

بهبود کارآیی محرکه DTC ماشین القایی با در نظرگیری تغییرات مقاومت استاتور

محمد مهدی رضایی سید مجتبی میرسلیم

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

واژه‌های کلیدی: موتور القایی، DTC، مقاومت استاتور

چکیده

یکی از محاسن روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC)، به حداقل رسیدن وابستگی سیستم کنترل به پارامترهای ماشین می‌باشد. در این روش تنها مقاومت استاتور است که در فرایند تخمین شار استاتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. تغییر مقاومت استاتور در اثر تغییر دما یا فرکانس، موجب بروز خطا در تخمین شار استاتور و گشتاور شده و به تبع آن موجب کاهش کارایی ماشین، بویژه در سرعت‌های پایین می‌گردد. بنابراین تخمین مقاومت استاتور و جبران تغییرات آن در محرکه‌های DTC ضروری ضروری به نظر می‌رسد. روشی که در این مقاله، بمنظور جبران تغییرات مقاومت استاتور پیشنهاد شده است، استفاده از کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی (PI) است که در حین کارکرد محرکه، بصورت خودکار توسط روش بهینه سازی مبتنی بر هجوم ذرات (PSO) بصورت بهینه تنظیم می‌گردد. نتایج بکارگیری روش پیشنهادی حاکی از آن است، که تنظیم سریع و در عین حال بهینه این کنترل کننده

موجب تخمین دقیق مقاومت استاتور در حالت مانا و افزایش قابل ملاحظه دقت تخمین در حالات گذرا می‌گردد.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، محرکه‌های کنترل مستقیم گشتاور ماشین القایی، با توجه به مزایای بارزی همچون طراحی و پیاده‌سازی ساده‌تر، کاهش وابستگی سیستم کنترل به پارامترهای ماشین و پاسخ گشتاور سریع‌تر توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است [۱]. روش کنترل مستقیم گشتاور در کنار محاسن بسیار زیاد، محدودیت‌هایی نیز دارد. یکی از مهمترین این محدودیت‌ها، استفاده از مقاومت استاتور در فرایند تخمین شار است. در این روش، با انتگرال‌گیری از اختلاف ولتاژ استاتور و افت اهمی ولتاژ استاتور می‌توان شار دربرگیرنده استاتور را مطابق رابطه (۱) محاسبه نمود [۲].

$$\bar{\psi}_s = \int (\bar{u}_s - R_s \bar{i}_s) dt \quad (1)$$

که در آن \bar{u}_s ، \bar{i}_s ، $\bar{\psi}_s$ و R_s به ترتیب بردار فضایی ولتاژ، بردار فضایی جریان، بردار فضایی شار دربرگیرنده و مقاومت

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

مقدار گشتاور مرجع کوچک است، تخمین مقاومت استاتور مبتنی بر کنترل کننده فازی دچار مشکل ناپایداری می‌شود. تخمین مقاومت استاتور با استفاده از یک ناظر مبتنی بر کنترل کننده فازی، روشی است که در مرجع [۵] پیشنهاد شده است. اگر چه دقت این روش بالاتر است، اما کنترل کننده فازی بکار رفته، شامل تعداد زیادی قوانین فازی بوده و بر مبنای نتایج عملی تعداد زیادی آزمون طراحی می‌شود؛ بنابراین استفاده از این روش در عمل چندان آسان نمی‌باشد.

روشی که در این مقاله پیشنهاد شده است، تنظیم هوشمند و بهینه ضرایب کنترل کننده PI در حین عملکرد ماشین است. در این روش ضرایب کنترل کننده PI بکار رفته در سیستم تخمین مقاومت استاتور، در حین عملکرد ماشین با استفاده از الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر هجوم ذرات (PSO) بهینه سازی می‌شوند. روش بهینه‌سازی بر مبنای هجوم ذرات یک روش بهینه‌سازی بر مبنای جستجوی تصادفی است. PSO نواحی بهینه فضای جستجو را از طریق تکرار جستجوی گروه ذرات پیدا می‌کند. این روش توانایی اعجاب انگیزی در حل مسائل بهینه‌سازی غیر خطی پیوسته دارد [۶-۷]. این روش نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی از پایداری بسیار خوب، کیفیت پاسخ دهی بالا و زمان محاسباتی بسیار کمتری برخوردار است.

