

بهبود نوسان گشتاور و بازده ماشین سنکرون مغناطیس دائم داخلی بر اساس کنترلر فازی

در روش کنترل مستقیم گشتاور

حجت مصطفوی^۱، بهزاد میرزاییان دهکردی^۲، محمد عطایی^۳ و مجتبی صادقی گوغری^۴

۱- دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی برق، اصفهان، ایران

mostafavi.hojat@gmail.com

۲- دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی برق، اصفهان، ایران

mirzaeian@eng.ui.ac.ir

۳- دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی برق، اصفهان، ایران

ataie@eng.ui.ac.ir

۴- دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی برق، اصفهان، ایران

mojtaba.138@gmail.com

چکیده: در این مقاله، روشی برای کنترل شار مرجع در سرعت ها و بارهای مختلف برای ماشین سنکرون مغناطیس دائم داخلی (IPMSM) ارائه می‌گردد. از روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC) بر اساس مدولاسیون بردار فضایی (SVM) برای کنترل (IPMSM) استفاده می‌شود. این روش از دو کنترل کننده تناسبی-انتگرالی (PI) برای کنترل شار استاتور و گشتاور استفاده می‌کند. همچنین، یک کنترل کننده فازی به منظور بهبود عملکرد دینامیکی روش DTC برای کنترل سرعت در نظر گرفته شده است. روش ارائه شده برای تولید شار مرجع استاتور به صورت تابعی از گشتاور مرجع است. این روش موجب بهبود پاسخ گشتاور IPMSM و همچنین، کاهش تلفات و در نتیجه، افزایش بازده آن نسبت به روش متداول می‌شود. نهایتاً کارایی روش پیشنهادی توسط شبیه سازی در سرعت ها و بارهای مختلف بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شار مرجع، کاهش تلفات، کنترل مستقیم گشتاور، ماشین سنکرون مغناطیس دائم، کنترل کننده فازی.

۱- مقدمه

می‌توان به حذف انتقال به مختصات‌های متفاوت، کمترین وابستگی به پارامترهای ماشین، عدم نیاز به کنترل مستقیم جریان استاتور و پاسخ دینامیکی سریعتر اشاره کرد [۵]. اگرچه، ریپل گشتاور و شار نسبتاً بالا از معایب این روش کنترل است، بسیاری از پژوهشگران برای بهبود ریپل گشتاور تلاش کرده‌اند [۶-۸]. یک روش مناسب برای کاهش ریپل گشتاور استفاده از مدولاسیون بردار فضایی (SVM) [۵] است. این روش به کمک کنترلر PI به فرکانس کلیدزنی ثابت و ریپل گشتاور و شار پایین دست یافته است. یکی از مسائل دیگری که در روش DTC مطرح است، عدم کنترل مستقیم جریان‌های استاتور است که اگر نتوان به طور مناسب این جریان‌ها را به صورت غیر مستقیم

از زمان به کارگیری کنترل مستقیم گشتاور (DTC) برای ماشین‌های القایی، تحقیقات برای پیاده‌سازی آن روی سایر انواع ماشین‌های الکتریکی آغاز شد. در سال ۱۹۹۰ روش DTC روی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم داخلی (IPMSM) پیاده سازی شد [۴-۱]. روش DTC، نسبت به روش‌های کنترل برداری مرسوم مزایای فراوانی دارد که

^۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۰/۴/۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۱۰/۱۰

نام نویسنده مسئول : بهزاد میرزاییان دهکردی

نشانی نویسنده مسئول : ایران ، اصفهان، دانشگاه اصفهان،

دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی برق

که L_d و L_q به ترتیب اندوکتانس های محور d و q ، ψ_d و ψ_q مولفه های شار پیوندی استاتور در قاب مرجع روتور، ψ_{pm} شار مغناطیس دائم، T_e گشتاور الکترومغناطیسی، P تعداد جفت قطب ها و δ زاویه بار (زاویه بین شار پیوندی استاتور و روتور) هستند. در حالت کار پایدار، با توجه به ثابت بودن گشتاور بار و اینکه شار استاتور و روتور هر دو با سرعت سنکرون می چرخند، δ ثابت است.

