

کنترل برداری بهینه موتور مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی به منظور استفاده در خودروهای هیبریدی

جواد رحمانی فرد^۱ سعادت جمالی آرند^۲

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق- موسسه آموزش عالی پویش- قم- ایران

javad.rahmani.fard@gmail.com

۲- استادیار- گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه یاسوج- یاسوج- ایران

s.jamali@yu.ac.ir

چکیده: سیستم موتور مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی (CS-PMSM) یک سیستم درایو جدید است که برای وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی (HEVs) استفاده می‌شود. در این مقاله مدل ریاضی موتور CS-PMSM به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، استراتژی کنترل CS-PMSM مورد بررسی قرار می‌گیرد. موتور CS-PMSM به دو ماشین سنکرون آهنربای دائمی تقسیم می‌شود: یک ماشین دو روتوره (DRM) و یک ماشین استاتور (SM). استراتژی‌های مختلف کنترل برای دو ماشین استفاده می‌شود. با توجه به ساختار و کاربرد، ماشین DRM کنترل گشتاور را انجام می‌دهد و ماشین SM کنترل سرعت را انجام می‌دهد. برای DRM کنترل $id = 0$ را اجرا می‌شود، در حالی که برای SM روش حداکثر گشتاور بر آمپر در ناحیه گشتاور ثابت و کنترل تضعیف شار در ناحیه توان ثابت اجرا می‌شود. ثانیاً، روش کنترل مستقیم گشتاور برای هر دو ماشین مورد بررسی قرار می‌گیرد. امکان‌سنجی کنترل برداری و روش کنترل مستقیم گشتاور با نتایج شبیه‌سازی در MATLAB/SIMULINK مورد بررسی قرار می‌گیرد و همچنین این دو روش باهم مقایسه می‌شوند. در نهایت روشهای کنترل مطلوب برای DRM و SM مشخص می‌شود و همچنین انتخاب تعداد دور بهینه برای استاتور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: موتور مغناطیس دائم، ساختار ترکیبی، خودروهای هیبریدی، کنترل برداری، کنترل مستقیم گشتاور

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.353

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر جواد رحمانی فرد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - قم - خیابان الغدير - کوچه ۱۱ - موسسه آموزش عالی پویش - دانشکده‌ی برق



۱- مقدمه

از لحاظ علمی اثبات شده است که خودروها یکی از عوامل اصلی آلودگی هوا و گرم شدن کره زمین هستند و به منابع نفتی که به طور فزاینده ای کاهش یافته‌اند متکی می‌باشند. خودروهای الکتریکی در دهه ۱۹۳۰ بوجود آمدند [۱]. منبع تغذیه انرژی یک وسیله الکتریکی باتری است و باتری انرژی الکتریکی را تامین می‌کند و موتور الکتریکی چرخ را برای چرخش خودرو به حرکت می‌اندازد. با این حال، فناوری باتری‌های فعلی (چگالی انرژی کم، توان ناکافی، قیمت بالا، عمر کوتاه و غیره) توسعه وسیله نقلیه الکتریکی خالص را محدود می‌کند [۲]. هزینه وسایل نقلیه الکتریکی نمی‌تواند با وسایل نقلیه سنتی با موتور احتراق داخلی رقابت کند و هزینه بیش از حد باعث می‌شود که وسایل نقلیه الکتریکی تجاری نشوند. در این شرایط، وسایل نقلیه هیبریدی که مزایای موتورهای احتراق داخلی و وسایل نقلیه الکتریکی را ترکیب می‌کنند، یک موضوع مهم در توسعه وسایل نقلیه جدید در سراسر جهان تبدیل شده‌اند. تا کنون، هیچ تعریف جامعی از وسایل نقلیه هیبریدی وجود ندارد. به طور کلی اعتقاد بر این است که وسایل نقلیه هیبریدی به استفاده از موتورهای الکتریکی و موتورهای احتراق داخلی به عنوان واحد قدرت در یک وسیله نقلیه اشاره می‌کنند [۳]-[۴].

طرحهای کنترل و تنظیم سرعت موتور AC شامل تنظیم ولتاژ و کنترل فرکانس (Variable Voltage, Variable Frequency) یا VVVF (کنترل برداری بر اساس جهت یابی میدان (Field oriented control یا FOC) و کنترل مستقیم گشتاور (Direct Torque Control یا DTC) می‌باشند.

متغیرهای کنترل VVVF متغیرهای خارجی موتور هستند، یعنی ولتاژ و فرکانس. سیستم کنترلی ولتاژ مرجع و فرکانس را به یک مدولاتور که VVVF را اجرا می‌کند وارد می‌کند و یک ولتاژ سینوسی متناوب بر روی سیم پیچ استاتور در ولتاژ مشخص شده و فرکانس مرجع تولید می‌کند. مدولاسیون با اینورتر PWM انجام می‌شود. VVVF یک کنترل حلقه باز است که نیاز به سیگنال‌های فیدبک ولتاژ، جریان سرعت یا موقعیت روتور را حذف می‌کند. از آنجا که هیچ سیگنال فیدبکی معرفی نشده است، حالت موتور بلافاصله مشاهده نمی‌شود و گشتاور الکترومغناطیسی نمی‌تواند با دقت کنترل شود. این کنترل فقط برای فن‌ها، پمپ‌ها و مواردی که به کنترل دقیق نیاز ندارند بکار می‌رود.

در حال حاضر اشکال مختلف کنترل برداری مانند کنترل برداری بر اساس جهت یابی میدان روتور، بر اساس جهت یابی میدان فاصله هوایی، و براساس جهت یابی میدان استاتور به طور گسترده ای استفاده می‌شوند. از آنجایی که میدان مغناطیسی روتور در موتور سنکرون مغناطیسی دائم از طریق آهنربای دائمی تولید می‌شود، اگر غیرخطی بودن میدان مغناطیسی نادیده گرفته شود، دامنه شار روتور ثابت است بنابراین اغلب کنترل برداری با جهت یابی میدان روتور

استفاده می‌شود. ایده اصلی کنترل برداری موتور مغناطیسی دائم اینست که از طریق تبدیل مختصات، جریان استاتور موتور AC را به مولفه تحریک و مولفه گشتاور که عمود بر هم هستند تجزیه کنند. در طول فرایند تنظیم سرعت، مولفه تحریک جریان ثابت می‌ماند و مولفه گشتاور جریان کنترل می‌شود و ویژگی‌های دینامیکی خوب می‌تواند بدست آید. ماهیت این کنترل، کنترل فاز و دامنه جریان استاتور است. تکنیک‌های کنترل برداری موتور سنکرون آهنربا دائمی معمولی به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. روش کنترل برداری بر اساس جهت یابی میدان یکی از مشهورترین روشهای کنترل بوده است [۵] و [۶]. برای خودرو الکتریکی هیبریدی و همچنین بسیاری از کاربردهای دیگر، عملکرد در رنج وسیع سرعت و راندمان بالا الزامی است. بنابراین یک استراتژی کنترلی که از کنترل حداکثر گشتاور بر آمپر در سرعت کم و کنترل برداری بر اساس جهت یابی میدان در سرعت بالا استفاده می‌کند در [۷-۹] بررسی شده است.

در این مقاله ابتدا به بررسی اصول کار موتور مغناطیسی دائم سنکرون با ساختار ترکیبی پرداخته شده است و مدل ریاضی آن به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است. موتور CS-PMSM به دو ماشین سنکرون آهنربای دائمی تقسیم می‌شود: یک ماشین دو روتوره (DRM) و یک ماشین استاتور (SM). استراتژی‌های مختلف کنترل برای دو ماشین استفاده می‌شود. با توجه به ساختار و کاربرد، ماشین DRM کنترل گشتاور را انجام می‌دهد و ماشین SM کنترل سرعت را انجام می‌دهد. برای DRM کنترل $id = 0$ را اجرا می‌شود، در حالی که برای SM روش حداکثر گشتاور بر آمپر در ناحیه گشتاور ثابت و کنترل تضعیف شار در ناحیه توان ثابت اجرا می‌شود. ثانیاً، روش کنترل مستقیم گشتاور برای هر دو ماشین مورد بررسی قرار می‌گیرد. امکان سنجی کنترل برداری و روش کنترل مستقیم گشتاور با نتایج شبیه سازی در MATLAB/SIMULINK مورد بررسی قرار می‌گیرد و همچنین این دو روش باهم مقایسه می‌شوند. در نهایت روشهای کنترل مطلوب برای DRM و SM مشخص می‌شود و همچنین انتخاب تعداد دور بهینه برای استاتور مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- موتور سنکرون مغناطیسی دائم با ساختار ترکیبی

موتور سنکرون مغناطیسی دائم با ساختار ترکیبی (CS-PMSM) در خودروهای هیبریدی الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ساختار فشرده تر، و بدون ارتباط مستقیم با موتور احتراق داخلی و محور محرک است. این ساختار توسط شرایط عملکرد خودرو تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد و دارای عملکرد بهینه و انعطاف پذیرتر در کنترل حالات عملکردی است [۱۱]-[۱۳]. این ساختار دارای چشم انداز کاربردی نسبتاً وسیع است. این موتور از دو موتور سنکرون آهنربای دائم متحد المركز تشکیل شده است، که روتور آهنربای دائم آن‌ها یوغ مشترک دارد که در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۴].