در حقیقت، سیستم تخمین مقاومت استاتور پیشنهادی، ترکیبی است از کنترل کننده‌های PI و روش بهینه سازی هجوم ذرات. بنابراین پس از آنکه در بخش دوم مبنای روش کنترل مستقیم گشتاور بصورت خلاصه مرور گردید، در بخش سوم، تاثیر تغییرات مقاومت استاتور بر کارایی محرکه کنترل مستقیم گشتاور مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش بهینه‌سازی مبتنی بر هجوم ذرات موضوعی است که در بخش چهارم تشریح شده است. در بخش پنجم، به معرفی سیستم تخمین مقاومت استاتور پیشنهادی پرداخته شده است. در بخش ششم، با استفاده از مدل محرکه کنترل مستقیم گشتاور، روش پیشنهادی مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج حالت مانا و گذرای آن، با

استاتور می‌باشد. تغییر مقاومت استاتور در اثر تغییر دمای ماشین یا در اثر تغییر فرکانس، باعث بوجود آمدن اعوجاج شدید شار و گشتاور ماشین، بویژه در سرعت‌های پایین خواهد شد؛ جایی که اندازه نیروی محرکه القایی ماشین کاهش یافته و بنابراین افت اهمی ولتاژ و تغییرات مقاومت استاتور اهمیت بیشتری خواهند یافت. مقاومت بکار رفته در روند تخمین شار، مطابق رابطه (۱)، مقدار نامی مقاومت استاتور است، بنابراین هر تغییری در مقاومت استاتور ماشین القایی ایجاد شود، خطای بزرگی در روند تخمین شار بوجود می‌آید و به تبع آن تخمین گشتاور ماشین و موقعیت بردار فضایی شار دربرگیرنده نیز دچار خطای تخمین می‌گردد.

موضوع تخمین مقاومت استاتور، اخیراً مورد توجه برخی محققین قرار گرفته است. تخمین مقاومت استاتور می‌تواند توسط کنترل کننده‌های تناسبی-انتهگرالی (PI) انجام شود. استفاده از کنترل کننده‌های PI روشی است که در مراجع [۳-۴] به آن پرداخته شده است. در این روش ضرایب کنترل کننده PI برای یک حالت خاص طراحی می‌شود و مقاومت استاتور بر مبنای خطای بین مقادیر مرجع و واقعی جریان استاتور تخمین زده می‌شود. در محرکه‌های کنترل مستقیم گشتاور با تغییرات جریان استاتور ناشی از تغییرات بار یا ولتاژ ورودی و در نتیجه تغییرات جدید دمایی ماشین، تغییرات مقاومت استاتور عوض خواهد شد. بنابراین کنترل کننده PI مرسوم، علاوه بر مشکل تنظیم بهینه، نمی‌تواند بطور جامع تخمین درستی از مقاومت استاتور داشته باشد. اگرچه در برخی از مقالات روش‌هایی بمنظور تنظیم ضرایب کنترل کننده PI در حین عملکرد ماشین پیشنهاد شده است اما این روش‌ها عمدتاً از دقت خوبی برخوردار نبوده و بنابراین نمی‌توانند تخمین خوبی از مقاومت استاتور ارائه دهند. در مرجع [۴] تخمین مقاومت استاتور یک محرکه کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از کنترل کننده‌های فازی پیشنهاد شده و نتیجه آن با یک کنترل کننده PI مقایسه شده است. در این مقاله تخمین مقاومت استاتور بر مبنای خطای بین مقادیر مرجع و واقعی جریان استاتور انجام می‌شود. اما هنگامی که

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

در محرکه‌های کنترل مستقیم گشتاور، پس از تخمین شار و گشتاور ماشین، از دو مقایسه کننده هیستریسز بمنظور تنظیم مستقیم گشتاور و شار دربرگیرنده استفاده می‌شود. پهنای باند این مقایسه کننده‌ها تعیین کننده محدوده مجاز نوسانات شار و گشتاور ماشین است. مادامی که شار و گشتاور ماشین در این محدوده قرار دارند ولتاژهای سوئیچ‌زنی صفر به ماشین اعمال می‌گردد. اما هنگامی که یکی از این دو پارامتر به مرز باند برسد و یا محدوده مجاز باند مقایسه کننده هیستریسز را نقض کند، با توجه به قطعی که بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور در آن قرار دارد، بهترین بردار ولتاژ انتخاب و به ماشین اعمال می‌شود [۱-۲].

۳- تاثیر تغییرات مقاومت استاتور بر محرکه DTC

یکی از محدودیت‌های محرکه‌های کنترل مستقیم گشتاور، استفاده از مقاومت استاتور برای تخمین شار دربرگیرنده استاتور است. تغییرات مقاومت استاتور در اثر تغییرات دمایی یا فرکانسی، اثرات نامطلوبی بر روند کنترل محرکه، بویژه در سرعت‌های پایین می‌گذارد. در روش کنترل مستقیم گشتاور، بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور ($\bar{\psi}_s$) با استفاده از انتگرال اختلاف بین ولتاژ استاتور و افت اهمی ولتاژ در اثر مقاومت استاتور مطابق رابطه (۱) تخمین زده می‌شود. گشتاور نیز پس از تخمین شار دربرگیرنده استاتور، بصورت حاصل ضرب برداری بردار فضایی جریان و شار استاتور مطابق رابطه (۶) تخمین زده می‌شود. در میان متغیرهای مختلفی که در ماشین وجود دارد، جریان استاتور بیشترین تاثیر را در مقابل تغییرات مقدار مقاومت استاتور می‌پذیرد. شکل (۲) تغییرات مقاومت و تاثیر آن بر جریان استاتور برای یک ماشین القایی سه فاز ۵ اسب بخار ۴۶۰ ولت و ۶۰ هرتز را نشان می‌دهد. در این شکل بمنظور حذف نوسانات فرکانس بالای جریان از یک فیلتر پائین گذر استفاده شده است. تاثیر تغییرات مقاومت استاتور بر شار دربرگیرنده استاتور، گشتاور الکترومغناطیسی و جریان استاتور را می‌توان از دیدگاه ریاضی بررسی نمود [۴]. با فرض آنکه هیچ خطایی

روش‌های دیگر مقایسه می‌گردد و در نهایت بخش هفتم ارائه دهنده نتیجه‌گیری کلی این روش می‌باشد.