در حالت کارکرد گذرا، شار استاتور و روتور با سرعت های متفاوت به چرخش در می آیند و δ تغییر می کند. از آنجا که ثابت زمانی الکتریکی معمولاً خیلی کوچکتر از ثابت زمانی مکانیکی است، سرعت چرخش شار استاتور نسبت به شار روتور به راحتی می تواند تغییر کند. بنابراین گشتاور می تواند با تغییر δ یا سرعت چرخش شار استاتور کنترل شود. این موضوع ایده اصلی کنترل مستقیم گشتاور است.

زاویه δ از رابطه زیر به دست می آید:

$$\begin{cases} \delta = \theta_s - \theta_r \\ \theta_s = \omega_s t \\ \theta_r = \omega_r t \end{cases} \quad (3)$$

که θ_s و θ_r زاویه های بردار شار استاتور و شار مغناطیس دائم نسبت به قاب مرجع ساکن هستند. مطابق معادله (۳)، کنترل گشتاور نهایتاً با تغییر سرعت زاویه ای بردار شار استاتور (ω_s) فراهم می شود. معادلات (۴) ولتاژ IPMSM در قاب شار مرجع استاتور (x-y) را بیان می کند. در این معادله R_s مقاومت سیم پیچی استاتور است. معادله (۴) نشان می دهد که سرعت چرخش بردار شار استاتور با بردار ولتاژ استاتور مناسب کنترل می شود. کاملاً واضح است که اندازه بردار شار استاتور می تواند مستقیماً با مؤلفه x ولتاژ استاتور تنظیم شود. همچنین گشتاور، به طور غیر مستقیم می تواند توسط مؤلفه y ولتاژ استاتور تنظیم شود، البته تا زمانی که زاویه بار به وسیله بردار شار استاتور کنترل می شود.

$$\begin{cases} V_{sx} = R_s i_x + \frac{d\psi_x}{dt} = R_s i_x + \frac{d\psi_s}{dt} \\ V_{sy} = R_s i_y + \omega_s \psi_x = R_s i_x + \omega_s \psi_s \end{cases} \quad (4)$$

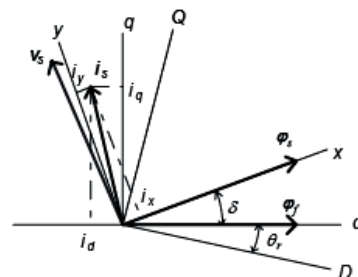
کنترل کرد، یکی از معایب روش DTC محسوب می شود. در این زمینه نیز تحقیقات متعددی برای بهبود عملکرد DTC انجام شده که از آن جمله می توان به مراجع [۹-۱۱] اشاره کرد. با توجه به این که جریان استاتور به شار و گشتاور وابسته است، اصلاح شار مرجع و گشتاور مرجع می تواند یکی از راه حل های این مسأله باشد. این مقاله با ارائه یک شار مرجع وابسته به گشتاور مرجع و جایگزینی آن به جای شار مرجع متداول، بهبود مناسبی را در کنترل جریان استاتور، کاهش تلفات و در نتیجه افزایش بازده IPMSM ایجاد می کند. به منظور بهبود دینامیک سرعت به خصوص در مواقعی که گشتاور بار به ماشین اعمال می گردد، یک کنترل کننده فازی جایگزین کنترل کننده PI شده است.

