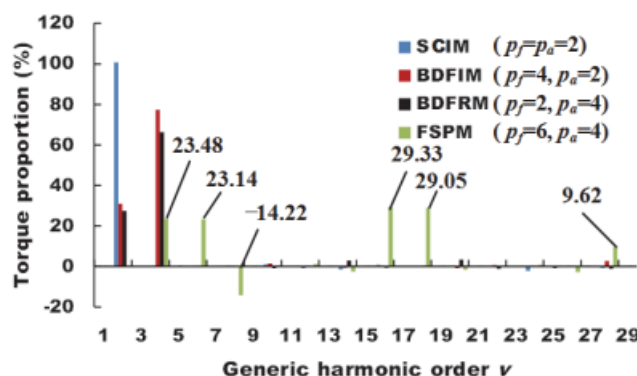
$$T_{Mfa} = -\frac{\mu_0 r_g^2 L_{stk}}{g} \int_0^{2\pi} M[F_f(\theta, t)] d[F_a(\theta, t)] \quad (23)$$

$$T_{Maa} = -\frac{\mu_0 r_g^2 L_{stk}}{g} \int_0^{2\pi} M[F_a(\theta, t)] d[F_a(\theta, t)] \quad (24)$$

علاوه بر این دو مولفه ی گشتاور یعنی T_{Mff} و T_{Maf} در ماشین نوع A، دو مولفه ی گشتاور دیگر در ماشین نوع B ظاهر می شوند. T_{Maf} توسط تعامل بین MMF آرمیچر مدوله شده و MMF مغناطیسی مدوله شده تولید می شود. T_{Maa} بستگی به تعامل بین MMF آرمیچر مدوله شده و خود آن دارد. مثال نوعی این مولفه ی گشتاور، گشتاور فعال در SRM، گشتاور دنده ایی در ماشین FSPM با PMS حذف شده و سیم پیچ آرمیچر تولید شده می -

باشد. تجزیه ی گشتاور میانگین ۴ توپولوژی ماشین معمولی در شکل ۱۳ داده شده است. نسبت گشتاور سهیم شده با

هر مولفه‌ی هارمونیک میدان با استفاده از روش استفاده شده در مرجع ۳۱ بر اساس مولفه‌های شعاعی و مماسی شار airgap بدست آمده از آنالیز المان متناهی 2D (D-FEA) محاسبه می‌شود. می‌توان مشاهده کرد که گشتاور ۴- قطب SCIM، توسط هارمونیک میدان زوج-۲- قطب غالب می‌شود. در BDFIM ۴/۲ و BDFRM ۲/۴، گشتاورهای کلی، بطور عمده با دو هارمونیک میدان جفت قطب سهیم می‌شوند و مولفه‌های گشتاور تقریباً متناسب با جفت‌های قطب می‌باشند. گشتاور قطبی ماشین ۱۰/۱۲ FSPM با ۶ هارمونیک میدان غالب سهیم می‌شود. این ۶ هارمونیک میدان، ۴ جفت هارمونیک را تشکیل می‌دهند که این ۴ جفت هستند: (۴، ۶)، (۱۶، ۶)، (۱۸، ۸-) و (۱۸، ۲۸). هر زوج هارمونیک می‌توانند بصورت مفهومی، بعنوان یک BDFRM درک شوند.



شکل ۱۳ تفکیک‌های گشتاور میانگین، BDFIM، SCIM، BDFRM و FSPM معمولی

(۲) معادله‌ی چگالی گشتاور

هنگامی که ترکیب گشتاور تعیین می‌شود، گشتاور میانگین موثر می‌تواند بلافاصله از ترکیب (۲۰)، (۲۱)، (۲۳) و (۲۴) بدست آورده شود. بیان ادغام شده‌ی چگالی گشتاور بری تمام ماشین‌های الکتریکی قبل دسترس نمی‌باشد زیرا بیان‌ها بستگی به نه تنها نوع مدولاسیون دارد بلکه به موقعیت نسبی سیم‌پیچ‌های آرمیچر و میدان هم بستگی دارد. در اینجا معادلات چگالی گشتاور کلی برای دو نوع ماشین نوعی برای نشان دادن اثربخشی روش نشان داده می‌شوند. بر اساس معادله‌ی ۱۹، معادله‌ی چگالی گشتاور کلی برای ماشین‌های معمول (SM, PMSM) نوع A و IM و SynRM نوع B) در عباراتی از حجم روتور می‌توانند بصورت زیر بیان شوند:

$$\text{TRV}_A = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \sum_v \overline{B_a^v J_a^v} \cos \varphi_a^v \quad (25)$$