۲- کنترل مستقیم گشتاور

شکل (۱) نمودار بلوکی یک محرکه‌ی کنترل مستقیم گشتاور را نشان می‌دهد. در این سیستم، مقادیر لحظه‌ای مولفه‌های شار دربرگیرنده استاتور در دستگاه مرجع ساکن و با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ و جریان استاتور، با توجه به رابطه (۱) محاسبه می‌شوند:

$$\psi_{sD} = \int (u_{sD} - R_s i_{sD}) dt \quad (2)$$

$$\psi_{sQ} = \int (u_{sQ} - R_s i_{sQ}) dt \quad (3)$$

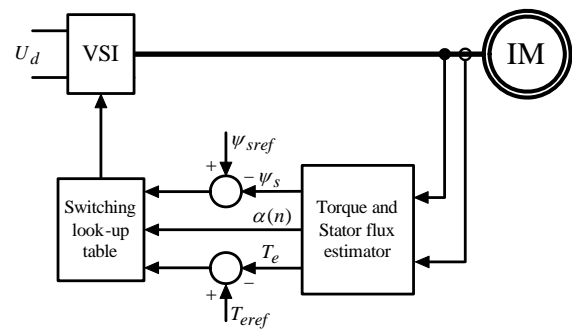
در این روابط i_{sD} ، i_{sQ} ، u_{sD} ، u_{sQ} ، ψ_{sD} و ψ_{sQ} به ترتیب مولفه‌های جریان ولتاژ و شار دربرگیرنده استاتور در دستگاه مرجع ساکن می‌باشند. اندازه و موقعیت بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی ماشین را می‌توان با استفاده از مولفه‌های تخمین زده شده شار دربرگیرنده و جریان استاتور، مطابق روابط (۶-۴) محاسبه نمود.

$$|\bar{\psi}_s| = \sqrt{\psi_{sD}^2 + \psi_{sQ}^2} \quad (4)$$

$$\rho_s = \tan^{-1}(\psi_{sQ} / \psi_{sD}) \quad (5)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\bar{\psi}_s \times \bar{i}_s) = \frac{3}{2} p (\psi_{sq} i_{sq} - \psi_{sd} i_{sd}) \quad (6)$$

که در آن، T_e گشتاور الکترومغناطیسی، p تعداد زوج قطب-ها و ρ_s زاویه بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور نسبت به محور حقیقی دستگاه مرجع ساکن می‌باشد.



شکل ۱: نمودار بلوکی محرکه‌ی کنترل مستقیم گشتاور

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

فرض بر آن است که در اثر تغییرات حرارتی یا فرکانسی، مقاومت ماشین به اندازه ΔR_s تغییر می‌کند و باعث ایجاد تغییر $\Delta \bar{i}_s$ در بردار فضایی جریان استاتور می‌شود؛ اما مقاومتی که در سیستم کنترل در نظر گرفته می‌شود تغییری نمی‌کند. بنابراین در حالی که مقاومت استاتور تغییر نموده است، در تخمین شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی، از مقدار قبلی مقاومت برای تخمین استفاده می‌شود. مقادیر جدید شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی در روابط زیر بیان شده است.

$$\bar{\psi}_s + \Delta \bar{\psi}_{sm} = \int [\bar{u}_s - (R_s + \Delta R_s)(\bar{i}_s + \Delta \bar{i}_s)] dt \quad (11)$$

$$\bar{\psi}_s + \Delta \bar{\psi}_{sc} = \int [\bar{u}_s - R_s(\bar{i}_s + \Delta \bar{i}_s)] dt \quad (12)$$

$$T_e + \Delta T_{em} = k((\bar{\psi}_s + \Delta \bar{\psi}_{sm}) \times (\bar{i}_s + \Delta \bar{i}_s)^*) \quad (13)$$

$$T_e + \Delta T_{ec} = k((\bar{\psi}_s + \Delta \bar{\psi}_{sc}) \times (\bar{i}_s + \Delta \bar{i}_s)^*) \quad (14)$$

