

کنترل برخط موقعیت کموتاسیون موتور سوئیچ رلوکتانس خطی با قسمت متحرک قطعه‌ای

علی زارع چاوشی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ بابک گنجی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان - کاشان - ایران - a.zare@grad.kashanu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان - کاشان - ایران - bganji@kashanu.ac.ir

چکیده: در مقاله حاضر، از یک تابع توزیع نیرو به منظور کنترل و کاهش تموج و نوسان‌های ذاتی موجود در نیروی خروجی موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی با قسمت متحرک قطعه‌ای استفاده می‌شود. موقعیت‌های روشن و خاموش شدن کلیدها از پارامترهای کنترلی مهم در توابع توزیع نیرو می‌باشند و انتخاب مناسب آن‌ها تأثیر بسزایی در افزایش و کاهش اثربخشی تابع استفاده‌شده به منظور کم کردن تموج نیرو دارد. به همین دلیل در این مقاله، دو الگوریتم کنترلی به منظور تعیین برخط موقعیت مناسب عملکرد هر کلید ارائه شده است. این الگوریتم‌ها به صورت برخط و با تغییر نقطه کار موتور، موقعیت‌های مطلوب عملکرد هر کلید را محاسبه کرده و به منظور ایجاد منحنی نیروی مرجع به تابع توزیع نیرو می‌فرستند. الگوریتم‌های ارائه‌شده، تأثیر قابل توجهی در کاهش تموج نیروی خروجی و تلفات مسی دارند و باعث افزایش راندمان موتور می‌شوند. تأثیر روش‌های کنترلی ارائه‌شده در این مقاله بر عملکرد موتور به منظور کاهش نوسان‌های ذاتی نیرو و تلفات مسی، توسط نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر روی یک موتور نمونه نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: موتور سوئیچ رلوکتانس خطی، قسمت متحرک قطعه‌ای، کنترل تموج نیرو، تابع توزیع نیرو، مدل‌سازی.

Online Commutation Angle Control of Linear Switched Reluctance Motor with Segmental Translator

A. Zare Chavoshi¹, MSc Student; B. Ganji², Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: a.zare@grad.kashanu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: bganji@kashanu.ac.ir

Abstract: In the present paper, a force distribution function is used to control and reduce ripple and inherent fluctuations in output force of segmental translator linear switched reluctance motors (STLSRM). The turn-on and turn-off angles are the important control parameters for the force distribution functions and proper selection of them has significant effect on increasing and decreasing effectiveness of the function used for reducing the force ripple. In order to determine the proper operation position of each switch, two control algorithms are proposed in this paper. When changing motor operating point, online calculation of the optimum turn-on and off angles is done using the proposed algorithms and the obtained values are used for force distribution function to make the reference force profile. The proposed algorithms have a significant impact on reduction of force output ripple and copper losses and increase of the motor efficiency. The effectiveness of the proposed control methods in control of the motor performance to reduce inherent force ripple and copper losses is evaluated using the simulation results given for a typical motor.

Keywords: Linear switched reluctance motor, segmental translator, force ripple control, force distribution function, modeling.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۴، ۱۳۹۶/۰۱/۰۷ و ۱۳۹۶/۰۴/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۳

نام نویسنده مسئول: بابک گنجی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کاشان - دانشگاه کاشان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی به دلیل ساختار ساده، استحکام مکانیکی بالا و قابلیت تحمل خطا برای کاربردهایی که به ردیابی دقیق موقعیت نیاز دارند انتخاب بسیار مناسبی بوده و می‌توانند جایگزین مطلوبی برای موتورهای القایی و سنکرون خطی باشند [۱-۳]. در این موتورها به دلیل عدم وجود سیم‌بندی بر روی قسمت متحرک، تلفات مسی در مقایسه با دیگر موتورهای خطی کاهش یافته و در نوع قسمت متحرک غیرفعال از وزن قسمت متحرک نیز کاسته شده است. همین عامل باعث می‌شود تا دقت موقعیتیابی در این موتورها افزایش یابد. علاوه بر این در موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی برخلاف دیگر موتورهای خطی متداول، به جای استفاده از سیم‌پیچ‌های توزیع‌شده، سیم‌بندی‌های هر فاز به صورت متمرکز در هر قطب استاتور و یا قسمت متحرک قرار می‌گیرند که ساخت آن بسیار ساده‌تر بوده و به تعمیر و نگهداری کم‌تری نیاز دارند. به‌تازگی نوع قطعه‌ای موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی نیز ارائه شده است که در آن، قسمت متحرک به جای ساختار دندانه‌ای از بخش‌های جداگانه‌ای به نام قطعه تشکیل شده است [۴]. در موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی با قسمت متحرک قطعه‌ای در مقایسه با موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی متداول، شار مغناطیسی در موقعیت هم‌راستایی کامل از مسیر کوتاه‌تری عبور خواهد کرد. به همین دلیل مقدار اندوکتانس در این موقعیت بیش‌تر شده و نیروی خروجی موتور افزایش یافته است.

علی‌رغم مزیت‌های ذکرشده برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی و نوع قطعه‌ای آن، این موتورها در هر گام حرکت و در هنگام وجود هم‌پوشانی بین قطب‌های استاتور و قسمت متحرک به اشباع رفته و مشخصه‌های مغناطیس‌شوندگی آن غیرخطی می‌شود. وجود مشخصه غیرخطی در موتور باعث ایجاد تموج و نوسان‌های ذاتی در نیروی خروجی موتور خواهد شد. علاوه بر این، ساختار غیرخطی موتور و وجود اشباع در مشخصه موتور باعث می‌شود تا معرفی مدلی که بتواند رفتار موتور را در شرایط عملکرد مختلف به‌خوبی نشان دهد بسیار مشکل بوده و به تحلیل‌های غیرخطی پیچیده‌ای نیاز می‌باشد [۵]. عدم وجود مدل کامل و دقیق از موتور باعث می‌شود تا پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی به‌منظور کاهش تموج نیروی خروجی مشکل باشد. بنا به دلایل ذکرشده، تاکنون کم‌تر به موضوع کنترل این موتورها پرداخته شده است به‌نحوی که برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی با قسمت متحرک قطعه‌ای هنوز هیچ روش کنترلی در مقالات ارائه نشده است. هدف این مقاله ارائه و ارزیابی یک تابع توزیع نیرو به‌منظور کاهش تموج‌های ذاتی در نیروی خروجی موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی با قسمت متحرک قطعه‌ای می‌باشد.

