

بهبود عملکرد راه اندازی موتورهای LSPMS به کمک کاهش هارمونیک‌های فضایی

حمیدرضا بهبهانی فرد^۱، علیرضا صدوقی^{۲*}، همایون مشگین کلک^۳

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر ۳- استادیار، دانشگاه تفرش

(دریافت: ۹۵/۰۱/۲۵، پذیرش: ۹۵/۰۸/۱۸)

چکیده: موتورهای سنکرون آهنربای دائم با راه انداز القایی به دلیل داشتن بازده بالاتر، ضریب قدرت بهتر، چگالی گشتاور بزرگتر و در نتیجه وزن و حجم کمتر نسبت به موتورهای القایی، جایگزین مناسبی برای این موتورها محسوب می‌شوند. علاوه بر آن عدم نیاز به درایو برای راه اندازی، استفاده از موتورهای LSPMS را نسبت به موتورهای سنکرون آهنربای دائم به صرفه‌تر کرده است. اما پائین تر بودن ظرفیت راه اندازی این موتورها نسبت به موتورهای القایی، یکی از مهمترین موارد محدود کننده جایگزینی موتورهای القایی با موتورهای LSPMS است. به دلیل وجود گشتاور ترمزی ناشی از آهنربا طی دوره راه اندازی در موتورهای LSPMS، کاهش اثرات نامطلوب هارمونیک‌های فضایی بر مشخصه سرعت گشتاور در این موتورها در مقایسه با موتورهای القایی، از اهمیت بالاتری برخوردار است. در این مقاله روشی برای حذف برخی از هارمونیک‌های فضایی به منظور بهبود عملکرد راه اندازی موتورهای LSPMS، به کار گرفته شده است. ابتدا نیروی محرکه مغناطیسی استاتور و هارمونیک‌های فضایی ایجاد شده در فاصله هوایی و همچنین تاثیر گشتاور القایی ناشی از آنها بر عملکرد ماشین بررسی می‌شود. سپس کاهش گشتاورهای انگلی ناشی از هارمونیک‌های فضایی، با حذف برخی از مولفه‌های هارمونیک نیروی محرکه مغناطیسی به کمک تغییر در ساختار استاتور، مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت با اعمال این روش به یک موتور LSPMS دو قطب، تاثیر این روش بر بهبود عملکرد ماشین برای راه اندازی بارهای ثابت، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کلیدواژه‌ها: موتورهای LSPMS، نیروی محرکه مغناطیسی، هارمونیک‌های فضایی، راه اندازی، کراولینگ

۱- مقدمه

بیشتر از دیگر انواع موتورها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نتیجه سهم این موتورها در مصرف انرژی و عواقب ناشی از آن بیشتر است. به عنوان مثال در کشور بریتانیا تنها موتورهای القایی سه فاز مسئول انتشار سالانه ۹۷ میلیون تن گاز دی اکسید کربن هستند. این مقدار حدود ۱۷٪ از کل گاز دی اکسید کربن تولیدی سالیانه این کشور می‌باشد [۳]. بنابر این بهینه‌سازی بازده موتورهای الکتریکی به ویژه موتورهای القایی سه فاز، تاثیر به‌سزایی در ذخیره‌سازی انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط زیست خواهد داشت. به همین دلیل در بسیاری از کشورها از جمله ایالات متحده آمریکا، کانادا و اتحادیه اروپا قواعدی برای تعیین مینیمم بازده قابل قبول برای موتورهای الکتریکی وضع شده‌اند. به منظور ارتقاء رقابت در بازار موتورهای الکتریکی، IEC^۲ در نوامبر ۲۰۰۸ استاندارد IEC60034-30 (کلاس‌های استاندارد IEC^۳) را برای ایجاد هماهنگی در طبقه‌بندی از نظر بازده برای موتورهای القایی سه‌فاز تک‌سرعت، قفس

مصرف انرژی سالیانه در جهان در دهه‌های اخیر رو به افزایش بوده است و به بیش از ۱۳۵۴۰ Mtoe^۱ در سال ۲۰۱۳ رسیده است. بیشتر این انرژی از منابع سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود. این افزایش علاوه بر خطر پایان یافتن این منابع در آینده نزدیک، مساله آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای و متعاقب آن افزایش دمای زمین را به دنبال دارد [۱].

بیش از ۵۰٪ انرژی الکتریکی تولیدی توسط انواع موتورهای الکتریکی مصرف می‌شود. به عنوان مثال در اتحادیه اروپا موتورهای الکتریکی مهمترین بارهای صنعتی هستند و حدود ۷۰٪ انرژی الکتریکی تولید شده را مصرف می‌کنند. در بخش غیرصنعتی هم سهم انرژی مصرف شده توسط موتورها حدود ۳۳٪ انرژی الکتریکی مصرف شده در این بخش می‌باشد [۲].

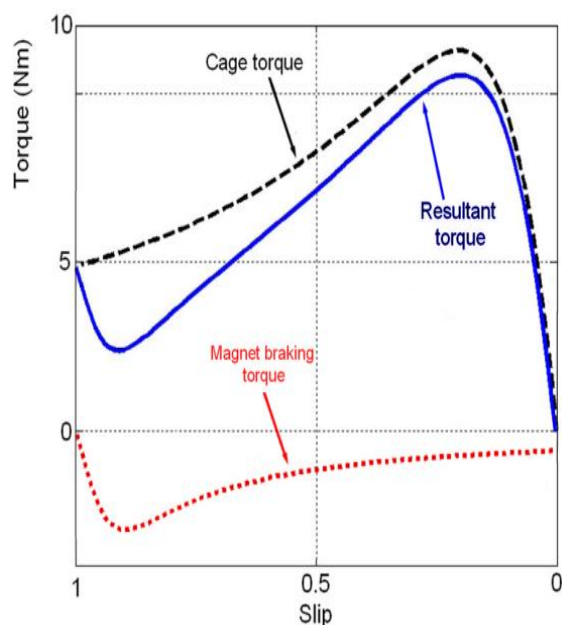
از بین انواع موتورهای الکتریکی، موتورهای القایی سه فاز

2. International Electrotechnical Committee
3. International Energy Efficiency

*نویسنده پاسخگو: sadoughi@mut-es.ac.ir

1. Mega Tone Oil Equivalent

به منبع، باعث راه‌اندازی موتور می‌شود. لکن در طی راه‌اندازی، به دلیل وجود آهنربای دائم، یک مولفه گشتاور دیگر هم در خلاف جهت چرخش موتور ایجاد می‌گردد. در شکل (۱) اثر گشتاور ترمزی آهنربای دائم بر مشخصه گشتاور موتور LSPMS هنگام راه‌اندازی نشان داده شده است. وجود این مولفه باعث می‌شود ظرفیت راه‌اندازی این موتورها نسبت به موتورهای القایی، به ویژه برای بارهای ثابت، کاهش یابد.



