

بهبود کارآیی موتور PM کنترل شده به روش DTC با در نظرگیری اشباع مغناطیسی

سید بهروز مجیدی جعفر میلی منفرد

دانشکده مهندسی برق، قطب علمی قدرت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

واژه‌های کلیدی: موتور PM، DTC، اشباع مغناطیسی

چکیده

اصولا طراحی موتورها به نحوی انجام می‌شود که نقطه کار نامی در نقطه زانویی واقع شود تا امکان استفاده از حداکثر گشتاوری که موتور قادر به تولید آن است، فراهم گردد. بنابراین چون موتور دارای اشباع مغناطیسی است، لذا در نظرگیری اشباع مغناطیسی و تاثیر آن در سیستم کنترل موتور امری لازم و ضروری می‌باشد. از طرف دیگر کنترل مستقیم گشتاور (DTC) به عنوان یک طرح مفید و کاربردی برای موتورهای PM مطرح می‌باشد. از این رو در این مقاله با در نظرگیری اثر اشباع مغناطیسی به اصلاح محدودیت‌ها، استراتژی‌های کنترل و بهبود کارآیی DTC در موتور PM پرداخته شده است. منظور از بهبود کارآیی، بهبود در پاسخ محرکه می‌باشد که از آن جمله می‌توان پاسخ دقیق سرعت، وابستگی اندک به تغییر پارامترها، بازیابی سریع سرعت تحت اغتشاشات بار و استفاده بهینه از ظرفیت موتور را نام برد. همچنین از آنجا که در مدل موتور PM در محیط MATLAB/SIMULINK اشباع مغناطیسی در نظر گرفته

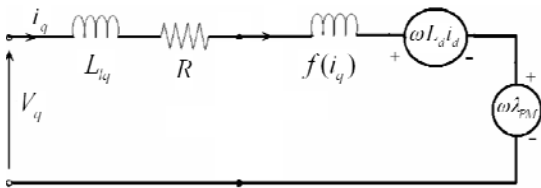
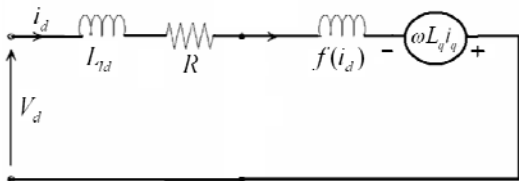
نشده است، ابتدا مدل‌سازی موتور PM با در نظرگیری اشباع مغناطیسی و سپس مقایسه پاسخ سرعت و گشتاور در گستره وسیع سرعت در دو حالت با در نظرگیری اشباع مغناطیسی و بدون در نظرگیری اشباع مغناطیسی در سیستم کنترل ارائه گردیده است. در پایان نتایج شبیه‌سازی کارآیی این پروسه را در گستره وسیع سرعت تایید می‌کند.

1- مقدمه

اخیرا به موتورهای PM به دلیل ویژگیهای ممتاز آن بیش از پیش توجه می‌شود. برخی از این ویژگیها عبارتند از: نسبت بالای گشتاور به جریان، نسبت بالای توان به جریان، نویز کم و بازده بالا. وجود این ویژگیها در گستره وسیع سرعت باعث شده تا موتورهای PM به خصوص در کاربردهای با کارآیی بالا مورد توجه خاصی واقع شوند [1]. در محرکه‌های با کارآیی بالا و سرعت متغیر، موتور تغییرات سرعت را از طریق یک فرمان مرجع دنبال می‌کند و با تغییرات بار یا پارامترهای موتور دستخوش تغییر نمی‌شود [2]. به طور خلاصه در برخی

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

مقاومت سیم پیچ‌های استاتور در هر فاز، شار آهنربا، ψ_f شار استاتور، δ زاویه بار، ω_{re} و ω_{rm} سرعت مکانیکی و سرعت زاویه‌ای الکتریکی، P تعداد زوج قطب، p عملگر مشتق، T_e گشتاور الکترومغناطیسی، T_l گشتاور بار و J ثابت اینرسی می‌باشد. البته در این روابط با در نظر گیری اشباع مغناطیسی L_d و L_q مقادیر ثابت نخواهند بود و به ترتیب تابعی از جریان‌های i_d و i_q خواهند بود. بر این اساس مدل کلی دو محوری موتور با در نظر گیری اشباع مغناطیسی به شکل زیر می‌باشد.



