

طراحی یک محرک مغناطیس دائم جدید برای کلید قدرت خلأ سطح فشار متوسط

احمد سیروس^۱، دیاکو عزیزی^۲ و سمیه یارکرمی^۲

^۱ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران، ahmadsiroos@yahoo.com

^۲ گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران، azizi.d@wtiau.ac.ir

^۲ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران، somayarkarami@gmail.com

چکیده - در این مقاله یک محرک مغناطیسی جدید برای کلید قدرت خلأ ارائه می‌شود. این محرک مغناطیسی ساختار دوپایا دارد و مغناطیس‌های دائم مورد استفاده به‌گونه‌ای در داخل آن تعبیه شده‌اند که سبب شده نیروهای اتلافی در آن کاهش یابند و باعث کاهش اندازه‌ی ساختار محرک مغناطیسی و همچنین کاهش میزان مواد استفاده شده (بخصوص ماده‌ی فرومغناطیسی) گردیده است و بدین ترتیب از نظر اقتصادی نسبت به نوع متداول آن، به میزان قابل توجهی به صرفه تر شده است. همچنین عملکرد محرک مغناطیسی پیشنهادی در مقایسه با نوع متداول آن بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است. به عنوان مثال، زمان باز کردن و زمان بسته شدن سریعتر شده و سرعت متوسط باز و بسته شدن کلید نیز افزایش داشته است. هر دو مشخصه‌ی استاتیک و دینامیک محرک مغناطیسی پیشنهادی و محرک مغناطیسی متداول توسط نرم‌افزار چندوجهی فیزیکی *Ansys Maxwell* شبیه‌سازی شده‌اند و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که هر دو محرک قادر به برآوردن احتیاجات کلید قدرت خلأ برای سطح ولتاژ مورد نظر می‌باشند. کلید واژه- کلید قدرت خلأ، محرک مغناطیسی، مشخصه‌ی استاتیک، مشخصه‌ی دینامیک.

۱- مقدمه

کلیدهای قدرت خلأ^۱ (VCBs) بطور وسیعی در سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند و این امر به سبب عملکرد خوب و قابلیت اطمینان بالای این نوع کلیدهاست. از طرف دیگر با توجه به اینکه گاز SF₆ یکی از گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود، تمایل روزافزون برای جایگزینی این نوع کلیدها با VCBها وجود دارد [۱]. مکانیزم عملیاتی، یک بخش مهم و اساسی در انواع کلیدهای قدرت به حساب می‌آید و در کلیدهای خلأ، کنتاکت متحرک در قطع‌کننده‌ی خلأ را درایو می‌کند. در سالهای اخیر یک نوع کلید قدرت خلأ که مکانیزمی جدید داشته و از خاصیت مغناطیسی آهنربا و نیروی مغناطیسی حاصل از جریان تحریک سیم‌پیچی استفاده می‌کند توسعه یافته است. این مکانیزم، محرک مغناطیس دائم (PMA)^۲ نامیده می‌شود [۲]. محرک‌های مغناطیس دائم بطور گسترده‌ای در کلیدهای قدرت خلأ بکار گرفته می‌شوند و این به سبب قابلیت اطمینان بالا، ساختار ساده، تعداد اجزاء کمتر، طول عمر طولانی‌تر و نیاز کمتر به نگهداری برای این نوع مکانیزم می‌باشد. یک محرک مغناطیس دائم، مکانیزم ساده‌ای دارد که یک نیروی الکترومغناطیسی که ناشی از جریان سیم‌پیچ تحریک مورد نظر می‌باشد را بر روی کنتاکت متحرک وارد می‌کند و سبب حرکت آن

¹ Vacuum Circuit Breakers

² Permanent Magnet Actuator

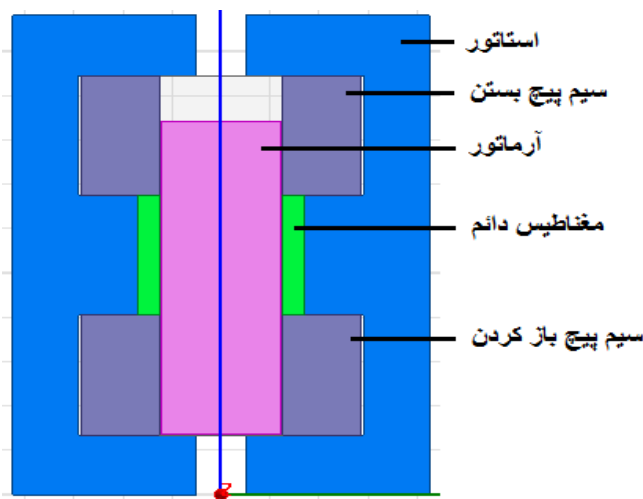
می‌شود و در وضعیت‌های ثابت، نیروی نگهداری ناشی از مغناطیس‌های دائم سبب نگهداشتن کنتاکت متحرک در وضعیت مورد نظر می‌شود [۳]-[۵]. دو نوع اصلی PMA به منظور استفاده در کلیدهای قدرت وجود دارد که نوع U و نوع E می‌باشند. PMAهای نوع U مناسب برای سطوح ولتاژ فشار ضعیف و فشار متوسط هستند در حالیکه PMAهای نوع E برای سطوح ولتاژ فشار متوسط و فشار قوی مناسبند [۶]. PMAهای نوع E خود به دو نوع تک‌پایا و دوپایا تقسیم‌بندی می‌شوند. عیبی که PMAها دارند مشخصه‌های سرعت پایین آنها می‌باشد که باعث شده این مکانیزم برای جابجایی‌های مسافت طولانی مناسب نباشد و به همین دلیل PMAها تنها برای کلیدهای قدرت خلأ سطح ولتاژ متوسط پرکاربرد می‌باشند. هرچند تحقیقاتی برای VCB سطح ولتاژ 126KV انجام شده است. همچنین پژوهش‌هایی هم جهت استفاده از PMA برای کلید قدرت هوایی صورت گرفته است [۷].

هدف این مقاله ارائه‌ی یک محرک مغناطیسی برای جابجایی 20mm می‌باشد به گونه‌ای که ساختار PMA نسبت به نوع متداول آن کوچکتر شده و در عین حال عملکرد آن هم بهبود یابد و مشخصه‌های جابجایی، سرعت، جریان تحریک و نیرو بهبود یابد. PMA پیشنهادی از نوع دوپایا بوده اما نحوه‌ی قرار گرفتن مغناطیس‌های دائم نسبت به نوع متداول فرق می‌کند. مشخصه‌های استاتیک و دینامیک مدل PMA پیشنهادی توسط یک مجموعه از معادلات به هم پیوسته حل شده و با استفاده از نرم‌افزار Ansys Maxwell شبیه‌سازی مورد نظر صورت می‌گیرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی PMA متداول و PMA پیشنهادی برای جابجایی 20mm، مقایسه می‌شوند.

