

Air Gap Field Modulation for Electric Machines

Hossein Hajian

Electrical Engineering Instructor, Islamic Azad
University, Bostanabad Branch, Tabriz, Iran

Navid Taghizadegan*

Professor, Department of Electrical Engineering,
Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz,
Iran

Abstract

In this paper, a general field-modulation theory for electrical machines is proposed by introducing a magnetic motive force (MMF) modulation operator. This operator is used to describe short-circuited windings, variable magnetic reluctance, and magnetic-flux guidance acting on the primary magnetic motive force generated by the field-winding function multiplied by the field current along the circumferential air gap. A magnetically anisotropic stator (the stationary part of the machine) or rotor acts as a modulator to generate a spectrum of field harmonics. The armature winding serves as a specific filter for extracting harmonic fields to contribute to the continuity of the corresponding flux linkage and to induce electromotive force (EMF). The developed field-modulation theory not only unifies the analysis principles of various electrical machines—including conventional DC machines, induction machines, and synchronous machines—which can be regarded as special cases of general field-modulated machines, thereby eliminating the need for fragmented machine theories, but also provides a powerful guideline for inventing new machine topologies.

Keywords: analytical modeling, electrical machine, filter, magnetic field, modulation, power conversion, spectral analysis, general theory

Received: 19/August/2026

Accepted: 23/August/2026

eISSN: 3060-6144

ISSN: 2980-8936

* Corresponding Author: hosseinhajian12@gmail.com

مدلاسیون میدان airgap (فضایی بین استاتور و روتور در یک دینام) برای ماشین‌های الکتریکی

حسین حاجیان

مربی برق دانشگاه آزاد بستان‌آباد، تبریز، ایران

نوید تقی‌زادگان*

استاد گروه برق دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده

در این مقاله، یک تئوری کلی مدولاسیون میدان برای ماشین‌های الکتریکی از طریق معرفی اپراتور مدولاسیون 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 به‌طور مغناطیسی ناهمسانگرد، مانند تعدیل‌کننده 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 توسعه‌یافته‌ی مدولاسیون میدان نه تنها تجزیه و تحلیل اصول ماشین‌های الکتریکی مختلف از جمله ماشین DC معمولی، ماشین القائی، ماشین سنکرون (همزمان) که حالت خاصی از ماشین‌های عمومی مدوله‌ی میدان می‌باشند و حذف‌کننده‌ی تئوری قطعه‌قطعه شدن ماشین هستند، را یکپارچه می‌سازد بلکه هر کدام از آن‌ها راهنمای قدرتمند برای اختراع توپولوژی ماشین‌های جدید می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: مدل تجزیه و تحلیلی، ماشین الکتریکی، فیلتر، میدان مغناطیسی، مدولاسیون، تبدیل توان، تجزیه و تحلیل تیفی 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، جفت‌شدگی میدان مغناطیسی را اتخاذ می‌کنند.

از آنجا که ژاکوبی، اولین ماشین جریان مستقیم را در ۱۸۳۴ اختراع کرد و فراری و تسلا اولین ماشین القایی را در اواخر دهه‌ی ۱۸۸۰ اختراع کردند، ماشین‌های الکترومغناطیس، یک منبع اصلی توان مکانیکی / الکتریکی با محدوده‌ی توان از چند نانوات تا هزاران ها مگاوات برای قرن گذشته شده‌اند. به علاوه 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 سوئیچ‌کننده (SRM)، ماشین PM-استاتور با ساختار برجسته‌ی دو گانه، ماشین ورنیر پارامغناطیس (PMV)، ماشین به‌طور مغناطیسی دنده‌دار و دنده مغناطیسی (MGM)، ماشین دو پورت مکانیکی (DMP)، برای رسیدن به عملکردهای مختلف ظهور یافته‌اند.

هم‌اکنون، تئوری‌های تحلیلی متفاوتی برای تجزیه و تحلیل 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 شناخته‌شده 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 شده، تجزیه و تحلیل و طراحی آسان ماشین‌های معمولی مانند DCM، IM، SM و ... را به ارمغان می‌آورند، اما در تجزیه و تحلیل مؤثر یک بخش بزرگی از ماشین‌های نوظهور با ویژگی‌های چند هارمونی و چند پورته‌ی مانند BDFIM، BDFRM و ماشین‌های PM استاتور و ... از خود ضعف نشان می‌دهند. برای مثال تئوری کلی Adkins بر اساس مدل ایده‌آل 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 می‌باشد، اما نمی‌تواند مکانیسم تبدیل انرژی را در عرض airgap روشن سازد.

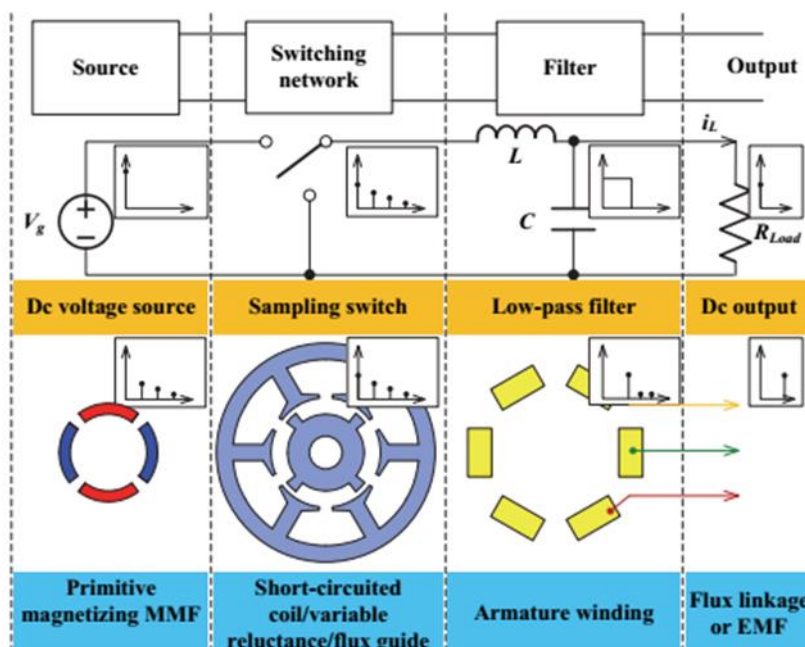
با حمله‌ی بی‌سابقه‌ی ساختارهای الکتریکی جدید برای برق‌رسانی به جهان در طول دهه‌های گذشته، تئوری‌ها و روش‌های تحلیل مکانیسم عملیات، محاسبه‌ی عملکرد و اصل طراحی و ... در حال تبدیل شدن بیشتر و بیشتر ماشین خاص و قطعه‌قطعه شده می‌باشند. بنابراین، برای ایجاد توضیح نظری و سیستماتیک و راهنمایی اختراع، تحلیل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