شکل (۱): مولفه‌های گشتاور متوسط در موتور LSPMS [۳]

معمولاً مولفه گشتاور ناشی از قفس را با یک منحنی هموار مطابق شکل (۲-الف) نشان می‌دهند. اما در عمل مشخصه سرعت گشتاور با آنچه که در شکل مذکور نشان داده شده است تفاوت دارد. این منحنی در نزدیکی سرعت صفر یا لغزش واحد، دارای ناهموازی مانند شکل (۲-ب) می‌باشد. عامل ایجاد این ناهموازیها گشتاورهای انگلی^۲ هستند. این گشتاورها منحنی سرعت گشتاور موتور القایی را به گونه‌ای تغییر می‌دهند که می‌تواند باعث شود موتور در یک سرعتی کمتر از سرعت نامی گیر بیفتد به این پدیده خزش یا کراولینگ^۳ گفته می‌شود. منشا ایجاد گشتاورهای انگلی، وجود هارمونیک‌ها در توزیع فضایی شار موسوم به هارمونیک‌های فضایی^۴ است. وجود این هارمونیک‌های فضایی دو پدیده گشتاور اثر سنکرونی و گشتاور اثر آسنکرونی در ماشین القایی ایجاد می‌کند. این گشتاورها علاوه بر ایجاد نویز و ارتعاش در ماشین موجب بروز ناهموازی در مشخصه گشتاور-سرعت موتور می‌گردند که می‌توانند باعث پدیده کراولینگ شوند.

سنجایی تغذیه‌شده با خط را به تصویب رساند. در آخرین پیشنهاد، IEC استاندارد 31-IEC60034 را تصویب کرد که در آن، بازده فوق‌عالی یا استاندارد IE4 پیشنهاد شده است. قابل ذکر است که تلفات موتورهای القایی با استاندارد IE4 باید ۱۰ تا ۱۵ درصد از تلفات موتورهای القایی با استاندارد IE3 کمتر باشد [۲ و ۴].

برخی از سازندگان اروپایی رسیدن به سطح استاندارد IE4 را برای موتورهای القایی امکان‌پذیر ندیدند. با توجه به این که درصد قابل ملاحظه‌ای از تلفات در موتورهای القایی، ناشی از تلفات اهمی در قفس رتور و سیم پیچی استاتور است [۲]، با حذف و یا کاهش این تلفات می‌توان به بازده بالاتر و استاندارد IE4 رسید. بنابر این استفاده از فناوری آهنربای دائم برای موتورهای القایی مطرح شد. در واقع برای رسیدن به بازده‌های بالا، راه مناسب جایگزین کردن موتورهای القایی با موتورهای مغناطیس دائم است. از طرفی استفاده از موتورهای PM به دلیل نیاز به درایو جهت راه‌اندازی، در بسیاری از کاربردهای تک‌سرعتی نظیر پمپ-ها، فن‌ها و کمپرسورها که اتفاقاً بیش از ۷۰٪ کاربردها را شامل می‌شوند، توجیه اقتصادی ندارد [۵]. برای حل این مسئله، استفاده از قفس سنجایی بر روی رتور جهت تامین گشتاور راه‌اندازی مورد توجه قرار گرفته است. موتورهای القایی قفس سنجایی که با اتصال به ولتاژ خط، راه‌اندازی شده و در مرحله بعد با استفاده از آهنربای دائم موجود در رتور سنکرون شده و در سرعت سنکرون کار می‌کنند را موتورهای سنکرون آهنربای دائم خط راه‌انداز (یا با راه‌انداز القایی) و به اختصار موتورهای LSPMS^۱ می‌گویند.

موتورهای سنکرون آهنربای دائم با راه‌انداز القایی به دلیل داشتن بازده بالاتر، ضریب قدرت بهتر، چگالی گشتاور بزرگتر و در نتیجه وزن و حجم کمتر نسبت به موتورهای القایی، جایگزین مناسبی برای این موتورها محسوب می‌شوند. علاوه بر آن عدم نیاز به درایو برای راه‌اندازی، استفاده از موتورهای LSPMS را نسبت به موتورهای سنکرون آهنربای دائم به صرفه‌تر کرده است [۳]. استاتور موتورهای LSPMS مانند استاتور موتورهای القایی است اما رتور آنها علاوه بر قفس به آهنربای دائم هم مجهز است. در این موتورها قفس رتور برای ایجاد گشتاور راه‌اندازی به کار می‌رود و آهنربا با ایجاد گشتاور سنکرون کننده، پس از سنکرون شدن موتور نقش سیم پیچ تحریک در موتور سنکرون در شرایط دائمی را دارد [۶].

در موتورهای LSPMS گشتاور ناشی از قفس با اتصال موتور

2 - Parasitic torques
3 - Crawling
4 - Space Harmonics

1 - Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor

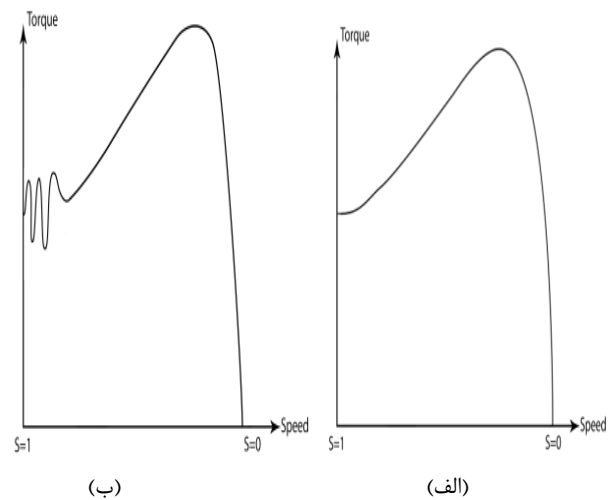
آسنکرون ناشی از هارمونیک‌های فضایی برای ماشین القایی با m و n سیم پیچ در استاتور و رتور بدست آمده و در مرجع [۱۳] این معادلات برای یک موتور القایی سه فاز به کار برده شده است. ماشین القایی در حضور هارمونیک‌های فضایی مورد تحلیل قرار گرفته و تاثیر گشتاورهای انگلی ناشی از هارمونیک‌های فضایی بر مشخصه سرعت گشتاور موتور بررسی شده است. در مرجع [۱۴] روشی مبتنی بر تغییر در ساختار استاتور از نظر موقعیت شیارها و تعداد حلقه‌های سیم پیچی درون شیارها، ارائه شده است. در این روش با بهینه‌سازی موقعیت شیارها و تعداد حلقه‌های سیم‌پیچی درون شیارها بر مبنای حذف و یا تضعیف هارمونیک‌های فضایی، تاثیر این هارمونیک‌ها بر گشتاور ماشین کاهش داده شده است.

در این مقاله برای بهبود عملکرد موتورهای LSPMS هنگام راه‌اندازی، روشی برای کاهش اثرات نامطلوب هارمونیک‌های فضایی بر مشخصه سرعت گشتاور این موتورها هنگام راه‌اندازی و جلوگیری از پدیده کراولینگ به کار گرفته شده است. ابتدا نیروی محرکه مغناطیسی استاتور و هارمونیک‌های فضایی ایجاد شده در فاصله هوایی و همچنین تاثیر گشتاور القایی ناشی از آنها بر عملکرد ماشین بررسی می‌شود. سپس کاهش گشتاورهای انگلی ناشی از هارمونیک‌های فضایی، با حذف برخی از مولفه‌های هارمونیک نیروی محرکه مغناطیسی به کمک تغییر در ساختار استاتور مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت با اعمال این روش به یک موتور LSPMS دو قطب، تاثیر این روش بر بهبود عملکرد ماشین برای راه‌اندازی بارهای ثابت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- توزیع نیروی محرکه مغناطیسی استاتور در فاصله هوایی

در سامانه‌های دو تحریکه نیرو یا گشتاور الکترومغناطیسی از داخل دو میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. در یک ماشین LSPMS گشتاور الکترومغناطیسی از اثر متقابل میدان مغناطیسی استاتور با میدان مغناطیسی رتور تولید می‌شود. لذا برای تحلیل این گشتاور بررسی نیروی محرکه مغناطیسی سیم پیچ استاتور و به تبع آن میدان مغناطیسی حاصل، ضروری است. برای سهولت ابتدا نیروی محرکه مغناطیسی سیم پیچ تک‌فاز و سپس سیم پیچ سه‌فاز را بررسی می‌کنیم.