در این فرمول $\overline{B}_a^v$ و $\overline{J}_a^v$ به ترتیب بارگذاری مغناطیسی ویژه و بارگذاری الکتریکی ویژه ی هارمونیک با مرتبه ی v سمت آرمیچر می باشند.

$$\overline{B}_a^v = 2B_{a(\text{amp})}^v / \pi \quad (26)$$

$$\overline{J}_a^v = 2m(N_a^j k_{wv}) I_{a(\text{rms})}^j / (\pi d) \quad (27)$$

در این فرمول $B_{a(\text{amp})}^v$ دامنه ی چگالی شار مولفه ی هارمونیک مرتبه ی v می باشد. N_a^j تعداد چرخش های در سری های سیم پیچ آرمیچر فاز λ ام می باشد. $I_{a(\text{rms})}^j$ ، مقدار rms (ریشه ی مربع میانگین) جریان آرمیچر (القاگیر) λ امین فاز می باشد d قطر airgap می باشد. بارگذاری مغناطیسی ویژه اکوالان کلی می تواند بصورت یک نوع ترکیبی از مولفه های هارمونیک مرتبه ی v تعریف شود. معادله ی گشتاور برای IM و SM که در حال حاضر برای اندازه گیری اولیه به میزان وسیعی استفاده شده است، تنها حالت خاصی از ۲۵ با تنظیم کردن $v = \text{pf}$ می باشد که به این معنی است که تنها هارمونیک میدان اولیه برای تولید گشتاور استفاده می شود. بر اساس ۲۲، معادله ی چگالی گشتاور کلی برای برخی از ماشین های نوع B (ماشین های BDFRM، stator-PM) در عباراتی از حجم روتور بصورت زیر می باشد:

$$\text{TRV} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \sum_v \frac{N_{RT(MB)}}{p_a^v} \overline{B}_a^v \overline{J}_a^v \cos \phi_a^v \quad (28)$$

$$\text{where } p_a^v = N_{RT(MB)} \pm p_f^v, p_f^v = (2k-1)p_f, k \in \mathbf{Z}^+.$$

ماشین FSPM بعنوان یک مثال آورده می شود. MMF مغاطیسی شدن ابتدایی ب سیم پیچ متمرکز تک فاز شامل هارمونیک های فضایی فرد ایستا (استاتیک) ایجاد می شود و سیم پیچ آرمیچر یا آرماتور، سیم پیچ متمرکز بطور جزئی شیاری را اتخاذ می کند که دارای طیف هارمونیک فضایی گسترده می باشد و می تواند هارمونیک های هترو دین شده ی $(N_{RT(MB)} \pm \text{pf}, \dots, N_{RT(MB)} \pm 3\text{pf})$ را برای ایجاد EMF و تولید گشتاور استفاده کند. گشتاور کلی با چندین زوج مولفه ی میدان $(p_a^v \pm p_f^v = N_{RT(MB)})$ ، غالب می شود و می تواند بصورت مفهومی بعنوان قرارگیری چندین BDFRMs درک شود. و بری هر زوج هارمونیک میدان در حال کار، گشتاور تولید شده با استفاده از هر زوج قطب، متناسب با تعداد زوج قطب آن می باشد. برای یک ماشین ۱۲/۱۰ FSPM نوعی، مولفه های گشتاور تولید شده توسط تعامل بین MMF

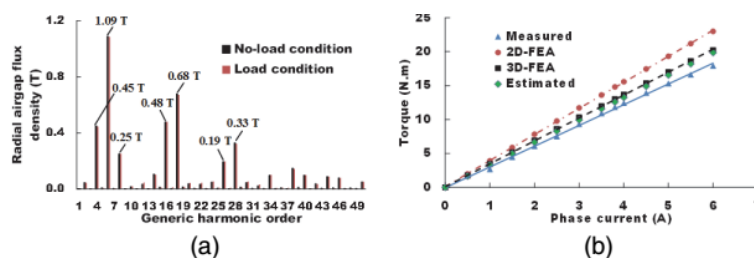
مغناطیسی شدن مدوله شده و MMF ارمیچر مدوله شده T_{pf}^v و آنهایی که به دلیل تعامل بین MMF ارمیچر مدوله شده و MMF مغناطیسی شدن مدوله شده $T_{N_{RT(MB)} \pm p_f^v}^{MMF}$ تولید شده متصل می‌شوند با

$$T_{p_f^v} = \frac{p_f^v}{N_{RT(MB)} - p_f^v} T_{N_{RT(MB)} - p_f^v} - \frac{p_f^v}{N_{RT(MB)} + p_f^v} T_{N_{RT(MB)} + p_f^v} \quad (29)$$