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 سیم‌پیچ، ارب‌سازی و تقسیم‌بندی را معرفی می‌کند. 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. به علاوه، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در ابداع توپولوژی جدید و همچنین ارزیابی امکان‌پذیری مربوطه به کار گرفته شود.

۲- نظریه‌ی مدولاسیون میدان

یک ماشین معمولی، معمولاً یک airgap دارد، که یک لایه‌ی نازکی از هوا و ساندیج 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 زیادی 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 نیروی محرکه‌ی الکتریکی از طریق برش خطوط مغناطیسی بر روی استاتور یا روتور نصب شده‌اند.

به‌عنوان یک تبدیل‌کننده‌ی میدان الکترومغناطیس، ماشین الکتریکی شباهت قابل توجهی با مبدل سوئیچ‌کننده دارد؛ همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. طیف‌های مربوطه، همچنین برای نشان دادن شباهت محدوددهی فرکانسی داده شده‌اند. بر اساس این مقایسه، یک ماشین الکتریکی را می‌توان به‌صورت توالی متشکل از سه بخش ابتدایی در نظر گرفت. این سه بخش عبارتند از: مغناطیس‌سازی اولیه‌ی نیروی محرکه‌ی مغناطیسی (MMF) (منبع)، هدایت شار/مقاومت مغناطیسی قابل تغییر/سیم‌پیچ اتصال کوتاه (مدول‌کننده) و سیم‌پیچ آرمیچری یا میله‌ی فلزی (فیلتر). 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 مؤلفه‌های هارمونیک MMF برای اینکه آن‌ها به‌عنوان مدول‌کننده اطلاق می‌شوند، مدوله می‌کند. تمام مؤلفه‌های MMF، ترکیبات میدان مغناطیسی مربوطه در airgap را تولید می‌کنند. سیم‌پیچ آرمیچری، نقش یک فیلتر فضایی را با انتخاب هارمونیک‌های مؤثر 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. مؤلفه‌ی MMF که می‌تواند هارمونیک‌های مؤثر میدان airgap را تولید کند، به‌عنوان مؤلفه‌ی MMF مؤثر تلقی می‌شود.



شکل ۱. مقایسه‌ی بین ماشین الکتریکی و مبدل سوئیچ‌کننده

برای ساده‌سازی مدل ریاضی، برخی از مفروضات پایه‌ای باید در نظر گرفته شوند، از جمله:

- PM ها به عنوان سیم پیچ‌های متمرکز تک فاز عمل می کنند که در اطراف یک ماده ای با نفوذپذیری مشابه با نفوذپذیری آهنربا پیچیده شده اند.
- هسته ی آهنی، نفوذپذیری مغناطیسی بی نهایت دارد.
- هادی ها، در هر شیار در نقطه ی میانی شیار باز متمرکز می شوند.
- خطوط شار تولید شده توسط مغناطیس شدن MMF در airgap، عمود بر پیرامون می باشند.
- نشت شار و طول معین محوری صرف نظر می شوند.
- کاهش MMF در آهن ماشین ها به دلیل اشباعیت، به عنوان یک نزول ثابت در airgap MMF در نظر گرفته می شود.

۲-۱- تابع سیم پیچ

طرح سیم پیچ، یک تأثیر قابل توجهی بر MMF تأسیس شده و EMF القایی دارد و می تواند به طور کامل با استفاده از تابع سیم پیچ (J امین فاز) $-W_j(\theta, \varphi)$ به دست آورده شده از توزیع دقیق سیم پیچ در طول یک airgap صاف معادل توصیف شود:

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

در این فرمول، $\tau^j(\theta, \varphi)$ تابع تبدیل J امین فاز می باشد. θ زاویه ی مکانیکی در امتداد محیط در چهارچوب مرجع ثابت می باشد. φ موقعیت زاویه ای روتور مکانیکی با در نظر گرفتن استاتور ثابت است و g ، طول airgap می باشد. تابع سیم پیچ دو برابر می باشد: برای تولید MMF اولیه با ضرب تابع سیم پیچ با جریان و برای تولید اتصال شار با انتگرال گیری تابع سیم پیچ ضرب شده با چگالی شار airgap. مهم ترین ویژگی های تابع سیم پیچ، تعداد زوج قطب اصلی p (PPPN) و فاکتور سیم پیچ هر هارمونیک k_{wv} می باشند. PPPN یک سیم پیچ داده شده به عنوان تعداد زوج قطب مؤلفه ی هارمونیک تابع سیم پیچ تعریف می شود که بزرگترین دامنه ی نسبی را دارد. با این تعریف، زوج قطب p می تواند بزرگترین مؤلفه ی MFF را تولید کند و می تواند بزرگترین مؤلفه ی هارمونیک میدان زوج قطب p را برای تولید اتصال شار و EMF بیشتر استخراج کند.