شکل (۳) مدل مسطح یک ماشین الکتریکی را نشان می‌دهد. برای سهولت ماشین را بدون شیار فرض کرده و ضریب نفوذ پذیری آهن استاتور و رتور را نامحدود در نظر می‌گیریم. سیم پیچ متمرکز با N_c دور با جریان DC تغذیه شده و گام سیم پیچ τ می‌باشد.



شکل (۲): مشخصه سرعت گشتاور موتور القایی، الف) بدون گشتاورهای انگلی، ب) با گشتاورهای انگلی

اگر چه در موتورهای القایی مورب‌سازی شیارهای رتور می‌تواند باعث کاهش اثر هارمونیک‌های فضایی گردد، اما در موتورهای LSPMS معمولاً به دلیل قرار گرفتن آهنربا در رتور، میله‌های رتور مورب نیستند. بنابر این وجود هارمونیک‌های فضایی در موتورهای LSPMS و گشتاورهای انگلی ناشی از آنها می‌تواند پدیده کراولینگ را تشدید کرده و عملاً راه‌اندازی موتور را با مشکل مواجه کند [۸-۷].

به علت اثر آهنربای دائم در کاهش گشتاور موتور LSPMS به‌ویژه در لغزش‌های کم، اثر کراولینگ در این موتور در مقایسه با موتور القایی حادث‌تر است و باید برای آن چاره‌ای اندیشید. در واقع یکی از مهمترین موارد محدود کننده جایگزینی موتورهای القایی با موتورهای LSPMS، پائین‌تر بودن ظرفیت راه‌اندازی این موتورها نسبت به موتورهای القایی است [۱۰-۹]. بنابر این، بررسی تاثیر هارمونیک‌های فضایی بر عملکرد موتور LSPMS هنگام راه‌اندازی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بررسی هارمونیک‌های فضایی و تاثیر آن بر عملکرد موتور القایی و روش‌های کاهش هارمونیک‌های فضایی در مقالات متعددی توسط محققین انجام شده است. در [۷] چگونگی ایجاد گشتاورهای سنکرون و آسنکرون در اثر هارمونیک‌های فضایی بر اساس تئوری میدان گردان در ماشین القایی مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین تاثیر مورب‌سازی میله‌های رتور در کاهش گشتاورهای پارازیتی نشان داده شده است. در [۱۱] یک مدل ریاضی برای یک ماشین القایی با m سیم پیچ در استاتور و n سیم پیچ در رتور بر اساس مدارهای تزویج شده با در نظر گرفتن هارمونیک‌های نیروی محرکه مغناطیسی ارائه شده است. در مرجع [۱۲] معادلات حالت دائمی برای گشتاورهای سنکرون و

مقدار ماکزیمم مؤلفه هارمونیک γ از رابطه زیر به دست می آید:

$$F_{cm\gamma} = \frac{4}{\tau} \int_0^{0.5\tau} F_{cg} \cos\left(\gamma \frac{p}{\tau} x\right) dx$$

$$= \frac{4}{\gamma\pi} F_{cg} \sin\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

متغیر خطی x با رابطه زیر قابل تبدیل به متغیر زاویه ای α است

$$\alpha = \frac{\pi}{p\tau} x \quad (7)$$

در رابطه فوق p تعداد زوج قطب می باشد. اگر سیم پیچ با جریان ac یعنی $i(t) = \sqrt{2}I \cos \omega t$ تغذیه شود نیروی محرکه مغناطیسی سیم پیچ برابر می شود با:

$$F(\alpha, t) = \sum_{\gamma=1,3,5,\dots}^{\infty} F_{m\gamma} \cos(\omega t) \cdot \cos(\gamma p \alpha) \quad (8)$$

در صورتی که سیم پیچ به صورت توزیع شده در شیارها بوده و کوتاه شدگی گام داشته باشیم، دامنه مؤلفه هارمونیک از رابطه زیر بدست می آید [۱۵].

$$F_{m\gamma} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{NK_{w\gamma}}{\gamma p} I \quad (9)$$

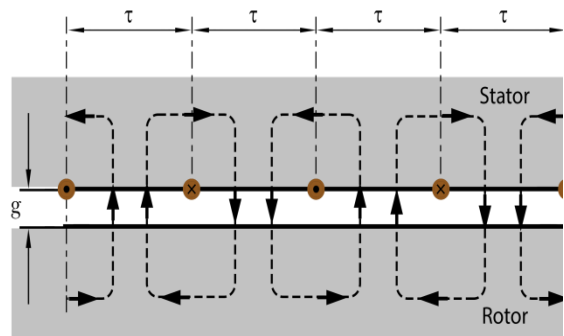
در رابطه فوق $K_{w\gamma}$ ضریب سیم پیچی^۱ هارمونیک مرتبه γ است که از حاصل ضرب ضریب گسترده گی^۲ و ضریب گام^۳ مربوط به هارمونیک مرتبه γ به دست می آید. رابطه (۸) نشان می دهد نیروی محرکه مغناطیسی یک سیم پیچ تک فاز برای هر مؤلفه هارمونیک یک موج نوسانی و ساکن است. این موج برای هر مؤلفه هارمونیک را می توان به صورت مجموع دو مؤلفه هم دامنه (با دامنه $0.5F_m$) و متحرک با سرعت دورانی یکسان ولی در دو جهت مخالف، مطابق رابطه زیر در نظر گرفت.

$$F(\alpha, t) = \frac{1}{2} \sum_{\gamma=1,3,5,\dots}^{\infty} F_{m\gamma} \cos(\gamma p \alpha - \omega t)$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{\gamma=1,3,5,\dots}^{\infty} F_{m\gamma} \cos(\gamma p \alpha + \omega t) \quad (10)$$

برای یک سیم پیچ سه فاز متقارن که با جریان سه فاز متعادل تغذیه شده باشد، می توان نشان داد که نیروی محرکه مغناطیسی کل برابر خواهد شد با [۱۵]:

$$F_1(\alpha, t) = \sum_{k=1,2,3,\dots}^{\infty} F_{1m\gamma} \cos(\gamma p \alpha \pm \omega t) \quad (11)$$