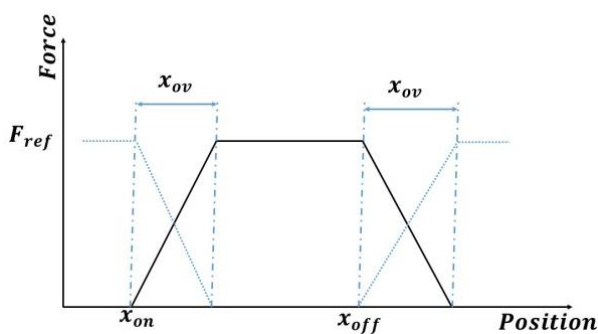
کنترل مستقیم نیروی خروجی در موتورهای سوئیچ رلوکتانس را می‌توان با کنترل مجموع نیروی خروجی سه فاز موتور و یا توسط کنترل برخط نیروی تولیدی هر فاز انجام داد. در روش اول نیروی

خروجی موتور، نیروی مرجع را در محدوده باند هیستریزس دنبال خواهد کرد [۶-۷]. در این روش هیچ توجهی به نحوه توزیع نیرو در هر فاز نخواهد شد و تنها مجموع نیروی خروجی موتور در محدوده باند هیستریزس نگه داشته می‌شود. در صورتی که در روش‌های کنترل برخط، نیروی خروجی هر فاز با توجه به موقعیت قسمت متحرک در هر لحظه کنترل می‌شود. یکی از روش‌های کنترل برخط نیروی خروجی موتور، روش تابع توزیع نیرو می‌باشد. در این روش با ارائه یک تابع خاص، نحوه توزیع نیرو بین هر فاز با توجه به موقعیت قسمت متحرک به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که علاوه بر کنترل برخط نیروی هر فاز، مجموع نیروی خروجی موتور نیز نیروی مرجع را دنبال خواهد کرد. توابع توزیع نیرو منحصر و یکتا نبوده و با استفاده از توابع بسیاری می‌توان نوسان‌های ذاتی موجود در موتور را کاهش داد. البته هر تابع بایستی با توجه به معیارهایی همچون میزان تموج نیروی خروجی، نرخ تغییرات شارپیوندی و جریان و همچنین سهم تابع ارائه‌شده در تلفات مسی، مورد ارزیابی قرار گیرد [۸].

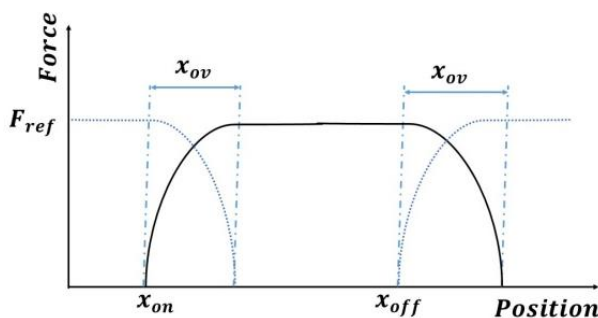
در [۹] ضمن ارائه ساختار متفاوتی برای مبدل استفاده‌شده در موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی، از یک تابع توزیع نیروی مربعی به‌منظور کاهش تموج نیروی خروجی موتور استفاده شده است. در [۱۰] تابعی ارائه شده است که در آن نیروی خروجی هر فاز در طول دوره کموتاسیون به‌صورت خطی با موقعیت قسمت متحرک تغییر می‌کند. برای کاهش تموج نیروی خروجی موتور سوئیچ رلوکتانس خطی، تحریک هم‌زمان چندفاز با استفاده از یکی از توابع توزیع شناخته‌شده در [۱۱] معرفی شده است. در [۱۲] کنترل سرعت قسمت متحرک و کاهش تموج نیروی خروجی موتور با معرفی مدلی غیرخطی از موتور و با استفاده از یک تابع توزیع نیرو، انجام شده است. در [۱۳] تابع توزیع نیروی ارائه‌شده باعث می‌شود تا نیروی خروجی موتور در طول دوره کموتاسیون به‌صورت نمایی با موقعیت قسمت متحرک تغییر کند. با معرفی یک تابع توزیع جدید در [۱۴]، کنترل لحظه‌ای موتور سوئیچ رلوکتانس خطی دولبه استفاده‌شده در یک آسانسور به‌منظور کاهش ریپل نیروی خروجی مطرح شده است.

هدف از پیاده‌سازی روش تابع توزیع نیرو در موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی، علاوه بر کم‌کردن تموج نیروی خروجی موتور، کاهش تلفات مسی و افزایش قابلیت مشخصه نیرو - سرعت نیز می‌باشد. به‌منظور دستیابی به این اهداف، بایستی پارامترهای کنترلی این توابع به‌صورت مطلوبی تعیین شوند. در بیش‌تر روش‌هایی که از تابع توزیع نیرو به‌منظور کاهش تموج نیروی خروجی موتور استفاده می‌شود، موقعیت‌های عملکرد هر کلید به‌صورت برون خط محاسبه و تعیین می‌شوند. درحالی‌که این موقعیت‌ها تابع نقطه کار موتور بوده و با تغییر سرعت و یا نیروی مرجع، باید تغییر کنند. در بیش‌تر مقالات منتشرشده در این زمینه، موقعیت‌های مذکور برای یک نقطه کار مشخص معمولاً از تحلیل عملکرد موتور به روش‌های مختلف برای مثال روش اجزاء محدود و یا از طریق اندازه‌گیری محاسبه می‌شوند و

کنترل کننده انتگرالی - تناسبی ایجاد کرد. همچنین می توان با اندازه گیری موقعیت قسمت متحرک و با استفاده از مشخصه های نیرو - جریان - موقعیت که از اندازه گیری های واقعی یا تحلیل های اجزاء محدود به دست آمده است، جریان هر فاز موتور را در هر موقعیت قسمت متحرک به دست آورد [۱۵]. چنانچه از مدل خطی موتور استفاده شود، با داشتن نحوه تغییرات اندوکتانس نسبت به موقعیت قسمت متحرک، جریان مرجع هر فاز موتور را می توان با استفاده از (۲) محاسبه کرد [۱۱]. توابع توزیع متداول در موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی به دو گروه توابع توزیع خطی و غیرخطی تقسیم می شوند [۱۶]. در توابع خطی نیروی مرجع هر فاز در طول دوره کموتاسیون به صورت خطی با موقعیت قسمت متحرک تغییر می کند در حالی که در توابع غیرخطی نیروی خروجی هر فاز در دوره کموتاسیون تغییراتی سینوسی، نمایی و یا مکعبی دارد. منحنی این دو نوع تابع در شکل های ۱ و ۲ رسم شده است.