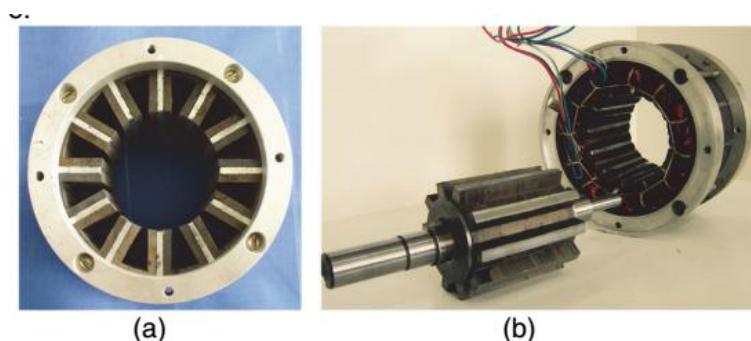
ربطه‌ی ۲۹ می‌تواند با استفاده از نتایج FEA نشان داده شده در شکل ۱۳ معتبر شود. معادلات چگالی گشتاور سایر ماشین‌ها مانند SRM و PMV نوع B همچنین می‌تواند از معادله‌ی ۱۸ به دنبال تجزیه‌ی گشتاور مشابه و روش مشتق‌گیری مشتق شود. گشتاور تخمین زده شده بر اساس معادله‌ی ۲۸، و چگالی شار هر مولفه‌ی هارمونیک میدان موثر نشان داده شده در شکل ۱۴ الف، بخوبی FEA (هم 2D و هم 3D) و نتیج تجربی منطبق می‌باشد همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است و پارمترهای آن در جدول II جدول‌بندی شده‌اند.

C. نوآوری در توپولوژی ماشین

تغییرات توپولوژی ماشین‌های stator-PM بعنوان مثال داده شده‌اند. بعنوان یک ماشین stator-PM نوعی، یک موضوع داغ هم در صنعت و هم در زمینه‌ی آکادمیک (دانشگاهی) آن از رنسانس ۲۰۰۵ شده است. ماشین‌های FSPM توسط FEA، مدل مدار مغناطیسی غیرخطی، یا مدل زیر دامنه (خطی) برای محاسبه‌ی دقیق توزیع میدان airgap بررسی شده‌اند. اخیراً تلاش‌هایی برای مدل عملکرد MMF ساده در تجزیه و تحلیل مکانیسم تولید گشتاور صورت گرفته است، اما کاربرد به نسبت محدود دارد و تنها برای تعیین مرتبه‌های هارمونیک کلی و سرعت‌های چرخش مولفه‌های میدان airgap و نه روابط بین عملکرد ماشین و ساختار توپولوژی، توسعه یافته شده است.



شکل ۱۴. نتایج تجربی و پیش‌بینی شده‌ی EF الف) طیف چگالی شار airgap محوری یا شعاعی ماشین‌های ۱۰/۱۲ FSPM مرسوم (حالت کنترل BLAC با $i_d=0$) ب) گشتاور الکترومغناطیس با مقدار rms (ریشه‌ی مربع میانگین) جریان فاز .



شکل ۱۵. نمونه‌ی اولیه‌ی FSPM الف) استاتور ب) استاتور و روتور

جدول II، پارامترهای نمونه‌های اصلی ۱۰/۱۲ FSPM

پارامترها	آیتم‌ها (موارد)
128, 70.4	قطر داخلی و خارجی استاتور (mm)
22	قطر داخلی روتور (mm)
0.35	طول airgap (mm)
75	طول دسته Stack (mm)
280	چرخش‌ها در سری‌های هر فاز
10.5	کمان دندانه‌ی روتور (درجه)
N35SH, 50W470	استیل سیلیکون، PM