شکل (۳): مدل مسطح یک ماشین الکتریکی با سیم پیچ تک فاز

با استفاده از قانون مدار آمپر، شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی از رابطه زیر به دست می آید [۱۵]:

$$\bar{H} \cdot d\bar{l} = 2Hg = N_c I \quad (1)$$

بنابر این نیروی محرکه مغناطیسی سیم پیچ در فاصله هوایی برابر می شود با:

$$F_{cg} = H \cdot g = \frac{N_c I}{2} \quad (2)$$

با معرفی پرمانس در واحد سطح برای فاصله هوایی به صورت:

$$\Lambda_g = \frac{\mu_0}{g} \quad (3)$$

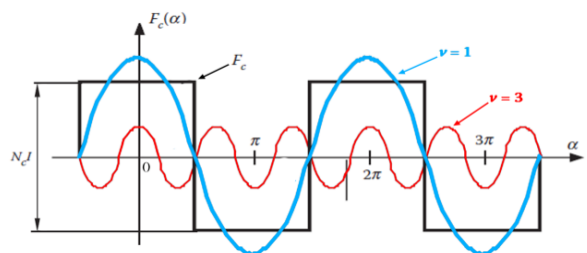
مقدار چگالی شار در فاصله هوایی که مانند شکل (۴) به صورت یک موج مربعی است را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$B_g = \mu_0 \cdot H = \frac{\mu_0}{g} \frac{N_c \cdot I}{2} = \Lambda_g \cdot F_{cg} \quad (4)$$

مشابه با موج چگالی شار مغناطیسی، شکل موج نیروی محرکه مغناطیسی را هم می توان مانند شکل (۴) به صورت موج مربعی در نظر گرفت و برای آن سری فوریه به صورت زیر نوشت:

$$F_c(x) = \sum_{\gamma=1,3,5,\dots}^{\infty} F_{cm\gamma} \cos\left(\gamma \frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (5)$$

قابل ذکر است با توجه به تقارن موج نیروی محرکه مغناطیسی، فقط هارمونیک های فرد در سری فوریه ظاهر می شوند.



شکل (۴): نیروی محرکه مغناطیسی و برخی از هارمونیک های یک سیم پیچ تک فاز

1. Winding Factor
2. Distribution Factor
3. Pitch Factor

مؤلفه‌های هارمونیک نسبت به هارمونیک اصلی، در بی‌باری و سرعت نامی، کمترین مقدار را دارند. با افزایش بار و افزایش جریان استاتور و در نتیجه جریان القایی رتور، مؤلفه‌های هارمونیک افزایش یافته و مؤلفه اصلی کاهش می‌یابد، لذا این مؤلفه‌های هارمونیک بیشترین تأثیر را هنگام راه‌اندازی دارند. بنابراین در هنگام طراحی موتور برای عملکرد راه‌اندازی مناسب، باید تلاش شود تا آنجا که ممکن است مؤلفه‌های هارمونیک میدان کاهش یابند. همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، مؤلفه‌های هارمونیک از مرتبه $\gamma = 6k + 1$ مؤلفه‌های مستقیم و هم‌جهت با مؤلفه اصلی و مؤلفه‌های هارمونیک از مرتبه $\gamma = 6k - 1$ مؤلفه‌های معکوس و در خلاف جهت مؤلفه اصلی هستند. اگر سرعت سنکرون برای هارمونیک اصلی n_1 باشد در این صورت لغزش برای هارمونیک اصلی یا S_1 به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸].

$$S_1 = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (12)$$

در رابطه فوق n_1 سرعت سنکرون برای مؤلفه اصلی و n سرعت رتور می‌باشد. برای مؤلفه هارمونیک از مرتبه γ سرعت سنکرون برابر می‌شود با:

$$n_\gamma = \frac{n_1}{\gamma} \quad (13)$$

بنابر این لغزش برای مؤلفه هارمونیک γ ام اگر مستقیم باشد از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_\gamma = \frac{n_\gamma - n}{n_\gamma} = (1 - \gamma) + \gamma \cdot S_1 \quad (14)$$

و اگر هارمونیک γ ام معکوس باشد، لغزش برابر خواهد شد با:

$$S_\gamma = \frac{n_\gamma + n}{n_\gamma} = (1 + \gamma) - \gamma \cdot S_1 \quad (15)$$

از روابط فوق می‌توان نتیجه گرفت در شرایط کاری عادی ماشین، لغزش برای مؤلفه‌های هارمونیک بسیار بزرگ بوده و عملاً تأثیری در شرایط کاری ماشین ندارد. بنابراین همانطور که قبلاً هم اشاره شد تأثیر هارمونیک‌های فضایی بر عملکرد موتور هنگام راه‌اندازی از اهمیت بیشتری برخوردار است.

۴- کاهش یا حذف هارمونیک‌های فضایی با تغییر

سیم پیچ استاتور

همان‌گونه که در قسمت‌های قبل اشاره شد، هارمونیک‌های فضایی، گشتاورهای انگلی ایجاد کرده که باعث افزایش نویز و ارتعاش و تلفات شده و علاوه بر آن می‌توانند مانع رسیدن سرعت

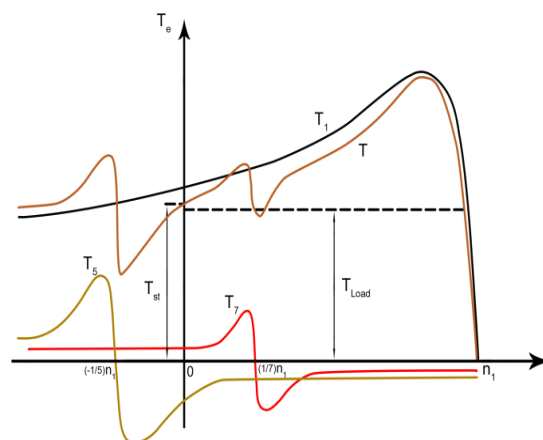
در رابطه (۱۱) γ نشان دهنده مرتبه هارمونیک است که بصورت زیر قابل دسته بندی است.

$$\gamma = 6k + 1 \quad \text{هارمونیک‌های مستقیم هم جهت با مؤلفه اصلی} \\ (1, 7, 13, \dots)$$

$$\gamma = 6k - 1 \quad \text{هارمونیک‌های معکوس در خلاف جهت مؤلفه اصلی} \\ (5, 11, 17, \dots) \quad \text{قابل ذکر است در میدان مغناطیسی سه فاز هارمونیک مضرب ۳ وجود ندارد.}$$

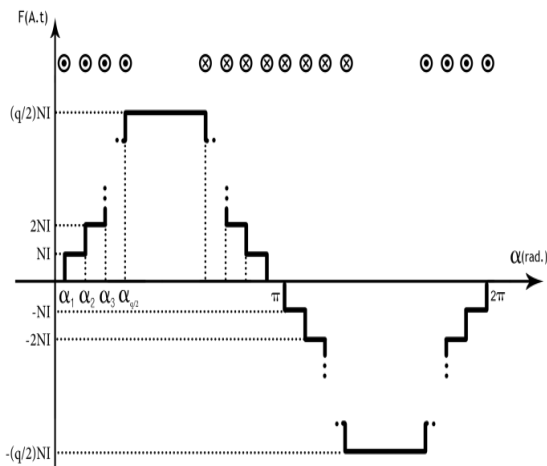
۳- گشتاورهای آسنکرونی و اثر آنها بر مشخصه گشتاور موتور

مؤلفه‌های هارمونیک نیروی محرکه مغناطیسی سیم پیچ استاتور در فاصله هوایی ایجاد میدانهای گردان می‌کنند. این میدانهای گردان به نوبه خود در رتور القا جریان کرده در نتیجه گشتاورهای الکترومغناطیسی مشابه گشتاور مؤلفه اصلی، منتهی با تعداد قطب‌های بیشتر و در نتیجه سرعت سنکرون کوچکتر، تولید می‌کنند [۱۶]. هنگامی که موتور برای رسیدن به سرعت نامی از سرعت سنکرون یکی از این مؤلفه‌ها عبور می‌کند، گشتاور القایی ایجاد شده توسط این هارمونیک یک فرورفتگی^۱ (چاله) در مشخصه سرعت گشتاور موتور ایجاد می‌کند. این فرورفتگی می‌تواند باعث شود در صورت راه‌اندازی موتور با بار، موتور در یک سرعت کمتر گیر کرده و پدیده کراولینگ رخ دهد. به این پدیده خزش آسنکرونی^۲ گفته می‌شود. شکل (۵) تأثیر هارمونیک‌های پنجم و هفتم فضایی استاتور را بر مشخصه گشتاور قفس نشان می‌دهد.