۲- مدل ماشین IPMSM

بردار شار پیوندی استاتور و بردار شار پیوندی روتور (مغناطیس دائم)، می توانند در قاب های مرجع، شار روتور (d-q)، شار استاتور (x-y) و ساکن (D-Q) رسم شوند که در شکل (۱) نشان داده شده است. معادلات شار استاتور و گشتاور در قاب شار مرجع روتور به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_{pm} \\ \psi_q = L_q i_q \\ |\psi_s| = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3P\psi_q}{4L_d L_q} (2\psi_{pm} L_q \sin \delta + \psi_s (L_q - L_d) \sin 2\delta) \\ &= \frac{3P}{2} (\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \end{aligned} \quad (2)$$



شکل (۱): شار پیوندی استاتور و روتور در قاب های مرجع متفاوت

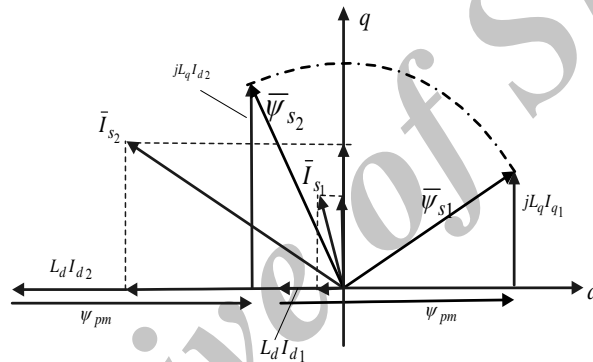
خواهد شد که افزایش تلفات و کاهش بازده را در پی خواهد داشت.

۵-۲- شار مرجع پیشنهادی

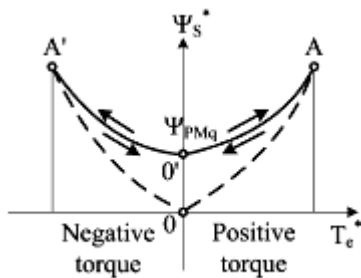
به منظور رفع مشکل شار مرجع متداول روشی بر اساس مرجع [۱۳] ارائه شده است. در روش پیشنهادی شار مرجع استاتور به گشتاور مرجع وابسته است. مشکل اینجاست که برای یک گشتاور و شار مرجع مشخص دو جفت جریان (i_d, i_q) وجود دارد که در معادله (۱) صدق می‌کند (شکل (۳)).

$$\delta_m \text{ که: } \psi_s = \frac{L_q}{L_q - L_d} \psi_{pm}$$

زاویه بار ماکزیمم است. در روش متداول (کنترل شار مرجع بر اساس سرعت)، در زیر سرعت پایه، مقدار شار مرجع ثابت است و از معادله (۹) به دست می‌آید؛ در سرعت‌های بالاتر از سرعت پایه، مقدار شار مرجع با افزایش سرعت، کاهش می‌یابد. در DTC، جریان‌های محور d و q استاتور به طور مستقیم کنترل نمی‌شوند و مقادیر آنها وابسته به مقادیر شار و گشتاور است. با توجه به این موضوع ثابت بودن شار مرجع زیر سرعت پایه، به ازای گشتاورهای متفاوت، موجب ایجاد جریان‌های نامناسب برای استاتور



شکل (۳): دو جفت جریان استاتور (I_d, I_q) برای گشتاور T_e^* و شار ψ_s^* داده شده



شکل (۴): منحنی گشتاور-شار $\psi_s^*(T_e^*)$ از صفر تا سرعت پایه [۱۲]

پس:

$$i_{d \max} = \frac{\psi_{pm}}{L_d} \quad (11)$$

هنگامی که ماکزیمم گشتاور بر حسب سرعت مورد نیاز باشد، خواهیم داشت:

با توجه به شکل (۳)، جفت $\bar{\psi}_{s1}$ و \bar{I}_{s1} به علت اینکه اندازه جریان کوچکتر است و همچنین، مغناطیس دائم در این حالت تحت فشار کمتری قرار دارد، مناسبتر است. یک راه حل برای ایجاد جریان‌های مناسب در DTC این است که برای گشتاور صفر داشته باشیم $(\psi_s^* = \psi_{PM})$ (نقطه $0'$ در شکل (۴))، که جریان صفر $(i_d = i_q = 0)$ را برای گشتاور صفر تضمین می‌کند، و سپس شار مرجع همراه با افزایش گشتاور مرجع افزایش یابد. از طرف دیگر، به منظور پاسخ‌دهی سریع گشتاور، هنگامی که ماشین زیر یک بار سنگین قرار دارد و یا در ناحیه تضعیف شار است، کنترل به سمت شار استاتور صفر در گشتاور صفر حرکت می‌کند (نقطه 0 در شکل (۴)).

جریان محور d محاسبه می شود و از این مقادیر i_q^* و ψ_d^* محاسبه می گردد.

$$i_d^* = \frac{\psi_{pm}^*}{L_d} \sqrt{\frac{|T_e^*|}{T_{e\max}^*}} \quad (15)$$

$$\psi_d^* = L_d i_d^* + \psi_{pm} \quad (16)$$

ساختار شار مرجع پیشنهادی که بر اساس معادلات (۱۱) تا (۱۶) طراحی شده، در شکل (۵) نشان داده شده است.

$$T_{e\max}^* = 1.5P\psi_q i_{d\max} \quad (12)$$

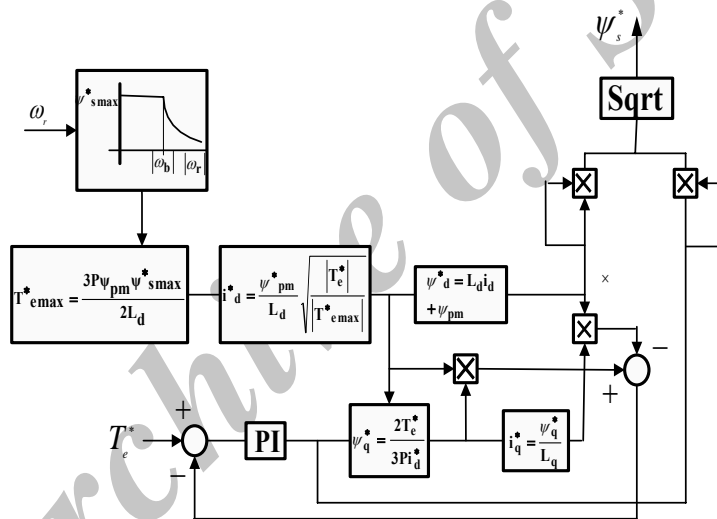
$$\left(\psi_s^*\right)_{T_{e\max}^*} = \frac{2T_{e\max}^* L_d}{3\psi_{pm}} \quad (13)$$

که $\left(\psi_s^*\right)_{T_{e\max}^*}$ به ترتیب زیر تعیین می گردد:

$$\left(\psi_s^*\right)_{T_{e\max}^*} \approx \frac{L_q}{L_q - L_d} \psi_{pm} = \psi_{s0} \quad \text{for } \omega_r < \omega_b$$

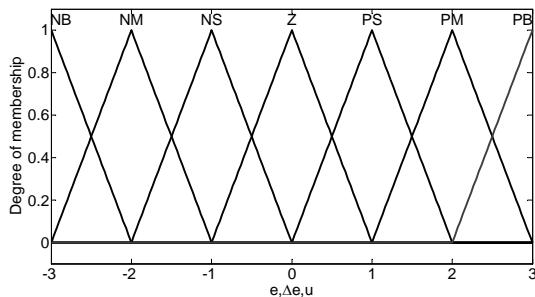
$$\left(\psi_s^*\right)_{T_{e\max}^*} \approx \psi_{s0} \frac{\omega_r}{\omega_b} \quad \text{for } \omega_r \geq \omega_b \quad (14)$$

سرعت پایه، ω_b و ولتاژ استاتور در سرعت پایه V_{sb} است. برای گشتاور مرجع داده شده، شار مرجع محور q و



شکل (۵): شار مرجع استاتور IPMSM

گرفته شده است. این توابع عضویت برای هر سه مولفه خطا، تغییرات خطا و خروجی (u) به صورت شکل (۶) در نظر گرفته شده است.