بیان تابع سیم پیچ در شکلی از سری های فوریه، یک شاخص عملکردی با استفاده ی بسیار آسان را تولید می کند که فاکتور پیچشی k_{wv} می باشد. به علاوه توزیع و گام سیم پیچ که با فاکتور سیم پیچ در نظر گرفته شده اند، ترکیب بین فازهای مختلف، همچنین تأثیرات MMF و EMF خط به خط که با ترکیب فاکتور k_{wv} مشخص می شوند. به علاوه قطعه شدن محوری یا اریب سازی (اریب سازی ناپیوسته)، قرارگیری میدان airgap در جهت محوری و تشکیل یک اثر توزیعی را تغییر می دهد که می تواند توسط فاکتور چولگی k_{sv} مشخص شود. در نظر گرفتن ۳ فاکتور منجر به بیان مختصری از MMF می شود، به صورت:

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

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

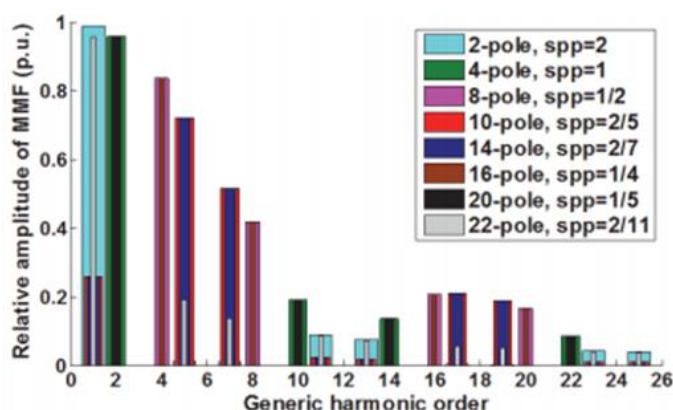
در این فرمول m تعداد فاز و δ زاویه‌ی چولگی است. F_v v امین دامنه‌ی هارمونیک MMF و φ_v زاویه‌ی فاز متناظر می‌باشد. رابطه‌ی بین F_v و (یا اتصال شار خط به خط/EMF) مرتبه‌ی هارمونیک کلی v است:

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

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 است.

۲-۲-۲- 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 $f(\theta)$ ، به‌طور پیوسته مشتق‌پذیر و قابل انتگرال است و $f(\theta) = f(\theta + 2\pi)$.



شکل ۲. طیف‌های سیم‌پیچ‌های ۳ فاز ۱۲ شیار متغیر

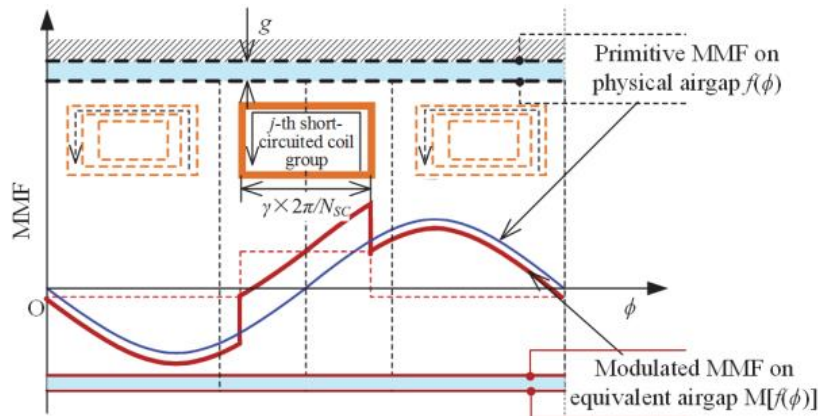
۲-۲-۱- سیم‌پیچ‌های اتصال کوتاه

در IMهای قفس سنجابی (SCIMs) و BDFIMs، روتورها با تعدادی از سیم‌پیچ‌های اتصال کوتاه قرار گرفته به‌طور معادل برای اصلاح توزیع MMF اولیه متغیر با زمان مجهز می‌شوند. سیم‌پیچ اتصال کوتاه یک دستگاه غیرفعال می‌باشد که بر فرکانس لغزشی بین توزیع اولیه MMF مغناطیسی (یا توزیع چگالی شار اولیه) و تعدیل‌کننده برای القای جریان در سیم‌پیچ تکیه دارد.

در مثال داده شده، جریان در λ امین سیم‌پیچ اتصال کوتاه، یک MMF مغناطیسی مازاد را ایجاد می‌کند؛ همان‌طور که توسط خط‌چین در شکل ۳ مشخص شده است. در نتیجه‌ی 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 سیم‌پیچ اتصال کوتاه است که حالت سوئیچ کردن (تعویض) مدوله‌کننده (تعدیل‌کننده) هر چرخ را منعکس می‌کند. γ فاکتور ظرفیت سیم‌پیچ خاص می‌باشد و i^j جریان در j امین سیم‌پیچ است. W^j تابع پیچشی j امین سیم‌پیچ بوده و ϕ موقعیت زاویه‌ای در چارچوب مرجع مدوله‌کننده‌ی ثابت می‌باشد و $\phi = \theta - \omega_r t$