شکل ۱: منحنی توابع توزیع خطی



شکل ۲: منحنی توابع توزیع غیرخطی

تابع توزیع نیروی استفاده شده در این مقاله به منظور کاهش تموج نیروی خروجی موتور و پیاده سازی الگوریتم های تعیین موقعیت بهینه عملکرد کلیدها، به صورت یک تابع نمایی و به شکل زیر می باشد [۱۷]:

$$FDF = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq x_{on} \\ f_{rise} & x_{on} \leq x \leq x_{on} + x_{ov} \\ f_{down} & x_{on} + x_{ov} \leq x \leq x_{off} \\ 0 & x_{off} \leq x \leq x_{off} + x_p \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{rise} = F_{ref} \left[1 - \exp\left(\frac{-(x - x_{on})^2}{x_{ov}}\right) \right] \quad (4)$$

در الگوریتم کنترلی مطرح شده مورد استفاده قرار می گیرند. از این رو با توجه به اهمیت موضوع، در مقاله حاضر دو الگوریتم کنترلی به منظور محاسبه برخط موقعیت های مطلوب عملکرد کلیدها در موتور سوئیچ رلوکتانس خطی با قسمت متحرک قطعه ای ارائه شده است. به علاوه، تأثیر این الگوریتم ها در کاهش نرخ تغییرات شار پیوندی و تلفات بررسی شده است. با پیاده سازی این الگوریتم ها در هنگام تغییر نیرو و یا سرعت مرجع، موقعیت عملکرد هر کلید نیز تغییر خواهد کرد تا از ورود موتور به ناحیه تولید نیروی منفی (بازیاب) و ایجاد تموج در نیروی خروجی موتور جلوگیری شود.

در ادامه این مقاله ابتدا در قسمت ۲ انواع توابع توزیع نیرو و روابط حاکم بر موتور بررسی شده و تابع توزیع استفاده شده در این مقاله ارائه خواهد شد. در قسمت های ۳ و ۴ الگوریتم های تعیین برخط موقعیت مطلوب کلیدها ارائه خواهد شد و در قسمت ۵ معیارهای ارزیابی تابع توزیع نیرو شرح داده می شوند. نتایج شبیه سازی به منظور بررسی تأثیر روش ارائه شده در کاهش تموج نیروی خروجی موتور در قسمت ۶ نشان داده خواهد شد و در نهایت نتیجه گیری در قسمت ۷ ارائه می شود.

۲- توابع توزیع نیرو

در موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی تبدیل انرژی از حالت مغناطیسی به مکانیکی به نحوه تغییرات شار پیوندی موتور نسبت به جریان و موقعیت قسمت متحرک بستگی دارد. نیروی تولید شده توسط هر فاز موتور با اعمال جریان i در موقعیت قسمت متحرک x را می توان به این صورت بیان کرد [۲]:

$$F = \frac{\partial \int \lambda(i, x) di}{\partial x} \quad (1)$$

در این رابطه λ شار پیوندی موتور می باشد. شار پیوندی در موتورهای سوئیچ رلوکتانس تابعی غیرخطی از جریان و موقعیت می باشد. به همین دلیل به دست آوردن رابطه مشخص و معین به منظور تعیین مقدار دقیق نیروی خروجی هر فاز از طریق روابط ریاضی، تقریباً غیرممکن می باشد. با این حال در بسیاری از مراجع از تأثیر جریان در شار پیوندی موتور صرف نظر شده و فرض می شود که مشخصه مغناطیس شوندگی موتور به صورت خطی و تنها با موقعیت قسمت متحرک تغییر خواهد کرد [۱۵]. در این صورت با فرض عملکرد دائم موتور در حالت خطی، نیروی خروجی هر فاز را می توان به این صورت بیان کرد:

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} \quad (2)$$

در این رابطه $L(x)$ اندوکتانس موتور می باشد که تنها با موقعیت قسمت متحرک تغییر می کند. در روش تابع توزیع نیرو، منحنی نیروی مرجع توسط توابع ارائه شده و با توجه به موقعیت قسمت متحرک ایجاد می شود. در این روش جریان مرجع هر فاز را می توان توسط تفاضل نیروی مرجع و نیروی خروجی موتور و با عبور از یک

در این رابطه V_{dc} ولتاژ لینک dc و R مقاومت اهمی سیم پیچها می باشد. با صرف نظر از مقاومت اهمی سیم پیچها و با فرض ثابت ماندن اندوکتانس در بازه x_1 تا x_{on} ، عضو اول و دوم (۶) حذف خواهند شد و نحوه تغییرات شار پیوندی موتور را می توان به صورت حاصل ضرب اندوکتانس در جریان سیم پیچ بیان کرد. اندوکتانس موتور در بازه x_1 تا x_{on} برابر با اندوکتانس غیرهم راستایی کامل می باشد. تغییرات جریان نسبت به زمان را نیز می توان به صورت حاصل ضرب تغییرات جریان نسبت به موقعیت و سرعت قسمت متحرک بیان کرد. بنابراین، (۶) به این صورت ساده می شود:

$$V_{dc} = L_{un} \frac{I_{ref} - 0}{x_1 - x_{on}} \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

لازم به ذکر است که موقعیت x_1 را می توان به راحتی از مشخصه اندوکتانس موتور که از اندازه گیری های عملی و یا از تحلیل های اجزاء محدود تعیین می شود به دست آورد. بنابراین موقعیت اولیه روشن شدن هر کلید به این صورت محاسبه می شود:

$$x_{o1} = x_1 - x_{on} = \frac{L_{un} I_{ref}}{V_{dc}} v_t \quad (8)$$

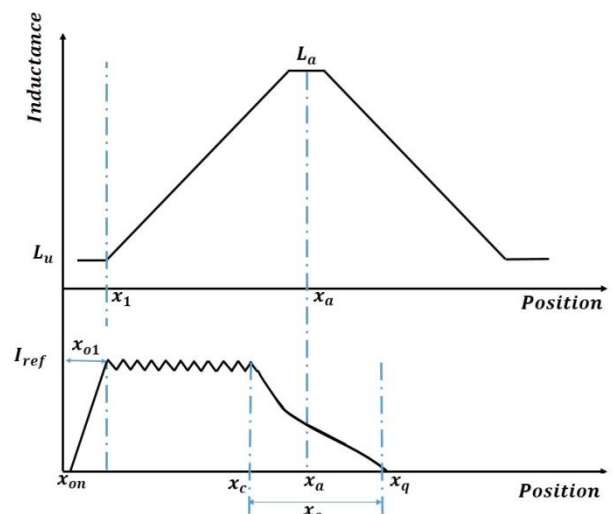
تعیین موقعیت بهینه روشن شدن کلیدها از اهمیت زیادی برخوردار می باشد. اگر کلیدهای هر فاز جلوتر از موقعیت مطلوب خود روشن شوند، جریان در هنگام ورود به ناحیه شروع هم پوشانی نیز افزایش یافته و باعث ایجاد موج در نیروی خروجی موتور خواهد شد. چنانچه کلیدهای هر فاز، عقب تر از موقعیت مطلوب خود روشن شوند جریان در موقعیت غیرهم راستایی کامل به مقدار ماکزیمم خود خواهد رسید. در حالی که در این ناحیه هیچ نیروی تولید نخواهد شد و باعث افزایش تلفات کلیدزنی و کاهش راندمان موتور می شود [۱۸]. بایستی این موضوع را در نظر گرفت که (۸) با صرف نظر از مقاومت اهمی سیم پیچها به دست آمده و اندوکتانس موتور تا موقعیت x_1 ثابت در نظر گرفته شده است. با این حال به دلیل اثر قطبهای استاتور و قسمت متحرک بر یکدیگر، اندوکتانس در این ناحیه دارای مقداری ثابت نبوده و عبور جریان از سیم پیچها نیز باعث ایجاد افت ولتاژ در موتور خواهد شد.