شکل 1: مدل موتور با در نظر گیری اشباع مغناطیسی در راستای محورهای d و q

3- اشباع مغناطیسی در موتور PM

اشباع مغناطیسی در مدل دو محوری در هر دو راستای d و q رخ می‌دهد. با فرض اینکه کوپلینگ بین دو محور d و q ناچیز باشد، می‌توان گفت اشباع در راستای محورهای d و q ناشی از مولفه جریان همان محور است، یعنی مولفه d جریان، شار در راستای محور d و مولفه q جریان، شار در راستای محور q تولید می‌کند. معمولاً اشباع مغناطیسی در راستای محور q بسیار شدیدتر از اشباع مغناطیسی در راستای محور d می‌باشد. این موضوع به آن دلیل است که فاصله هوایی در راستای محور d نسبت به محور q بزرگتر است و این فاصله هوایی مانع از اشباع شدید هسته در راستای این محور می‌شود. از این رو می‌توان از اثر اشباع مغناطیسی در راستای محور d صرف نظر کرد [4]. تاثیر اشباع مغناطیسی روی L_q را

کاربردها عملکرد محرکه در گستره وسیع سرعت مورد نظر و مطلوب ما می‌باشد. به عبارت دیگر هدف عملکرد مطلوب در هر دو ناحیه گشتاور ثابت و توان ثابت می‌باشد [3]. یکی از روش‌های رسیدن به عملکرد بهینه محرکه، استفاده از استراتژی‌های کنترلی مناسب نظیر حداکثر گشتاور بر جریان (MTPA) در زیر سرعت نامی و تضعیف شار (FW) در بالای سرعت نامی می‌باشد. ذکر این نکته لازم و ضروری است که استراتژی‌های MTPA و FW با در نظر گرفتن اشباع مغناطیسی اصلاح و بهینه می‌شوند که در این مقاله با در نظر گرفتن این موضوع به بهبود عملکرد موتور PM کنترل شده به روش DTC در گستره وسیع سرعت پرداخته شده است.

2- مدل ماشین

مدل ریاضی موتور PM در قاب مرجع روتور به کمک مدل ماشین سنکرون با توجه به شار ثابت آهنربا بدست می‌آید. در اینجا با توجه به ناچیز بودن تلفات هسته و اندوکتانس پراکندگی و تغییرات ناچیز شار روتور به بررسی اثر اشباع مغناطیسی پرداخته شده است [3]. با در نظر گرفتن فرضیات فوق معادلات ولتاژ و گشتاور به شرح زیر می‌باشند.

$$\begin{pmatrix} V_q \\ V_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & \omega_{re} L_d \\ -\omega_{re} L_q & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_q \\ i_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_q & 0 \\ 0 & i_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} pL_q \\ pL_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_q & 0 \\ 0 & L_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} pi_q \\ pi_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{re} \psi_f \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3P\psi_s}{4L_d L_q} [2\psi_f L_q \sin \delta - \psi_s (L_q - L_d) \sin 2\delta] \quad (2)$$

$$T_e = T_L + B \omega_{rm} + Jp \omega_{rm} \quad (3)$$

$$\omega_{rm} = \frac{1}{P} \omega_{re} \quad (4)$$

که V_q و V_d مولفه‌های d و q ولتاژ، L_q و L_d مولفه‌های d و q اندوکتانس، i_q و i_d مولفه‌های d و q جریان، R

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$T = \frac{3}{2} P [\psi_f + (L_d - L_q(i_q)) i_d] i_q \quad (7)$$

$$|\psi_s| = \sqrt{(L_d i_d + \psi_f)^2 + (L_q(i_q) i_q)^2} \quad (8)$$

ذکر این نکته لازم و ضروری است که به منظور نگاشت صحیح بایستی اثر اشباع مغناطیسی در روابط (7) و (8) در نظر گرفته شود، یعنی L_q در روابط (7) و (8) مقدار ثابتی نخواهد بود، بلکه تابعی از i_q می‌باشد که در رابطه (6) بیان گردید. در اینجا به بیان محدودیت‌های ولتاژ و جریان پرداخته و سپس بررسی آن‌ها در دو ناحیه گشتاور ثابت (زیر سرعت نامی) و توان ثابت (بالای سرعت نامی) ارائه گردیده است.