اختلاف مقادیر واقعی و تخمین زده شده شار و گشتاور ماشین، با مقادیر مرجع نیز برابر است با:

$$\Delta \bar{\psi}_{sm} = \int (R_s \Delta \bar{i}_s + \Delta R_s \bar{i}_s + \Delta R_s \Delta \bar{i}_s) dt \quad (15)$$

$$\Delta \bar{\psi}_{sc} = \int (R_s \Delta \bar{i}_s) dt \quad (16)$$

$$\Delta T_{em} = k(\bar{\psi}_s \times \Delta \bar{i}_s^* + \Delta \bar{\psi}_{sm} \times \bar{i}_s^* + \Delta \bar{\psi}_{sm} \times \Delta \bar{i}_s^*) \quad (17)$$

$$\Delta T_{ec} = k(\bar{\psi}_s \times \Delta \bar{i}_s^* + \Delta \bar{\psi}_{sc} \times \bar{i}_s^* + \Delta \bar{\psi}_{sc} \times \Delta \bar{i}_s^*) \quad (18)$$

با توجه به روابط (15) تا (18)، خطای تخمین شار دربرگیرنده استاتور $\Delta \bar{\psi}_s$ و گشتاور الکترومغناطیسی ΔT_e را می‌توان چنین بیان نمود:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\psi}_s &= \Delta \bar{\psi}_{sm} - \Delta \bar{\psi}_{sc} \\ &= \int (R_s \Delta \bar{i}_s + \Delta R_s \bar{i}_s + \Delta R_s \Delta \bar{i}_s) dt \\ &\quad - \int (R_s \Delta \bar{i}_s) dt = \int (\Delta R_s \bar{i}_s + \Delta R_s \Delta \bar{i}_s) dt \\ &= \int \Delta R_s (\bar{i}_s + \Delta \bar{i}_s) dt \end{aligned} \quad (19)$$

در پارامترهای ماشین وجود ندارد، مقادیر واقعی و تخمین زده شده شار دربرگیرنده استاتور $\bar{\psi}_s$ و گشتاور الکترومغناطیسی ماشین، T_e مطابق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

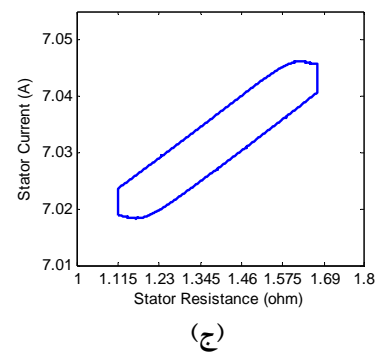
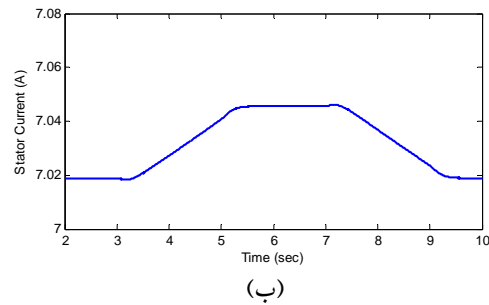
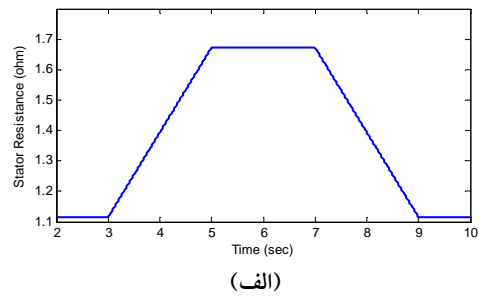
$$\bar{\psi}_{sm} = \int (\bar{u}_s - R_s \bar{i}_s) dt \quad (7)$$

$$\bar{\psi}_{sc} = \int (\bar{u}_s - R_s \bar{i}_s) dt \quad (8)$$

$$T_{em} = k(\bar{\psi}_{sm} \times \bar{i}_s^*) \quad (9)$$

$$T_{ec} = k(\bar{\psi}_{sc} \times \bar{i}_s^*) \quad (10)$$

در روابط فوق $\bar{\psi}_{sm}$ ، T_{em} ، $\bar{\psi}_{sc}$ و T_{ec} به ترتیب بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور واقعی ماشین و بردار فضایی شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور تخمین زده شده توسط کنترل کننده می‌باشند.



شکل ۲: تغییرات مقاومت و تاثیر آن بر جریان استاتور

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$\begin{aligned} \Delta \bar{i}_s &= 0 \Rightarrow \\ \Delta \bar{\psi}_{sm} &= \int (R_s \Delta \bar{i}_s + \Delta R_s \bar{i}_s + \Delta R_s \Delta \bar{i}_s) dt \\ &= \int (\Delta R_s \bar{i}_s) dt \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{i}_s &= 0 \Rightarrow \Delta \bar{\psi}_{sm} = \int (\Delta R_s \bar{i}_s) dt \Rightarrow \Delta T_{em} \\ &= k(\bar{\psi}_s \times \Delta \bar{i}_s^* + \Delta \bar{\psi}_{sm} \times \bar{i}_s^* + \Delta \bar{\psi}_{sm} \times \Delta \bar{i}_s^*) \\ &= k(\Delta \bar{\psi}_{sm} \times \bar{i}_s^*) = k((\int \Delta R_s \bar{i}_s dt) \times \bar{i}_s^*) \end{aligned} \quad (24)$$

بنابراین خطای واقعی شار دربرگیرنده و گشتاور الکترومغناطیسی برابر صفر نخواهد بود و به همین علت، روند کنترل ماشین دچار مشکل خواهد شد.