شکل ۳. اصل مدولاسیون سیم‌پیچ اتصال کوتاه

یک نوع BDFIM معمولی با میدان زوج-قطب-pf پیچشی، آرمیچر جفت-قطب-pa پیچشی و گروه‌های سیم‌پیچ اتصال کوتاه تک‌لایه N_{SC} با طول سیم‌پیچ مشابه $\gamma \times 2\pi / N_{SC}$ به‌عنوان یک مثال داده شده است. هنگامی که آن با استفاده از یک واحد زوج-قطب-pf MMF مغناطیسی اولیه‌ی کسینوسی برانگیخته می‌شود، توزیع MMF نهایی شامل هارمونیک‌هایی می‌شود که زوج قطب آن‌ها pf و $\text{INSC} \pm \text{pf}$ می‌باشد؛ جایی که I یک عدد صحیح مثبت است. دامنه‌های نسبی هر هارمونیک می‌تواند به‌طور تحلیلی توسط ضرایبی که به میزان زیادی با ترکیب زوج قطب و طول سیم‌پیچ در ارتباط می‌شوند تعیین و مشخص شوند که می‌توانند برای بررسی تأثیر ترکیب زوج قطب و طول یا محدوده‌ی سیم‌پیچ برای عملکردی مانند توانایی جفت‌شدگی عرضی، چگالی گشتاور و ... استفاده شوند. این فرایند مدولاسیون و جابه‌جایی طیفی در شکل ۴ الف و ب به ترتیب نشان داده شده است.

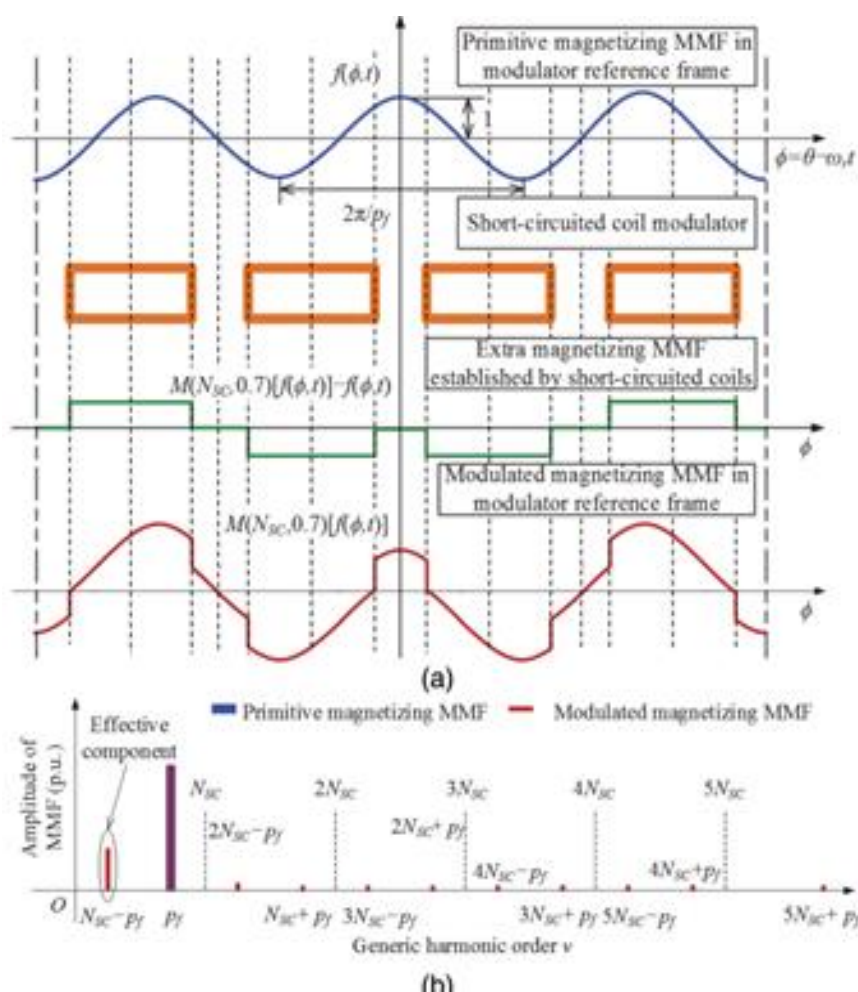
۲-۲-۲- مقاومت مغناطیسی متغیر

قطب‌های برجسته‌ی روتور و استاتور، همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، متغیر متناوبی از مقاومت مغناطیسی را برای مدولاسیون در یک توزیع MMF اولیه‌ی اختیاری (حتی از نوع یکنواخت) استفاده می‌کنند و می‌توانند توسط عملگر مدولاسیون استاتور $[\cdot] M(N_{ST}, \varepsilon_{ST})$ و عملگر مدولاسیون روتور $[\cdot] M(N_{RT}, \varepsilon_{RT})$ ، مشخص شوند که $[\cdot] M(N_{ST}, \varepsilon_{ST})$ و $[\cdot] M(N_{RT}, \varepsilon_{RT})$ به‌صورت نگاشت‌هایی از یک تابع اختیاری با یک دوره‌ی 2π برای تابع تکه‌ای در $[0, 2\pi]$ تعریف می‌شوند.

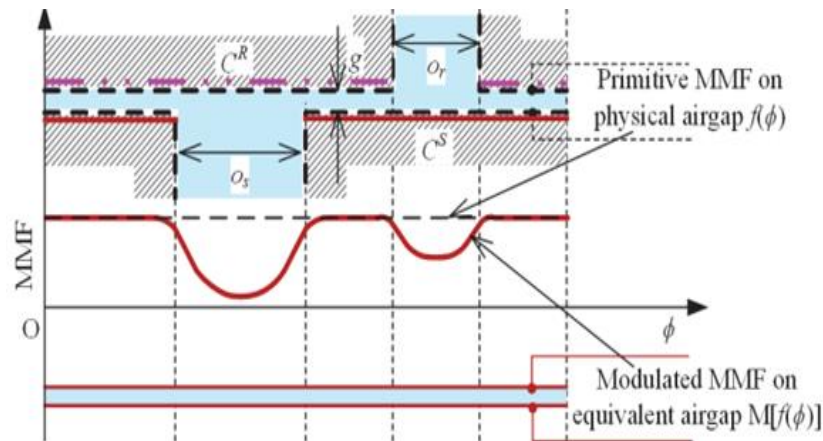
$$M(N_{ST}, \varepsilon_{ST})[f(\theta)] = \begin{cases} f(\phi), & \phi \in C^s, \\ \kappa(o_s/t_{ds})f(\phi), & \phi \in [0, 2\pi] - C^s. \end{cases} \quad (5)$$