4-1- محدودیت‌ها

با در نظر گیری محدودیت‌های ولتاژ و جریان می‌توان نوشت:

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{am} \quad (9)$$

$$V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \leq V_{am} \quad (10)$$

که I_{am} حد حرارتی جریان و یا به عبارت دیگر حداکثر جریان مجاز اینورتر می‌باشد و V_{am} حد ولتاژ و یا به عبارت دیگر حداکثر ولتاژ خروجی اینورتر می‌باشد. همانطور که در رابطه (9) دیده می‌شود، حد بحرانی I_a ، I_{am} می‌باشد که اگر در صفحه $i_d - i_q$ رسم شود، دایره‌ای خواهد بود که به دایره حرارتی معروف می‌باشد، چنانچه در شکل (3-الف) دیده می‌شود. شکل این دایره حرارتی مستقل از در نظر گیری یا صرف نظر کردن از اشباع مغناطیسی می‌باشد. حال به ازای هر زوج i_d و i_q به کمک روابط (7) و (8) می‌توان این محدودیت‌ها را به صفحه $T - |\varphi_s|$ نگاشت داد. چنانچه در شکل‌های (3-ب) و (3-ج) دیده می‌شود. در شکل (3-ب) نگاشت بدون در نظر گیری اشباع مغناطیسی و در شکل (3-ج) نگاشت با در نظر گیری اشباع مغناطیسی انجام شده است.

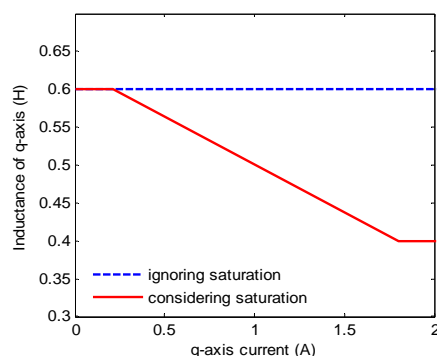
می‌توان اینگونه در نظر گرفت که در واقع L_q مقدار ثابتی نمی‌باشد، بلکه تابعی غیر خطی از i_q می‌باشد [5].

$$L_q = L_q(i_q) \quad (5)$$

تابع L_q خطی سازی شده که در اینجا مورد استفاده قرار داده‌ایم، مطابق رابطه (6) می‌باشد [6].

$$L_q = \begin{cases} L_{q0}, & i_q < i_{qs} \\ L_{q0} - \beta(i_q - i_{qs}), & i_q > i_{qs} \end{cases} \quad (6)$$

همان‌طور که در این رابطه مشاهده می‌شود تا قبل از i_{qs} مقدار L_q ثابت می‌باشد و از آن به بعد با افزایش جریان i_q مقدار L_q کاهش می‌یابد. در رابطه فوق β ضریبی است که معرف شدت اشباع در L_q می‌باشد. همچنین منحنی مربوط به تابع L_q خطی سازی شده در شکل (2) مشاهده می‌شود.



شکل 2: منحنی خطی سازی شده مربوط به تابع L_q

4- بررسی DTC با در نظر گیری اشباع مغناطیسی

در روش کنترل برداری شار و گشتاور از طریق کنترل مولفه‌های d و q جریان کنترل می‌شوند و از این‌رو استراتژی‌ها و محدودیت‌های روش کنترلی در صفحه $i_d - i_q$ نشان داده می‌شوند. در روش کنترل مستقیم گشتاور بر خلاف روش کنترل برداری، گشتاور و شار استاتور مستقیماً کنترل می‌شوند، از این رو تمامی استراتژی‌ها و محدودیت‌های روش DTC در صفحه $T - |\varphi_s|$ نشان داده می‌شوند. این محدودیت‌ها در واقع همان محدودیت‌های روش کنترل برداری هستند که طبق روابط (7) و (8) از صفحه $i_d - i_q$ به صفحه $T - |\varphi_s|$ نگاشت داده می‌شوند.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