برابر با سرعت روتور داخلی است و سرعت روتور بیرونی برابر سرعت بار است. سرعت انتقال به چرخ می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\begin{aligned}\omega_{wheel} &= \left(\frac{1}{G}\right) \times \omega_{load} \\ &= \left(\frac{1}{G}\right) \times (\omega_{inner rotor} + \omega_{double rotor motor}) \quad (2) \\ &= \left(\frac{1}{G}\right) \times (\omega_{ICE} + \omega_{double rotor motor})\end{aligned}$$

که ω_{load} و ω_{wheel} به ترتیب سرعت چرخ و سرعت شفت ورودی گیربکس؛ ω_{ICE} سرعت خروجی موتور احتراق داخلی؛ $\omega_{inner rotor}$ و $\omega_{double rotor motor}$ به ترتیب سرعت مکانیکی روتور داخلی و سرعت موتور دو رتوره و G نسبت گیربکس می باشند.

گشتاور خروجی روتور بیرونی برابر با مجموع گشتاور ماشینهای DRM و SM است. روتور داخلی توسط موتور احتراق داخلی و گشتاور الکترومغناطیسی ماشین DRM رانده می شود. برای تعادل حالت پایدار روتور درونی، گشتاور الکترومغناطیسی ماشین DRM باید برابر با گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی باشد. بنابراین گشتاور منتقل شده به چرخ می تواند بیان شود:

$$\begin{aligned}T_{wheel} &= G \times T_{load} \\ &= G \times (T_{double rotor motor} + T_{stator motor}) \\ &= G \times (T_{ICE} + T_{stator motor}) \quad (3)\end{aligned}$$

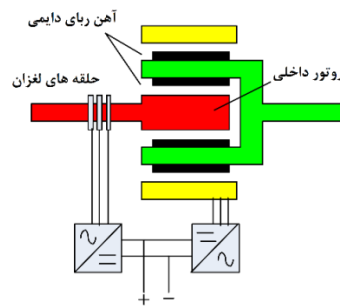
که T_{load} و T_{wheel} به ترتیب گشتاور منتقل شده به چرخ و محور ورودی گیربکس؛ T_{ICE} گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی؛ $T_{double rotor motor}$ و $T_{stator motor}$ به ترتیب گشتاور ماشینهای DRM و SM هستند. لذا توان تحویلی به چرخ به صورت زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned}P_{wheel} &= \omega_{wheel} \times T_{load} \\ &= (\omega_{ICE} + \omega_{double rotor motor}) \times (T_{ICE} + T_{stator motor}) \quad (4)\end{aligned}$$

از رابطه (۴) دیده می شود که در شرایطی که موتور احتراق داخلی در نقطه عملیاتی ثابت کار می کند، برای تامین تقاضای توان مورد نیاز چرخها با تغییر شرایط جاده، جبران سرعت توسط ماشین DRM و جبران گشتاور توسط ماشین SM انجام می شود. این عمل باعث بهبود مصرف سوخت و کارایی سیستم می شود.

۲-۲-۲- مدل ریاضی موتور

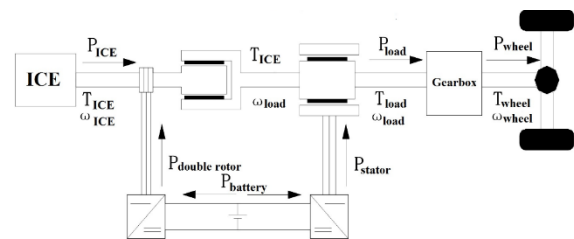
سیستم مختصات d-q سیستم مختصاتی است که به صورت سنکرون با میدان مغناطیسی استاتور چرخانده می شود. جهت محور d جهت مغناطیس شونده گی شار پیوندی مغناطیس دائم روتور است. محور q



شکل (۱): ساختار موتور سنکرون مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی

۲-۱- تجزیه و تحلیل اصول عملکرد

در ادامه یک تحلیل از اصول کار موتور و رابطه توان، گشتاور و سرعت بیان شده است. برای مشاهده بهتر، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۰]؛ دو روتور و استاتور از هم جدا شده اند و توسط اتصال مکانیکی روتور بیرونی متصل می شوند. برای راحتی تجزیه و تحلیل، استاتور و روتور بیرونی به عنوان ماشین بیرونی یا ماشین استاتور (SM) و روتور داخلی و روتور خارجی به عنوان ماشین داخلی یا ماشین دو رتوره (DRM) در نظر گرفته می شوند.



شکل (۲): نمودار پخش توان در موتور CS-PMSM

تلفات در قسمتهای مختلف در تجزیه و تحلیل نادیده گرفته می شوند. دو منبع انرژی در یک سیستم موتور CS-PMSM وجود دارد، به طوری که قدرت تحویلی به چرخ ها می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\begin{aligned}P_{wheel} &= P_{load} = P_{ICE} + P_{battery} \\ &= P_{ICE} + P_{(doublerotor)} + P_{stator} \quad (1)\end{aligned}$$

که P_{wheel} توان تحویلی به چرخها و P_{load} توان بار مورد نیاز قبل از گیربکس؛ P_{ICE} توان خروجی موتورهای احتراق داخلی و $P_{battery}$ توان باتری؛ $P_{(doublerotor)}$ توان ماشین DRM و P_{stator} توان ماشین SM می باشند.

مقدار توان در معادله می تواند منفی باشد و زمانی که منفی باشد، نشان می دهد که جریان توان در شکل ۲ معکوس شده است. از آنجا که روتور داخلی به صورت مکانیکی به شفت خروجی موتور احتراق داخلی متصل است، روتور بیرونی به صورت مکانیکی به شفت ورودی گیربکس وصل شده است، یعنی سرعت خروجی موتور احتراق داخلی

قرار می‌دهد [۱۵]. به خصوص برای موتورهای دارای اشباع عمیق. این پدیده گاهی قابل نظر کردن نیست.

بنابراین، برای ایجاد یک مدل ریاضی برای ماشین DRM، دو حالت می‌توان در نظر گرفت: ۱- بدون در نظر گرفتن پدیده مغناطیس‌شوندگی متقاطع ۲- با در نظر گرفتن پدیده مغناطیس‌شوندگی متقاطع.

معادلات شار پیوندی، ولتاژ، گشتاور الکترومغناطیسی ماشین DRM در سیستم مختصات d-q بدون در نظر گرفتن پدیده مغناطیس‌شوندگی متقاطع عبارتند از:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\psi}_d = \hat{L}_{dd} \hat{i}_d + \psi_f \\ \hat{\psi}_q = \hat{L}_{qq} \hat{i}_q \\ \hat{u}_d = \frac{d\hat{\psi}_d}{dt} - (\omega - \omega_{ICE}) \hat{\psi}_q + R_s \hat{i}_d \\ \hat{u}_q = \frac{d\hat{\psi}_q}{dt} + (\omega - \omega_{ICE}) \hat{\psi}_d + R_s \hat{i}_q \\ \hat{T}_e = \frac{3}{2} \hat{p} \left[\hat{\psi}_f \hat{i}_q + (\hat{L}_{dd} - \hat{L}_{qq}) \hat{i}_d \hat{i}_q \right] \end{array} \right. \quad (6)$$

معادلات شار پیوندی، ولتاژ، گشتاور الکترومغناطیسی ماشین DRM در سیستم مختصات d-q با در نظر گرفتن پدیده مغناطیس‌شوندگی متقاطع عبارتند از:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\psi}_d = \hat{L}_{dd} \hat{i}_d + \psi_f + \hat{L}_{dq} \hat{i}_q \\ \hat{\psi}_q = \hat{L}_{qq} \hat{i}_q + \hat{L}_{qd} \hat{i}_d \\ \hat{u}_d = \frac{d\hat{\psi}_d}{dt} - (\omega - \omega_{ICE}) \hat{\psi}_q + \hat{R}_s \hat{i}_d \\ \hat{u}_q = \frac{d\hat{\psi}_q}{dt} + (\omega - \omega_{ICE}) \hat{\psi}_d + \hat{R}_s \hat{i}_q \\ \hat{T}_e = \frac{3}{2} \hat{p} \left[\hat{\psi}_f \hat{i}_q + (\hat{L}_{dd} - \hat{L}_{qq}) \hat{i}_d \hat{i}_q + \hat{L}_{dq} \hat{i}_q^2 - \hat{L}_{qd} \hat{i}_d^2 \right] \end{array} \right. \quad (7)$$