۲- ساختار و اصل عمل PMA

۲-۱- ساختار و اصل عمل PMA متداول

شکل ۱ ساختار PMA متداول را نشان می‌دهد. ساختار مورد نظر یک ساختار تقارن محوری است که از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است.



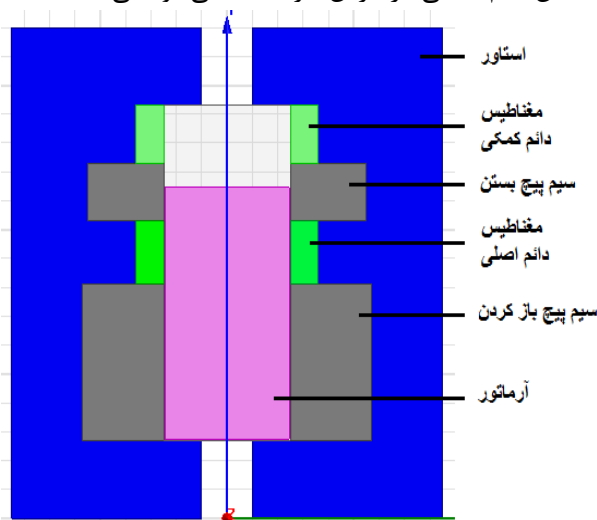
شکل ۱: ساختار دوبعدی PMA متداول

استاتور، هسته‌ی ثابت PMA است که دیگر اجزاء در داخل آن قرار می‌گیرند. آرماتور، هسته‌ی متحرک PMA می‌باشد که در داخل استاتور قرار دارد و در وضعیت بسته شدن VCB به سمت بالا می‌رود و در وضعیت باز شدن VCB به سمت پایین حرکت می‌کند و در وضعیت‌های ثابت حرکت نمی‌کند. مغناطیس دائم که در داخل استاتور تعبیه شده وظیفه‌ی نگهداری آرماتور در حالت‌های ثابت بسته یا باز را بر عهده دارند. سیم‌پیچ تحریک بستن در بالای مغناطیس دائم قرار گرفته و حول آرماتور پیچیده شده است و وظیفه‌ی تحریک آرماتور به نحوی که باعث بالا رفتن آن شود را بر عهده دارد. سیم‌پیچ تحریک باز کردن نیز در پایین مغناطیس دائم قرار گرفته و باعث تحریک آرماتور و حرکت آن به سمت پایین می‌شود. شفت عملیاتی نیروی ناشی از حرکت هسته‌ی متحرک را از طریق یک واسط به کنتاکت متحرک VCB منتقل می‌کند.

وقتی VCB در وضعیت ثابت باز است آرماتور در پایین قرار دارد. چگالی شار پسماند ناشی از مغناطیس‌های دائم مسیر خود را از طریق حلقه آرماتور و استاتور و فاصله هوایی ایجاد شده در قسمت پایین می‌بندد و نیروی مغناطیسی ایجاد شده باعث نگهداری آرماتور در این حالت می‌شود. همین وضعیت برای حالت بسته نیز برقرار است و به همین اندازه نیرو که در حالت باز برای نگهداری آرماتور وارد می‌شد در حالت بسته نیز از طریق مغناطیس‌های دائم بر آرماتور وارد گشته و آن را در حالت ثابت بسته نگه می‌دارد. برای عمل بسته شدن VCB ابتدا آرماتور در پایین قرار دارد و نیروی ناشی از مغناطیس‌های دائم در جهت پایین به آن وارد می‌شوند، سپس توسط یک مدار الکترونیکی در سیم‌پیچ تحریک بستن جریان DC جاری می‌شود و این جریان DC سبب تولید نیروی الکترومغناطیسی در خلاف جهت نیروی ناشی از مغناطیس‌های دائم می‌شود. جریان تحریک DC با تغییر زمان افزایش می‌یابد تا جایی که نیروی ناشی از جریان سیم‌پیچی تحریک بستن با نیروی ناشی از مغناطیس‌های دائم برابر می‌گردد و آرماتور در آستانه حرکت به سمت بالا قرار می‌گیرد. با شروع حرکت آرماتور به سمت بالا، نیروی ناشی از مغناطیس‌های دائم کاهش می‌یابد و جریان سیم‌پیچ تحریک نیز شروع به کاهش می‌کند تا جایی که آرماتور به سمت بالا حرکت کرده و VCB به وضعیت بسته می‌رسد. در این زمان دیگر نیازی به جریان سیم‌پیچ تحریک بستن نمی‌باشد و توسط مدار کنترلی، تغذیه‌ی سیم‌پیچ تحریک قطع می‌گردد و چگالی شار ناشی از مغناطیس‌های دائم در حلقه‌ی پایینی که شامل استاتور، فاصله‌ی هوایی و آرماتور می‌باشد مسیر خود را می‌بندد و نیروی مغناطیسی به سمت بالا بر آرماتور وارد می‌کند و باعث نگهداری آرماتور در این وضعیت می‌شود. برای عمل باز کردن VCB، همین مراحل طی می‌شود و این بار جریان DC در سیم‌پیچ تحریک باز کردن جاری می‌شود و آرماتور به سمت پایین حرکت می‌کند.

۲-۲- ساختار و اصل عمل PMA پیشنهادی

شکل ۲ ساختار PMA پیشنهادی را ارائه می‌کند. همانطور که ملاحظه می‌شود ساختار این نوع PMA نیز حالت تقارن محوری دارد. استاتور که هسته‌ی ساکن PMA می‌باشد، آرماتور که هسته‌ی متحرک PMA است، شفت عملیاتی و همچنین سیم‌پیچ تحریک باز کردن، ساختاری مشابه با PMA متداول دارند. سیم‌پیچ تحریک بستن و مغناطیس دائم مشترک نیز مشابه با PMA متداولند با این تفاوت که اندازه‌ی این دو در PMA پیشنهادی کوچکتر است. اما اختلاف اصلی در مغناطیس دائم استفاده شده در بالای سیم‌پیچ تحریک بستن که مغناطیس دائم کمکی باز کردن نیز نامیده می‌شود می‌باشد.