MTPA بدون در نظرگیری اشباع و با در نظرگیری اشباع به ترتیب در روابط (11) و (12) بیان شده است [7-8].

$$i_d = \frac{\psi_f}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\psi_f^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2} \quad (11)$$

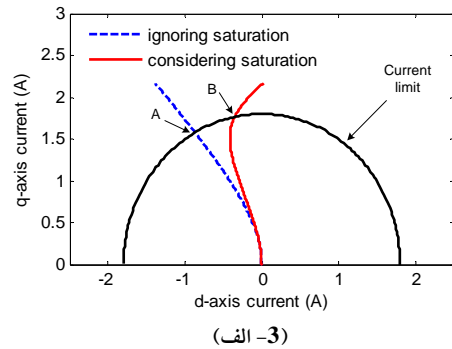
$$i_d = \frac{\psi_f - \sqrt{\psi_f^2 + 4i_q^2(L_q - L_d)}[(L_q - L_d) - (L'_q)i_q]}{2[(L_q - L_d) - (L'_q)i_q]} \quad (12)$$

با توجه به آنچه که در رابطه (6) بیان شد، L'_q به صورت زیر تعریف می‌شود:

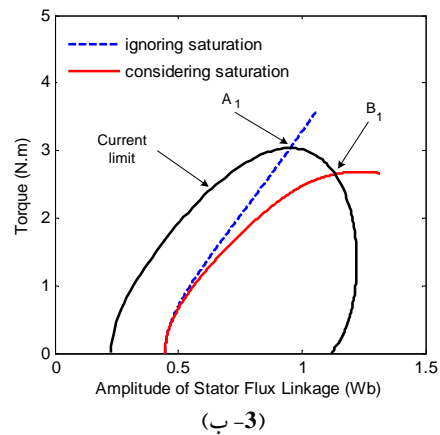
$$L'_q = \begin{cases} 0 & i_q < i_{qs} \\ -\beta & i_q > i_{qs} \end{cases} \quad (13)$$

شکل (3-الف) مسیر MTPA را در صفحه $i_d - i_q$ با در نظرگیری و بدون در نظرگیری اشباع مغناطیسی نشان می‌دهد. شکل (3-ب) و (3-ج) مسیر MTPA معمولی و اصلاح شده را هنگام نگاشت یکبار بدون در نظرگیری اشباع مغناطیسی و یکبار با در نظرگیری اشباع مغناطیسی در صفحه $T - |\varphi_s|$ نشان می‌دهد.

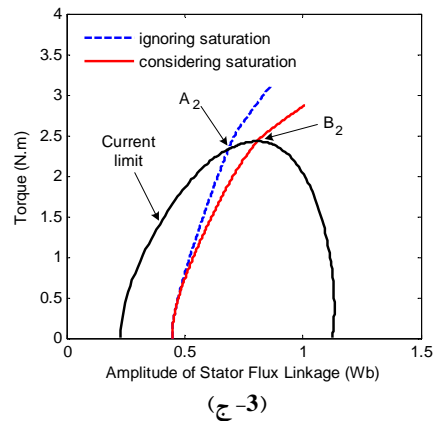
نقطه کار مورد نظر به منظور حداکثر گشتاور، از برخورد مسیر MTPA و دایره حرارتی بدست می‌آید که این نقطه بدون در نظرگیری اشباع مغناطیسی (یعنی MTPA معمولی) با حرف A و با در نظرگیری اشباع مغناطیسی (یعنی MTPA اصلاح شده) با حرف B نشان داده شده است. نگاشت داده شده نقاط A و B بدون در نظرگیری اشباع در نگاشت نقاط A_1 و B_1 و با در نظرگیری اشباع در نگاشت A_2 و B_2 می‌باشند که در شکل‌های (3-ب) و (3-ج) دیده می‌شوند. نقطه A_1 نمی‌تواند نقطه نظیر حداکثر گشتاور باشد، چون در موتور PM واقعی اشباع وجود دارد، همچنین نقطه B_1 هم نمی‌تواند نقطه نظیر حداکثر گشتاور باشد، چون در نگاشت هم باید اثر اشباع مغناطیسی لحاظ شود. به این ترتیب نقطه نظیر حداکثر گشتاور، نقطه B_2 می‌باشد که در شکل (3-ج) نشان داده شده است.