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

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. زیروند s و r به ترتیب استاتور و روتور را نشان می‌دهند. 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 شرایط بیشتر، روتور/استاتور شیار ریز ($o/td < 0.3$) می‌توانند به صورت استوانه‌ای عمل کنند؛ به جز در حالتی که تأثیرات شیار کوچک بر چنین مطالعه‌ی فقدان‌های هارمونیک در SCIM، گشتاور دنده‌ایی در PMSM و ... تمرکز دارد. حالت خاص جایی است که هیچ شیار نیست و یا می‌توان از تأثیر شیار به عنوان مدولاسیون واحد صرف نظر کرد؛ بدان معنی که هیچ تغییری در توزیع MMF ایجاد نمی‌شود و مدول کننده‌ی متناظر، واحد می‌باشد.

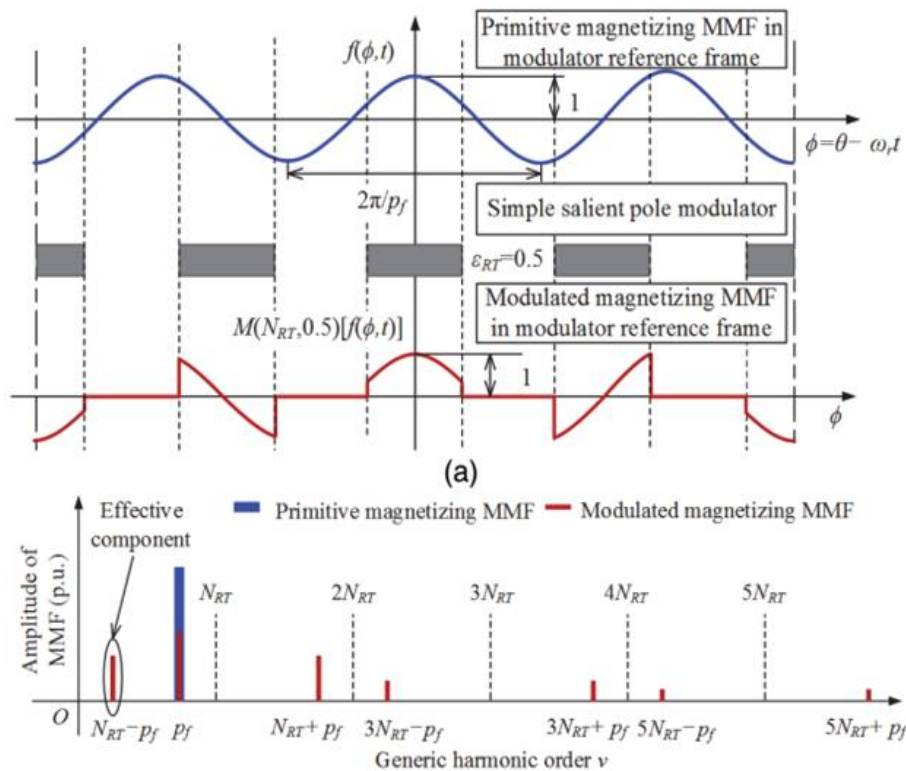


شکل ۴. مدولاسیون مدول کننده‌ی اتصال کوتاه در یک BDFIM ($p_f = 3$, $p_a = 1$, $N_{sc} = 4$) (a) فرایند مدولاسیون (b) جابه‌جایی طیف



شکل ۵. اصل مدولاسیون قطب‌های برجسته و یا نمایان ساده

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



شکل ۶. مدولاسیون مدوله‌کننده‌ی روتور قطب-برجسته‌ی-ساده در BDFRM معمولی ($p_f = 3$, $p_a = 1$, $N_{RT} = 4$) (الف) فرایند مدولاسیون (ب) جابه‌جایی طیف

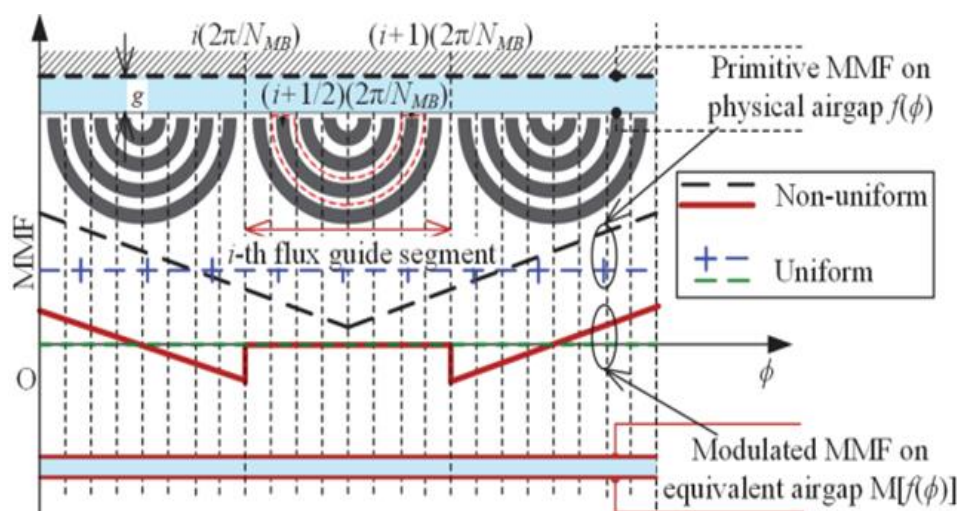
هدایت شار

هدایت شار، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، MMF اولیه‌ی غیریکنواخت را (MMF اولیه، یک مقدار ثابتی از dc نمی‌باشد) با تعریف مسیر خطوط شار مدوله می‌کند. راهنماهای شار معمولاً با یکدیگر به شکل قطعه