که \hat{L}_{dd} و \hat{L}_{dq} -اندوکتانس‌های خودی محورهای d و q؛

\hat{L}_{qd} و \hat{L}_{dq} -اندوکتانس متقابل محورهای d و q؛

\hat{u}_d و \hat{u}_q -ولتاژ محورهای d و q؛

\hat{i}_d و \hat{i}_q -جریان محورهای d و q؛

$\hat{\psi}_d$ و $\hat{\psi}_q$ -شار پیوندی استاتور محورهای d و q؛

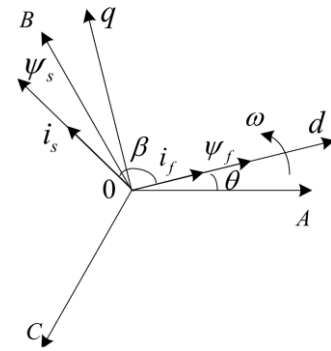
$\hat{\psi}_f$ -شار پیوندی مغناطیس دائم روی استاتور؛

\hat{T}_e -گشتاور الکترومغناطیسی ماشین DRM؛

\hat{R}_s -مقاومت استاتور ماشین DRM

\hat{p} -تعداد جفت قطب‌های ماشین DRM

۹۰ درجه نسبت به محور d پیش فاز است، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است. β زاویه بین جریان استاتور و محور میدان مغناطیسی دائمی (محور d) است. همچنین به عنوان زاویه گشتاور نیز شناخته می‌شود. θ زاویه بین محور d محور و محور سیم پیچی فاز A است. ψ_f شار تحریک تولید شده توسط آهنربای دائم روتور است و i_f جریان تحریک معادل آن است.



شکل (۳): سیستم مختصات d-q

۲-۲-۱- مدل ریاضی ماشین SM

معادلات شار پیوندی، ولتاژ و گشتاور الکترومغناطیسی ماشین SM در سیستم مختصات d-q عبارتند از:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \\ u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q + R_s i_d \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d + R_s i_q \\ T_e = \frac{3}{2} p \left[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \end{array} \right. \quad (8)$$

که L_d و L_q -اندوکتانس محورهای d و q؛

u_d و u_q -ولتاژ محورهای d و q؛

i_d و i_q -جریان محورهای d و q؛

ψ_d و ψ_q -شار پیوندی استاتور محورهای d و q؛

ψ_f -شار پیوندی مغناطیس دائم روی استاتور؛

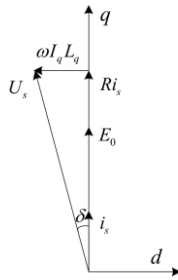
T_e -گشتاور الکترومغناطیسی ماشین SM؛

R_s -مقاومت استاتور ماشین SM؛

p -تعداد جفت قطب‌های ماشین SM.

۲-۲-۲- مدل ریاضی ماشین DRM

ماشین DRM دارای محدودیت فضا و مغناطیس‌شوندگی متقاطع است. مدار مغناطیسی متقاطع دارای یک بخش مشترک است (دندان روتور، یوغ استاتور)، جایکه پدیده مغناطیس‌شوندگی متقاطع وجود دارد و پتانسیل مغناطیسی هر محور اشباع محور دیگر را تحت تاثیر



شکل (۴): دیاگرام فازوری روش $i_d=0$

۲-۳- کنترل حداکثر گشتاو بر جریان

کنترل حداکثر گشتاو بر جریان در ناحیه گشتاور ثابت بکار می‌رود. این روش یک استراتژی کنترل جریانی است که در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم قطب برجسته استفاده می‌شود. برای یک موتور سنکرون مغناطیس دائم قطب صاف، کنترل حداکثر گشتاو بر جریان $i_d = 0$ است. این الگوریتم برای کنترل جریان استاتور با یک مقدار کمینه در شرایطی که موتور یک گشتاور خواسته شده را تامین می‌کند بکار می‌رود. در این روش می‌توان رابطه i_d را به صورت زیر نوشت [۱۶]-[۱۷]:

$$i_d = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 4(L_q - L_d)^2 i_q^2}}{2(L_q - L_d)} \quad (9)$$

کنترل حداکثر گشتاور بر جریان می‌تواند تلفات مس را کاهش دهد و راندمان را بهبود بخشد، و عملکرد سوئیچینگ اینورتر را تسهیل کند. بر اساس این روش و با روش مناسب کنترل تضعیف میدان می‌توان عملکرد گشتاور خروجی موتور را در محدوده توان ثابت بهبود بخشید. با این حال، همانطور که گشتاور خروجی افزایش می‌یابد، ضریب قدرت به سرعت کاهش می‌یابد. در عین حال، این روش کنترلی پیچیده و محاسبات نسبتاً زیادی دارد و یک کنترل کننده با کارایی بالا مورد نیاز دارد.

۳-۳- کنترل تضعیف میدان مغناطیسی

با توجه به اشباع تنظیم کننده جریان در اینورتر ناشی از محدودیت لینک DC اینورتر، گشتاور و توان بدون کنترل تضعیف میدان در سرعت‌های بالا کاهش می‌یابند. موتورهای سنکرون مغناطیس دائم از کنترل تضعیف میدان استفاده می‌کنند تا دامنه سرعت را گسترش دهند [۱۸]. کنترل تضعیف میدان به این صورت است که از مولفه محور d جریان استاتور برای تضعیف میدان فاصله هوایی تولید شده توسط آهنربای دائم روتور استفاده می‌شود، شبیه به اثر تضعیف میدان مغناطیسی در موتور DC. هنگامی که ولتاژ موتور به حد ولتاژ خروجی اینورتر می‌رسد، داریم:

$$u_{lim} = \omega \sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2} \quad (10)$$

ω_{ICE} - سرعت زاویه‌ای الکتریکی روتور درونی که همان سرعت موتور احتراق داخلی است.

۲-۲-۳- معادله حرکت موتور

ماشین‌های SM و DRM یک روتور مشترک دارند. بنابراین معادلات حرکت موتور مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی به صورت زیر می‌تواند بیان شود:

$$T_e + \hat{T}_e = T_L + B\omega_r + J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (8)$$

که ω_r - سرعت زاویه‌ای (مکانیکی) روتور مشترک دو موتور؛

T_L - گشتاور بار؛

J - اینرسی موتور؛

B - ضریب اصطکاک.

۳- استراتژیهای کنترل برداری موتور سنکرون

مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی

در سال ۱۹۷۱، دانشمندان آلمانی Blaschke و Hasse تئوری کنترل برداری موتورهای AC را پیشنهاد دادند. کنترل برداری می‌تواند کنترل سرعت موتور AC را انجام دهد که همان عملکرد عالی کنترل موتور DC را داشته باشد. در این مقاله روش‌های کنترل برداری موتور سنکرون مغناطیس دائم شامل: (۱) کنترل $i_d = 0$ ؛ (۲) روش کنترلی حداکثر گشتاور بر جریان (۳) کنترل تضعیف میدان بررسی می‌شوند.

۳-۱- کنترل $i_d = 0$

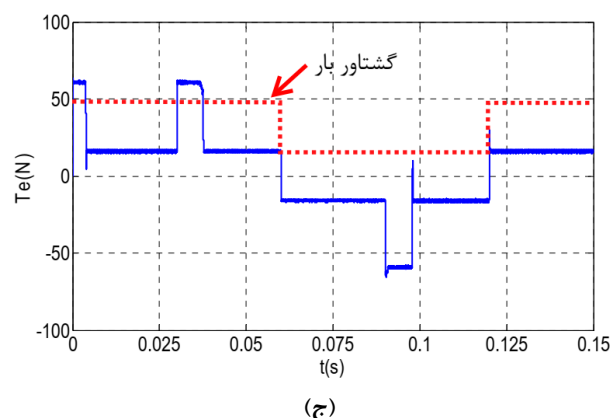
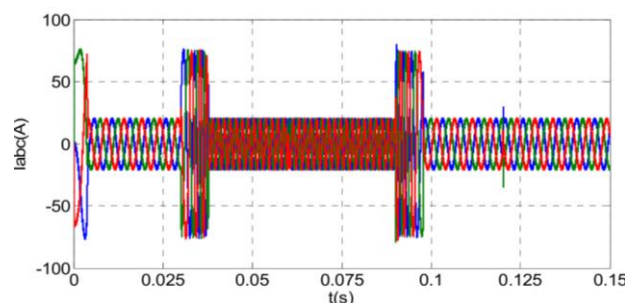
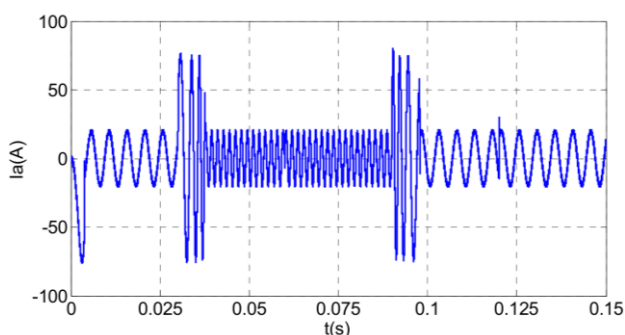
کنترل $i_d = 0$ یک روش کنترل جریانی ساده است. گشتاور الکترومغناطیسی تابع خطی از جریان محور q است. جریان عکس‌العمل آرمیچر مولفه محور d را ندارد و لذا اثر مغناطیسی زدایی عکس‌العمل آرمیچر وجود ندارد. از معایب این روش این است که همانطور که گشتاور خروجی افزایش می‌یابد، ولتاژ ترمینال افزایش می‌یابد، ضریب قدرت کاهش می‌یابد. به منظور اطمینان از عملکرد دینامیکی حلقه جریان، ولتاژ اعمال شده باید با افزایش سرعت موتور افزایش یابد. برای یک موتور سنکرون مغناطیس دائم با قطب برجسته، این روش به طور کامل قابل استفاده نمی‌باشد زیرا گشتاور رلوکتانسی به طور کامل از این روش پیروی نمی‌کند. دیاگرام فازوری این روش در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول (۳): پارامترهای شبیه سازی موتور DRM