(3-الف)



(3-ب)



(3-ج)

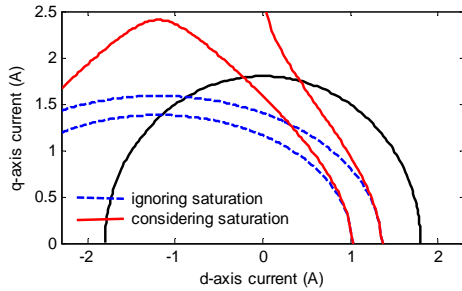
شکل 3: مسیر MTPA و منحنی محدودیت جریان الف- در صفحه $i_d - i_q$
 ب- نگاشت داده شده به صفحه $T - |\varphi_s|$ بدون در نظرگیری اشباع مغناطیسی
 ج- نگاشت داده شده به صفحه $T - |\varphi_s|$ با در نظرگیری اشباع مغناطیسی

4-2- کنترل در ناحیه گشتاور ثابت

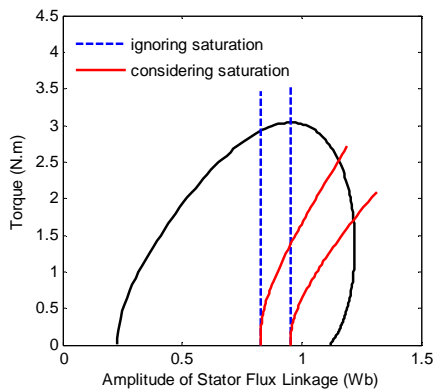
رایجترین استراتژی کنترل در ناحیه گشتاور ثابت، استراتژی MTPA می‌باشد. در اینجا استراتژی MTPA با در نظرگیری اشباع مغناطیسی اصلاح می‌شود. رابطه بین i_d و i_q در

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

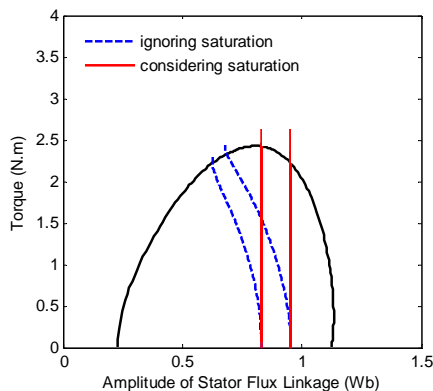
محدودیت ولتاژ همواره توسط کنترل مسیر MTPA اصلاح می‌شود. هنگام عملکرد در بالای سرعت نامی خطوط محدودیت ولتاژ به سمت نیمه چپ صفحه $T-|\varphi_s|$ حرکت می‌کنند و طبق رابطه (18) شار استاتور کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر دامنه شار استاتور به صورت معکوس و تقریباً خطی، با افزایش سرعت کاهش می‌یابد.



(الف -4)



(ب -4)



(ج -4)

شکل 4: منحنی‌های محدودیت ولتاژ و جریان الف- در صفحه $i_d - i_q$ ب- نگاهت داده شده به صفحه $T-|\varphi_s|$ بدون در نظرگیری اشباع مغناطیسی ج- نگاهت داده شده به صفحه $T-|\varphi_s|$ با در نظرگیری اشباع مغناطیسی

3-4- کنترل در ناحیه توان ثابت (تضعیف شار)

گشتاور در ناحیه تضعیف شار توسط محدودیت‌های ولتاژ و جریان مشخص می‌شوند.