بر اساس نظریه‌ی میدان airgap پیشنهادی، اصل کار ماشین FSPM می‌تواند بصورت MMF مغناطیسی مستطیلی ایده‌آل ایجاد شده ب استفاده از آرایه‌ی PM قرار گرفته شده بصورت پیرامونی، در ابتدا بطور هم‌زمان توسط قطب‌های برجسته‌ی ساده‌ی استاتور مدوله می‌شود و بعد بطور غیرهم‌زمان با قطب‌های برجسته‌ی ساده‌ی روتور مدوله می‌شود که رفتارهای آن بعنوان عملگر مدولاسیون روتور و استاتور در نظر گرفته می‌شوند. MMF مدوله شده که بر airgap یکنواخت مجازی اعمال شده، توزیع میدان مورد نیاز را تولید می‌کند. سیم‌پیچ متمرکز چرخنده شده در اطراف

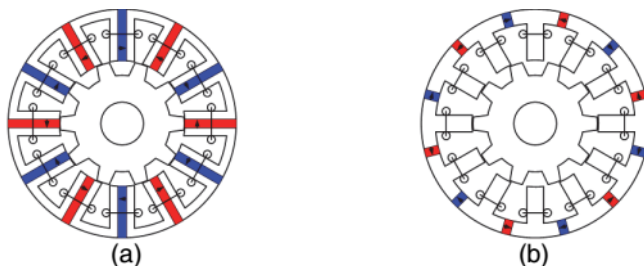
دندانه‌ی استاتور، مولفه‌های میدان فعال را برای تولید EMF circumferentially ایجاد شده استخراج می‌کند و گشتاور الکترومغناطیس زمانی که یک جریان همزمان به EMF در سیم‌پیچ استاتور تحمیل می‌شود تولید می‌شود. از لحاظ توپولوژی، ماشین‌ها تنها مرتبط با MMF مغناطیسی ابتدایی، دو عملگر مدولاسیون و سیم‌پیچ آرماتور می‌باشند و در مورد موقعیت خاص و شکلی از ۳ المان یا عنصر مهم نیستند.

(۱) تغییرات در MMF مغناطیسی اولیه

همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، اگر آرایه‌ی PM از دندانه‌ی داخلی در ماشین FSPM معمول به یوغ استاتور حرکت داده شود، یک ماشین آهنربای دائمی با مقاومت مغناطیسی متغیر عملی VRPM تولید می‌شود. همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، فرایند سوییچ کردن شامل ۳ مرحله می‌شود. مرحله‌ی اول، آرایه‌ی PM بطور منطقی در جهت عقربه‌های ساعت با گام نصف دندانه ($\pi/12$ بر حسب رادیان) چرخانده می‌شود.

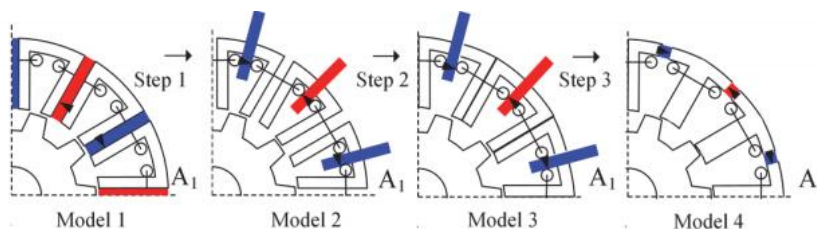
مرحله‌ی ۲، هر هسته‌ی U به دو آرایه‌ی PM تطبیقی یا همساز تقسیم می‌شود و هر دو نیمه‌ی هسته‌ی U به شکل تی با هم ادغام می‌شوند.

مرحله‌ی ۳. طول شعاعی آرایه‌ی PM تا ارتفاع یوغ کوتاه می‌شود.



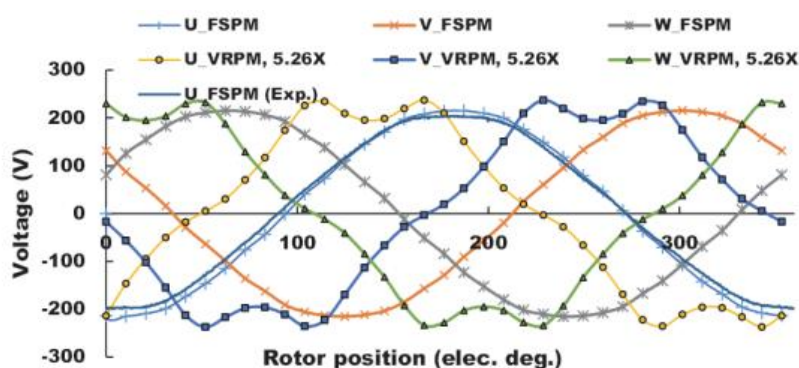
شکل ۱۶. متغیرهای ماشین FSPM به دلیل تغییر در MMF مغناطیسی اولیه (الف) ۱۰/۱۲ FSPM مرسوم ب)