۴- بهینه‌سازی مبتنی بر هجوم ذرات

روش PSO یک روش بهینه‌سازی با تکامل تدریجی است که با شبیه‌سازی رفتارهای گروهی دسته ماهی‌ها (و یا پرندگان) عمل بهینه‌سازی را انجام می‌دهد. در گروه‌های بزرگی همچون دسته ماهی‌ها هر ذره ماهی که اصلاحاً به آن ذره گفته می‌شود، در یک فضای جستجوی چند بعدی حرکت می‌کند. اما در حین حرکت، هر ذره علاوه بر جستجوی هدف، موقعیت خود را نسبت به کل ذرات و نسبت به ذرات کناری مد نظر قرار می‌دهد و به آن توجه دارد. این عمل موجب خواهد شد تا اطلاعات هر ذره از موقعیت‌های بهتر در اختیار دیگر ذرات بویژه ذرات کناری نیز قرار گیرد. این اطلاعات چنان به همه ذرات منتقل می‌شود که بر سرعت و جهت حرکت بعدی گروه تاثیر می‌گذارد. هر ذره در حین حرکت دو نکته دقت می‌کند، یکی بهترین موقعیت خود همان ذره، از ابتدای جستجو که اصطلاحاً $pbest$ نام دارد و دیگری بهترین موقعیت کل ذرات گروه از ابتدای جستجو که به آن $gbest$ گفته می‌شود. سرعت و جهت حرکت هر ذره در هر مرحله با توجه به این دو مقدار، مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$v_i(k+1) = \omega \cdot v_i(k) + c_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest_i - x_i) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest - x_i) \quad (25)$$

که در آن c_1 و c_2 ضرایب وزنی $pbest$ و $gbest$ بوده و ω ضریب اینرسی است. $v_i(k)$ نیز سرعت حرکت نامین

$$\begin{aligned} \Delta T_e &= \Delta T_{em} - \Delta T_{ec} \\ &= k(\bar{\psi}_s \times \Delta \bar{i}_s^* + \Delta \bar{\psi}_{sm} \times \bar{i}_s^* + \Delta \bar{\psi}_{sm} \times \Delta \bar{i}_s^*) \\ &\quad - k(\bar{\psi}_s \times \Delta \bar{i}_s^* + \Delta \bar{\psi}_{sc} \times \bar{i}_s^* + \Delta \bar{\psi}_{sc} \times \Delta \bar{i}_s^*) \\ &= k[(\Delta \bar{\psi}_{sm} - \Delta \bar{\psi}_{sc}) \times \bar{i}_s^* \\ &\quad + (\Delta \bar{\psi}_{sm} - \Delta \bar{\psi}_{sc}) \times \Delta \bar{i}_s^*] \\ &= k(\Delta \bar{\psi}_{sm} - \Delta \bar{\psi}_{sc}) \times (\bar{i}_s^* + \Delta \bar{i}_s^*) \\ &= k(\int \Delta R_s (\bar{i}_s + \Delta \bar{i}_s) dt) \times (\bar{i}_s^* + \Delta \bar{i}_s^*) \end{aligned} \quad (20)$$

با توجه به روابط فوق، در اثر تغییر مقاومت استاتور بین مقادیر تخمینی و واقعی شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی ماشین خطای تخمین بوجود خواهد آمد. در این حالت کنترل کننده تنها اختلاف بین مقادیر تخمینی و مرجع شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی ماشین را می‌بیند و چنان عمل می‌کند که با انتخاب بردارهای ولتاژ سوئیچ‌زنی مناسب اختلاف میان مقادیر تخمینی و مرجع شار دربرگیرنده و گشتاور الکترومغناطیسی را جبران نماید (در صورتی که می‌بایست اختلاف میان مقادیر واقعی و مرجع شار دربرگیرنده و گشتاور الکترومغناطیسی را جبران نماید)؛ بنابراین

$$\Delta \bar{\psi}_{sc} = 0 \Rightarrow \int (R_s \Delta \bar{i}_s) dt = 0 \quad (21)$$

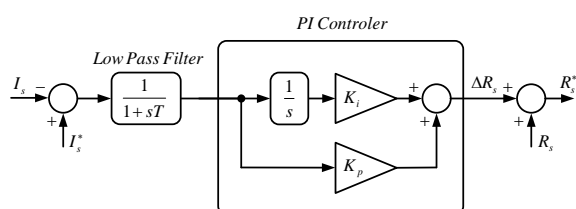
کنترل کننده با انتخاب بردارهای ولتاژ مناسب سعی در به صفر رساندن $\Delta \bar{\psi}_{sc}$ می‌کند و با توجه به رابطه فوق برای محقق شدن آن می‌بایست $\Delta \bar{i}_s$ به صفر برسد؛ در این شرایط خطای تخمین گشتاور برابر است با:

$$\Delta \bar{i}_s = 0 \Rightarrow \Delta \bar{\psi}_{sc} = 0 \Rightarrow \Delta T_{ec} = k(\bar{\psi}_s \times \Delta \bar{i}_s^* + \Delta \bar{\psi}_{sc} \times \bar{i}_s^* + \Delta \bar{\psi}_{sc} \times \Delta \bar{i}_s^*) = 0 \quad (22)$$