بنا به دلایل ذکر شده، ممکن است فرضیات در نظر گرفته شده باعث شود تا موقعیت مطلوب روشن شدن هر کلید متفاوت از موقعیت محاسبه شده توسط (۸) باشد. به همین دلیل در این مقاله به منظور تعیین موقعیت برخط روشن شدن کلیدها از الگوریتم مطرح شده در [۱۸] که برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس دورانی ارائه شده است، کمک گرفته می شود. نحوه عملکرد این الگوریتم به این صورت می باشد که ابتدا با مشاهده هر گونه تغییر در سرعت و یا جریان، با استفاده از (۸) مقدار اولیه ای برای x_{on} تعیین شده و توسط مقدار ثابت x_1 ، بازه x_{o1} به دست خواهد آمد. سپس x_{o1} محاسبه شده در مرحله قبل (x_{o1}^p) با موقعیت روشن شدن کلید در گام قبل (x_{on}^p) جمع شده و با مقدار ثابت x_1 مقایسه خواهد شد. تفاضل این دو مقدار نیز با Δx

$$f_{down} = F_{ref} \left[\exp\left(\frac{-(x - x_{off})^2}{x_{ov}}\right) \right] \quad (5)$$

در این روابط f_{down} و f_{rise} به ترتیب نحوه افزایش و کاهش نیرو در طول دوره کموتاسیون می باشد. پارامترهای x_{on} و x_{off} به ترتیب موقعیت روشن و خاموش شدن هر کلید بوده و x_{ov} و x_p دوره هم پوشانی و دوره عملکرد هر فاز را نشان می دهد.

همان گونه که از (۳) مشاهده می شود، در این تابع نیروی مرجع هر فاز موتور به موقعیت های خاموش و روشن شدن کلیدها وابسته بوده و انتخاب مناسب این موقعیتها می تواند در کاهش موج نیروی خروجی و افزایش راندمان موتور تأثیر بسزایی داشته باشد. شکل ۳ نحوه تغییرات اندوکتانس و جریان موتور نسبت به موقعیت قسمت متحرک را نشان می دهد. مشاهده می شود که جریان در لحظه های فعال و غیرفعال شدن هر فاز به صورت برخط تغییر نخواهد کرد. علت این امر آن است که موتور دارای خاصیت القایی بوده و نحوه تغییرات جریان در لحظه شروع تحریک هر فاز و انتهای دوره عملکرد آن به ثابت زمانی سیم پیچها بستگی دارد. به همین دلیل تعیین موقعیت های مطلوب عملکرد هر کلید از اهمیت زیادی در افزایش تأثیر تابع ارائه شده در کنترل و کاهش موج نیرو برخوردار است.



شکل ۳: نحوه تغییرات اندوکتانس و جریان نسبت به موقعیت قسمت متحرک

۳- تعیین موقعیت مطلوب روشن شدن هر کلید

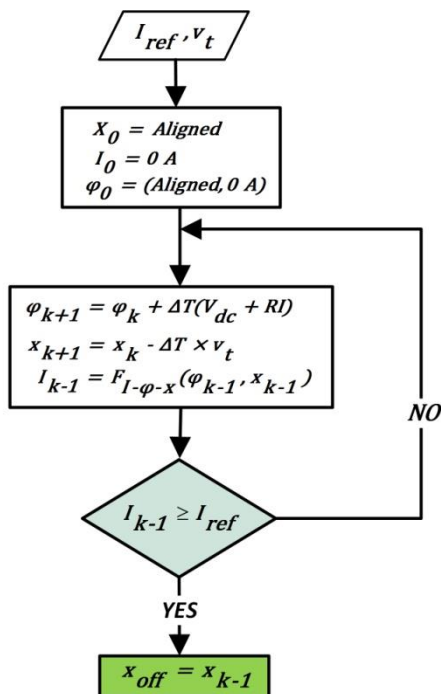
برای منحنی اندوکتانس ارائه شده در شکل ۳ فرض نماییم کلیدهای هر فاز در موقعیت x_{on} روشن شوند و در بازه $x_1 - x_{on}$ اندوکتانس ثابت بماند. در این صورت، اگر بخواهیم جریان در موقعیت x_1 به مقدار مرجع خود برسد، می توان موقعیت شروع تحریک کلیدهای هر فاز را با استفاده از رابطه ولتاژ موتور محاسبه کرد. رابطه ولتاژ در موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی به این صورت بیان می شود:

$$V_{dc} = Ri + \frac{\partial \lambda}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \lambda}{\partial i} \frac{di}{dt} \quad (6)$$

هر فاز به مقدار صفر خواهد رسید. سپس در این موقعیت و در جریان صفر آمپر، شارپیوندی موتور در جریان و موقعیت مذکور با استفاده از مشخصه جریان - شار - موقعیت، استخراج خواهد شد. در این مرحله شارپیوندی و موقعیت مرحله قبل با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) تخمین زده شده و جریان موتور توسط مشخصه جریان برحسب موقعیت و شار به دست خواهد آمد. در مرحله بعد، جریان به دست آمده با جریان مرجع مقایسه شده و چنانچه با مقدار مرجع خود برابر باشد، موقعیتی که در آن، جریان مذکور به دست آمده است به عنوان موقعیت بهینه خاموش شدن کلید در نظر گرفته خواهد شد. در غیر این صورت الگوریتم با تخمین موقعیت و شار مرحله قبل و با محاسبه دوباره جریان تکرار خواهد شد.