شکل ۲: ساختار دوبعدی PMA پیشنهادی

عمل PMA پیشنهادی مشابه با PMA متداول می‌باشد. وقتی VCB در وضعیت ثابت باز است، آرماتور در پایین قرار گرفته و نیروی ناشی از مغناطیس دائم مشترک آرماتور را در وضعیت ثابت باز نگه می‌دارد. برای عمل وصل VCB، سیم‌پیچ تحریک بستن توسط مدار الکترونیکی تغذیه می‌شود و جریان DC در این سیم‌پیچ به گردش در می‌آید بطوری که ایجاد نیروی الکترومغناطیسی

در استاتور و آرماتور می‌کند به نحوی که نیروی وارد بر روتور به سمت بالا وارد می‌شود و با نیروی ناشی از مغناطیس دائم مخالفت می‌کند. وقتی نیروی ناشی از تحریک سیم‌پیچ بستن و نیروی ناشی از مغناطیس دائم مشترک که بر آرماتور وارد می‌شوند با هم برابر شود، آرماتور در آستانه‌ی حرکت قرار می‌گیرد. با شروع حرکت آرماتور به سمت بالا، نیروی ناشی از مغناطیس دائم مشترک به شدت کاهش می‌یابد و جریان القا شده در سیم‌پیچ تحریک بستن نیز کاهش می‌یابد. وقتی آرماتور فاصله‌ی مورد نظر را طی کند و به بالا برسد، عمل بسته شدن VCB انجام شده است. در این هنگام تحریک سیم‌پیچ بستن توسط مدار کنترل الکترونیکی قطع می‌شود و نیروی بر روتور وارد می‌شود که این نیرو ناشی از مغناطیس دائم مشترک و مغناطیس دائم کمکی بسته می‌باشد و طبیعتاً مقدار این نیرو در مقایسه با حالت ثابت باز، افزایش قابل توجهی دارد.

۳- مدل آنالیز

برای تحلیل حالت استاتیک PMA، نیروی ناشی از مغناطیس‌های دائم در حالت ثابت باز یا بسته مورد محاسبه قرار می‌گیرد. معادلات مگنتواستاتیک ماکسول برای تحلیل حالت استاتیک بکار گرفته می‌شوند. نیروی مغناطیسی وارد بر آرماتور در حالت ثابت باز یا بسته، ناشی از چگالی شار پسماند مغناطیس دائم می‌باشد. بدین ترتیب با استفاده از روش المان محدود و بکارگیری معادله‌ی ماکسول که تبدیل به معادله‌ی پواسون بر حسب متغیر A (پتانسیل بردار مغناطیسی) شده است محاسبات مربوطه انجام می‌شود.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = -J \quad (1)$$

که μ نفوذپذیری مغناطیسی ماده و J بردار چگالی جریان می‌باشد. که برای یک ناحیه جریان آزاد این معادله می‌تواند به یک معادله‌ی لاپلاس کاهش پیدا کند.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = 0 \quad (2)$$

همچنین معادله حاکم بر ناحیه‌ی مغناطیسی می‌تواند بصورت زیر بیان شود:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A - B_r) = 0 \quad (3)$$

که B_r چگالی شار پسماند ناشی از مغناطیس دائم می‌باشد. با توجه به اینکه هر دو PMA متداول و PMA پیشنهادی ساختار متقارن محوری دارند برای انجام عمل آنالیز و شبیه‌سازی مورد نظر، حالت 2D Axysymmetric بکار گرفته می‌شود. برای تحلیل حالت استاتیک PMA پیشنهادی و PMA متداول از آنالیز حالت Magnetostatic نرم‌افزار Ansys Maxwell 2D استفاده می‌شود. با توجه به اینکه نیروی ناشی از مغناطیس‌های دائم نسبت به زمان تغییر نمی‌کند، جابجایی آرماتور به عنوان متغیر در نظر گرفته می‌شود و با اعمال جابجایی آرماتور از 0mm تا 20mm، نیروی نگهداری ناشی از مغناطیس‌های دائم از حالت باز به حالت بسته محاسبه می‌شود.

اما برای تحلیل حالت دینامیک PMA، مدار کنترل الکترونیکی، میدان‌های مغناطیسی و حرکت‌های مکانیکی بایستی بصورت یکجا در نظر گرفته شوند. چند معادله‌ی دیفرانسیل جزئی برای تحلیل حالت دینامیک PMA بایستی بطور همزمان در نظر گرفته شوند که این معادلات شامل معادله‌ی تعادل ولتاژ در مدار، معادلات D'Alembert در حرکت و معادلات ماکسول در میدان مغناطیسی می‌باشند.

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی برای PMA متداول

| پارامتر | اندازه | واحد |
|--------------------|--------|------|
| ظرفیت خازن | 0.1 | F |
| ولتاژ اولیه‌ی خازن | 120 | V |

| | | |
|----------|-------|-----------------|
| Ω | 0.733 | مقاومت |
| Mm | 20 | جابجایی آرماتور |
| Kg | 8 | جرم بخش متحرک |

جدول ۲: پارامترهای شبیه‌سازی برای PMA پیشنهادی

| واحد | اندازه | پارامتر |
|----------|--------|--------------------|
| F | 0.08 | ظرفیت خازن |
| V | 120 | ولتاژ اولیه‌ی خازن |
| Ω | 0.733 | مقاومت |
| Mm | 20 | جابجایی آرماتور |
| Kg | 6.5 | جرم بخش متحرک |

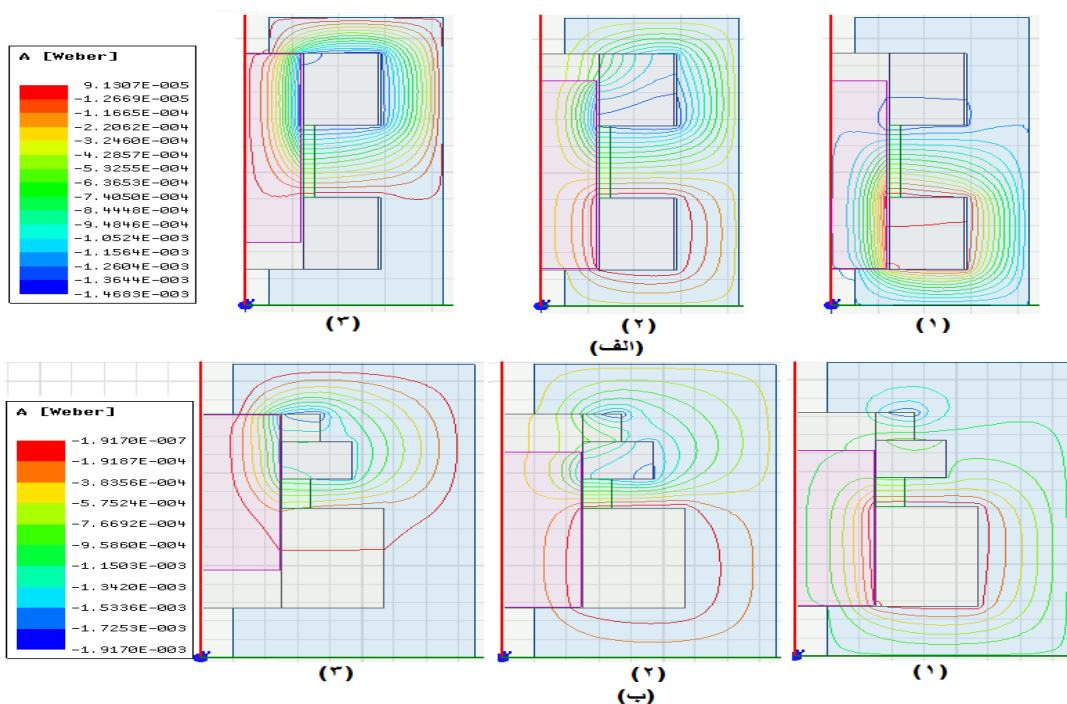
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv}{dt} = \frac{F(x, \frac{dx}{dt})}{m} \\ \frac{dx}{dt} = v \\ \frac{dU_C}{dt} = -\frac{i}{C} \\ \Psi \Big|_{t=0} = \Psi_0 \\ v \Big|_{t=0} = v_0, x \Big|_{t=0} = x_0 \end{array} \right. \quad (4)$$