اگر کنترل کننده در جهت کاهش و به صفر رساندن $\Delta \bar{i}_s$ و در نتیجه ΔT_{ec} و $\Delta \bar{\psi}_{sc}$ ، بردارهای ولتاژ سوئیچ‌زنی مناسب را انتخاب کند، خطای واقعی شار دربرگیرنده و گشتاور الکترومغناطیسی به صفر نخواهد رسید، زیرا در شرایطی که $\Delta \bar{i}_s$ برابر با صفر فرض شود، طبق روابط (۱۵) تا (۱۸) در عین حالی که $\Delta \bar{\psi}_{sc} = 0$ و در نتیجه $\Delta T_{ec} = 0$ خواهد شد، خطای واقعی شار دربرگیرنده و گشتاور الکترومغناطیسی برابر است با:

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

کنترل کننده PI تخمین زد [۳-۴]. در این روش، با توجه به مقادیر مرجع شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی و با استفاده از مدل ماشین، جریان استاتور تخمین زده می‌شود. خطای جریان استاتور پس از مقایسه جریان تخمینی استاتور (I_s^*)، با جریان واقعی آن (I_s)، محاسبه می‌شود. سپس بمنظور حذف هارمونیک‌های فرکانس بالا از یک فیلتر پائین‌گذر استفاده می‌شود. بعد از آن با استفاده از یک کنترل کننده PI تغییرات مقاومت استاتور با توجه به خطای جریان استاتور تخمین زده می‌شود.

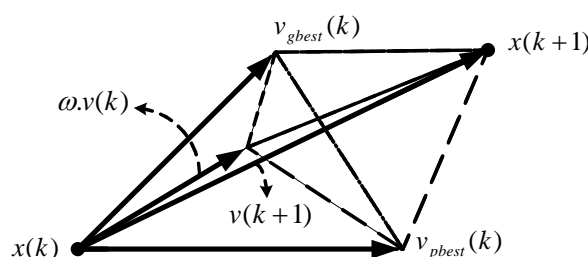


شکل ۴: کنترل کننده PI

با توجه به ساختار ساده و طراحی نسبتاً آسان کنترل کننده‌های PI مرسوم، این کنترل کننده‌ها کاربرد وسیعی در محرکه‌های مختلف موتورهای الکتریکی دارند. اما در صورتی که ضرایب کنترل کننده‌های PI (K_p , K_i) بصورت صحیحی تنظیم نشوند، نمی‌توان کارایی لازم را از این کنترل کننده‌ها انتظار داشت.

هدف، طراحی یک کنترل کننده PSO-PI بمنظور تخمین هرچه دقیق‌تر مقاومت استاتور می‌باشد. مطابق شکل (۴)، جریان مرجع استاتور (I_s^*)، ورودی سیستم، جریان واقعی استاتور (I_s)، خروجی سیستم، مقدار تغییر مقاومت استاتور (ΔR_s)، خروجی کنترل کننده PSO-PI و مقدار صحیح مقاومت استاتور ($R_s(k+1)$) ورودی محرکه کنترل مستقیم گشتاور می‌باشد. شکل (۵) نمای کلی این روش را نشان می‌دهد.

ذره در زمان k است. با توجه به رابطه فوق سرعت و جهت حرکت هر ذره در هر مرحله با توجه به سرعت و جهت حرکت مرحله قبل و $pbest$ و $gbest$ تعیین می‌گردد. بنابراین موقعیت هر ذره در هر مرحله نیز با توجه به شکل (۳) و رابطه (۲۶) تعیین می‌گردد.



شکل ۳: نحوه تعیین موقعیت هر ذره در مرحله بعد

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (26)$$

که در آن $x(k+1)$ موقعیت ذره در مرحله بعد، $v(k+1)$ سرعت ذره در مرحله بعد است. $v_{pbest}(k)$ و $v_{gbest}(k)$ نیز به ترتیب سرعت متناسب با $pbest$ و $gbest$ می‌باشند:

$$v_{pbest}(k) = c_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest - x(k)) \quad (27)$$