مقاومت استاتور (Ω)	۰,۱۰۵	اینرسی موتور (kgm^2)	۰,۰۰۰۸
اندوکتانس محور d (μH)	۵۰۰	ضریب اصطکاک موتور ($N.m. s$)	۰
اندوکتانس محور q (μH)	۵۴۰	تعداد جفت قطب های موتور	۶
شار PM (Wb)	۰,۱۳۹	ولتاژ لینک dc (V)	۵۴۰

۴-۱- تجزیه و تحلیل نتایج شبیه سازی ماشین SM

نتایج شبیه سازی ماشین SM در شکل ۴ (الف) تا (د) نشان داده شده است.



هنگامی که موتور با یک سرعت مشخص ω حرکت می کند، جریان محور d از معادله ولتاژ به صورت زیر بدست می آید:

$$i_d = \frac{-\psi_f}{L_d} + \sqrt{\left(\frac{u_{lim}}{L_d}\right)^2 - \left(\frac{L_q i_q}{L_d}\right)^2} \quad (11)$$

آهنرباهای دائمی در ماشین DRM که در این مقاله مورد استفاده قرار می گیرند، از نوع سطحی می باشند، بنابراین اندوکتانس محورهای q و d متفاوت چندانی ندارند گشتاور رلوکتانسی نسبت به گشتاور الکترومغناطیسی کوچک است. لذا طرح کنترلی مناسب برای آن کنترل $i_d = 0$ است. آهنرباهای دائمی در موتور SM از نوع دفن شده هستند و تفاوت بین اندوکتانس محورهای q و d نسبتاً بزرگ است. با توجه به اینکه وسیله نقلیه الکتریکی نیاز به گشتاور بزرگ برای سرعت های کم دارد روش کنترلی مناسب، روش حداکثر گشتاور بر جریان می باشد و برای سرعت های بیشتر از سرعت نامی از استراتژی کنترل تضعیف میدان استفاده می شود.

۴-۲- تجزیه و تحلیل نتایج شبیه سازی کنترل برداری سیستم موتور سنکرون مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی

به منظور واضح تر شدن عملکرد چهار ناحیه موتور CS-PMSM، نقطه عملیاتی موتور احتراق داخلی در سرعت 3000 r/min و گشتاور 32 N.m تنظیم می شود. فرایند شبیه سازی به چهار دوره زمانی مختلف تقسیم می شود که هر کدام با دوره های قبل متفاوت است. شرایط بار در جدول ۱ نشان داده شده است.

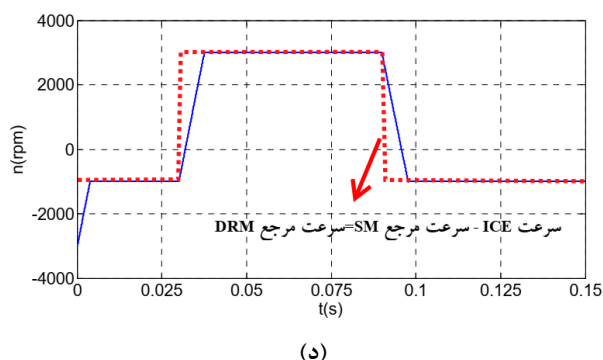
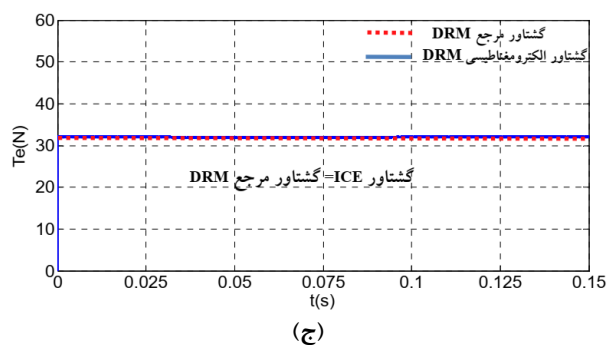
جدول (۱): شرایط بار

زمان (s)	سرعت (r/min)	گشتاور (N.m)	ناحیه عملکردی
۰	۲۰۰۰	۴۸	ناحیه عملکردی SM
۰,۰۳	۶۰۰۰	۴۸	موتوری
۰,۰۶	۶۰۰۰	۱۶	موتوری
۰,۰۹	۲۰۰۰	۱۶	ژنراتوری
۰,۱۲	۲۰۰۰	۴۸	ژنراتوری

لیست کامل پارامترهای شبیه سازی در جدول های ۲ و ۳ آورده شده است:

جدول (۲): پارامترهای شبیه سازی موتور SM

مقاومت استاتور (Ω)	۰,۱۱۸	اینرسی موتور ($kg m^2$)	۰,۰۰۰۸
اندوکتانس محور d (μH)	۴۴۸	ضریب اصطکاک موتور ($Nm. s$)	۰
اندوکتانس محور q (μH)	۶۴۷	جفت قطب های موتور	۶
شار PM (Wb)	۰,۰۸۹۸	ولتاژ لینک dc (V)	۵۴۰

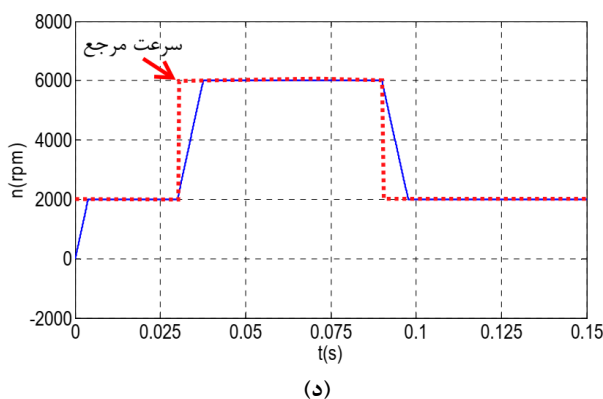


شکل (۵): (الف) جریان فاز A ماشین DRM (ب) جریان سه فاز ماشین DRM (ج) گشتاور الکترومغناطیسی ماشین DRM (د) سرعت ماشین DRM

همانطور که از نتایج شبیه‌سازی DRM دیده می‌شود، سرعت DRM برابر با سرعت SM منتهای سرعت ICE است. میانگین مقدار گشتاور الکترومغناطیسی DRM برابر با گشتاور موتور احتراق داخلی (۳۲ نیوتن متر) است. گشتاور الکترومغناطیسی در محدوده معینی در حدود 30 ± 5 نیوتن متر است. از شکل موج جریان DRM می‌توان مشاهده کرد که؛ هنگامی که فاز جریان به مقدار درجه ۱۸۰ درجه در 0.03 ثانیه تغییر می‌کند، سرعت DRM نیز به مقدار مثبت تغییر می‌کند و DRM از حالت اصلی ژنراتوری را به حالت موتوری تغییر می‌کند. در 0.06 ثانیه، DRM از حالت موتوری به حالت ژنراتوری تغییر می‌کند و فاز A به مقدار 180 درجه تغییر می‌دهد.

شکل موج های شبیه‌سازی نشان می‌دهند که سیستم دارای پاسخ سریع، خطای ماندگار بسیار کم است و عملکرد دینامیکی خوبی دارد. نتایج شبیه‌سازی اثربخشی استراتژی کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی را نشان می‌دهد.