VRPM با PM در یوغ



شکل ۱۷. فرایند سوئیچ کردن از 12/10 FSPM تا 12/10 VRPM با PM در یوغ

EMFs بدون بارگذاری پیش‌بینی شده‌ی D-FEA^۲ ماشین 12/10 FSPM (مدل ۱)، و ماشین VRPM (مدل ۴) در شکل ۱۸ همراه با EMF بدون بارگذاری اندازه‌گیری شده بطور تجربی در ۱۲۰۰ r/min نشان داده می‌شوند. EMFs هر فاز VRPM بالای مرتبه‌های ۵.۲ (حجم کلی مصرف شده توسط FSPM، ۵.۲۶ برابر حجم مصرفی توسط VRPM می‌باشد) برای داشتن دامنه‌های قابل مقایسه با دامنه‌های FSPM مقیاس‌گذاری می‌شوند. می‌توان مشاهده کرد که EMF هر فاز ۱۲/۱۰ FSPM بطور ایده‌آل سینوسی می‌باشد. در مقابل، مولفه‌ی هارمونیک ۵ام قابل توجه در EMF از VRPM ظاهر می‌شود. و فاز مختلف بین دو EMFs تقریباً $\pi/4$ می‌باشد.



شکل ۱۸. EMFs بارگذاری نشده‌ی مدل ۱ و مدل ۴ (۱۲۰۰ r/min)

(۲) تغییر در مدول کننده

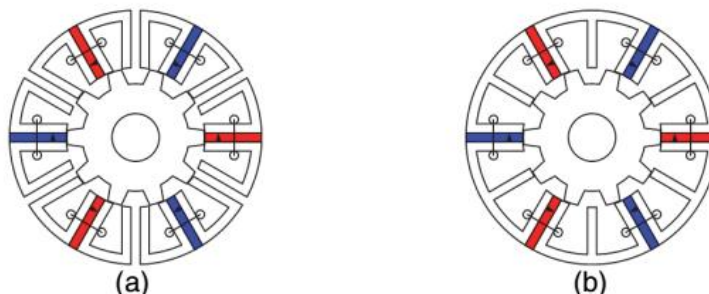
اگر عملگر مدولاسیون استاتور و روتور نسبت به منبع MMF اولیه اصلاح شوند، یک نوع از متغیرهای FSPM معمول بدست آورده می‌شوند همانطور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

(۳) تغییرات در سیم‌پیچ آرماتور

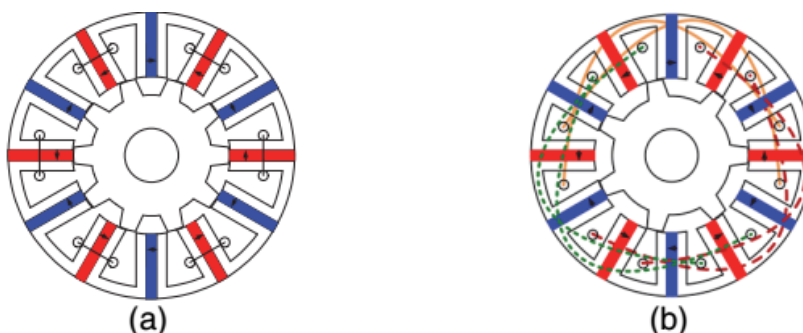
اگر فقط سیم‌پیچ آرماتور تغییر داده شود، یک شاخه‌ی متغیر بدست آورده می‌شود چنانکه در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

(۴) تغییر در وضعیت نسبی

اگر استاتور یا روتور تقسیم شود و موقعیت‌های نسبی ۳ المان تغییر داده شود، ماشین FSPM استاتور تقسیم شده و موتور روتور دوگانه‌ی بطور مکانیکی دنده‌دار شده بدست آورده می‌شود، چنانکه در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