$$V_o = \sqrt{v_{do}^2 + v_{qo}^2} \leq V_{om} \quad (14)$$

که در آن:

$$v_{do} = -\omega_{re} L_q (i_q) i_q, \quad v_{qo} = \omega_{re} L_d i_d + \omega_{re} \psi_f \quad (15)$$

$$V_{om} = V_{am} - RI_{am} \quad (16)$$

شکل (4-الف) محدودیت‌های ولتاژ بدون در نظرگیری اشباع مغناطیسی و با در نظرگیری اشباع مغناطیسی را در صفحه $i_d - i_q$ نشان می‌دهد. شکل‌های (4-ب) و (4-ج) محدودیت ولتاژ معمولی و اصلاح شده را هنگام نگاهت یکبار بدون در نظرگیری اشباع مغناطیسی و یکبار با در نظرگیری اشباع مغناطیسی در صفحه $T-|\varphi_s|$ نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (4-ج) دیده می‌شود، محدودیت ولتاژ با در نظرگیری اشباع مغناطیسی در صفحه $T-|\varphi_s|$ خطوط عمودی هستند. همچنین رابطه محدودیت ولتاژ با در نظرگیری اشباع از ترکیب روابط (14) و (15) بدست می‌آید.

$$\left(-L_q (i_q) i_q\right)^2 + \left(L_d i_d + \psi_f\right)^2 = \left(\frac{V_{om}}{\omega_{re}}\right)^2 \quad (17)$$

بنابراین:

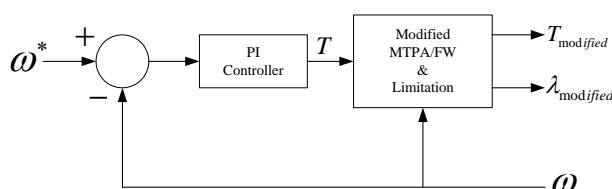
$$|\psi_s| = \frac{V_{om}}{\omega_{re}} \quad (18)$$

همانطور که مشاهده می‌شود رابطه (18) مستقل از اشباع مغناطیسی می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت که صرف نظر از در نظر گرفتن یا در نظر نگرفتن اشباع مغناطیسی، محدودیت ولتاژ در صفحه $T-|\varphi_s|$ خطوطی عمودی خواهند بود. به طور کلی هنگام عملکرد در زیر سرعت نامی خطوط محدودیت ولتاژ در صفحه $T-|\varphi_s|$ در نیمه راست مسیر MTPA و دایره حرارتی هستند (نقطه B₂). بنابراین

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

5- نتایج شبیه‌سازی

با توجه به توضیحاتی که در قسمت‌های قبل داده شد، بلوک دیاگرام سیستم کنترل موتور مطابق شکل (5) می‌باشد.



شکل 5: بلوک دیاگرام سیستم کنترل موتور

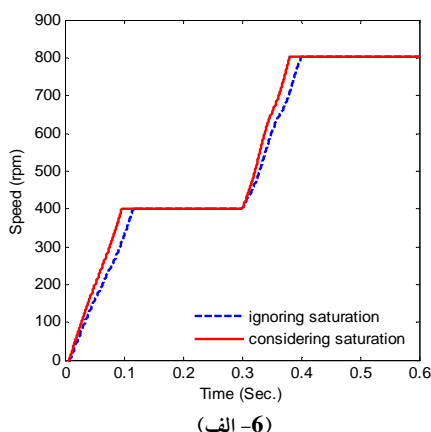
در این سیستم ابتدا سرعت موتور با سرعت مبنا مقایسه و خطای آن وارد کنترلر PI می‌شود. در هر لحظه خروجی کنترلر، گشتاور و خروجی بلوک Modified MTPA/FW بردار گشتاور و شار استاتور اصلاح شده می‌باشد که به سیستم اعمال می‌شود. پارامترهای موتور PM مورد آزمایش در جدول (1) آمده است.