که Ψ شار پیوندی از میان سیم‌پیچی‌ها در PMA می‌باشد؛ U_C ولتاژ دو سر خازن‌های تخلیه است، R مقاومت سیم‌پیچی است؛ i جریان سیم‌پیچی است؛ v سرعت توده‌ی متحرک است؛ F مقاومت منته‌جه است؛ m جرم توده‌ی متحرک است؛ x تغییر مکان توده‌ی متحرک است؛ و C ظرفیت خازنی خازن است. تحلیل حالت دینامیک PMA متداول و پیشنهادی نیز با استفاده از آنالیز حالت Transient نرم‌افزار Ansys Maxwell 2D Axysymmetric انجام شده است. جدول ۱ و جدول ۲ به ترتیب پارامترهای شبیه‌سازی برای PMA متداول و PMA پیشنهادی را نشان می‌دهند.

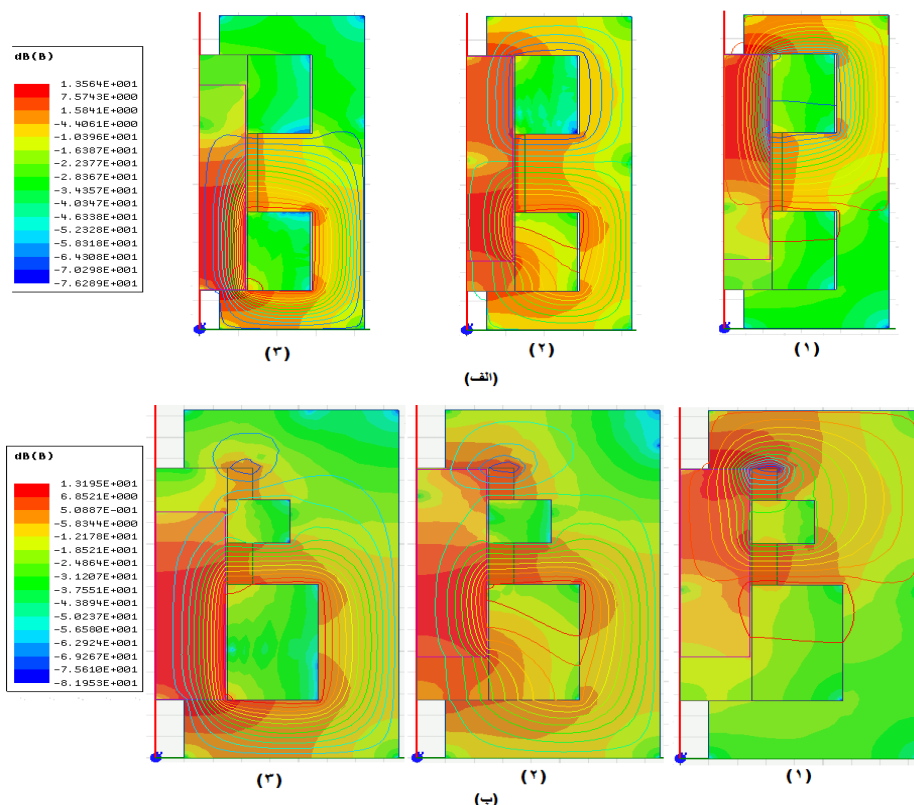
۴- نتایج شبیه‌سازی

۴-۱- شبیه‌سازی حالت استاتیک

شکل ۳-الف توزیع خطوط شار مغناطیسی در طول عمل بسته شدن VCB با PMA متداول را نشان می‌دهد و به همین ترتیب شکل ۳-ب توزیع خطوط شار مغناطیسی طی عمل بسته شدن VCB با PMA پیشنهادی را ارائه می‌کند. همانطور که ملاحظه می‌شود.



شکل ۳: توزیع خطوط شار مغناطیسی طی عمل بسته شدن VCB در (الف): PMA متداول (ب): PMA پیشنهادی



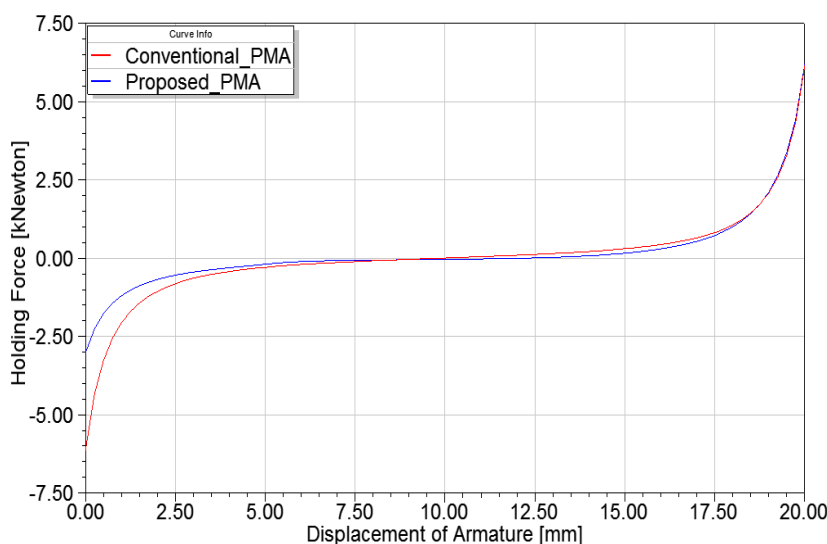
شکل ۴: پراکندگی شدت میدان مغناطیسی و توزیع خطوط شار مغناطیسی طی عمل باز شدن VCB در (الف): PMA متداول (ب): PMA پیشنهادی