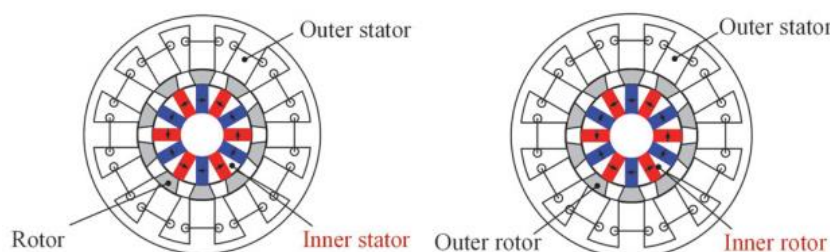


شکل ۱۹ گوناگونی‌های ماشین FSPM به دلیل تغییر در مدوله کننده الف) نوع A2 و ب) FSPM هسته‌ی E



شکل ۲۰ گوناگونی‌های ماشین FSPM به دلیل تغییر در سیم‌پیچ آرماتور الف) FSPM قطب متناوب ب) FSPM

سیم‌پیچ توزیع شده‌ی



شکل ۲۱ گوناگونی‌های ماشین FSPM به دلیل تغییر موقعیت نسبی الف) FSPM استاتور تقسیم شده‌ی ب) و تور

دوتور دوگانه بطور مکانیکی دنده‌دار

IV. نتیجه‌گیری

این مقاله، برای اولین بار یک پدیده‌ی مدولاسیون میدان airgap تعمیم یافته‌ی ماشین‌های الکتریکی را با استفاده از مقایسه بین ماشین الکتریکی و مبدل سوئیچ کننده نظریه‌پردازی می‌کند که نشان می‌دهد که عملکرد یک ماشین الکتریکی به شدت بستگی به توالی از سه بخش ابتدایی دارد که این سه بخش MMF مغناطیسی اولیه، مدول کننده و سیم‌پیچ آرماتور می‌باشد. تمام ماشین‌های معمول از جمله IM, DCM و SM مطابق با نظریه‌ی مدولاسیون میدان می‌باشند و می‌توانند بعنوان حالت‌های خاصی از ماشین‌های مدوله شده‌ی میدان کلی در نظر گرفته شوند. MMF مغناطیس اولیه و سیم‌پیچ آرماتور می‌توانند با استفاده از ویژگی انتخاب فرکانس سیم‌پیچ‌های مشخص شده با فاکتور سیم‌پیچ، فاکتور چوله و فاکتور تبدیل تجزیه و تحلیل و طراحی شوند. مدول کننده با استفاده از عملکرد مدولاسیون مشخص می‌شود که نگاشت را از تابع توزیع MMF اولیه تا تابع توزیع MMF نهایی تعریف می‌کند. بر اساس نظریه‌ی مدولاسیون میدان کلی ارائه شده، همه‌ی ماشین‌های الکتریکی با استاتور و روتور مغناطیسی ناهسانگرد می‌توانند با یک استاتور و روتور استوانه‌ای و airgap صاف معادل شوند. معادلات کلی برای توزیع میدان argap بارگذاری شده و بدون بارگذاری، اتصال شار بدون بارگذاری متصل شده با سیم‌پیچ آرماتور، EMF بدون بارگذاری، و گشتاور الکترومغناطیس بدست آورده شده‌اند. دو نوع ماشین اساسی با استفاده از ترکیب گشتاور و دو نوع مدولاسیون متمایز، یعنی مدولاسیون همزمان و غیر همزمان یافت شده و بطور دقیق مقایسه می‌شوند. مزایای نظریه‌ی مدولاسیون میدان airgap کلی توسعه یافته بصورت زیر خلاصه می‌شود:

- (۱) آن برای تمام ماشین‌های الکترومغناطیس، صرف نظر از ماشین‌های AC و DC، ماشین‌های برجسته و غیر برجسته، ماشین‌های جلوبرنده‌ی سینوسی یا مستطیلی و غیره معتبر است.
- (۲) آن نه تنها می‌تواند تجزیه و تحلیل کیفی را با بیان فیزیکی واضح انجام می‌دهد بلکه تجزیه و تحلیل کمی ماشین‌های الکتریکی را هم انجام می‌دهد.
- (۳) آن نه تنها ماشین‌های الکتریکی را تجزیه و تحلیل می‌کند بلکه ابداع توپولوژی‌های جدید ماشین را هم هدایت می‌کند. تجزیه و تحلیل‌ها و کاربردهای بیشتر نظریه‌ی مدولاسیون میدان کلی پیشنهادی در مقاله‌ای جداگانه در آینده گزارش خواهد شد.

منابع و مراجع:

[1] S. Sul, "Introduction," in Control of electric machine drive systems, 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 2011, pp. 1-35.