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + \Delta T (V_{dc} + Ri) \quad (9)$$

$$x_{k+1} = x_k - \Delta T v_t \quad (10)$$



شکل ۵: فلوجارت الگوریتم محاسبه موقعیت خاموش شدن هر کلید

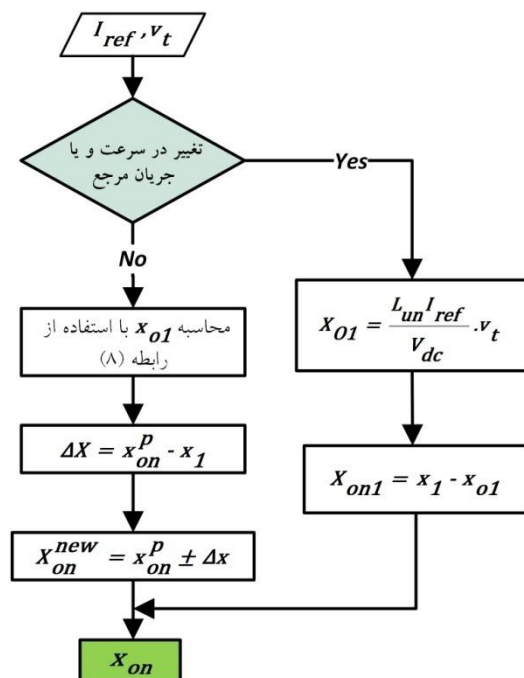
۵- معیارهای ارزیابی تابع توزیع نیرو

۵-۱- تغییرات شارپیوندی نسبت به موقعیت قسمت متحرک هدف اصلی تابع توزیع نیرو، کاهش تموجها و نوسانهای موجود در نیروی خروجی موتور می باشد. از سوی دیگر کاهش تموج نیرو و دنبال کردن نیروی مرجع توسط موتور، مستلزم آن است که کنترل کننده های جریان و یا شار به خوبی مقدار مرجع خود را دنبال کنند [۱۶]. این کنترل کننده ها در شرایطی که حالت اشباع در آنها رخ ندهد به خوبی مقدار مرجع خود را دنبال خواهند کرد. به عبارت دیگر ولتاژ مورد نیاز موتور بایستی کم تر از مقدار ولتاژ لینک dc باشد تا از ورود کنترل کننده ها به حالت اشباع جلوگیری شود. بنابراین انتظار

نشان داده می شود. چنانچه مقدار به دست آمده برای Δx مثبت باشد، موقعیت روشن شدن مرحله بعد بایستی کاهش یابد و چنانچه مقدار Δx منفی باشد، به افزایش موقعیت در مرحله بعد نیاز می باشد. این الگوریتم تا محاسبه مقدار مناسبی برای موقعیت مطلوب روشن شدن کلیدهای هر فاز تکرار می شود. ضمن این که چنانچه در طول عملکرد این الگوریتم تغییری در سرعت و جریان مرجع مشاهده شود این فرآیند با محاسبه دوباره مقدار x_{o1} تکرار خواهد شد. نحوه عملکرد این الگوریتم در شکل ۴ نشان داده شده است.

۴- تعیین موقعیت بهینه خاموش شدن هر کلید

با توجه به شکل ۳ در موقعیت x_c هم زمان با اتمام ناحیه عملکرد موتوری هر فاز، ولتاژ لینک dc به منظور کاهش سریع جریان به صورت معکوس به فاز مورد نظر اعمال می شود. همان گونه که مشاهده می شود تا موقعیت x_a ولتاژ اعمالی به موتور و نیروی ضد محرکه دارای پلاریته یکسان بوده و جریان به سرعت کاهش می یابد. پس از عبور از این موقعیت به دلیل کاهش شیب اندوکتانس، پلاریته نیروی ضد محرکه تغییر خواهد کرد و با کاهش سریع جریان مخالفت می کند و جریان با نرخ کندتری کاهش می یابد. به همین دلیل تعیین موقعیت مناسب خاموش شدن کلیدهای هر فاز از اهمیت بالایی در کاهش تموج نیروی خروجی موتور برخوردار است.



شکل ۴: فلوجارت الگوریتم محاسبه موقعیت روشن شدن هر کلید

در این بخش الگوریتمی به منظور تعیین برخط موقعیت مطلوب خاموش شدن کلیدها با توجه به تغییرات سرعت و جریان موتور، ارائه می شود. با توجه به شکل ۵، نحوه عملکرد این الگوریتم به این صورت می باشد که ابتدا فرض می شود جریان در انتهای دوره عملکرد موتوری

$$\frac{di}{dt} = \frac{V - Ri - v_t \partial \lambda / \partial x}{v_t \partial \lambda / \partial i} \quad (17)$$

نرخ تغییرات جریان حتی در ولتاژ و سرعت ثابت نیز به صورت یک تابع غیرخطی می باشد. محاسبه بیشترین نرخ تغییرات جریان از یک تابع غیرخطی بسیار مشکل است. بنابراین بهتر است از معیار شارپیوندی به منظور ارزیابی تابع توزیع نیرو و تعیین محدوده کنترل کننده استفاده شود. به همین جهت در این مقاله از تغییرات شارپیوندی موتور نسبت به موقعیت قسمت متحرک به عنوان معیار ارزیابی تابع توزیع نیروی ارائه شده استفاده می شود.

۵-۳- تلفات مسی

یکی دیگر از معیارهای ارزیابی یک تابع توزیع نیرو، میزان کاهش تلفات مسی در صورت استفاده از تابع ارائه شده می باشد. در موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی میزان تلفات مسی به نوع تابع توزیع ارائه شده (برای مثال f_{rise} و f_{down}) و پارامترهای کنترل آن همچون موقعیت‌های روشن و خاموش شدن کلیدها بستگی دارد [۱۹]. از سوی دیگر میزان تلفات مسی به صورت مستقیم بر راندمان موتور تأثیر می گذارد. تلفات مسی در موتور با مجذور جریان هر فاز رابطه دارد. مجذور جریان موتور در طول عملکرد هر فاز را می توان به صورت زیر محاسبه کرد [۷]:

$$i^2 = \frac{1}{x_p} \int_{x_{on}}^{x_{off}} i^2(x) dx \quad (18)$$

همان گونه که از (۱۸) مشاهده می شود میزان جریان موتور و تلفات مسی با موقعیت عملکرد کلیدهای هر فاز رابطه دارد. بنابراین، با تعیین موقعیت مطلوب عملکرد هر کلید می توان تلفات مسی را نیز در موتور کاهش داد.

بلوک دیاگرام کلی کنترل موتور سوئیچ رلوکتانس خطی با قسمت متحرک قطعه ای در شکل ۶ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود ابتدا نیروی مرجع اولیه به تابع توزیع نیرو ارسال می شود. این تابع با استفاده از موقعیت‌های مطلوب روشن و خاموش شدن کلیدها که توسط بلوک‌های مربوطه به دست می آیند و به کمک تابع نمایی ارائه شده، منحنی نیروی مرجع را با در نظر گرفتن موقعیت‌های مطلوب عملکرد هر کلید محاسبه می نماید. نیروی مرجع ایجاد شده را می توان با عبور از یک کنترل کننده تناسبی - انتگرالی به جریان مرجع تبدیل کرد و سپس توسط کنترل کننده هیستریزس جریان پالس‌های لازم را به کلیدهای مبدل اعمال کرد. همچنین می توان به صورت مستقیم توسط کنترل کننده‌های هیستریزس نیرو، نیروی خروجی موتور را در محدوده باند هیستریزس نگه داشت. همان گونه که مشاهده می شود، بلوک‌های تعیین وضعیت کلیدها فقط به سرعت و جریان موتور وابسته بوده و به کمیت‌های دقیق موتور نیاز نیست.