راهنمای شار قرار داده می‌شوند. قطعات، همچنین، به‌عنوان قطعات مانع شار نامیده می‌شوند. هر قطعه راهنمای شار شامل لایه‌های چند لایه‌ای است که به‌طور مغناطیسی با مواد غیرمغناطیسی 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 $(i+1/2)2\pi/N_{MB}$ 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 به‌طور معادل سهیم می‌شود. راهنما یا هدایت شار می‌تواند با استفاده از یک عملگر $M(N_{MB})$ به‌صورت زیر مشخص شود.

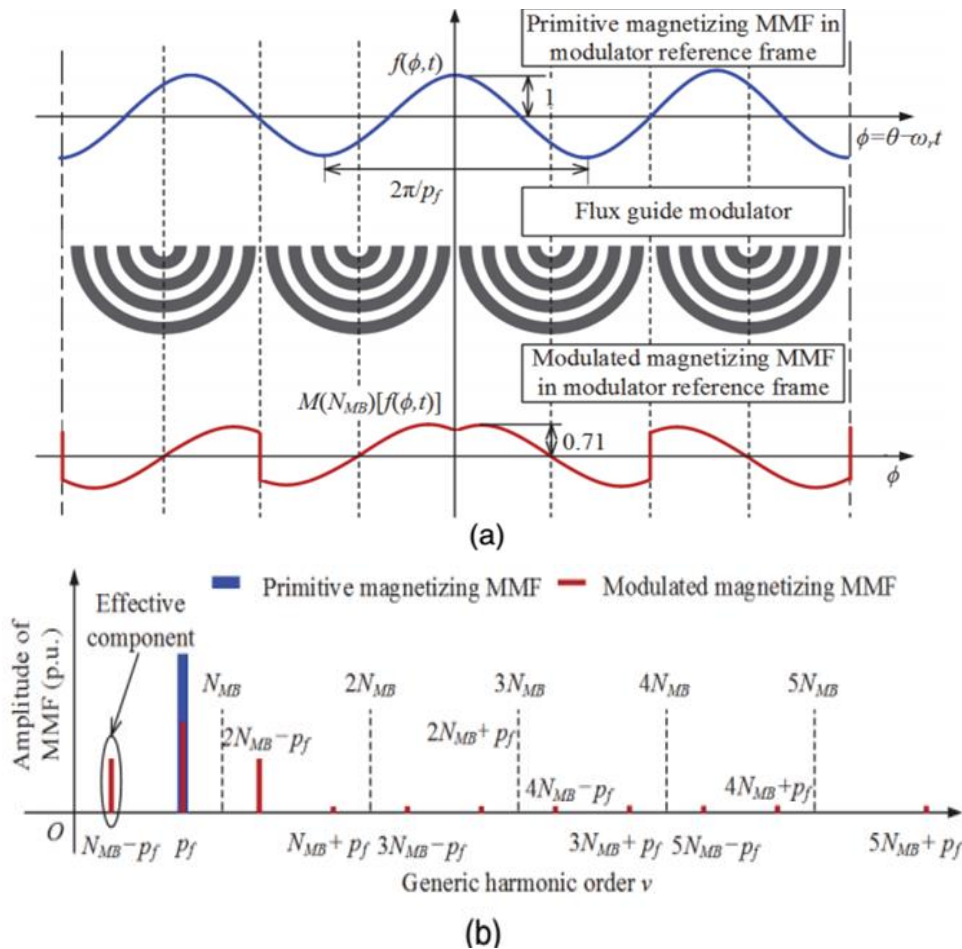
$$M(N_{MB})[f(\phi)] = \frac{1}{2} \left[f(\phi) - f\left((2i+1)\frac{2\pi}{N_{MB}} - \phi\right) \right], \quad \phi \in \left(\frac{2\pi i}{N_{MB}}, \frac{2\pi(i+1)}{N_{MB}} \right) \quad (7)$$

در این فرمول NMB تعداد قطعه‌ی راهنمای شار می‌باشد که همچنین تعداد حالت سوئیچ‌کننده‌ی (تعویض‌کننده) مدوله‌کننده را در هر چرخه‌شان می‌دهد. هدایت ایده‌آل شار با ساختار ناهمسانگرد (ALA) لایه‌لایه شده به‌طور محوری مشخص می‌شود. معمولاً برای سهولت تولید، ساختار چند سدی اتخاذ می‌شود.



شکل ۷. اصل مدولاسیون هدایت شار

مدوله‌کننده‌ی هدایت شار، معمولاً در SynRM، BDFRM، ماشین FSPM و ... استفاده می‌شود. مشابه این حالات، با استفاده از مدوله‌کننده‌ی سیم‌پیچ اتصال کوتاه و مدوله‌کننده‌ی قطب برجسته‌ی ساده است. مدولاسیون همچنین توسط هدایت شار، ۳ نوع هارمونیک را ایجاد می‌کند که زوج قطب آن pf و $INMB \pm pf$ می‌باشد. فرایند مدولاسیون دقیق مدوله‌کننده‌ی هدایت شار در یک BDFRM معمولی با یک روتور چند سدی، در شکل ۸ (الف) نشان داده شده 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. $(p_f=3, p_a=1, N_{MB}=4)$.
(الف) فرایند مدولاسیون (ب) جابه‌جایی طیف.