[2] M. E. Talaat, "Steady-state and transient synthesis of 3-phase reluctance motors (synchronous motors without field excitation)," Trans. AIEE, vol. ۷۰, DOI: 10.1109/T-AIEE.1951.5060658, no. 2, pp. 1963-1970, Jul. ۱۹۵۱.

[3] M. W. Brainard, "Synchronous machines with rotating permanent-magnet fields Part I. Characteristics and Mechanical Construction," Trans. AIEE. Part III: Power Apparatus and Syst., vol. 71, DOI: 10.1109/AIEEPAS.1952.4498525, no. 1, pp. 670-676, Jan. 1952.

[4] K. T. Chau, C. C. Chan, and C. Liu, "Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, DOI: 10.1109/TIE.2008.918403, no. 6, pp. ۲۲۴۶-۲۲۵۷, Jun. 2008.

[5] C. H. Lee, "Vernier motor and its design," IEEE Trans. Power Apparatus Syst., vol. 82, DOI: 10.1109/TPAS.1963.291362, no. 66, pp. 343-349, Jun. ۱۹۶۳.

[6] A. R. W. Broadway, L. Burbridge, "Self-cascaded machine: a low speed motor or high frequency brushless alternator," Proc. IEE, vol. 117, DOI: ۱۰.۱۰۴۹/piee.1970.0247, no. 7, pp. 1277-1290, Jul. 1970.

[7] P. Han, M. Cheng, and R. Luo, "Design and analysis of a brushless doubly-fed induction machine with dual-stator structure," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 31, DOI: 10.1109/TEC.2016.2547955, no. 3, pp. ۱۱۳۲-۱۱۴۱, Sep. 2016.

[8] A. R. W. Broadway, "Cageless induction machine," Proc. IEE, vol. 118, DOI: 10.1049/piee.1971.0290, no. 11, pp. 1593-1600, Nov. 1971.

[9] E. R. Laithwaite, J. F. Eastham, H. R. Bolton, and T. G. Fellows, "Linear

motors with transverse flux," Proc. IEE, vol. 118, DOI:

۱۰,۱۰۴۹/piee.1971.0328, no. 12, pp. 1761-1767, Dec. 1971.

[10] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop, J. Corda, and N. N.

Fulton, "Variable-speed switched reluctance motors," IEE Proc. –Electr.

Power Appl., vol. 127, DOI: 10.1049/ip-b:19800034, no. 4, pp. 253-265,

Jul. 1980.

[11] Y. Liao, F. Liang, and T. A. Lipo, "A novel permanent magnet motor with

doubly salient structure," in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, vol. 1,

DOI: 10.1109/IAS.1992.244279, pp. 308-314, Oct. 1992.

[12] M. Cheng, W. Hua, J. Zhang, and W. Zhao, "Overview of

stator-permanent magnet brushless machines," IEEE Trans. Ind.

Electron., vol. 58, DOI: 10.1109/TIE.2011.2123853, no. 11, pp.

۵۰۸۷-۵۱۰۱, Nov. 2011.

[13] A. Toba, T. A. Lipo, "Novel dual-excitation permanent magnet vernier

machine," in Conf. Record of IEEE IAS Annu. Meeting, vol. 4, DOI:

۱۰,۱۱۰۹/IAS.1999.799197, pp. 2539-2544, Oct. 1999.

[14] K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "Design, analysis and

realisation of a high-performance magnetic gear," IEE Proc. – Electr.

Power Appl., vol. 151, DOI: 10.1049/ip-epa:20040224, no. 2, pp.

۱۳۵-۱۴۳, Mar. 2004.

[15] K. Atallah, J. Rens, S. Mezani, and D. Howe, "A novel 'pseudo'

direct-drive brushless permanent magnet machine," IEEE Trans. Magn.,

vol. 44, DOI: 10.1109/TMAG.2008.2001509, no. 12, pp. 4605-4617, Dec.

۲۰۰۸.

[16] K. T. Chau, D. Zhang, J. Z. Jiang, C. Liu, and Y. Zhang, "Design of a

magnetic-gear outer-rotor permanent-magnet brushless motor for

electric vehicles," IEEE Trans. Magn., vol. 43, DOI:

۱۰,۱۱۰۹/TMAG.2007.893714, no. 6, pp. 2504-2506, Jun. 2007.