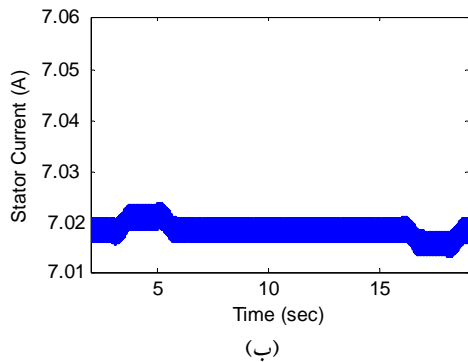
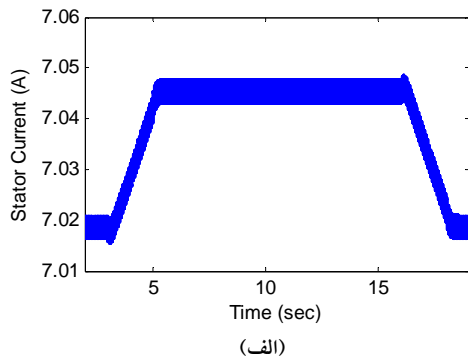
$$v_{gbest}(k) = c_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest - x(k)) \quad (28)$$

۵- تخمین مقاومت استاتور

در محرکه DTC، تغییر مقادیر مرجع شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور باعث تغییر دامنه جریان می‌شود. اگر فرمان‌های شار و گشتاور ثابت بماند، دامنه جریان استاتور تنها تابع تغییرات مقاومت استاتور بوده و تنها در اثر تغییر مقاومت استاتور تغییر خواهد نمود. به عبارت دیگر در شرایطی که مقادیر مرجع شار دربرگیرنده استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی ثابت است، تغییرات جریان استاتور نشان دهنده تغییر مقاومت استاتور می‌باشد. با توجه به اندازه‌گیری جریان استاتور در محرکه کنترل مستقیم گشتاور، می‌توان از این ارتباط جهت تخمین تغییرات مقاومت استاتور استفاده نمود.

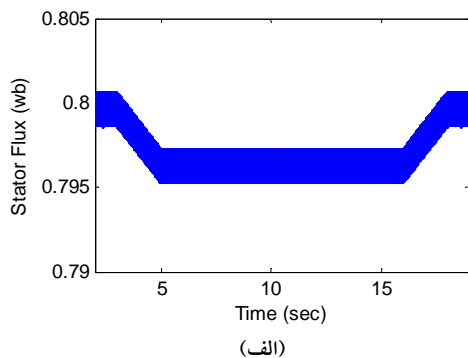
مطابق شکل (۴)، با توجه به تغییرات جریان استاتور در اثر تغییر مقاومت، می‌توان مقاومت استاتور را با استفاده از یک

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

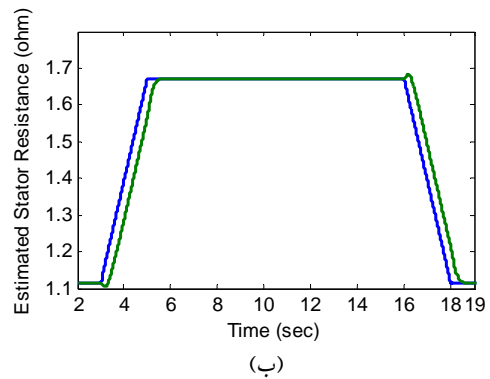
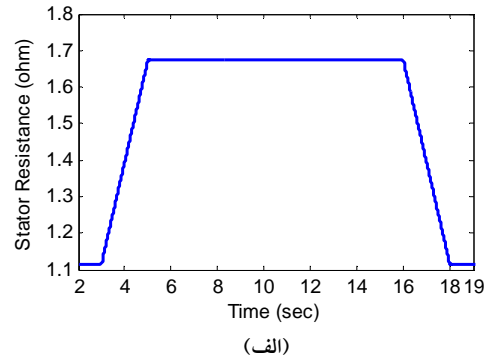


شکل ۷: تغییرات دامنه جریان استاتور، قبل و بعد از تخمین مقاومت

با توجه به تاخیر مدار تخمین در حالت گذرا، مقاومت تخمین زده شده با مقاومت استاتور کمی اختلاف دارد و بنابراین جریان استاتور مطابق شکل (ب-۷) کمی اعوجاج خواهد داشت. چنانچه پیش از این نیز ذکر شد، شیب تغییرات مقاومت از شیب واقعی تغییرات آن بسیار بیشتر است و بنابراین در حالت واقعی تغییرات جریان از شکل (ب-۷) نیز کمتر خواهد بود، اما در فاصله زمانی که تخمین دقیق انجام می‌شود، جریان استاتور هیچ اعوجاجی ندارد.



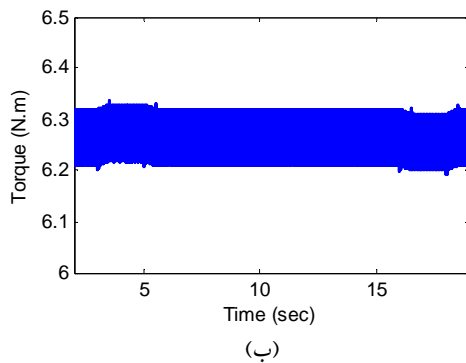
و گشتاور ماشین بررسی می‌شود. مطابق این شکل، مقاومت استاتور با یک شیب نسبتاً تند از مقدار نامی خود به ۱/۵ برابر خود افزایش یافته و پس از چند ثانیه دو مرتبه کاهش می‌یابد.