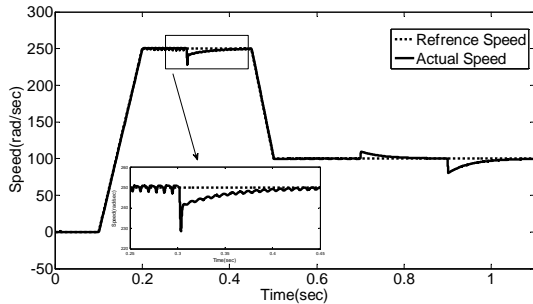
شکل (۶): توابع عضویت فازی برای e, de, u

۵-۳- کنترل کننده فازی

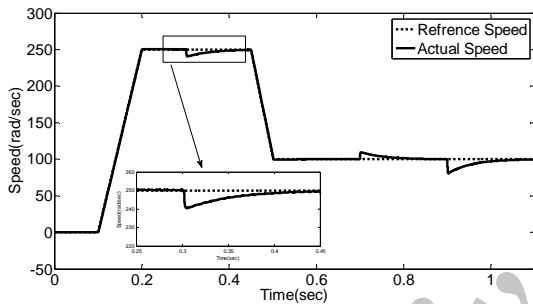
عملکرد دینامیکی PI سرعت در روش شرح داده شده در بخش (۳)، به خصوص در مواقع اعمال گشتاور بار، تا حدودی کند است؛ بنابراین به منظور بهبود عملکرد دینامیکی سرعت یک کنترل کننده فازی جایگزین PI در حلقه سرعت می گردد.

کنترل کننده فازی دارای دو ورودی خطا (e) و تغییرات خطا (de) است. توابع عضویت برای این کنترل کننده به صورت توابع مثلثی و در فاصله ۳- تا ۳ در نظر

در مدل شبیه سازی شده، زمان نمونه برداری SVM روی $5 \mu s$ تنظیم شده است. شکل های (۷ تا ۱۲) عملکرد دینامیکی دو روش متداول و پیشنهادی را نسبت به سرعت مرجع مشخص شده در شکل (۷) نشان می دهند:

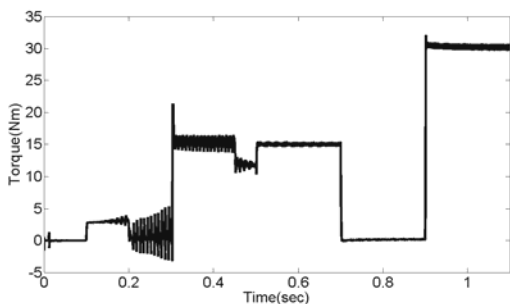


شکل (۷): پاسخ دینامیکی سرعت در روش متداول



شکل (۸): پاسخ دینامیکی سرعت در روش پیشنهادی

در حالی که در ثانیه 0.3 گشتاور 15 Nm (نصف گشتاور نامی) به موتور اعمال می شود و موتور در ثانیه 0.9 زیر گشتاور نامی (30 Nm) قرار می گیرد. با مقایسه شکل (۷) و (۸) مشاهده می شود در روش پیشنهادی، پاسخ سرعت به خصوص در لحظه ای که موتور زیر بار قرار می گیرد، با نوسان کمتری همراه است. پاسخ گشتاور دو روش در شکل های (۹) و (۱۰) قابل مقایسه هستند.