ماشین DRM در حالت ژنراتوری یا موتوری با توجه به سرعت مورد نیاز آن کار می‌کند، هنگامی که سرعت مورد نیاز کمتر از صفر باشد، در حالت ژنراتوری کار می‌کند و بالعکس. ماشین SM در حالت ژنراتوری یا موتوری با توجه به گشتاور الکترومغناطیسی خود کار می‌کند، هنگامی که گشتاور الکترومغناطیسی بیشتر از صفر است، در حالت موتوری کار می‌کند و هنگامی که گشتاور الکترومغناطیسی کمتر از صفر است و در حالت ژنراتوری عمل می‌کند. از نتایج شبیه‌سازی بالا و تجزیه و تحلیل تئوری، می‌توان نتیجه گرفت که سرعت و گشتاور گذار

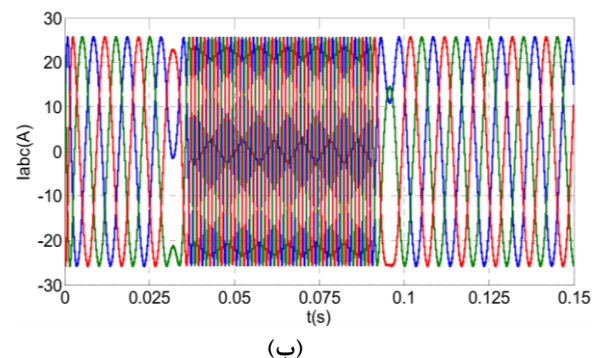
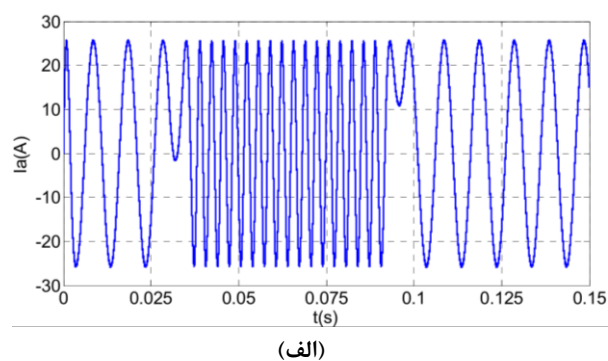


شکل (۴): (الف) جریان فاز A ماشین SM (ب) جریان سه فاز ماشین SM (ج) گشتاور الکترومغناطیسی ماشین SM (د) سرعت ماشین SM

همانطور که از نتایج شبیه‌سازی SM دیده می‌شود، سرعت SM برای رفع نیازهای بار بسیار خوب است. گشتاور الکترومغناطیسی حالت پایدار SM برابر با گشتاور مورد نیاز بار و گشتاور ICE است. هنگامی که گشتاور بار از 48 نیوتن متر به 16 نیوتن متر در 0.06 ثانیه تغییر می‌کند، گشتاور الکترومغناطیسی انتقال یافته از DRM به SM در حدود 32 نیوتن متر است. در این زمان، SM از 16 - نیوتن متر برای تولید برق استفاده خواهد کرد. در 0.06 ثانیه، SM از حالت موتوری به حالت ژنراتوری تغییر می‌کند. همان زمان جریان فاز A از SM به مقدار 180 درجه تغییر فاز می‌دهد. در 0.09 ثانیه، SM از حالت ژنراتوری به حالت موتوری تغییر می‌کند.

۴-۲- شبیه‌سازی ماشین DRM

نتایج شبیه‌سازی ماشین DRM در شکل های ۵ (الف) تا (د) نشان داده شده است.



بین SM و DRM با یکدیگر در ارتباط هستند. روند تعامل به شرح زیر است:

(۱) گشتاور الکترومغناطیسی گذرا در ماشین SM توسط گشتاور بار و گشتاور الکترومغناطیسی گذرای ماشین DRM تعیین می‌شود، گشتاور الکترومغناطیسی گذرای SM تقریباً برابر با تفاوت بین این دو مقدار در یک لحظه است. این تفاوت، جریانهای d و q ماشین SM را تعیین می‌کند و باعث تولید گشتاور الکترومغناطیسی گذرا در ماشین SM می‌شود. بنابراین، گشتاور گذار SM مربوط به گشتاور گذار DRM است.

(۲) سرعت ماشین DRM بوسیله سرعت روتور بیرونی (یعنی سرعت SM) و سرعت روتور داخلی تعیین می‌شود و مقدار آن برابر با تفاوت بین این دو سرعت است، به طوری که سرعت گذرا DRM با سرعت گذار SM در ارتباط است.

۳-۴- بهینه سازی پارامترهای سیم پیچی ماشین SM

اگرچه موتور سنکرون مغناطیس دائم دارای چگالی بالا، راندمان بالا و عملکرد دینامیکی خوب است، نیرو محرکه ی مغناطیسی تولید شده توسط آهنربا دائمی نمی‌تواند تنظیم شود. فقط با تنظیم جریان استاتور، یعنی افزایش مولفه مغناطیس زدایی (محور d) استاتور تعادل ولتاژ در سرعتهای بالا حفظ می‌شود. تا ناحیه تضعیف میدان وسیعتری بدست آید. در زمان عملکرد در ناحیه تضعیف میدان که ولتاژ ترمینال به مقدار محدود شده ی خود می رسد و جریان به مقدار نامی خود میرسد شرایطی که میدان مغناطیسی در هر سرعت بالا می‌تواند داشته باشد به صورت $\psi_f = L_d i_{lim}$ است، یعنی در هر سرعت بالاتر از سرعت نامی $e_0 = X_d i_{lim}$.

در حقیقت، از آنجا که موتور سنکرون مغناطیس دائم دارای یک آهنربا دائمی است که دارای مقاومت مغناطیسی بزرگی در مدار مغناطیسی محور d است، غیر ممکن است که اندوکتانس محور d موتور بسیار بزرگ باشد. بنابراین، رابطه $e_0 = X_d i_{lim}$ به طور کلی غیر ممکن است. برای موتور موتور سنکرون مغناطیس دائمی به طور کلی $X_d i_{lim} \ll e_0$ می باشد.

روش‌های اصلی که می تواند برای افزایش سرعت در یک موتور سنکرون مغناطیسی دائم استفاده شود عبارتند از: (۱) کاهش ψ_f ؛ (۲) افزایش i_{lim} ؛ (۳) افزایش L_d ؛ (۴) افزایش محدوده ولتاژ موتور؛ (۵) استفاده ترکیبی از چهار روش اول. افزایش محدوده ولتاژ و جریان موتور باعث افزایش ظرفیت اینورتر در سیستم می‌شود و در نتیجه هزینه تولید سیستم افزایش می‌یابد. کاهش ψ_f یک راه مهم برای افزایش ناحیه تضعیف میدان است، اما کاهش ψ_f گشتاور را در سرعت‌های پایین کاهش می‌دهد و عملکرد گذرای موتور نیز ضعیف خواهد بود.

ψ_f بسیار کوچک منجر به کاهش مولفه گشتاور مغناطیسی دائم می‌شود و نسبت گشتاوررلوکتانسی به گشتاور مغناطیسی دائم افزایش می‌یابد. این امر منجر به عدم استفاده کامل از انرژی مغناطیسی آهنرباهای دائم می‌شود. افزایش L_d یک روش ایده‌آل برای گسترش ناحیه تضعیف شار مغناطیسی است [۱۹].

اندازه L_d بطور نزدیکی به تعداد هادیها در هر شیار موتور مرتبط است، بنابراین در این مقاله تاثیر تعداد هادیها بر عملکرد موتور و سیستم کلی آن تحت همان شرایط SM بررسی می‌شود. مقاومت استاتور مربوطه، اندوکتانس محور d و محور q و شار تولید شده توسط آهنربای دائمی برای تعداد هادی در هر شیار SM در جدول ۴ داده شده است. سپس پارامترهای موتور SM تحت شرایط مختلف در جدول با همان سرعت و بار مورد نیاز شبیه سازی می شوند. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول (۴): پارامترهای مختلف موتور استاتور (SM)

تعداد هادی ها در هر شیار (n)	مقاومت استاتور (Ω)	اندوکتانس محور d (μH)	اندوکتانس محور q (μH)	شار پیوندی آهنربای دائمی (Wb)
۷	۰.۰۹۰۳	۳۴۳	۴۹۵.۳۵	۰.۰۷۸۵
۸	۰.۱۱۸	۴۴۸	۶۴۷	۰.۰۸۹۸
۹	۰.۱۴۹	۵۶۷	۸۱۹	۰.۱۰۱
۱۰	۰.۱۸۴	۷۰۰	۱۰۱۱	۰.۱۱۲
۱۱	۰.۲۳۳	۸۴۷	۱۲۲۳	۰.۱۲۳