می رود نرخ تغییرات شارپیوندی و یا جریان موتور تا حد ممکن ناچیز باشد. به همین دلیل نرخ تغییرات شار و یا جریان از معیارهای مهم در ارزیابی یک تابع توزیع نیرو می باشد. با صرف نظر از مقاومت اهمی سیم پیچ‌ها، نرخ تغییرات شارپیوندی موتور را می توان به این صورت بیان کرد:

$$\frac{d\lambda}{dt} = V_{dc} \quad (12)$$

با بسط طرف سمت چپ این رابطه، نرخ تغییرات شار را می توان نسبت به موقعیت و سرعت قسمت متحرک به این صورت بیان کرد:

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{V_{dc}}{v_t} \quad (13)$$

بنابراین به منظور ردیابی دقیق شارپیوندی موتور توسط تابع توزیع ارائه شده و کاهش تموج نیروی خروجی، بیشترین نرخ تغییرات شارپیوندی بایستی شرط زیر را برآورده کند:

$$\left(\frac{d\lambda}{dx} \right)_{\max} \leq \frac{V_{dc}}{v_{\max}} \quad (14)$$

در این رابطه v_{\max} بیشترین سرعت حرکت قسمت متحرک می باشد. تغییرات شارپیوندی موتور نسبت به موقعیت قسمت متحرک را می توان به این صورت محاسبه کرد:

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{\lambda_k - \lambda_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \quad (15)$$

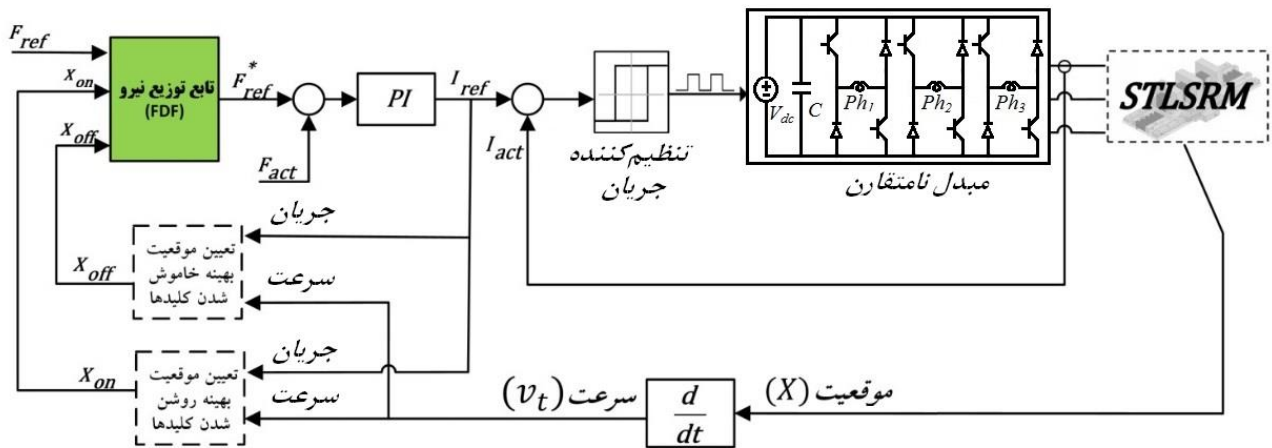
در هر لحظه با توجه به موقعیت روشن و خاموش شدن کلیدهای هر فاز، منحنی نیروی مرجع توسط تابع توزیع نیرو ساخته می شود. جریان مرجع نیز توسط کنترل کننده انتگرالی - تناسبی ایجاد شده و یا با اندازه گیری موقعیت قسمت متحرک و با استفاده از مشخصه جریان بر حسب نیرو و موقعیت تعیین خواهد شد. منحنی شارپیوندی را نیز می توان با اندازه گیری موقعیت قسمت متحرک و توسط مشخصه شار-جریان - موقعیت در هر لحظه به دست آورد. با محاسبه شارپیوندی موتور، نرخ تغییرات شار در هر موقعیت محاسبه شده و بیشترین تغییرات شار به عنوان معیار ارزیابی تابع توزیع نیرو در نظر گرفته خواهد شد. بنابراین:

$$m_\lambda = \max \left\{ \text{abs} \left(\frac{d\lambda}{dx} \right) \right\} \quad (16)$$

در این رابطه m_λ بیشترین نرخ تغییرات شارپیوندی در موتور می باشد.

۵-۲- نرخ تغییرات جریان

با توجه به رابطه ولتاژ اعمالی به موتور، نرخ تغییرات جریان نسبت به زمان به این صورت بیان می شود:



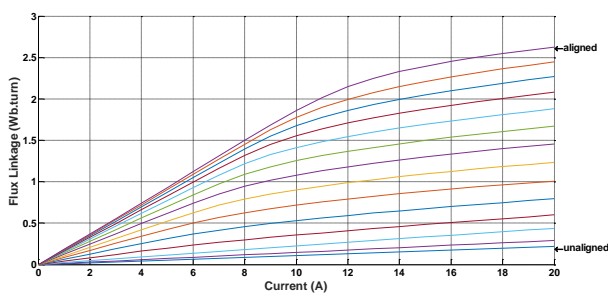
شکل ۶: بلوک دیاگرام روش تابع توزیع نیرو توسط کنترل برخط موقعیت هر کلید

۶- نتایج شبیه‌سازی

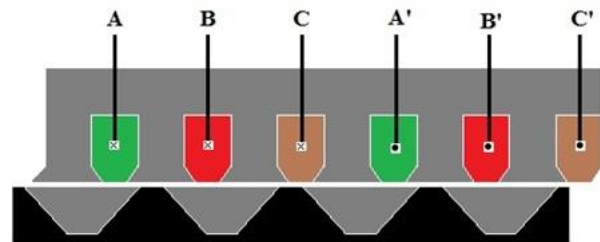
در این قسمت عملکرد الگوریتم‌های ارائه‌شده در تعیین موقعیت مطلوب عملکرد کلیدها و تأثیر آن‌ها در کاهش تموج نیروی خروجی و تلفات مسی موتور توسط نتایج شبیه‌سازی نشان داده می‌شود. این شبیه‌سازی بر روی یک موتور نمونه با برش عرضی شکل ۷ و مشخصات جدول ۱ در محیط نرم‌افزار *Matlab/simulink* انجام شده است. ورقه‌های این موتور برای استاتور و قطعه‌های قسمت متحرک از نوع M800-50A می‌باشند که منحنی مغناطیس‌شوندگی مربوط در شکل ۸ نشان داده شده است. مشخصه استاتیکی شار پیوندی با یک فاز موتور مزبور از روش اجزاء محدود دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS پیش‌بینی شده و در شکل ۹ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است شبیه‌سازی‌های این بخش در گام نمونه‌برداری ۱۰ میکروثانیه و نیروی مرجع ۵۰ نیوتن انجام شده است.