شکل (۹): پاسخ دینامیکی گشتاور در روش متداول

در این مقاله ۷ تابع عضویت استفاده شده که به صورت: NB (Negative Big), NM (Negative Medium), NS (Negative Small), Z (Zero), PS (Positive Small), PM (Positive Medium), PB (Positive Big) نام گذاری شده اند. قوانین فازی مورد استفاده در این مقاله در جدول (۱) آمده است:

جدول (۱): قوانین فازی

| de | PB | PM | PS | Z | NS | NM | NB |
|------|----|----|----|----|----|----|----|
| PB | Z | Z | Z | PB | PM | Z | Z |
| PM | Z | Z | Z | PM | Z | Z | Z |
| PS | Z | Z | Z | PS | Z | Z | NM |
| Z | PB | PM | PS | Z | NS | NM | NB |
| NS | PM | Z | Z | NS | Z | Z | Z |
| NM | Z | Z | Z | NM | Z | Z | Z |
| NB | Z | Z | NM | NB | Z | Z | Z |

۶- شبیه سازی

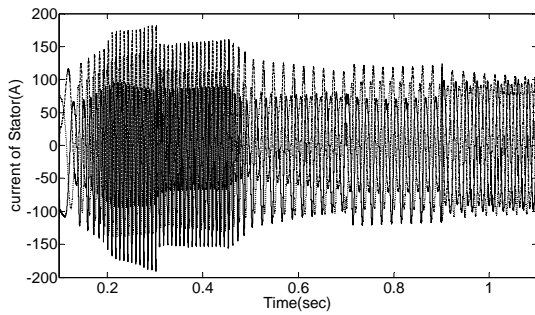
برای بررسی کارایی روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش متداول، از نرم افزار Matlab/simulink استفاده شده است. پارامترهای IPMSM بکار رفته، در جدول شماره (۲) آمده است.

جدول (۲): پارامترهای ماشین IPMSM

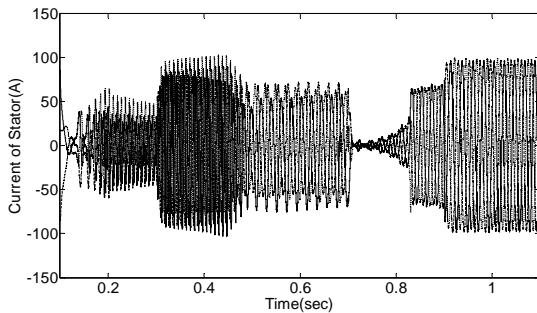
| | | |
|------------------------|-------------|-------------------------|
| ۳ | P | تعداد جفت قطب ها |
| $29.5 \text{ m}\Omega$ | R_s | مقاومت استاتور |
| 0.07 Wb | ψ_{pm} | شار پیوندی مغناطیس دائم |
| $375 \mu\text{H}$ | L_d | اندوکتانس محور |
| $835 \mu\text{H}$ | L_q | اندوکتانس محور |
| 240 V | V | ولتاژ فاز نامی |
| 120 A | I | جریان فاز نامی |
| 2500 rpm | ω_b | سرعت پایه |
| 30 Nm | T_e | گشتاور نامی |

با توجه به مطالب ذکر شده در بخش ۵-۱ و به منظور رسیدن به کنترل پایدار، مقدار شار پیوندی استاتور نامی (ψ_{s0}) بنابر معادله (۹) به صورت زیر است:

$$\psi_{s0} = 0.127$$

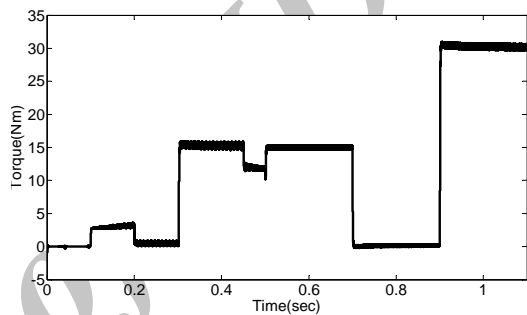


شکل (۱۱): جریان های استاتور در روش متداول



شکل (۱۲): جریان های استاتور در روش پیشنهادی

همان طور که ملاحظه می شود، پاسخ گشتاور روش پیشنهادی با ریبیل گشتاور کمتری همراه است؛ هرچند ریبیل گشتاور هر دو روش در گشتاور و سرعت نامی یکسان است. شکل (۱۲) جریان های سه فاز استاتور را برای روش پیشنهادی نشان می دهد. مشاهده می شود که دامنه جریان استاتور، بویژه در بی باری نسبت به روش متداول، (شکل (۱۱))، کاهش درخور توجهی داشته است. جدول (۳)، تلفات اهمی استاتور را برای دو روش ذکر شده در سرعت 200 rad/sec به ازای گشتاورهای مختلف نشان می دهد.

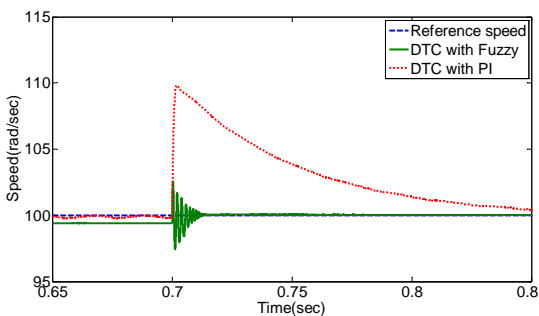


شکل (۱۰): پاسخ دینامیکی گشتاور در روش پیشنهادی

جدول (۳): تلفات اهمی تحت بارهای مختلف

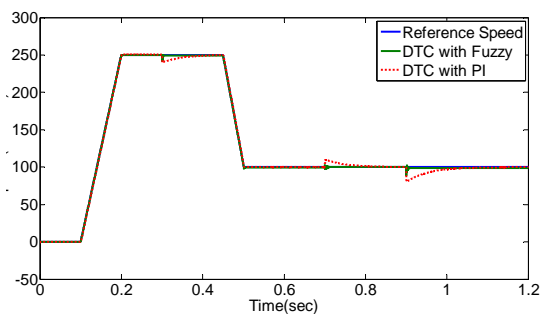
| گشتاور (Nm) | تلفات اهمی روش متداول | تلفات آهن روش متداول | تلفات اهمی روش پیشنهادی | تلفات آهن روش پیشنهادی | درصد کاهش تلفات روش پیشنهادی نسبت به روش متداول |
|-------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|------------------------|---|
| ۵ | ۱۷۴/۹ W | ۱۴۸/۷ W | ۳۷ W | ۳۱/۸ W | ٪۷۸/۷ |
| ۱۰ | ۱۵۵ W | ۱۳۰/۲ W | ۵۸/۴ W | ۵۰/۲ W | ٪۶۱/۹ |
| ۲۰ | ۱۵۲ W | ۱۲۹/۲ W | ۱۱۴/۱ W | ۹۵/۸۵ W | ٪۲۵/۳ |
| ۳۰ | ۱۹۰/۲ W | ۱۶۴/۵ W | ۱۹۰/۲ W | ۱۶۴/۵ W | ٪۰ |

همان طور که شکل (۱۴) به وضوح نشان می دهد، هنگام اعمال گشتاور بار کنترل کننده فازی توانسته است در زمان بسیار کمتری نسبت PI سرعت را به مقدار مرجع خود باز گرداند.



شکل (۱۴): بزرگنمایی شکل (۱۳) را در بازه زمانی ۰/۸۵

شکل (۱۳) پاسخ سرعت روش DTC پیشنهادی را در حالتی که از کنترل کننده PI در حلقه سرعت استفاده می کند با حالتی که از کنترل کننده فازی استفاده می شود، مقایسه می کند.