شکل (۵): تأثیر گشتاور ناشی از هارمونیک‌های پنجم و هفتم فضایی استاتور بر مشخصه گشتاور قفس رتور [۱۷]

1. Dip
2. Asynchronous Crawling



شکل (۶): توزیع نیروی محرکه مغناطیسی یک فاز سیم‌پیچی استاتور ساختار کلاسیک

۴-۲- تغییر ساختار سیم‌پیچی استاتور:

با توجه به این‌که ضرایب سری فوریه نیروی محرکه مغناطیسی استاتور تابع محل شیارها و تعداد دور سیم‌پیچ در شیارها می‌باشند، می‌توان این مقادیر را به‌گونه‌ای تعیین کرد که دامنه مؤلفه‌های هارمونیک مورد نظر کمترین مقدار را داشته و یا صفر باشند. در طرح جدید به منظور کاهش مؤلفه‌های هارمونیک mmf استاتور، دهانه شیارها یکسان نبوده و تعداد حلقه‌های سیم‌پیچی داخل شیارها نیز با هم برابر نخواهند بود. اما باید توجه داشت بررسی عملی بودن طرح به منظور اجرا، کاملاً ضروری است. لذا پس از طراحی و مشخص شدن محل شیارها و تعداد دور سیم‌پیچی داخل هر شیار، امکان‌پذیری اجرای طرح باید بررسی شود.

در واقع در طرح جدید شکل شیارها و عرض دندانها نسبت به قبل تغییر خواهند کرد. می‌توان با ثابت نگه داشتن عمق شیارها، ضخامت یوغ استاتور را ثابت نگه داشت. در این صورت عرض دندانها تغییر می‌کنند. در صورت ثابت نگه داشتن عرض دندانها، عمق شیارها تغییر کرده و در نتیجه ضخامت یوغ استاتور در قسمت‌های مختلف تغییر می‌کند. به هر حال در طراحی استاتور لازم است چگالی شار در قسمت‌های مختلف محاسبه شده تا در صورت اشباع، تغییرات لازم در طراحی با تغییر پارامترهایی مانند عرض دندان، شکل شیار و یا عمق شیار انجام گیرد و از عدم اشباع اطمینان حاصل گردد.

برای یک ماشین که دارای Q شیار استاتور و P زوج قطب و q شیار در هر فاز بر قطب باشد برای این‌که تقارن ربع موج داشته باشیم q باید زوج بوده و حداقل ۲ باشد بنابراین روش فقط برای ماشین‌های سه‌فازی که تعداد شیارهای آنها بر زوج قطب مضربی از ۱۲ باشد قابل استفاده است. برای بهینه‌سازی با توجه به شکل زیر و تقارن ربع موج، مشاهده می‌شود که تعداد پارامترهای متغیر

موتور به سرعت نامی آن شوند. از آنجا که توزیع هادی‌های استاتور در یک ماشین الکتریکی عملاً سینوسی نیست، حتی اگر سیم‌پیچی توسط یک منبع کاملاً سینوسی تغذیه شود تغییر آمپر دور بر حسب مکان سینوسی نخواهد بود. در نتیجه توزیع آمپر دور در فاصله هوایی توسط سیم‌پیچی استاتور، شامل هارمونیک‌ها می‌شود.

می‌توان با ایجاد تغییر ساختاری در استاتور، محتوای هارمونیک توزیع نیروی محرکه مغناطیسی در فاصله هوایی را کاهش داد. در واقع با بهینه‌سازی محل شیارهای استاتور و تعداد هادی‌های درون هر شیار، می‌توان برخی از هارمونیک‌های فضایی خاص را حذف کرد [۱۴]. با حذف این هارمونیک‌های فضایی، ولتاژ القایی ناشی از آنها و همچنین توان و گشتاور الکترومغناطیسی مرتبط با آنها هم حذف خواهند شد. در واقع بهینه‌سازی با هدف کاهش اثر منفی هارمونیک‌های فضایی با حذف آنها در توزیع نیروی محرکه مغناطیسی استاتور انجام می‌شود. روش رسیدن به این هدف مانند روشی است که در افزایش کیفیت ولتاژ خروجی یک اینورتر استفاده می‌شود با این تفاوت که در این‌جا متغیرهای قابل تنظیم تعداد دور سیم‌پیچ در شیارها و محل شیارها به جای ولتاژ و زمان است. با جابه‌جایی نتایج به‌دست آمده برای یک فاز به میزان $\pm 120^\circ$ نتایج برای دو فاز دیگر هم به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است که فقط محاسبه تعداد دور سیم‌پیچی و محل شیارها کافی نیست بلکه مناسب بودن نتایج حاصله برای اجرا نیز ضروری است.

۴-۱- تحلیل ساختار کلاسیک

اگر تعداد هادی‌ها در هر شیار و همچنین دهانه شیارها با هم برابر باشند، با فرض این‌که مقدار آمپر دور در مرکز هر شیار به صورت پله‌ای تغییر کند، شکل موج نیروی محرکه مغناطیسی در هر فاز مانند شکل (۶) می‌باشد. با توجه به تقارن موجود در شکل نیروی محرکه مغناطیسی، سری فوریه و ضرایب آن به صورت زیر می‌باشند.

$$F(\alpha) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\alpha) \quad (16)$$

$$b_n = \frac{4N}{n\pi} \sum_{k=1}^{q/2} \cos(nak) \quad (17)$$

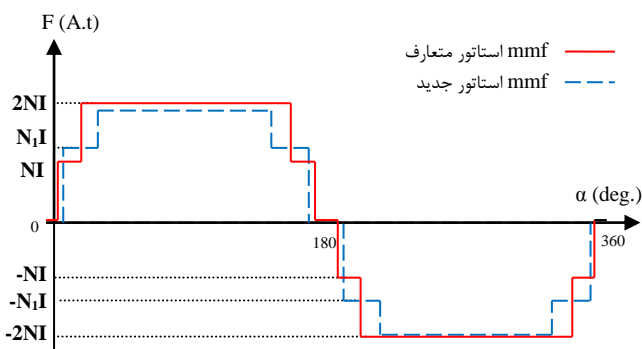
قابل ذکر است که در سری فوریه نیروی محرکه مغناطیسی، ضرایب هارمونیک مؤلفه‌های زوج صفر هستند. همچنین باید توجه داشت که هارمونیک‌های فرد مضرب سه، میدان گردان تولید نمی‌کنند.