در حالت ۱ که حالت ثابت بسته می‌باشد خطوط شار مغناطیسی ناشی از مغناطیس‌های دائم از حلقه‌ی پایینی مسیر خود را می‌بندند

و گستردگی این خطوط برای PMA متداول بیش از PMA پیشنهادی می‌باشد. در حالت ۲ در هر دو PMA جریان به حدی در سیم‌پیچ تحریک بستن جاری شده که آرماتور در آستانه‌ی حرکت قرار گرفته است. در حالت ۳ همانطور که ملاحظه می‌شود آرماتور به سمت بالا حرکت کرده و عمل بسته شدن VCB انجام شده است. با توجه به خطوط شار مغناطیسی جریان یافته در حالات ۱ و ۳ می‌توان دریافت که در حالت ثابت باز که نیاز کمتری به نیروی نگهداری می‌باشد، خطوط شار کمتری در PMA پیشنهادی به گردش در می‌آید که مطلوب است.

شکل ۴-الف و ۴-ب پراکندگی میدان مغناطیسی به همراه توزیع خطوط شار مغناطیسی را طی عمل باز شدن VCB به ترتیب برای PMA متداول و PMA پیشنهادی ارائه می‌کنند. در حالت ۱ آرماتور در حالت ثابت بسته است و جریان DC در سیم‌پیچ تحریک باز کردن جاری می‌شود. در حالت ۲ جریان به حدی در سیم‌پیچ تحریک باز کردن جاری شده که آرماتور در آستانه‌ی حرکت به سمت پایین قرار گرفته است. در حالت ۳ آرماتور بطور کامل به سمت پایین حرکت کرده و عمل قطع VCB انجام شده است و در این زمان می‌بایست تغذیه‌ی سیم‌پیچ تحریک باز کردن قطع گردد.

نیروی ناشی از مغناطیس‌های دائم که بر آرماتور وارد می‌شود در حیطه‌ی آنالیز استاتیک است. شکل ۵ مشخصه‌ی نیروی نگهداری ناشی از مغناطیس دائم بر حسب جابجایی آرماتور را از زمانی که VCB در حالت باز است یعنی آرماتور در پایین قرار دارد و جابجایی آن 0mm است تا زمانی که VCB به وضعیت بسته برسد و جابجایی آرماتور 20mm گردد برای PMA متداول و PMA پیشنهادی نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود نیروی مغناطیسی وارد بر آرماتور در وضعیت بسته برای PMA متداول 6142N و برای PMA پیشنهادی برابر 6194N است. اما نیروی مغناطیسی وارد بر آرماتور در وضعیت باز برای PMA متداول برابر 6142N و برای PMA پیشنهادی 3037N می‌باشد و این امری مطلوب است زیرا در حالت باز نیروی لازم برای نگهداری آرماتور کمتر از 2000N است. دلیل کم شدن مقدار نیروی مغناطیسی در حالت باز همان جدا شدن مغناطیس‌های دائم می‌باشد زیرا در حالت باز تنها مغناطیس دائم مشترک بر آرماتور تأثیر می‌گذارد و با وجود اینکه میزان مغناطیس دائم استفاده شده در هر دو PMA تقریباً یکسان است، اما در PMA پیشنهادی از خاصیت مغناطیسی آهنربا به نحوی مؤثرتر استفاده شده است.



شکل ۵: منحنی نیروی نگهداری وارد بر آرماتور بر حسب جابجایی آرماتور

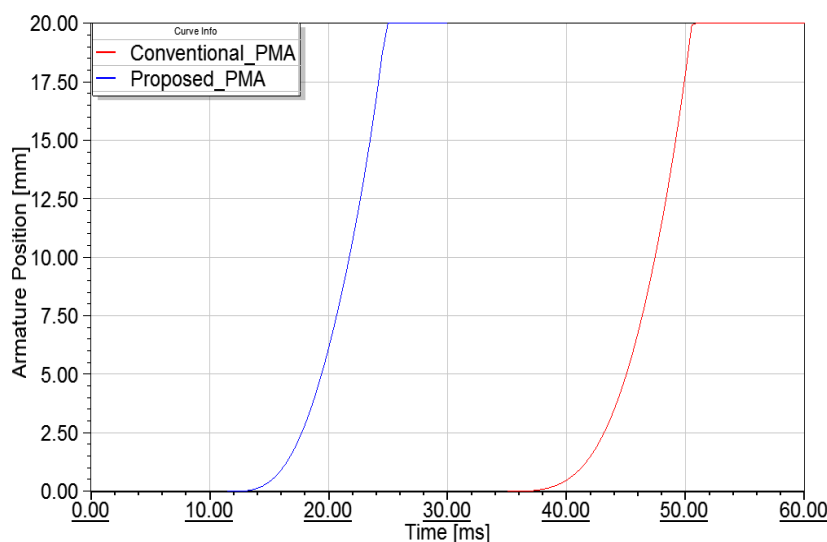
۴-۲- شبیه‌سازی حالت دینامیک

مشخصه‌های دینامیک PMA متداول و PMA پیشنهادی با استفاده از حل‌کننده‌ی میدان مغناطیسی گذرای نرم‌افزار Ansys Maxwell 2D/3D شبیه‌سازی می‌شود. می‌توان در شکل ۶ نمودار مشخصه‌ی جابجایی آرماتور نسبت به زمان را در طول عمل بسته شدن VCB برای هر دو PMA متداول و پیشنهادی ملاحظه کرد. همانطور که از شکل پیداست در PMA متداول در زمان 51ms و در PMA پیشنهادی در زمان 25ms عمل بسته شدن VCB تکمیل می‌شود و بدین ترتیب در PMA پیشنهادی زمان بسته