جدول (۵): نتایج شبیه سازی حالت‌های مختلف موتور استاتور

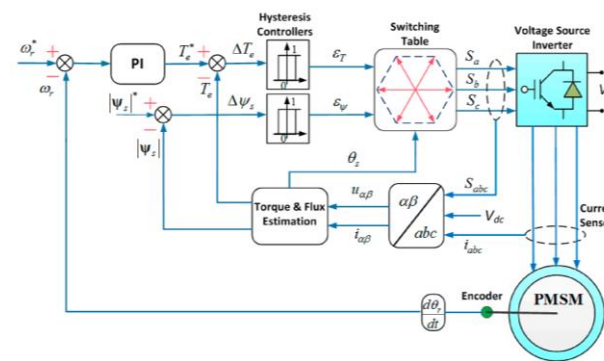
تعداد هادی ها در هر شیار (n)	جریان مورد نیاز در سرعت ۳۰۰۰rpm و گشتاور ۳۲ N.m (A)	جریان مورد نیاز در سرعت ۶۰۰۰rpm و گشتاور ۱۶ N.m (A)	جریان ماکزیمم (A)
۷	۲۳.۹	۱۶.۹۷	۲۳.۹
۸	۲۸.۳	۱۴.۸۵	۲۸.۳
۹	۲۴.۷۵	۲۱.۲۲	۲۴.۷۵
۱۰	۲۲.۶۳	۲۵.۴۶	۲۵.۴۶
۱۱	۲۰.۵	۳۴.۶۵	۳۴.۶۵

از نتایج شبیه‌سازی دیده می‌شود که تحت شرایط عملکرد یکسان موتور، از دیدگاه ظرفیت اینورتر، ۹ هادی در هر شیار ترجیح داده می‌شود، اما ۱۰ هادی در هر شیار تنها ۰.۷۱ آمپر بزرگتر از ۹ هادی در هر شیار است. اگر موتور همیشه در سرعت پایه کار کند بهتر است ۱۰ را انتخاب کنیم که دارای تلفات مس موتور کمتری در نسبت به ۹ هادی در هر شیار است.

۵- کنترل مستقیم گشتاور در موتور سنکرون

مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی

اصل کنترل مستقیم گشتاور استفاده از تحلیل برداری است [۲۰]- [۲۲]. با این حال، بر خلاف کنترل بردار معمولی، که از فیدبک گشتاور و شار استفاده می‌کند، کنترل گشتاور مستقیم با تشخیص خطای گشتاور و شار انجام می‌شود. با توجه به مشخصات موتور در حال حرکت (جهت چرخش، اندازه گشتاور، تغییر بار، و غیره) بردار ولتاژ خروجی اینورتر انتخاب می‌شود، به این ترتیب کنترل سرعت موتور را تکمیل می‌کند. اصل ساختار سیستم کنترل مستقیم گشتاور PMSM در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: بلوک دیاگرام کنترل DTC

۶- تجزیه و تحلیل نتایج شبیه سازی کنترل

مستقیم گشتاور در موتور مغناطیس دائم با

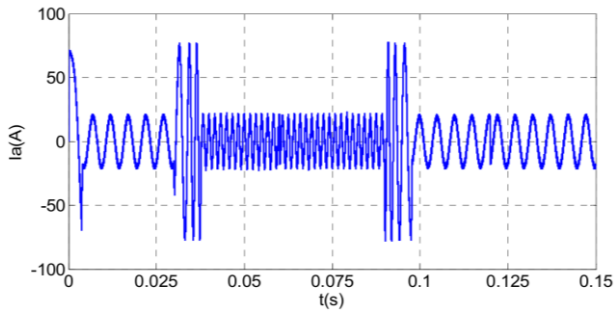
ساختار ترکیبی

پارامترها، شرایط بار و سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی و نقطه کار موتور احتراق داخلی در قسمت قبلی بیان شده‌اند. از آنجا که نتایج شبیه‌سازی شده در قسمت قبل به طور دقیق تجزیه و تحلیل شده است، تنها نتایج شبیه‌سازی کنترل گشتاور مستقیم در اینجا ارائه می‌شود.

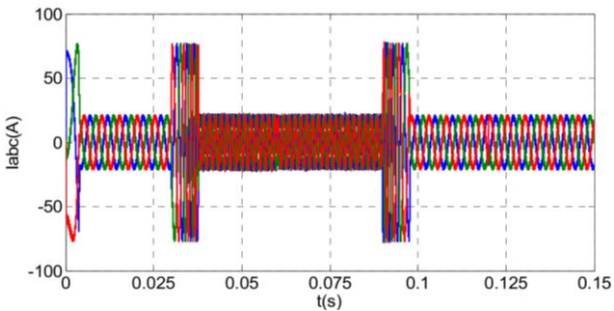
۶-۱- نتایج شبیه سازی کنترل مستقیم گشتاور در

ماشین SM

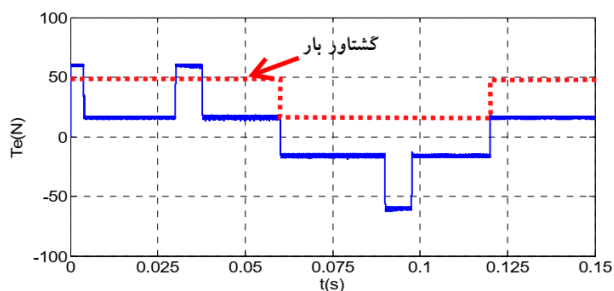
نتایج شبیه‌سازی کنترل گشتاور مستقیم در ماشین SM در شکل‌های ۷ تا ۱۱ نشان داده شده است.



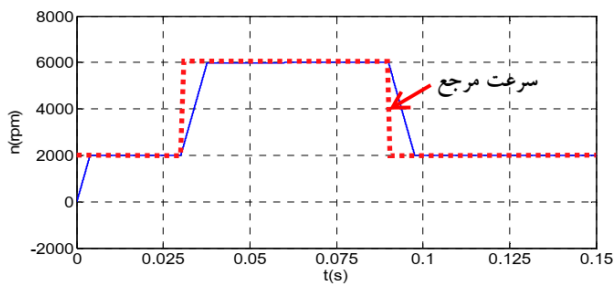
شکل (۷): جریان فاز a ماشین SM



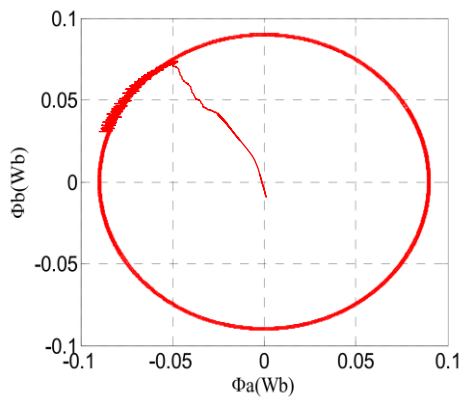
شکل (۸): جریان سه فاز ماشین SM



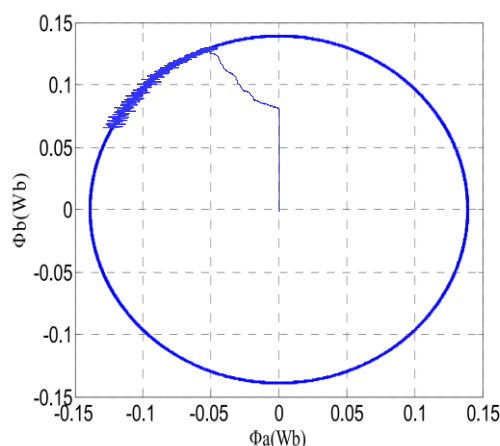
شکل (۹): گشتاور الکترومغناطیسی ماشین SM



شکل (۱۰): سرعت ماشین SM



شکل (۱۱): شار پیوندی استاتور ماشین SM



شکل (۱۶): شار پیوندی استاتور ماشین DRM

۳-۶- مقایسه کنترل برداری و کنترل مستقیم گشتاور

۳-۶-۱- مقایسه در ماشین SM

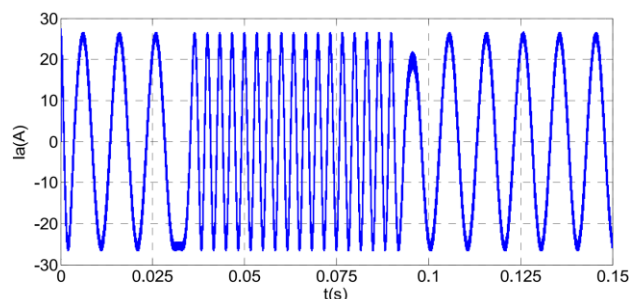
در کنترل مستقیم گشتاور در موتور PMSM، گشتاور الکترومغناطیسی با تنظیم زاویه بار δ کنترل می‌شود. "کنترل مستقیم گشتاور" به استفاده مستقیم از گشتاور به عنوان یک متغیر کنترل (با استفاده از تنظیم کننده هیستریزیس) اشاره می‌کند و همچنین به بردار ولتاژ برای تنظیم مستقیم δ (انتخاب بردار سوئیچ ولتاژ) اشاره می‌کند. تنظیم δ عملاً در حال تغییر $L_q i_q$ است و میدان مغناطیسی محور q توسط جریان i_q ایجاد شده است. بنابراین، ماهیت کنترل مستقیم گشتاور در موتور PMSM همچنان کنترل جریان i_q است. از این نقطه نظر، کنترل مستقیم گشتاور و کنترل برداری در اصول کنترل یکسان هستند و تفاوت اصلی در حالت کنترل منعکس شده است. ماهیت تولید گشتاور الکترومغناطیسی، تعامل بین میدان مغناطیسی است که توسط جریان استاتور ایجاد می‌شود. بنابراین مهم نیست که چه روش کنترل استفاده می‌شود. گشتاور را فقط می‌توان با کنترل جریان استاتور کنترل کرد. از این منظر، کنترل گشتاور مستقیم PMSM واقعاً "مستقیم" نیست و از آنجا که به طور مستقیم از i_q به عنوان یک متغیر کنترل استفاده نمی‌کند؛ در عوض، i_q توسط ولتاژ استاتور به طور غیر مستقیم کنترل می‌شود.