حلقه‌های سیم پیچی درون شیار اول برای یک فاز را به عنوان متغیر مستقل در نظر می‌گیریم. با صفر قرار دادن ضرائب هارمونیک‌های پنجم، هفتم و یازدهم از رابطه (۱۷) و با استفاده از روش نیوتن رفسون برای حل معادلات مذکور، متغیرهای مورد نظر محاسبه می‌شوند. با مشخص شدن نتایج برای یک فاز، نتایج مربوط به دو فاز دیگر با اعمال $\pm 120^\circ$ درجه انتقال زاویه بدست می‌آیند. نتایج حاصل از حل معادلات به کمک نرم افزار متلب برای یک فاز در جدول (۲) ثبت شده است. α نشان دهنده موقعیت شیار در استاتور برحسب درجه و N تعداد دور در هر شیار است. برای مقایسه بهتر، موقعیت شیارها و تعداد حلقه‌های سیم پیچ درون هر شیار برای استاتور با ساختار متعارف و جدید در جدول (۲) نشان داده شده است. قابل ذکر است تعداد حلقه‌های سیم پیچی استاتور در هر شیار برای ماشین با سیم پیچی متعارف ۵۳ دور می‌باشد.

توزیع نیروی محرکه مغناطیسی در فاصله هوایی برای سیم پیچی جدید و سیم پیچی متعارف در شکل (۸) رسم شده و با یکدیگر قابل مقایسه هستند. طیف هارمونیک‌های نیروی محرکه مغناطیسی در دو حالت مذکور محاسبه شده و برای مقایسه در جدول (۳) ثبت شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در سیم پیچی جدید هارمونیک‌های پنجم، هفتم و یازدهم عملاً حذف شده‌اند. این در حالی است که هارمونیک اصلی کمتر از ۴ درصد کاهش یافته است.

جدول (۲): موقعیت شیارها و تعداد حلقه‌های درون آنها در ستاتور

موقعیت شیارها و تعداد حلقه‌های درون آنها در استاتور متعارف								
α	۷/۵	۲۲/۵	۱۵۷/۵	۱۷۲/۵	۱۸۷/۵	۲۰۲/۵	۳۳۷/۵	۳۵۲/۵
N	۵۳	۵۳	۵۳	۵۳	۵۳	۵۳	۵۳	۵۳
موقعیت شیارها و تعداد حلقه‌های درون آنها در استاتور جدید								
α	۱۱	۳۵	۱۴۵	۱۶۹	۱۹۱	۲۱۵	۳۲۵	۳۴۹
N	۶۷	۳۸	۳۸	۶۷	۶۷	۳۸	۳۸	۶۷

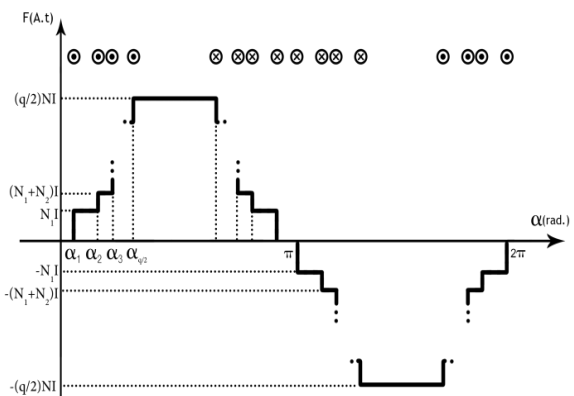


شکل (۸): مقایسه توزیع نیروی محرکه مغناطیسی یک فاز سیم پیچی استاتور در دو ساختار متعارف و جدید

برای بهینه‌سازی $\frac{q}{2}$ محل شیارها به اضافه $\frac{q}{2}$ تعداد دور سیم پیچ در هر شیار، یعنی q پارامتر می‌باشد. اگر ماکزیمم نیروی محرکه مغناطیسی در ماشین را ثابت فرض کنیم، یکی از متغیرها استقلال خود را از دست داده و تعداد پارامترهای بهینه‌سازی $q-1$ خواهد شد. لذا می‌توان $q-1$ مؤلفه هارمونیک را حذف کرد [۱۴]. شکل (۷) توزیع نیروی محرکه مغناطیسی یک فاز سیم پیچی استاتور در ساختار جدید را نشان می‌دهد. در جدول (۱) مؤلفه‌های هارمونیک قابل حذف، برای حالت‌های مختلف تعداد شیار بر قطب ثبت شده است. در جدول Q تعداد کل شیارهای استاتور، p زوج قطب و m تعداد فازها را نشان می‌دهند.

۴-۳- نتایج عددی

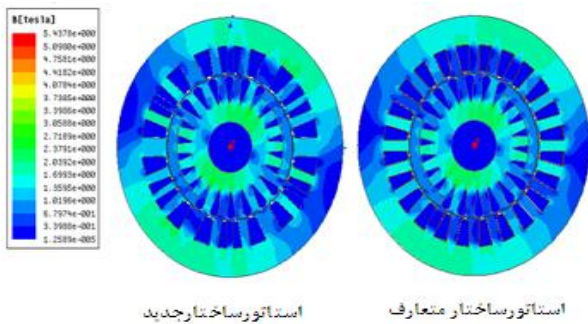
برای ارزیابی روش ارائه شده در قسمت (۴-۲) یک موتور LSPMS دو قطب با ۲۴ شیار در استاتور، مورد بررسی قرار گرفته است. در این ماشین تعداد شیارها در هر فاز بر قطب، ۴ شیار است. بنابر این می‌توان با استفاده از روش مذکور هارمونیک‌های پنجم، هفتم و یازدهم نیروی محرکه مغناطیسی در فاصله هوایی را حذف کرد. با توجه به تفارن ربع موج همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، محل شیارهای اول و دوم و تعداد



شکل (۷): توزیع نیروی محرکه مغناطیسی یک فاز سیم پیچی استاتور ساختار جدید

جدول (۱): مؤلفه‌های هارمونیک قابل حذف برای حالت‌های مختلف تعداد شیار بر قطب

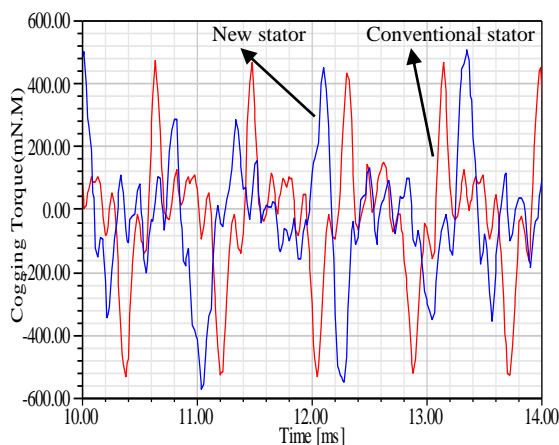
Q/p	$q=Q/(2p.m)$	تعداد هارمونیک‌های قابل حذف	هارمونیک‌های قابل حذف
۱۲	۲	۱	۵
۲۴	۴	۳	۵،۷،۱۱
۳۶	۶	۵	۵،۷،۱۱،۱۳،۱۷
۴۸	۸	۷	۵،۷،۱۱،۱۳،۱۷،۱۹،۲۳