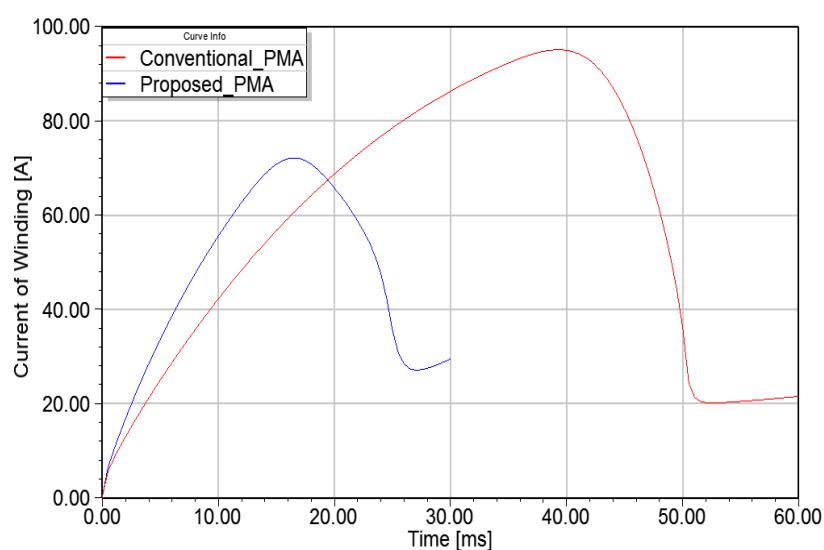
شدن کلید، 26ms کاهش یافته است. سرعت بسته شدن VCB از زمانی که فاصله‌ی بین دو کنتاکت، دو سوم ماکزیمم فاصله‌ی بینشان می‌باشد تا زمانی که دو کنتاکت به هم می‌رسند در PMA متداول 2.66m/s و در PMA پیشنهادی برابر 2.78m/s می‌باشد. هر دو PMA نیاز VCB مورد نظر را برای اندازه‌ی سرعت بسته شدن کلید برآورده می‌کنند. سرعت متوسط بسته شدن VCB از موقعیت 0mm تا موقعیت 20mm برای PMA متداول برابر 1.25m/s است و این شاخص برای PMA پیشنهادی برابر 1.54m/s می‌باشد. مشاهده می‌شود که شاخص سرعت متوسط بسته شدن VCB برای PMA پیشنهادی نسبت به PMA متداول افزایش ۲۳/۲ درصدی داشته است و این امر بسیار مطلوب است.

شکل ۷ نمودار مشخصه‌ی جریان سیم‌پیچ تحریک بستن طی عمل بسته شدن VCB برای PMA متداول و PMA پیشنهادی را بر حسب زمان نشان می‌دهد. با توجه به نمودار معلوم است که ماکزیمم جریان تحریک سیم‌پیچی برای PMA متداول برابر 94A و برای PMA پیشنهادی برابر 72A می‌باشد. یعنی ماکزیمم جریان تحریک سیم‌پیچ PMA پیشنهادی 23.4% نسبت به PMA متداول کاهش یافته است و این امر برای کاهش ابزار کنترل الکترونیکی مناسب می‌باشد و همچنین کاهش ماکزیمم جریان عبوری از سیم‌پیچ تحریک سبب کاهش تلفات می‌شود.

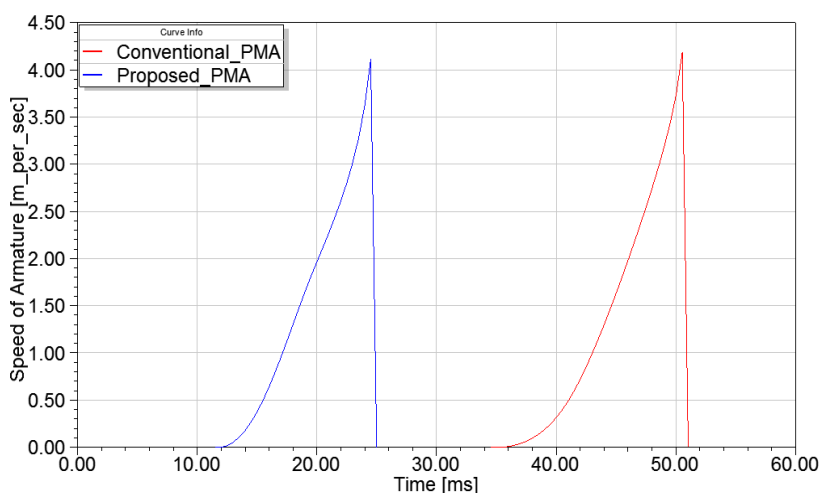
شکل ۸ نمودار مشخصه‌ی سرعت بالا رفتن آرماتور بر حسب زمان را برای PMA متداول و PMA پیشنهادی در طول عمل بسته شدن VCB ارائه می‌کند. طی عمل بسته شدن VCB در لحظه‌ی برخورد کنتاکت متحرک با کنتاکت ثابت، آرماتور ماکزیمم سرعت خود را دارد. ماکزیمم سرعت آرماتور در طول عمل بسته شدن کلید برای PMA متداول 4.21m/s و برای PMA پیشنهادی برابر 4.1m/s است. شاخص ماکزیمم سرعت آرماتور در PMA پیشنهادی نسبت به PMA متداول کاهش ۲/۶ درصدی داشته است که امری مطلوب قلمداد می‌شود زیرا هرچه سرعت برخورد دو کنتاکت با یکدیگر کمتر باشد، ساییدگی کنتاکت‌ها کمتر و طول عمر آنها بیشتر می‌شود.