ویژگی عملگر مدولاسیون

تمام مدولاسیون‌ها در چارچوب مرجع مدوله‌کننده‌ی ثابت دستکاری می‌شوند؛ جایی که مدول‌کننده به صورت 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 ایستار را در سیستم مختصات چرخشی سرعت روتور مدوله می‌کند.

عملگر مدولاسیون مانند یک عملگر ریاضی دارای ویژگی‌هایی می‌باشد، از جمله:

الف) خطی بودن

عملگر مدولاسیون خطی است که به صورت 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 می‌سازند، بدین صورت:

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

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 سیم‌پیچ اتصال کوتاه یک استثنا است.

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

۲-۳- فاکتور مدولاسیون

شایان ذکر است که هر چند مدولاسیون میدان airgap، خطوط طیفی ناحیه‌ی فرکانس MMF اولیه‌ی دوره‌ای را جابه‌جا می‌کنند، اما محتوای توان کلی تغییر داده نخواهد شد؛ صرف‌نظر از اینکه چه نوع مدولاسیونی استفاده می‌شود. یک فاکتور مدولاسیون میدان می‌تواند به‌عنوان نسبت توان اجزای MMF مؤثر توزیع MMF نهایی به توان اجزای MMF مؤثر MMF ابتدایی برای توصیف کارآمدی 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 فرمول، E مرتبه‌هایی از اجزای مؤثر MMF مدوله شده است. بر اساس معادله‌ی ۱۱، فاکتور مدولاسیون میدان سیم‌پیچ اتصال کوتاه تک‌لایه در شکل ۴، قطب روتور برجسته‌ی ساده در شکل ۶ و روتور چند سدی در شکل ۸ به ترتیب 0.27، 0.318 و 0.318 می‌باشند.

۲-۴- مدل Airgap معادل

با معرفی عملگر مدولاسیون، airgap فیزیکی با سیم‌پیچ‌ها، شیارها یا راهنماهای شارها به یک airgap یکنواخت و معادل با MMF مدوله‌شده‌ی $M[F_f(\theta, t)]$ 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.

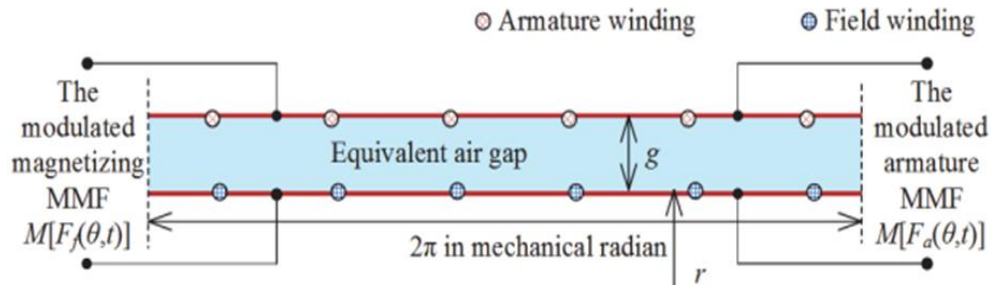
$$F_{f(a)}(\theta, t) = \sum_{j=1}^m \left[W_{f(a)}^j(\theta, t) \times i_{f(a)}^j(t) \right] \quad (13)$$

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

توزیع چگالی شار airgap می‌تواند به‌صورت 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 خلأ می‌باشد.



شکل ۹. مدل airgap معادل

توزیع چگالی شار airgap بدون بار گذاری به صورت زیر می باشد:

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

اتصال شار بدون بار گذاری هر فاز متصل شده توسط سیم پیچ آرمیچر به صورت زیر به دست می آید:

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

در این فرمول، r_g شعاع airgap می باشد و L_{stk} طول بسته می باشد.

EMF بدون بار گذاری در هر فاز در سیم پیچ آرمیچر می تواند با استفاده از دیفرانسیل اتصال شار به دست آورده

شود:

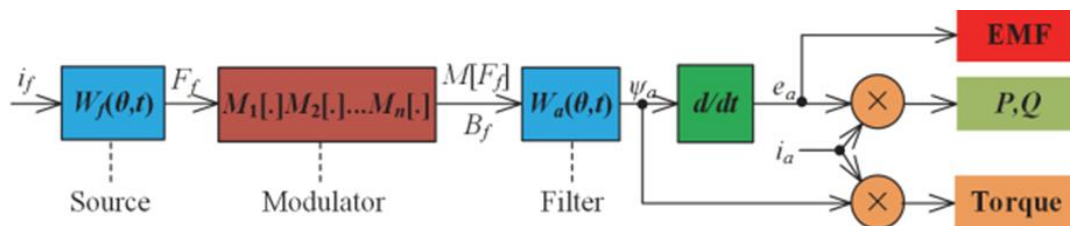
$$e_a^j(t) = -\frac{d}{dt} \left[\mu_0 \frac{r_g L_{stk}}{g} \int M[F_f(\theta, t)] \times W_a^j(\theta, t) d\theta \right] \quad (17)$$

و گشتاور الکترومغناطیس هست:

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

۲-۵- جریان سیگنال

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



از نقطه نظر تبدیل انرژی الکترومکانیکی، حداقل یکی از سه عنصر حرکت دارد و در کل (۲-۳) ترکیب قابل دسترس برای یک ماشین الکتریکی استاندارد با یک سیم پیچ تک میدانک، یک مدوله کننده ی تک و سیم پیچ آرمیچر تک وجود خواهد داشت. به نظر می رسد که مدول کننده می تواند هم با MMF (آرمیچر) مغناطیسی ابتدایی که به عنوان مدولاسیون (هم زمان) استاتیک (ایستا) مشخص می شود، هماهنگ شود و هم نسبت به MFF (آرمیچر) مغناطیسی ابتدایی که به عنوان مدولاسیون (هم زمان) دینامیک (پویا) مشخص می شود، حرکت کند.