شکل (۱۰): توزیع چگالی شار در موتور LSPMS

۵-۲- بررسی گشتاور دندانه‌ای^۱

گشتاور دندانه‌ای از کنش متقابل بین آهنربای دائم رتور و شیارهای استاتور بوجود می‌آید. این گشتاور به تعداد آهنرباهای رتور، تعداد شیارهای استاتور و همچنین ساختار شیارها و دندانه‌ها بستگی دارد [۱۹]. با توجه به این‌که تعداد شیارها و همچنین عمق شیارها نسبت به ساختار قبلی تغییر نکرده و فقط عرض دندانه‌ها تغییر کرده است، لذا انتظار می‌رود که گشتاور دندانه‌ای در ساختار جدید نسبت به قبل از نظر فرکانس و دامنه تغییر نکند و فقط محل وقوع بیشینه مثبت و منفی در پروفیل گشتاور دندانه‌ای نسبت به ساختار قبلی تغییر کند. گشتاور دندانه‌ای برای موتور LSPMS با استاتور متعارف و موتور LSPMS با استاتور جدید با روش المان محدود محاسبه، و برای مقایسه در شکل (۱۱) رسم شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تعویض استاتور متعارف با استاتور جدید تاثیر چندانی در گشتاور دندانه‌ای ندارد.



شکل (۱۱): مقایسه گشتاور دندانه‌ای در دو موتور با استاتورهای متفاوت

۵-۳- تاثیر ساختار جدید بر عملکرد راه‌اندازی موتور

برای بررسی تاثیر ساختار جدید استاتور بر عملکرد راه‌اندازی موتور LSPMS، بار با گشتاور ثابت به موتورهای مذکور اعمال شده است. همان‌گونه که در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده

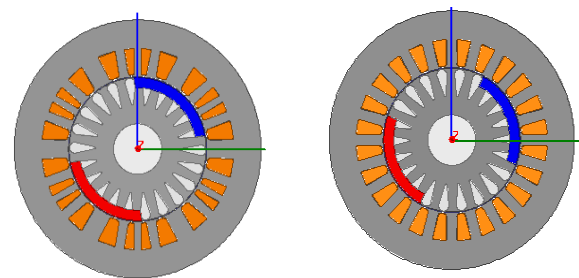
جدول (۳): مقایسه دامنه هارمونیک‌های mmf استاتور بر حسب درصد در دو ساختار متعارف و جدید

شماره هارمونیک	۱	۵	۷	۱۱	۱۳	۱۷	۱۹	۳
دامنه در استاتور متعارف	۱۰۰	۴/۳	۲/۴	۱/۲	۱/۰	۱/۰	۱/۱	۴/۳
دامنه در استاتور جدید	۹۶/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۰	۴/۳	۵/۱	۱/۹	۰/۷

۵-۴- تاثیر سیم پیچی جدید بر عملکرد موتور LSPMS

برای بررسی تاثیر سیم پیچی جدید بر عملکرد موتور LSPMS یک موتور سه فاز دو قطب با آهنربای درون سطحی و ۲۴ شیار در استاتور در نظر گرفته شده است. با استفاده از نتایج قسمت (۳-۴) سیم پیچی استاتور در ساختار جدید در نرم افزار ماکسول اجرا شده است. شکل (۹) مقطع موتور در دو حالت، موتور با سیم پیچی متعارف و موتور با سیم پیچی جدید را نشان می‌دهد.

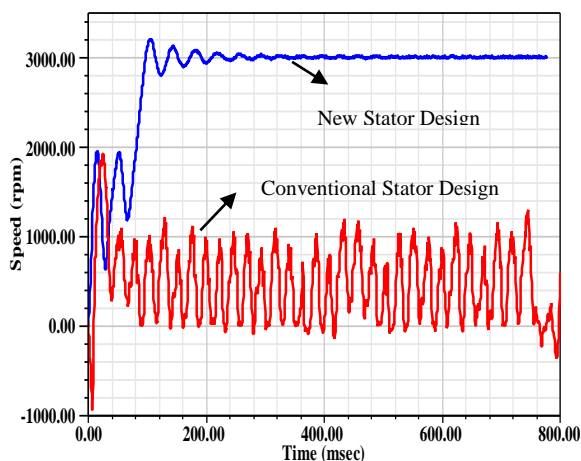
در این قسمت با استفاده از روش المان محدود دو بعدی توسط نرم افزار ماکسول، تاثیر ساختار جدید در نحوه توزیع چگالی شار در ماشین، گشتاور دندانه‌ای و عملکرد موتور در راه‌اندازی و سنکرون کردن بارهای ثابت مورد بررسی قرار گرفته است



شکل (۹): موتور LSPMS با دو استاتور متفاوت

۵-۱- تاثیر ساختار جدید در نحوه توزیع چگالی شار

برای اطمینان از عدم اشباع در ماشین با استاتور ساختار جدید، با استفاده از روش المان محدود توسط نرم افزار ماکسول توزیع چگالی شار در قسمت‌های مختلف موتور با استاتور متعارف و جدید محاسبه و در شکل (۱۰) رسم شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عدم اشباع ماشین در طرح جدید را تایید می‌کند.



شکل (۱۴): تاثیر کاهش هارمونیک‌های فضایی در جلوگیری از وقوع کراولینگ

۶- نتیجه‌گیری

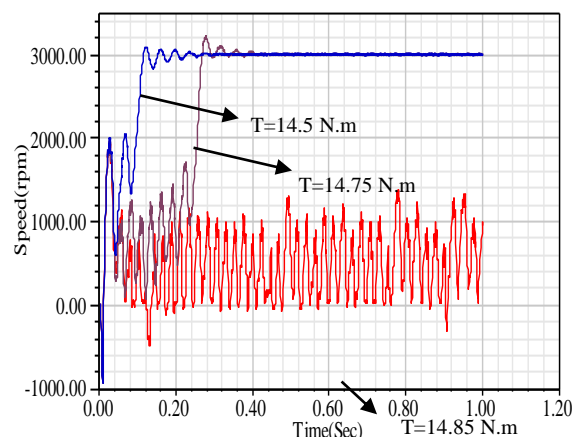
در این مقاله نشان داده شد که تاثیر هارمونیک‌های فضایی در کاهش گشتاور راه‌اندازی و وقوع پدیده کراولینگ، در موتورهای LSPMS در مقایسه با موتورهای القایی، بیشتر است. به منظور کاهش اثرات نامطلوب هارمونیک‌های فضایی بر مشخصه سرعت گشتاور موتورهای LSPMS هنگام راه‌اندازی و جلوگیری از پدیده کراولینگ، برخی از مولفه‌های هارمونیک‌های نیروی محرکه مغناطیسی حذف شدند. حذف این مولفه‌های هارمونیک، به کمک تغییر در ساختار استاتور انجام گرفت. این روش بر روی یک موتور LSPMS دو قطب اعمال شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با کاهش هارمونیک‌های فضایی، عملکرد راه‌اندازی موتورهای LSPMS برای بارهای با گشتاور ثابت، بهبود یافته و از وقوع پدیده کراولینگ جلوگیری می‌شود.