جدول 1: پارامترهای موتور PM مورد نظر

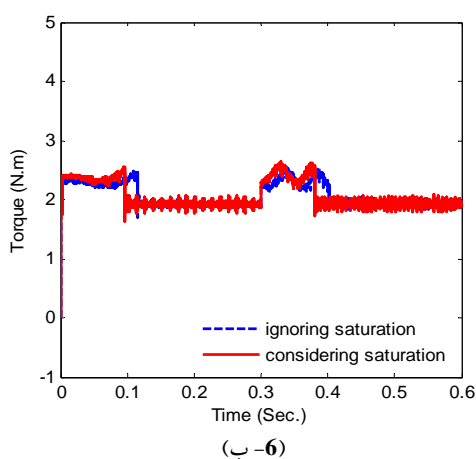
Ω 19.4	R_s	240 V	V_{am}
0.447 Wb	λ_m	1.8 A	I_{am}
0.003 kg.m ²	J	4	P
0.0008 Nm/rad/sec	B	0.375 H	L_d
		$i_q < (0.21A)$	L_q
		$0.601 - 0.1258(i_q - 0.21) H$	

به منظور ارزیابی سیستم کنترل پیشنهادی، موتور در شرایط زیر سرعت نامی با استراتژی MTPA و بالای سرعت نامی با استراتژی FW در محیط MATLAB/SIMULINK تحت آزمایش قرار گرفته است. در هر آزمایش نتایج در دو حالت با در نظر گیری اشباع مغناطیسی و بدون در نظر گیری اشباع مغناطیسی ارائه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در زیر سرعت نامی، پس از راه اندازی در لحظه 0.3 ثانیه سرعت از 400 دور بر دقیقه به 800 دور بر دقیقه افزایش داده شده است و در بالای سرعت نامی پس از راه اندازی در لحظه 0.1 ثانیه

گشتاور بار به 1.4 نیوتن متر افزایش و در لحظه 0.2 ثانیه سرعت از 800 دور بر دقیقه به 2000 دور بر دقیقه (بالای سرعت نامی) افزایش داده شده است.

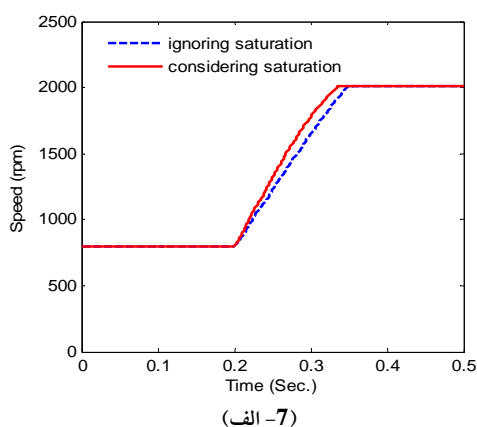


(6-الف)



(6-ب)

شکل 6: پاسخ سیستم DTC با در نظر گیری و بدون در نظر گیری اشباع مغناطیسی در ناحیه زیر سرعت نامی
الف- پاسخ سرعت ب- پاسخ گشتاور



(7-الف)

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

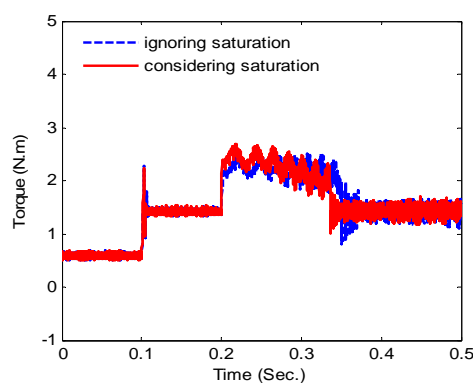
در شکل (8) همانطور که قبلاً نیز اشاره گردید، در شرایط زیر سرعت نامی از استراتژی MTPA و در شرایط بالای سرعت نامی از استراتژی FW استفاده شده است.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظرگیری اشباع مغناطیسی در موتور و تاثیر آن در سیستم کنترل، منحنی‌های مربوط به استراتژی‌های کنترل، محدودیت‌های ولتاژ و محدودیت‌های جریان اصلاح و ارائه گردید. همچنین نشان داده شد که در نظر گرفتن اشباع مغناطیسی منجر به بهبود کارایی DTC در موتور PM می‌گردد. منظور از بهبود کارایی، بهبود در پاسخ خروجی محرکه موتور PM می‌باشد که از آن جمله می‌توان پاسخ دقیق سرعت، بازیابی سریع تحت اغتشاشات بار و افزایش ظرفیت و حداکثر گشتاور موتور را نام برد. نتایج شبیه‌سازی تاثیر و کارایی این موضوع را در گستره وسیع سرعت تایید می‌کند.