لذا این باعث مشکلات زیر خواهد شد: (۱) بردار ولتاژ سوئیچینگ گسسته ارائه شده توسط اینورتر برای پاسخگویی به i_q مورد نیاز در تمام زمان‌ها کافی نیست. (۲) با توجه به وجود اندوکتانس استاتور، جریان i_q همیشه در پشت سر ولتاژ u_q استاتور است و میدان مغناطیسی استاتور نمی‌تواند بطور ناگهانی تغییر یابد. لذا با افزایش ناگهانی بردار ولتاژ سوئیچینگ استاتور جریان استاتور نمی‌تواند بلافاصله تغییرات را دنبال کند. در عوض، با یک تاخیر زمانی معین تغییرات را دنبال می‌کند. اگر بردار ولتاژ سوئیچینگ در مدت کوتاهی

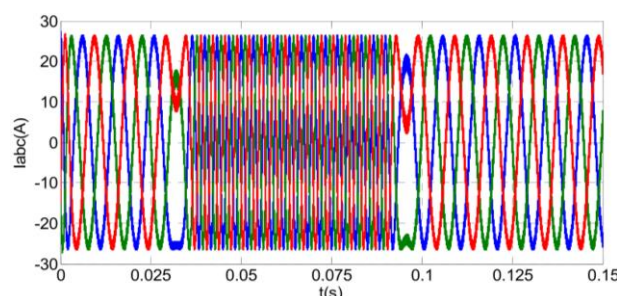
۲-۶- نتایج شبیه سازی کنترل مستقیم گشتاور در

ماشین DRM

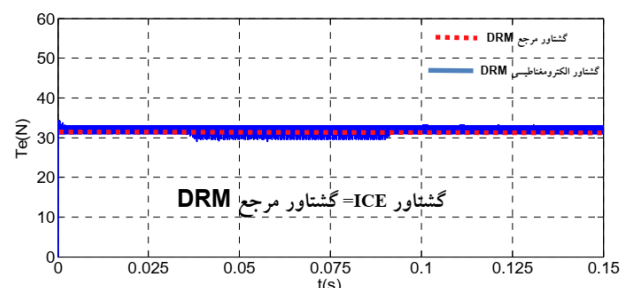
نتایج شبیه‌سازی کنترل گشتاور مستقیم در ماشین DRM در شکل‌های ۱۲ تا ۱۶ نشان داده شده است.



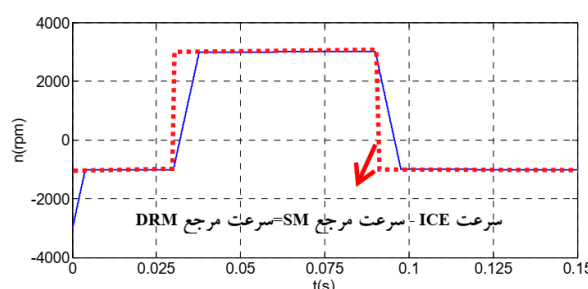
شکل (۱۲): جریان فاز a ماشین DRM



شکل (۱۳): جریان سه فاز موتور DRM



شکل (۱۴): گشتاور الکترومغناطیسی ماشین DRM



شکل (۱۵): سرعت ماشین DRM

عمل کند، جریان نمی‌تواند به مقدار مورد انتظار برسد، این باعث ریپل گشتاور می‌شود.

در کنترل برداری، i_d و i_q به طور مستقیم به عنوان متغیرهای کنترل استفاده می‌شوند، گشتاور توسط i_q کنترل می‌شود و ψ_s (تضعیف شار) توسط i_d کنترل می‌شود. در مقایسه با کنترل مستقیم گشتاور، کنترل برداری می‌تواند کنترل دقیق i_q را تضمین کند و کنترل گشتاور همچنین یک کنترل پیوسته و دقیق است. اگرچه کنترل مستقیم گشتاور از تنظیم کننده جریان و تبدیل مختصات استفاده نمی‌کند که سرعت سیستم را افزایش می‌دهد و در نتیجه باعث کاهش دقت گشتاور می‌شود. از نتایج شبیه‌سازی بالا می‌توان دید که کنترل برداری و مستقیم گشتاور تقریباً سرعت پاسخ یکسانی دارند. نوسان گشتاور در کنترل مستقیم گشتاور به طور قابل توجهی بیشتر از نوسان گشتاور در کنترل برداری است. بنابراین، برای ماشین SM یک استراتژی کنترل برداری انجام می‌شود.

۶-۳-۲- مقایسه در ماشین DRM

در کنترل مستقیم گشتاور از شار پیوندی مغناطیس دائم در سیستم کنترل استفاده می‌شود. با توجه به مدل ماشین DRM با در نظر گرفتن پدیده القای متقاطع، مدل شبیه‌سازی برای سیستم ایجاد شده است و نتایج شبیه‌سازی برای این دو حالت ارائه شده است.

همچنین، به منظور تجزیه و تحلیل عمیقتر دو استراتژی کنترل، وابستگی دو استراتژی کنترل به پارامترهای سیستم کنترل جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج شبیه‌سازی مربوط به تغییر شار مرجع و مقاومت استاتور توسط کنترل مستقیم گشتاور در جدول ۶ آمده است. جدول ۷ نتایج شبیه‌سازی دو روش کنترلی را نشان می‌دهد که میزان القای متقاطع در ماشین DRM متفاوت است. جدول ۸ نتایج شبیه‌سازی دو استراتژی کنترل را به ازای تغییر شار پیوندی در سیستم کنترلی نشان می‌دهد. در تمام شبیه‌سازی‌ها گشتاور مرجع ۳۲ N.m می‌باشد.

جدول (۶): نتایج شبیه‌سازی مربوط به تغییر شار مرجع و مقاومت استاتور توسط کنترل مستقیم گشتاور

شار پیوندی (Wb)	مقاومت استاتور داده شده (Ω)	گشتاور مرجع (N.m)	گشتاور متوسط بدون اثر القای متقاطع (N.m)	گشتاور متوسط با اثر القای متقاطع (N.m)
۰,۱۳۱	۰,۰۷	۳۲	۳۲,۰۵	۳۲,۰۵
۰,۱۳۵	۰,۱۰۱	۳۲	۳۲	۳۲
۰,۱۳۹	۰,۱۰۵	۳۲	۳۲	۳۲
۰,۱۴۳	۰,۱۰۹	۳۲	۳۲	۳۲
۰,۱۴۷	۰,۱۱۴	۳۲	۳۱,۹	۳۱,۹

جدول (۷): نتایج شبیه‌سازی دو روش کنترلی با میزان القای متقاطع متفاوت در موتور DRM

گشتاور در کنترل مستقیم گشتاور (N.m)	گشتاور در کنترل برداری (N.m)	اندوکتانس متقابل محورهای متعامد در موتور DRM (μH)	
		\hat{L}_{dq}	\hat{L}_{qd}
۳۲	۳۲,۰۳	۲۶,۴	۱۳,۵
۳۲	۳۲,۲	۵۲,۸	۲۷
۳۲	۳۲,۵	۱۰۵,۶	۵۴
۳۲	۳۳	۲۱۱,۲	۱۰۸
۳۲	۳۳,۷	۴۲۲,۴	۲۱۶

جدول (۸): نتایج شبیه‌سازی دو استراتژی کنترل را به ازای تغییر شار پیوندی

شار پیوندی (Wb)	کنترل مستقیم گشتاور		کنترل برداری	
	گشتاور متوسط با اثر القای متقاطع (N.m)	گشتاور متوسط بدون اثر القای متقاطع (N.m)	گشتاور متوسط با اثر القای متقاطع (N.m)	گشتاور متوسط بدون اثر القای متقاطع (N.m)
۰,۱۳۱	۳۲	۳۲	۳۴,۱۶	۳۴
۰,۱۳۵	۳۲	۳۲	۳۳,۱۵	۳۲,۹۵
۰,۱۳۹	۳۲	۳۲	۳۲,۲	۳۲
۰,۱۴۳	۳۲	۳۲	۳۱,۳	۳۱,۱
۰,۱۴۷	۳۲	۳۲	۳۰,۴۵	۳۰,۳

از تجزیه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی بالا، می‌توانیم ببینیم که کنترل مستقیم گشتاور یک تاثیر خوبی بر روی پدیده القای متقاطع در ماشین DRM به علت حلقه بسته گشتاور دارد و وابستگی به پارامترهای سیستم کنترل بسیار کمتر از کنترل برداری است. بنابراین، ماشین DRM، از استراتژی کنترل مستقیم گشتاور استفاده می‌کند.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به تجزیه و تحلیل تئوری، شبیه‌سازی و مطالعه عمیق موتور سنکرون با ساختار ترکیبی پرداخت شد. ساختار پایه و اصول کار موتور سنکرون مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی به طور خلاصه شرح داده شده است. سپس مدل ریاضی این موتور با ساختار شار شعاعی ایجاد شد. سه روش کنترل برداری موتور سنکرون مغناطیس دائم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بر اساس کاربرد موتور سنکرون مغناطیس دائم در خودرو هیبرید، یک استراتژی کنترل مناسب برای موتور سنکرون مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که موتور سنکرون مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی می‌تواند به خوبی در چهار ناحیه عمل کند و نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی با تجزیه و تحلیل تئوری دارد. همچنین مشخص شد که برای ماشین SM استراتژی کنترل برداری و برای ماشین DRM از استراتژی کنترل مستقیم گشتاور استفاده شود.