شکل (۱۳): مقایسه پاسخ دینامیکی سرعت با کنترل کننده PI

Fuzzy و

۰/۶۵

نتیجه گیری

در این مقاله، روش مناسبی برای تولید شار مرجع (به صورت تابعی از گشتاور مرجع) برای DTC-SVM ارائه شد، گشتاور و شار برای رسیدن به بهترین عملکرد دینامیکی و حالت دائمی کنترل شدند. نتایج شبیه سازی کارایی این روش را در کاهش ریبیل گشتاور و به خصوص بهبود بازده در بارهای کم به وسیله کاهش تلفات استاتور نشان می دهد. همچنین، به منظور بهبود عملکرد روش DTC، یک کنترل کننده فازی طراحی و جایگزین کنترل کننده PI حلقه سرعت گردید که موجب بهبود پاسخ دینامیکی سرعت، به خصوص در هنگام اعمال گشتاور بار به موتور شد.

مراجع

- [6] C. G. Mei, S. K. Panda, J. X. Xu and K. W. Lim, "Direct Torque Control of Induction Motor – Variable Switching Sensors," Conf. Rec. IEEE-PEDS, Hong Kong, pp. 80-85, Jul. 1999
- [7] C. Martins, X. Roboam, T. A. Meynard and A. S. Caryalho, "Switching Frequency Imposition and Ripple Reduction in DTC Drives by Using a Multilevel Converter," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 17, No. 2, pp. 286-297, Mar. 2002.
- [8] C. Lascu, I. Boldea and F. Blaabjerg, "A Modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 36, No. 1, pp.122-130, Jan/ Feb. 2000.
- [9] L. Tang, L. Zhong, M. F. Rahman and W. Y. Hu, "A Novel Direct Torque Controlled Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Drive With Low Ripple in Flux and Torque and Fixed Switching Frequency," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 19, No. 2, pp. 1746-1756, Mar. 2004.
- [10] M. Meye, T. Grote and J. Bocker, "Direct Torque Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Respect to Optimal Efficiency," Conf. Power Electron. and Applicat. European. pp. 1-9, Jan. 2007.
- [11] G. H. B. Foo and M. F. Rahman, "Direct Torque Control of an IPM-Synchronous Motor Drive at Very Low Speed Using a Sliding-Mode Stator Flux Observer," IEEE Trans. Power Electron, Vol. 25, No. 4, pp. 933-942, Apr. 2010.
- [12] L. Tang, L. Zhong, M. F. Rahman, and Y. Hu, "A novel direct torque control for interior permanent-magnet synchronous machine drive with low ripple in torque and flux—A speed-sensorless approach," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 39, No. 6, pp. 1748-1756, Nov./Dec. 2003.
- [13] I. Boldea, C. I. Pitic, C. Lascu, G.-D. Andreescu, L. Tutelea, F. Blaabjerg, and P. Sandholdt, "DTFC-SVM motion-sensorless control of PM-assisted reluctance synchronous machine as starter-alternator for hybrid electric vehicles," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 21, No. 3, pp. 711-719, May. 2006.
- [1] Zhong, M. F. Rahman, W. Y. Hu and K. W. Lim, "Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives," IEEE Trans. Power Electron., vol. 12, No. 3, pp. 528-536, May. 1997.
- [2] L. Zhong, M. F. Rahman, W. Y. Hu and K. W. Lim, "A direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive incorporating field weakening," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 34, No. 6, pp. 1246-1253, Nov./Dec. 1998.
- [3] C. French and P. Acarnley, "Direct torque control of permanent magnet drives," IEEE Trans Ind. Appl., Vol. 32, No. 5, pp. 1080-1088, Sept./Oct. 1996
- [4] M. F. Rahman, L. Zhong and K. W. Lim, "A direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive incorporating field weakening," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, Vol. 1, pp. 67-74, Sept. 1997
- [5] L. Tang, L. Zhong, M. F. Rahman and Y. Hu, "A Novel Direct Torque Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Drive System with Low Ripple in Flux and Torque and Fixed Switching Frequency," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 19, No. 2, pp. 346-354, Mar. 2004.