جدول ۱: مشخصات موتور نمونه [۴]

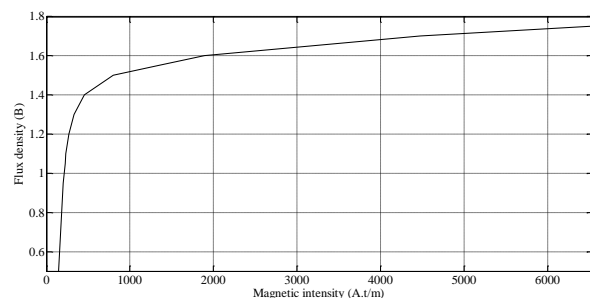
۴۶	پهنای قطب استاتور (میلی‌متر)
۴۶	پهنای شیار استاتور (میلی‌متر)
۶۷	ارتفاع قطب استاتور (میلی‌متر)
۴۶	ارتفاع هسته استاتور (میلی‌متر)
۱	طول فاصله هوایی (میلی‌متر)
۴۹	پهنای قطب قسمت متحرک (میلی‌متر)
۸۹	پهنای شیار قسمت متحرک (میلی‌متر)
۴۹	ارتفاع هسته قسمت متحرک (میلی‌متر)
۱۲۵	عمق هسته (میلی‌متر)
۱۶۰	تعداد دور بر فاز



شکل ۹: مشخصه استاتیکی شار پیوندی با یک فاز موتور نمونه

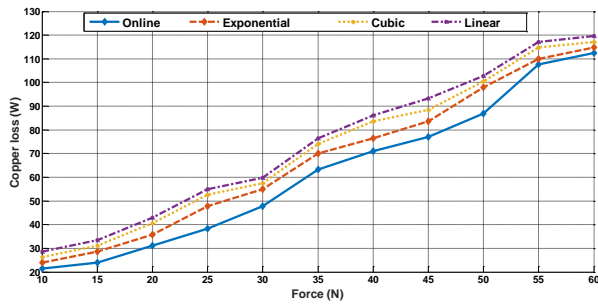


شکل ۷: برش عرضی موتور نمونه [۴]



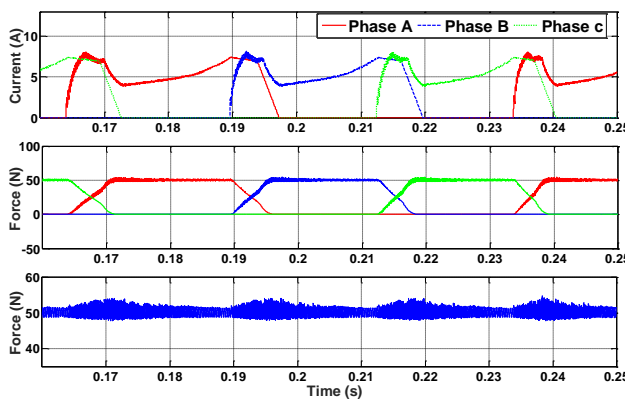
شکل ۸: منحنی مغناطیس‌شوندگی ورقه‌های موتور نمونه

شکل ۱۰ موقعیت‌های روشن شدن کلیدهای هر فاز را برای نیروهای مرجع مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش نیروی مرجع، سرعت موتور نیز افزایش یافته و اندوکتانس با سرعت بیش‌تری افزایش می‌یابد. به همین جهت کلیدهای هر فاز باید در موقعیت‌های عقب‌تری نسبت به حالت قبل روشن شوند تا جریان بتواند در دوره افزایش اندوکتانس به مقدار مرجع خود برسد.



شکل ۱۳: تلفات مسی در نیروهای مرجع مختلف

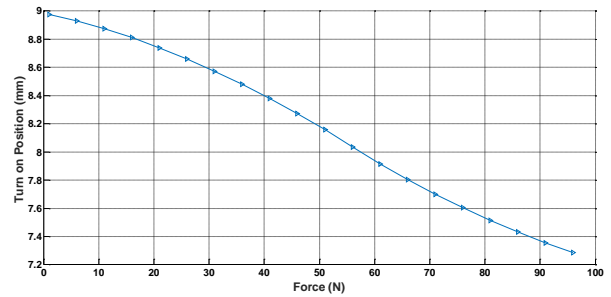
تلفات مسی در موتور رلوکتانسی سوئیچی با مجذور جریان موتور رابطه مستقیم دارد و به این خاطر با کاهش جریان می‌توان تلفات مسی را کاهش داد. در شکل ۱۳ مشهود است که با به‌کارگیری الگوریتم‌های کنترل برخط در تعیین موقعیت مطلوب عملکرد کلیدها، تلفات مسی در مقایسه با کنترل برون‌خط کلیدها در توابع نمایی، توانی و خطی کاهش یافته است. شکل موج‌های جریان، نیروی تولیدی هر فاز و مجموع نیروی خروجی موتور در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با به‌کارگیری این الگوریتم‌ها هر فاز سهم یکسانی در تولید نیروی خروجی موتور دارد و مجموع نیروی خروجی موتور نیز مقدار مرجع ۵۰ نیوتن را به‌خوبی دنبال می‌کند.



شکل ۱۴: نیروی تولیدی هر فاز و مجموع نیروی خروجی موتور

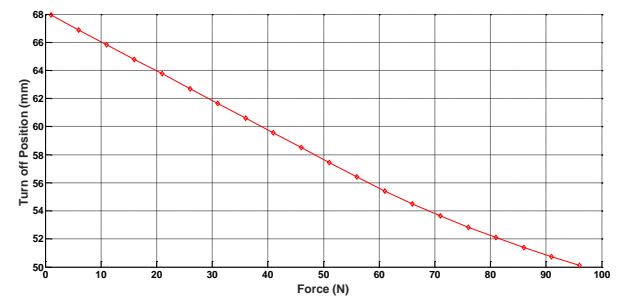
۷- نتیجه‌گیری

به‌منظور بهبود عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس خطی با قسمت متحرک قطعه‌ای در دنبال کردن نیروی مرجع و کاهش نوسان‌های ذاتی موجود در شکل موج نیروی خروجی، در مقاله حاضر از روش تابع توزیع نیرو استفاده شد و منحنی نیروی مرجع توسط یک تابع نمایی ایجاد گردید. عملکرد مطلوب و مناسب یک تابع توزیع نیرو توسط معیارهایی همچون نرخ تغییرات شار پیوندی نسبت به موقعیت قسمت متحرک، نرخ تغییرات جریان و همچنین تلفات مسی موتور ارزیابی می‌شود و معیارهای مذکور ارتباط نزدیکی با پارامترهای کنترل تابع توزیع نیرو دارند. به همین جهت با انتخاب موقعیت مطلوب عملکرد کلیدها می‌توان تأثیر سیستم کنترل را در کاهش موج نیروی خروجی موتور افزایش داد.