شکل ۶: منحنی جابجایی آرماتور طی عمل بسته شدن VCB در PMA متداول و پیشنهادی

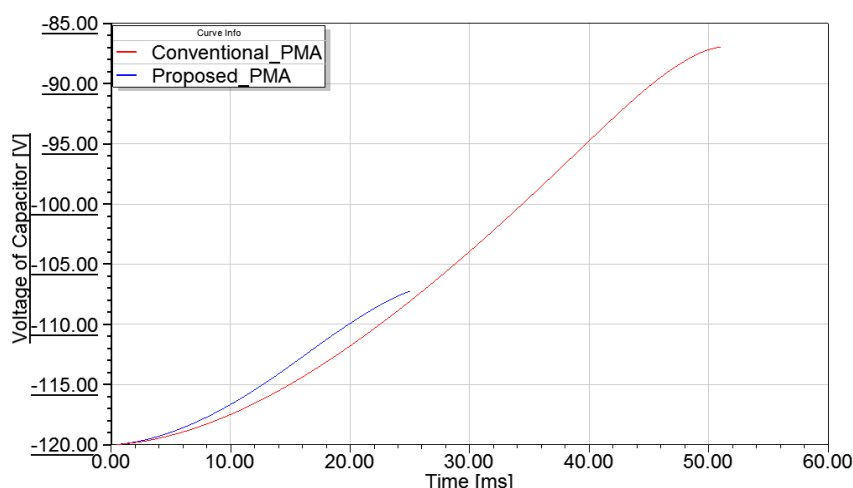


شکل ۷: منحنی جریان سیم‌پیچی بستن طی عمل بسته شدن VCB در PMA متداول و پیشنهادی



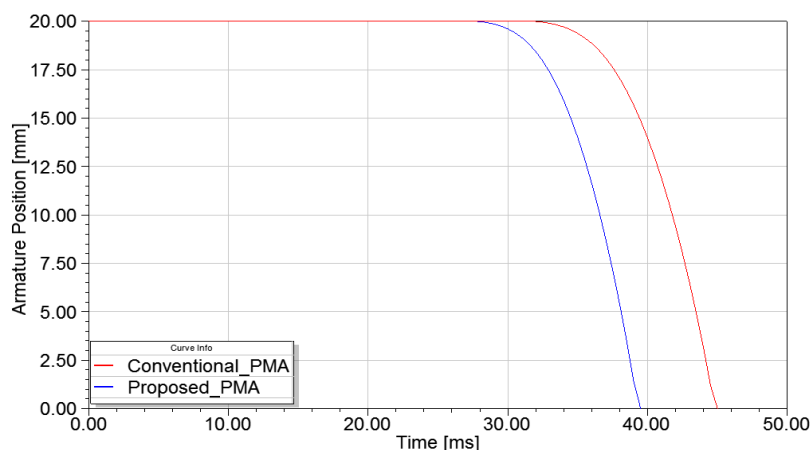
شکل ۸: منحنی سرعت آرماتور طی عمل بسته شدن VCB در PMA متداول و پیشنهادی

شکل ۹ نمودار مشخصه‌ی ولتاژ خازن تغذیه بر حسب زمان طی عمل بسته شدن VCB برای PMA متداول و PMA پیشنهادی می‌باشد. شاخص ولتاژ خازن در طول عمل بسته شدن VCB برای PMA متداول از مقدار 120V کاهش یافته و وقتی عمل VCB تکمیل می‌شود مقدار ولتاژ خازن به 87V کاهش پیدا می‌کند. اما برای PMA پیشنهادی این شاخص از 120V به 107V می‌رسد و این یعنی انرژی تلف‌شده در خازن در PMA متداول نسبت به PMA پیشنهادی بیشتر است زیرا با توجه به رابطه‌ی انرژی تلفاتی خازن که با اختلاف مجذور ولتاژ اولیه و مجذور ولتاژ ثانویه رابطه‌ی مستقیم دارد انرژی تلفاتی خازن در PMA پیشنهادی کاهش ۶۵/۴ درصدی نسبت به انرژی تلفاتی خازن در PMA متداول دارد یعنی انرژی تلفاتی به اندازه‌ی 223.51 ژول کاهش یافته است و این یک مزیت بزرگ به حساب می‌آید.



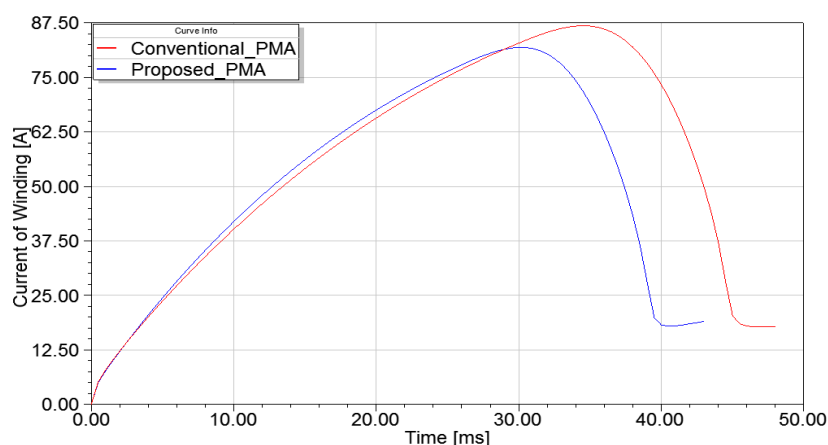
شکل ۹: منحنی ولتاژ خازن تغذیه طی عمل بسته شدن VCB در PMA متداول و پیشنهادی

شکل ۱۰ نمودار مشخصه جابجایی آرماتور نسبت به زمان را برای PMA متداول و PMA پیشنهادی در طول عمل باز شدن VCB ارائه می‌کند. عمل باز شدن VCB با PMA متداول در زمان 45ms کامل می‌شود و این عمل برای PMA پیشنهادی در زمان 39.5ms تکمیل می‌گردد. بدین ترتیب زمان باز شدن VCB برای PMA پیشنهادی نسبت به PMA متداول، کاهش ۱۲/۲ درصدی داشته است. سرعت متوسط باز شدن VCB از لحظه جدا شدن دو کنتاکت تا زمانی که فاصله بین دو کنتاکت به دو سوم ماکزیمم فاصله بینشان برسد برای PMA متداول برابر 2.66m/s و برای PMA پیشنهادی برابر 2.95m/s می‌باشد. هر دو PMA نیاز سرعت باز شدن VCB را برای سطح ولتاژ مورد نظر برآورده می‌کنند. سرعت متوسط باز شدن آرماتور از لحظه جدا شدن دو کنتاکت تا زمانی که فاصله بین دو کنتاکت به ماکزیمم فاصله بینشان برسد برای PMA متداول برابر 1.29m/s و برای PMA پیشنهادی برابر 1.48m/s است. شاخص سرعت متوسط باز شدن آرماتور در PMA پیشنهادی نسبت به PMA متداول افزایش ۱۴/۷ درصدی داشته است.