فهرست علائم و اختصارات

FOC	Field Oriented Control
FW	Field Weakening
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
MTPA	Maximum Torque Per Ampere
PM	Permanent Magnet
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
CSPMSM	Compound-Structure PMSM
DRM	Double Rotor Machine
SM	Stator Machine
P_{wheel}	توان تحویلی به چرخها
P_{load}	توان بار مورد نیاز قبل از گیربکس
P_{ICE}	توان خروجی موتورهای احتراق داخلی
$P_{battery}$	توان باتری
$P_{(doublerotor)}$	توان ماشین DRM
P_{stator}	توان ماشین SM
ω_{wheel}	سرعت چرخ
ω_{load}	سرعت شفت ورودی گیربکس
ω_{ICE}	سرعت خروجی موتور احتراق داخلی
$\omega_{inner rotor}$	سرعت مکانیکی روتور داخلی
$\omega_{double rotor motor}$	سرعت موتور دو روتوره
G	نسبت گیربکس
T_{wheel}	گشتاور منتقل شده به چرخ
T_{load}	گشتاور منتقل شده به محور ورودی گیربکس
T_{ICE}	گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی
$T_{double rotor motor}$	گشتاور ماشین DRM
$T_{stator motor}$	گشتاور ماشین SM
β	زاویه بین جریان استاتور و محور میدان مغناطیسی دائمی
θ	زاویه بین محور d محور و محور سیم پیچی فاز A
ψ_f	شار تحریک تولید شده توسط آهنربای دائم روتور
i_f	جریان تحریک معادل شار تحریک
L_q و L_d	اندوکتانس محورهای d و q
u_q و u_d	ولتاژ محورهای d و q
i_q و i_d	جریان محورهای d و q
ψ_q و ψ_d	شار پیوندی استاتورمحورهای d و q
T_e	گشتاور الکترومغناطیسی ماشین SM
R_s	مقاومت استاتور ماشین SM
p	تعداد جفت قطب های ماشین SM
\hat{L}_{qq} و \hat{L}_{dd}	اندوکتانس های خودی محورهای d و q
\hat{L}_{qd} و \hat{L}_{dq}	اندوکتانس متقابل محورهای d و q

\hat{u}_q و \hat{u}_d	ولتاژ محورهای d و q
\hat{i}_q و \hat{i}_d	جریان محورهای d و q
$\hat{\psi}_q$ و $\hat{\psi}_d$	شار پیوندی استاتورمحورهای d و q
$\hat{\psi}_f$	شار پیوندی مغناطیسی دائم روی استاتور
\hat{T}_e	گشتاور الکترومغناطیسی ماشین DRM
\hat{R}_s	مقاومت استاتور ماشین DRM
\hat{p}	تعداد جفت قطب های ماشین DRM
ω_r	سرعت زاویه ای (مکانیکی) روتور مشترک دو موتور
J	اینرسی موتور
B	ضریب اصطکاک

مراجع

- [۱] حاتمی، حجت؛ محمدباقر بناء شریفیان و محمدرضا فیضی، "ارایه ی روش جدید طراحی بهبودیافته ماشین های مغناطیسی دائم شار محوری سرعت پایین مورد استفاده در خودروهای هیبریدی"، فصلنامه مهندسی برق دانشگاه تبریز ۴۵ (۲)، ۱۳۹۴.
- [2] Xu, Qiwei, et al. "Research on Parameters Matching of Hybrid Electric Vehicle with Compound-Structure Induction Machine." Advanced Computational Methods in Energy, Power, Electric Vehicles, and Their Integration. Springer, Singapore, 2017. 339-350.
- [3] Singh, Krishna Veer, Hari Om Bansal, and Dheerendra Singh. "A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components." Journal of Modern Transportation 27.2 (2019): 77-107.
- [4] He, Xiangyu, and Ying Jiang. "Review of hybrid electric systems for construction machinery." Automation in Construction 92 (2018): 286-296.
- [5] H. Cai and L. Xu, "Modeling and control for cage rotor dual mechanical port electric machine-part I: model development," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 30, no. 3, pp. 957-965, 2015.
- [6] G. Chandaka and G. Prasanth, "Direct torque control and field-oriented control of PMSM using SVPWM technique," Int. J. Adv. Res. Sci. Eng., vol. 3 no. 11, 2014.
- [7] A. Khlaief, M. Abassi, M. Boussak and M. Gossa, "DSP based SVPWM technique for field-oriented speed control of permanent magnet synchronous motor drive," Proce of the Int. Conf. Sci. Tech. Autom. Control, 2009.
- [8] V. R. Jevremovic and D. P. Marcetic, "Closed-loop fluxweakening for permanent magnet synchronous motors," Proc. of the 4th IET Conf. Power Electron. Machines Drives, pp. 717-721, 2008.
- [9] J. M. Kim and S. K. Sul, "Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 33, no. 1, pp. 43-48, 1997.
- [10] Xu, Qiwei, et al. "Analysis and Design of a Compound-Structure Permanent-Magnet Motor for Hybrid Electric Vehicles." Energies 11.8 (2018): 2156.
- [11] Tang, Xiaolin, et al. "A novel simplified model for torsional vibration analysis of a series-parallel hybrid electric vehicle." Mechanical Systems and Signal Processing 85 (2017): 329-338.

- [12] Wang, Mingqiao, et al. "Performance analysis of an axial magnetic-field-modulated brushless double-rotor machine for hybrid electric vehicles." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66.1 (2018): 806-817.
- [13] T. Bäckström. *Integrated Energy Transducer Drive for Hybrid Electric Vehicles*. Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm. 2000:10~15
- [14] Cai, Haiwei. "Modeling and Control of Dual Mechanical Port Electric Machine." PhD diss., The Ohio State University, 2015.
- [15] S. Eriksson, C. Sadarangani. "A Four-quadrant HEV Drive System." *Proceedings of Vehicular Technology Conference*. 2002:1510~1514
- [16] Bojan Štumberger, Gorazd Štumberger, Drago Dolinar, Anton Hamler and Mladen Trlep. "Evaluation of Saturation and Cross-Magnetization Effects in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor." *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2003, 39(5): 1264~1271
- [17] Ekanayake, Sithumini, et al. "Direct torque and flux control of interior permanent magnet synchronous machine in deep flux-weakening region." *IET Electric Power Applications* 12.1 (2017): 98-105.
- [18] Shinohara, Atsushi, et al. "Correction method of reference flux for maximum torque per ampere control in direct-torque-controlled IPMSM drives." *IEEE Journal of Industry Applications* 6.1 (2017): 12-18.
- [19] Rahmani Fard J. "A Novel High-Performance Field-Weakening Control for Axial Flux-Switching Permanent-Magnet Motor." *IJEEE*. 2020; 16 (1) :39-47

[۲۰] عرب مارکده، غ و م. صدوق، کنترل مستقیم گشتاور و ضریب توان یک موتور القایی با خطی سازی ورودی-خروجی با استفاده از مبدل ماتریسی. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۰، ۸(۱): صفحه ۳۹-۳۱

[۲۱] مویدی راد، ح، م.ع. شمسی نژاد و م. فرشاد، بهبود عملکرد درایو کنترل سرعت موتور القایی در محدوده ی سرعت های پایین و بالا با جبران ساز شار روتور. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران: ۱۳۹۱، ۹(۲): صفحه ۵۹-۶۴.

[۲۲] مویدی راد، ح، م. فرشاد و م.ع. شمسی نژاد، مقاوم سازی و بهبود عملکرد درایو موتور القایی در قبال تغییرات شایع پارامترهای موتور در حین کار با استفاده از کنترل کننده ی هوشمند مبتنی بر یادگیری عاطفی. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۶، ۱۲(۱): صفحه ۱۰۳-۱۱۸.