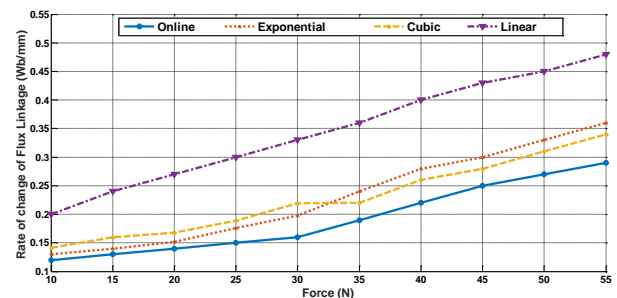
شکل ۱۰: موقعیت روشن شدن هر کلید در نیروهای مرجع مختلف

موقعیت‌های خاموش شدن کلیدهای هر فاز نیز برحسب نیروهای مرجع خواسته‌شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش نیروی مرجع به جهت جلوگیری از ورود موتور به ناحیه تولید نیروی منفی، کلیدهای هر فاز در موقعیت‌های عقب‌تری نسبت به حالت قبل خاموش می‌شوند. با توجه به ساختار مبدل نامتقارن [۶]، با خاموش شدن هم‌زمان هر دو کلید فاز، دیویدهای متناظر با کلیدها در حالت هدایت قرار می‌گیرند. در این حالت، ولتاژ لینک dc به‌صورت معکوس در دو سر سیم‌پیچ فاز موردنظر قرار گرفته و باعث کاهش سریع جریان خواهد شد.



شکل ۱۱: موقعیت خاموش شدن هر کلید در نیروهای مرجع مختلف

نرخ تغییرات شار پیوندی و تلفات مسی زمانی که از الگوریتم‌های کنترل برخط برای تعیین موقعیت عملکرد کلیدها استفاده می‌شود با حالتی که این موقعیت‌ها به‌صورت برون‌خط به کمک توابع توزیع متداول تعیین می‌شوند، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود در حالت کنترل برخط، نرخ تغییرات شار نسبت به حالت کنترل برون‌خط کم‌تر شده است که منجر به کاهش بیش‌تر موج نیروی خروجی در موتور خواهد شد.



شکل ۱۲: نرخ تغییرات شار پیوندی در نیروهای مرجع مختلف

- [9] H. Bae, B. Lee, P. Vijayraghavan and R. Krishnan, "A linear switched reluctance motor: converter and control," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 5, pp. 1351-1359, 2000.
- [10] W. Gan, N. C. Cheung and L. Qiu, "Position control of linear switched reluctance motors for high-precision applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 5, pp. 1350-1362, 2003.
- [11] H. S. Lim, R. Krishnan and N. S. Lobo, "Design and control of a linear propulsion system for an elevator using linear switched reluctance motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 2, pp. 534-542, 2008.
- [12] J. F. Pan, N. C. Cheung and Y. Zou, "An improved force distribution function for linear switched reluctance motor on Force ripple minimization with nonlinear inductance modeling," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 3064-3067, 2012.
- [13] Z. Zhang, N. C. Cheung, K. W. E. Cheng, X. Xue and J. Lin, "Direct instantaneous force control with improved efficiency for four-quadrant operation of linear switched reluctance actuator in active suspension system," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 4, pp. 1567-1576, 2012.
- [14] S. Masoudi, M. R. Feyzi and M. B. Sharifian, "Force ripple and jerk minimisation in double sided linear switched reluctance motor used in elevator application," *IET Electric Power Appl.*, vol. 10 no. 6, pp. 508-516, 2016.
- [15] S. W. Zhao and et al, "A linear switched reluctance motor based position tracking system," *13th International Power Electronics and Motion Control Conf*, pp. 1221-24, 2008.
- [16] X. D. Xue, K. W. E. Cheng and S. L. Ho, "Optimization and evaluation of torque-sharing functions for torque ripple minimization in switched reluctance motor drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 9, pp. 2076-2090, 2009.
- [17] J. Ye, B. Bilgin and A. Emadi, "An extended-speed low-ripple torque control of switched reluctance motor drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 3, pp. 1457-1470, 2015.
- [18] C. Mademlis and I. Kioskeridis, "Performance optimization in switched reluctance motor drives with online commutation angle control," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 3, pp. 448-457, 2003.
- [19] V. P. Vujičić, "Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 388-399, 2012.

در این مقاله دو الگوریتم کنترلی به منظور تعیین برخط موقعیت مطلوب عملکرد هر کلید ارائه گردید. الگوریتم‌های کنترلی ارائه شده با استفاده از روابط ریاضی ساده به صورت برخط موقعیت مطلوب عملکرد هر کلید را محاسبه می‌کنند و بنابراین به دانستن پارامترهای دقیق موتور نیاز نیست. در انتها نیز روش کنترلی ارائه شده در محیط نرم‌افزار *Matlab/simulink* بر روی یک موتور نمونه پیاده‌سازی و نتایج شبیه‌سازی به منظور تأیید اثربخشی الگوریتم‌های مطرح شده در کاهش موج نیروی خروجی موتور ارائه گردید.

مراجع

- [1] T. J. E. Miller, "Switched reluctance motor and their control", Oxford U. K. Clarendon, 1993.
- [2] R. Krishnan, "Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications", CRC press, 2001.
- [3] B. Zhang, J. Yuan, L. Qiu, N. Cheung and J. F. Pan, "Distributed coordinated motion tracking of the linear switched reluctance machine-based group control system", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 3, pp. 1480-89, 2016.
- [4] B. Ganji and M. H. Askari, "Analysis and modeling of different topologies for linear switched reluctance motor using finite element method," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, pp. 2531-38, 2016.
- [5] W. Ding and D. Liang, "Modeling of a 6/4 switched reluctance motor using adaptive neural fuzzy inference system," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 7, pp. 1796-1804, 2008.
- [6] P. L. Miguel, M. d. Rosário, A. Calado and S. Mariano. "Direct instantaneous thrust control of 3 phase linear switched reluctance actuator," *Electrical and Power Engineering, International Conf and Exposition*, pp. 436-40, 2012.
- [7] J. Liang, D. H. Lee and J. W. Ahn, "Direct instantaneous torque control of switched reluctance machines using 4-level converters." *IET electric power applications*, vol. 3, no. 4, pp. 313-323, 2009.
- [8] J. Ye, B. Bilgin and A. Emadi, "An offline torque sharing function for torque ripple reduction in switched reluctance motor drives," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 2, pp. 726-735, 2015.