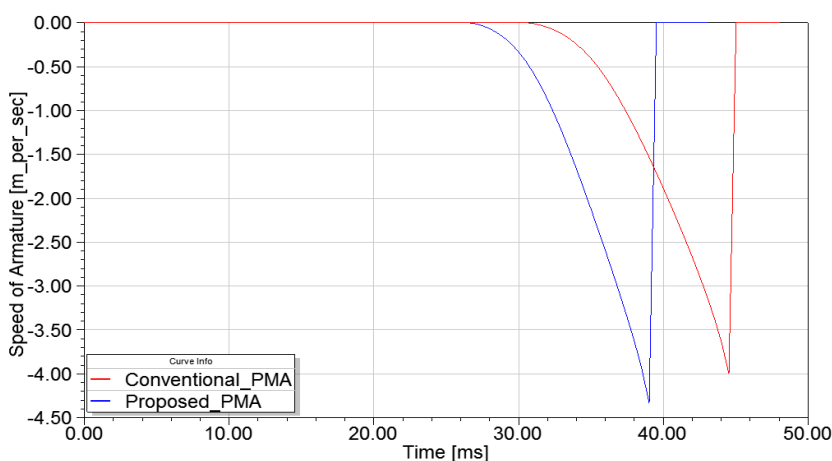


شکل ۱۰: منحنی جابجایی آرماتور طی عمل باز شدن VCB در PMA متداول و پیشنهادی

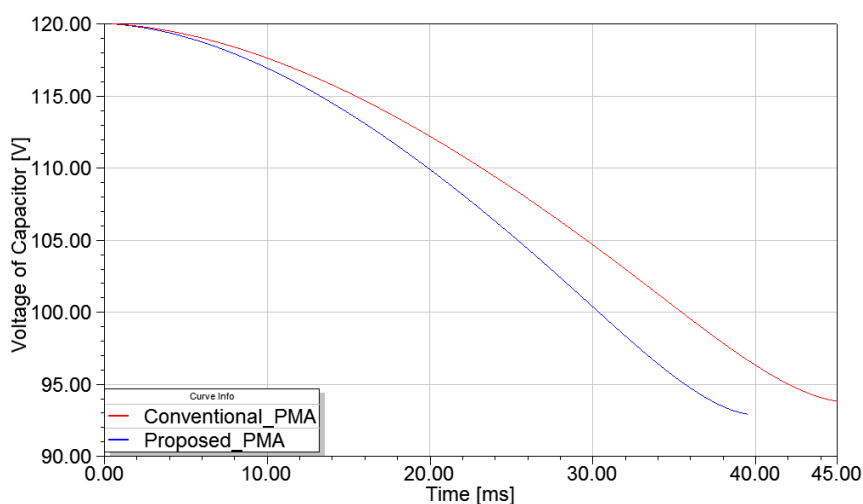
شکل ۱۱ نمودار مشخصه جریان سیم پیچ تحریک باز کردن طی عمل باز شدن VCB برای هر دو PMA را نشان می‌دهد. ماکزیمم مقدار جریان جاری در سیم پیچ تحریک برای PMA متداول برابر 87A و برای PMA پیشنهادی برابر 81A است. شاخص جریان باز شدن PMA پیشنهادی نسبت به PMA متداول، کاهش ۷ درصدی داشته است. شکل ۱۲ نمودار مشخصه سرعت PMA



شکل ۱۱: منحنی جریان سیم‌پیچی بستن طی عمل باز شدن VCB در PMA متداول و پیشنهادی



شکل ۱۲: منحنی سرعت آرماتور طی عمل باز شدن VCB در PMA متداول و پیشنهادی



شکل ۱۳: منحنی ولتاژ خازن تغذیه طی عمل باز شدن VCB در PMA متداول و پیشنهادی

متداول و PMA پیشنهادی را در طول عمل باز شدن کلید قدرت نشان می‌دهد. شکل ۱۳ نمودار مشخصه‌ی ولتاژ دو سر خازن تغذیه طی عمل باز شدن VCB را برای PMA متداول و پیشنهادی ارائه می‌کند. همانطور که ملاحظه می‌گردد مقدار ولتاژ خازن در هر دو PMA از 120V به 93V کاهش پیدا می‌کند. تلفات ناشی از افت ولتاژ خازن در PMA پیشنهادی نسبت به PMA متداول ۵/۵٪

ژول کاهش داشته است و با توجه به نتیجه بدست آمده، مقدار انرژی تلفاتی ناشی از خازن PMA پیشنهادی نسبت به PMA متداول ۲۰ درصد کاهش داشته است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک PMA جدید برای VCB سطح فشار متوسط ارائه شد. PMA پیشنهادی یک حالت تقارن محوری داشته و ساختار دوپایا دارد. مغناطیس دائم استفاده شده در این PMA به دو بخش تقسیم شده و بطور جداگانه در داخل استاتور تعبیه شده است که این ساختار سبب شده تا نیروی مغناطیسی وارد بر آرماتور در حالت ثابت باز نسبت به نوع متداول کاهش داشته باشد و عملکرد PMA پیشنهادی نسبت به نوع متداول آن بهبود یابد. کوچک شدن ساختار PMA پیشنهادی و همچنین کاهش حجم مواد استفاده شده در PMA پیشنهادی نسبت به PMA متداول، سبب می شود که طرح جدید نسبت به طرح متداول از نظر اقتصادی بسیار به صرفه تر باشد. از طرف دیگر هر دو مشخصه استاتیک و دینامیک PMA متداول و PMA پیشنهادی از طریق نرم افزار Ansys Maxwell 2D/3D شبیه سازی شدند و نتایج شبیه سازی نشان از بهبود عملکرد PMA پیشنهادی نسبت به PMA متداول برای سطح ولتاژ مورد نظر داشتند. از مشخصه های بهبود یافته در PMA پیشنهادی نسبت به PMA متداول می توان به کاهش نیروی نگهداری ناشی از مغناطیس دائم در حالت ثابت باز، افزایش سرعت متوسط بسته شدن PMA، کاهش ماکزیمم سرعت حرکت آرماتور در طول عمل بسته شدن کلید (سرعت برخورد دو کنتاکت)، کاهش ماکزیمم جریان سیم پیچ تحریک بستن، کاهش انرژی تلفاتی خازن در طول عمل باز و بسته شدن VCB، افزایش سرعت متوسط آرماتور در طول عمل باز شدن VCB اشاره کرد. از طرف دیگر با وجود بهبود مشخصه های PMA پیشنهادی، ساختار این نوع PMA نسبت به PMA متداول کوچکتر شده است.

۶- مراجع

- [1] Z. Wang, L. Sun, S. He, Y. Geng, Z. Liu, "A Permanent Magnetic Actuator for 126 kV Vacuum Circuit Breakers" IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, No. 3, March 2014.
- [2] L. Wei, F Chun-en, Z Lili, W Jun, "Simulation and Testing of Operating Characteristic of 27.5kV Vacuum Circuit Breaker with Permanent Magnetic Actuator" IEEE Transactions on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Vol. 1, No. 1, pp. 978-982, 2008.
- [3] Liu, F., Guo, H., Yang, Q., et al. "An improved approach to calculate the dynamic characteristics of permanent magnetic actuator of vacuum circuit breaker" IEEE Transactions. Applications. Supercond. 14, pp. 1918– 1921, 2004.
- [4] Y.M. Yoo, D.K. Kim, B. Kwon "Optimal Design of a Permanent Magnetic Actuator for Vacuum Circuit Breaker using FEM" Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 92-97, 2006.
- [5] K. I. Woo and B. I. Kwon, "Characteristic Analysis and Modification of PM-Type Magnetic Circuit Breaker", IEEE Transactions on Magnetics., Vol. 40, No. 2, pp. 691–694, Mar. 2004.
- [6] S. Lim, S. Min "Design Optimization of Permanent Magnet Actuator Using Multi-Phase Level-Set Model" IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, No. 4, April 2012.
- [7] S. Fang, L. Heyun, S. L. Ho, X. Wang, J. Ping, and L. Hengchuan, "Characteristics analysis and simulation of permanent magnet actuator with a new control method for air circuit breaker," IEEE Transactions on Magnetics., Vol. 45, No. 10, pp. 4566–4569, Oct. 2009.