7- مراجع

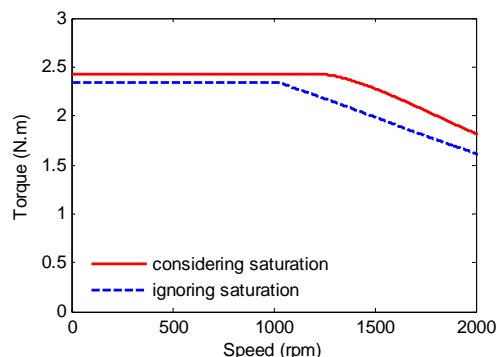
- [1] G. R Slemon, "Electric machines and drives, Addison-Wesley Publication Company, 1992, pp. 503-511.
- [2] K. Malekian and J. Monfared, "A genetic based fuzzy logic controller for IPMSM drive over wide speed range," Electric Machines & Drives Conference, IEMDC '07, IEEE International, vol. 1, pp. 847-853, May 2007.
- [3] S. R. MacMinn and T. m. Jahns, "Control techniques for improved high-speed performance of interior PM synchronous motor drive," IEEE Trans. Industrial Application, vol. IA-27, no.4, Sep/Oct., pp.997~1004, 1991.
- [4] S. A. Nasar, I. Boldea and L. E. Unnewehr, "Permanent magnet, reluctance, and self-synchronous motors. Florida: CRC Press, 1993.
- [5] N. Bianchi and S. Bolognani, "Parameters and volt-ampere rating of a synchronous motor drive for flux-weakening applications," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 12, no. 5, pp. 895-903, Sept. 1997.
- [6] B. J. Chalmers, "Influence of saturation in brushless permanent-magnet motor drives," IEE Proc, pt. B, vol. 139, no. 1, pp. 51-52, Jan. 1992.
- [7] C. Mademlis and V. G. Agelidis, "On considering magnetic saturation with maximum torque to current control in interior permanent magnet synchronous motor drives," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 16, no. 3, pp. 246-252, Sep. 2001.
- [8] Y. A. Mohamed, "Direct Instantaneous Torque Control in Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Motors—a New Approach," IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 22, pp. 829-838, Dec. 2007.



(7- ب)

شکل 7: پاسخ سیستم DTC با در نظرگیری و بدون در نظرگیری اشباع مغناطیسی در ناحیه بالای سرعت نامی
الف- پاسخ سرعت ب- پاسخ گشتاور

نتایج حاصله در دو حالت زیر سرعت نامی در شکل‌های (6- الف) و (6- ب) و در بالای سرعت نامی در شکل‌های (7- الف) و (7- ب) ارائه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در هر دو حالت موتور دارای اشباع مغناطیسی می‌باشد. در حالت اول اثر اشباع مغناطیسی در معادلات و سیستم کنترل لحاظ نگردیده ولی در حالت دوم اثر اشباع مغناطیسی در معادلات و سیستم کنترل لحاظ گردیده است. همانطور که از مقایسه شکل‌ها و همچنین شکل (8) بر می‌آید، در نظرگیری اشباع مغناطیسی باعث افزایش حداکثر گشتاور از 2/32 به 2/41 نیوتن متر (حدود 4 درصد افزایش ظرفیت موتور)، کاهش ریبیل گشتاور، سریعتر میرا شدن گشتاور در اثر تغییر سرعت و شتابگیری سریعتر موتور تحت فرمان‌های سرعت می‌گردد.



شکل 8: منحنی گشتاور- سرعت در زیر و بالای سرعت نامی با در نظرگیری و بدون در نظرگیری اشباع مغناطیسی