در حقیقت، مدولاسیون استاتیک یا ایستا می‌تواند به‌عنوان حالت خاصی از مدولاسیون دینامیک در نظر گرفته شود؛ جایی که سرعت نسبی بین MMF مغناطیسی ابتدایی و مدوله‌کننده صفر می‌باشد. رفتار هر دو مدولاسیون می‌تواند در ماشین‌های الکتریکی نوظهور و مرسوم مشاهده شود. مقایسه‌ی بین مدولاسیون ایستا و پویا در جدول ۱ آورده شده است.

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

مدولاسیون استاتیک (ایستا) (هم‌زمان)	مدولاسیون دینامیک (پویا) (غیرهم‌زمان)	نوع مدولاسیون
آسایش	حرکت یا جنبش	سرعت نسبی بین MMF مغناطیسی اولیه و مدوله‌کننده
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

نتیجه‌گیری

این مقاله، برای اولین بار یک پدیده‌ی مدولاسیون میدان **airgap** تعمیم‌یافته‌ی ماشین‌های الکتریکی را با استفاده از مقایسه‌ی بین ماشین‌های الکتریکی و مبدل سوئیچ‌کننده نظریه‌پردازی می‌کند و نشان می‌دهد که عملکرد یک ماشین الکتریکی به‌شدت به توالی سه بخش ابتدایی بستگی دارد. این سه بخش عبارتند از: MMF مغناطیسی اولیه، مدول‌کننده و سیم‌پیچ آرماتور.

تمام ماشین‌های معمول از جمله IM, DCM و SM مطابق با نظریه‌ی مدولاسیون میدان می‌باشند و می‌توانند به‌عنوان حالت‌های خاصی از ماشین‌های مدوله‌شده‌ی 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. مدول‌کننده 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 ناهمسانگرد 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 به دست آورده شده‌اند.

دو نوع ماشین اساسی با استفاده از ترکیب گشتاور و دو نوع مدولاسیون متمایز، یعنی مدولاسیون همزمان و غیرهمزمان یافت شده و به‌طور دقیق مقایسه می‌شوند. مزایای نظریه‌ی مدولاسیون میدان **airgap** کلی توسعه‌یافته به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱. برای تمام ماشین‌های الکترومغناطیس، صرف‌نظر از ماشین‌های AC و DC، ماشین‌های برجسته و غیربرجسته، ماشین‌های جلوبرنده‌ی سینوسی یا مستطیلی و ... معتبر است.
۲. نه تنها می‌تواند تجزیه و تحلیل کیفی را با بیان فیزیکی واضح انجام دهد بلکه تجزیه و تحلیل کمی ماشین‌های الکتریکی را هم انجام می‌دهد.

۳. 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

- Atallah, K., Calverley, S. D., & Howe, D. (2004). Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear. *IEE Proceedings—Electric Power Applications*, 151(2), 135–143.
- Brainard, M. W. (1952). Synchronous machines with rotating permanent-magnet fields: Part I. Characteristics and mechanical construction. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III: Power Apparatus and Systems*, 71(1), 670–676.
- Broadway, A. R. W. (1971). Cageless induction machine. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 118(11), 1593–1600.
- Broadway, A. R. W., & Burbridge, L. (1970). Self-cascaded machine: A low-speed motor or high-frequency brushless alternator. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 117(7), 1277–1290.
- Chau, K. T., Chan, C. C., & Liu, C. (2008). Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2246–2257.
- Cheng, M., Hua, W., Zhang, J., & Zhao, W. (2011). Overview of stator-permanent magnet brushless machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(11), 5087–5101.
- Han, P., Cheng, M., & Luo, R. (2016). Design and analysis of a brushless doubly-fed induction machine with dual-stator structure. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(3), 1132–1141.
- Laithwaite, E. R., Eastham, J. F., Bolton, H. R., & Fellows, T. G. (1971). Linear motors with transverse flux. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 118(12), 1761–1767.
- Lawrenson, P. J., Stephenson, J. M., Blenkinsop, P. T., Corda, J., & Fulton, N. N. (1980). Variable-speed switched reluctance motors. *IEE Proceedings B: Electric Power Applications*, 127(4), 253–265.
- Lee, C. H. (1963). Vernier motor and its design. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 82(66), 343–349.
- Liao, Y., Liang, F., & Lipo, T. A. (1992). A novel permanent magnet motor with doubly salient structure. In *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (Vol. 1, pp. 308–314). IEEE.
- Sul, S.-K. (2011). Introduction. In *Control of electric machine drive systems* (pp. 1–35). John Wiley & Sons.
- Talaat, M. E. (1951). Steady-state and transient synthesis of 3-phase reluctance motors (synchronous motors without field excitation). *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 70(2), 1963–1970.
- Toba, A., & Lipo, T. A. (1999). Novel dual-excitation permanent magnet Vernier machine. In *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference: 34th IAS Annual Meeting* (Vol. 4, pp. 2539–2544). IEEE.

استناد به این مقاله: حاجیان، حسین، و تقی‌زادگان، نوید. (۱۴۰۵). مدولاسیون میدان airgap (فضایی بین استاتور و روتور در یک دینام) برای ماشین‌های الکتریکی. فصلنامه پژوهش‌های نوین در شهر هوشمند، ۴(۴)، ۲۰–۶.



New Researches in The Smart City is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.