[17] Y. Fan, L. Zhang, M. Cheng, and K. T. Chau, "Sensorless

SVPWM-FADTC of a new flux-modulated permanent-magnet wheel

motor based on a wide-speed sliding mode observer," IEEE Trans. Ind.

[18] X. Sun, M. Cheng, W. Hua, and L. Xu, "Optimal design of double-layer permanent magnet dual mechanical port machine for wind power application," IEEE Trans. Magn., vol. 45, DOI: 10.1109/TMAG.

2009.2021526, no. 10, pp. 4613-4616, Sep. 2009.

[19] T. A. Lipo, "Winding distribution in an ideal machine," in Analysis of synchronous machine, 2nd ed., CRC Press, 2012, pp. 1-76.

[20] D. A. Staton, W. L. Soong, R. P. Deodhar, and T. J. E. Miller, "Unified theory of torque production in ac, dc and reluctance motors," in Conf. Rec.

IEEE IAS Annu. Meeting, vol. 1, DOI: 10.1109/IAS.1994.345485, pp.

149-156, Oct. 1994.

[21] K. L. Hansen, "The rotating magnetic field theory of A-C motors,"

Journal of AIEE, vol. 44, DOI: 10.1109/JAIEE.1925.6536172, no. 2, pp.

170-178, Feb. 1925.

[22] H. R. West, "The cross-field theory of alternating-current machines,"

Trans. AIEE, vol. XLV, DOI: 10.1109/T-AIEE.1926.5061238, pp.

466-474, Jan. 1926.

[23] R. E. Doherty, C. A. Nickle, "Synchronous machines I – an extension of Blondel's two-reaction theory," Trans. AIEE, vol. XLV, DOI:

10.1109/T-AIEE.1926.5061289, pp. 912-947, Jan. 1926.

[24] R. K. Park, "Two-reaction theory of synchronous machine generalized method of analysis – Part I," Trans. AIEE, vol. 48, DOI:

10.1109/T-AIEE.1929.5055275, no. 3, pp. 716-727, Mar. 1929.

[25] B. Adkins, R. G. Harley, The General Theory of Alternating Current Machines. London: Chapman and Hall Ltd., 1975.

[26] J. Fienne, "New approach to general theory of electrical machines using magnetic equivalent circuit," Proc. IEE, vol. 120, DOI:

10.1049/piee.1973.0018, no. 1, pp. 94-104, Jan. 1973.

[27] C. E. Linkous, "Effect of skew on induction motor magnetic fields,"

- Trans. AIEE. Part III: Power Apparatus and Syst., vol. 74, DOI: 10.1109/AIEEPAS.1955.4499143, no. 3, pp. 760-765, Jan. 1955.
- [28] T. Ishikawa, G. R. Slemon, "A method of reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing," IEEE Trans. Magn., vol. 29, DOI: 10.1109/20.250808, no. 2, pp. 2028-2031, Mar. 1993.
- [29] R. P. Deodhar, D. A. Staton, and T. J. E. Miller, "Modeling of skew using the flux-mmF diagram," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, DOI: 10.1109/28.556637, no. 6, pp. 1339-1347, Nov./Dec. 1996.
- [30] B. Heller, V. Hamata, Harmonic Field Effects in Induction Machines. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1977.

Air gap field modulation theory for electric machines (space between the stator and rotor in a dynamo)

Hossein Hajian

Professor of Electrical Engineering, Bostan Abad Islamic Azad University

hosseinhajian12@gmail.com

Reza Eslami

Professor of Electrical Engineering, Tabriz University of Technology

eslami@sut.ac.ir

Abstract—

In this paper, a general theory of field modulation for electric machines is proposed by introducing the magnetic motive force modulation operator to describe the short-circuited coil, the variable magnetic resistance and the magnetic flux leading to the primary magnetic motive force created by the field coil function increased by the field current along the peripheral air gap. The stator (fixed part of the machine) or the rotor is magnetically anisotropic, acting as a modulator to produce a harmonic spectrum of the field, and the coil inductor plays the role of a special filter to extract the harmonic field for the contribution of the corresponding flux continuity and for the induction of the magnetic motive force. The developed theory of field modulation not only unifies the analysis of the principles of various electrical machines, including ordinary DC machines, induction machines, and synchronous machines, which are special cases of general field modulation machines, thus eliminating the theory of machine fragmentation, but also provides a powerful guide for the invention of new machine topologies.

Keywords: air gap, analytical model, electrical machine, filter, magnetic field, modulation, power conversion, spectral analysis, and general theory