۷- مراجع

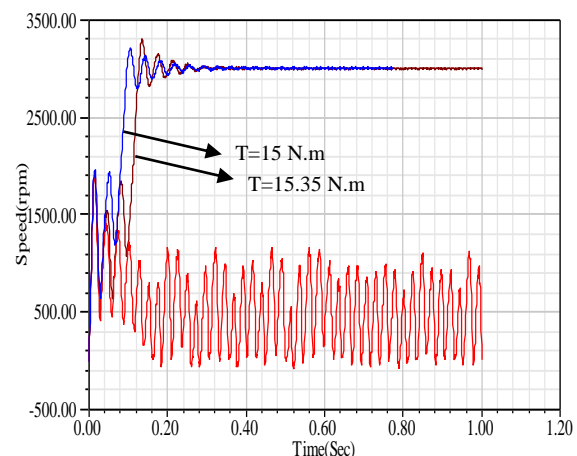
- [1] Keyworld energy statistics, "International Energy Agency," 2015.
- [2] Anibal, T. D. Almeida, F. J. T. E. Ferreira, and J. A. C. Fong, "Standards for Efficiency of Electric Motors," Industry Applications Magazine, IEEE, vol. 17, pp. 12-19, 2011.
- [3] A. H. Isfahani and S. Vaez-Zadeh, "Effects of Magnetizing Inductance on Start-Up and Synchronization of Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motors," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 4, April 2011.
- [4] Feng, L. Liu, J. Kang, and Y. Zhang, "Super Premium Efficient Line Start-up Permanent Magnet Synchronous Motor," XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome.
- [5] T. Marcic, B. Stumberger, G. Stumberger, M. Hadziselimovic, P. Vrtic, and D. Dolinar, "Line-Starting Three and Single-Phase Interior Permanent Magnet Synchronous Motors-Direct Comparison to Induction Motors," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, pp. 4413 - 4416, 2008.

شده است، نتایج شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار ماکسول نشان می‌دهد برای موتور با استاتور متعارف، موتور با افزایش گشتاور بار ثابت تا $14/75$ نیوتن متر توانایی سنکرون شدن را دارد. با افزایش بار موتور قادر به سنکرون شدن نیست. این در حالی است که موتور با استاتور ساختار جدید توانایی سنکرون شدن در بار گشتاور ثابت تا $15/35$ نیوتن متر را دارد. بنا بر این نتایج شبیه سازی بهبود عملکرد راه‌اندازی موتور LSPMS با ساختار جدید استاتور را تایید می‌کند.

برای ارزیابی روش ارائه‌شده در جلوگیری از وقوع کراولینگ، بار ثابت با گشتاور 15 نیوتن متر به هر کدام از موتورهای اعمال شد. نتایج شبیه‌سازی برای مقایسه در شکل (۱۴) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود موتور با ساختار متعارف قادر به سنکرون شدن در این گشتاور بار نبوده و با میانگین سرعت حدود 430 دور بر دقیقه که حدود یک هفتم سرعت سنکرون است می‌چرخد. که این مورد در واقع بیانگر وقوع پدیده کراولینگ ناشی از هارمونیک هفتم فضایی است. با تغییر ساختار استاتور و حذف هارمونیک هفتم، موتور جدید قادر به سنکرون کردن بار مذکور بوده، پدیده کراولینگ در این موتور اتفاق نمی‌افتد.



شکل (۱۲): عملکرد موتور با استاتور متعارف تحت بار گشتاور ثابت



شکل (۱۳): عملکرد موتور با استاتور جدید تحت بار گشتاور ثابت

- [12] H. R. Fudeh and C. M. Ong, "Modeling and Analysis of Induction Machines Containing Space Harmonics Part II: Analysis of Asynchronous and Synchronous Actions," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 8, August 1983.
- [13] H. R. Fudeh and C. M. Ong, "Modeling and Analysis of Induction Machines Containing Space Harmonics Part III, Three-Phase Cage Rotor Induction Machines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 8, August 1983.
- [14] D. A. Kocabas, "Novel Winding and Core Design for Maximum Reduction of Harmonic Magnetomotive Force in AC Motors," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 2, February 2009.
- [15] J. F. Gieras, C. Wong, and J. Cholai, "Noise of Polyphase Electric Motors," 2006 Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [16] Alger, "The nature of polyphase induction machine," John Wiley & Sons Inc., New York, 1951.
- [17] X. Liang and Y. Luy, "Harmonic Analysis for Induction Motors," IEEE CCECE/CCGEIJ, Ottawa, May 2006.
- [18] Be. Heller and V. Hamata, "Harmonic Field Effects in Induction Machines," Elsevier Scientific Publishing Company, 1977.
- [19] H. Behbahanifard and A. Sadoughu, "Cogging Torque Reduction in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor," Journal of Electrical Engineering Technology, Korea, vol. 11, no. 4, pp. 878-888, 2016.
- [6] W. Fei, P. C. K. Luk, J. Ma, J. X. Shen, and G. Yang, "A High-Performance Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor Amended From a Small Industrial Three-Phase Induction Moto," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 10, October 2009.
- [7] M. Popescu, T. J. E. Miller, M. I. McGilp, and F. J. H. Kalluf, "Effect of Winding Harmonics on the Asynchronous Torque of a Single-Phase Line-Start Permanent-Magnet Motor," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, no. 4, July/August 2006.
- [8] B.-T. Kim and B.-I. Kwon, "Influence of Space Harmonics on Starting Performance of a Single-Phase Line Start Permanent-Magnet Motor," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 12, December 2008.
- [9] A. Takahashi, S. Kikuchi, K. Miyata, and A. Binder, "Asynchronous Torque of Line-Starting Permanent-Magnet Synchronous Motors," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, no. 2, June 2015.
- [10] V. B. Honsinger, "Permanent magnet machines: Asynchronous operation," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-99, no. 4, pp. 1503-1509, Jul./Aug. 1980.
- [11] H. R. Fudeh and C. M. Ong, "Modeling and Analysis of Induction Machines Containing Space Harmonics Part I: Modeling and Transformation," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 8, August 1983.

**Starting Performance Improvement of Line Start PMSM by
Reduction of Space Harmonics**

H. R. Behbahanifard, A. R. Sadoughi*, H. Meshghinkelk

MalekAshtar University of Technology

(Received: 13/04/2016, Accepted: 08/11/2016)

Abstract

Line start permanent magnet synchronous motors possess many attractive features including high efficiency, low loss, high power factor, small volume and light weight. Also they need no inverter for starting which is economical for many single speed applications such as most fans, pumps and compressors. Therefore LSPMS motors have been considered as an alternative for induction motors, but the starting performance of LSPMS motors have been a challenging issue concerned by many researchers so far. Compared to Induction motors, because of braking torque due to permanent magnets, the winding space harmonics and their negative impacts on LSPMS motors torque characteristics should be considered more serious. In this paper, first the mmf distribution of stator winding in the air gap is studied based on Fourier analysis. Then by using an optimization process, a new stator winding has been developed, which has a lower harmonic content in its mmf than the conventional winding. Finally the method is applied to an existing LSPMS motor and its performance is obtained by a finite element analysis.

Keywords: Line Start PMS Motor, mmf distribution, space harmonics, starting performance, crawling

* Corresponding author E-mail: sadoughi@mut-es.ac.ir