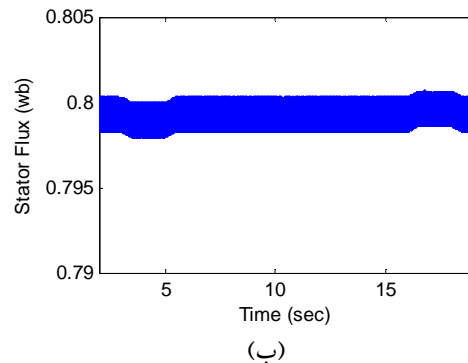
شکل ۸: بررسی دقت تخمین مقاومت استاتور

شکل (ب-۶) مقاومت استاتور و مقدار تخمین زده شده مقاومت استاتور را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نیز مشخص است، با توجه به تاخیر مدار تخمین مقاومت استاتور، در حالت گذرا بین مقاومت تخمین زده شده و مقاومت واقعی استاتور مقداری خطا وجود دارد. هرچه شیب تغییرات مقاومت کمتر باشد این خطا کوچکتر خواهد بود. در عمل، دمای ماشین طی چند دقیقه به مقدار پایدار خود می‌رسد. بنابراین شیب تغییرات مقاومت استاتور مقدار کوچکی داشته و تقریباً بصورت نمایی است. بنابراین خطای ناشی از تاخیر مدار تخمین مقدار کوچکی دارد. اما در حالت مانا، هنگامی که دمای ماشین به یک حالت پایدار رسیده و در نتیجه تغییرات مقاومت استاتور به تثبیت می‌شود، تخمین مقاومت دقیق بوده و هیچ خطایی بین این دو وجود ندارد.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۹: تغییرات دامنه شار استاتور، قبل و بعد از تخمین مقاومت



شکل ۸: تغییرات دامنه شار استاتور، قبل و بعد از تخمین مقاومت

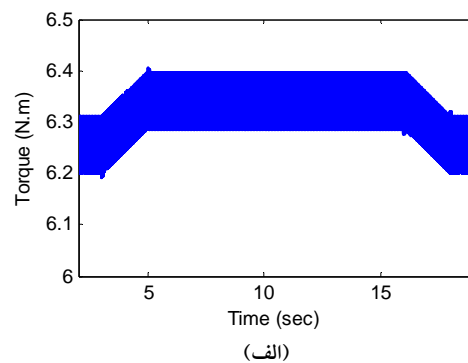
روش PSO بدون نیاز به مدل ریاضی سیستم، ضرایب کنترل کننده PI را در شرایط خاص بصورت بهینه محاسبه می‌کند؛ اما در صورتی که شرایط بطور نامشخص تغییر نماید، ضرایب کنترل کننده PI دیگر بهینه نبوده و بنابراین خطایی در تخمین مقاومت استاتور بوجود خواهد آمد. بطور مثال می‌توان ضرایب کنترل کننده PI را در بار مشخصی بدست آورد، اما اگر در حین عملکرد ماشین در این شرایط بار ماشین افزایش یابد، مقاومت نیز با توجه به افزایش دمای ماشین افزایش یافته و ضرایب کنترل کننده PI تخمین صحیحی از مقاومت استاتور نخواهد داشت.

بنابراین می‌بایست ضرایب کنترل کننده PI بین مقادیر حداقل و حداکثر خود بطور مناسبی تغییر یابد. بدین منظور مدل سیستم به ازای تغییرات مختلف و مشخص مقاومت شبیه سازی شده و ضرایب کنترل کننده PI به ازای آنها توسط روش PSO-PI بهینه می‌گردد. این داده‌ها می‌توانند در یک جدول طبقه بندی شده و با توجه به خطای جریان استاتور در شرایط کاری مختلف، مقادیر K_p , K_I بطور مناسب تغییر یابند.

بمنظور بررسی صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی، به ازای تغییرات مقاومت استاتور مطابق شکل (الف-۱۰)، تخمین مقاومت انجام شده و تاثیر آن بر شار و گشتاور ماشین بررسی می‌شود. مطابق این شکل، مقاومت استاتور با یک شیب نسبتاً تند، ابتدا از مقدار نامی خود به $1/2$ برابر خود افزایش یافته و

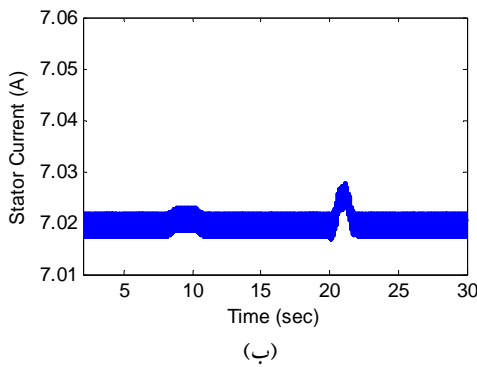
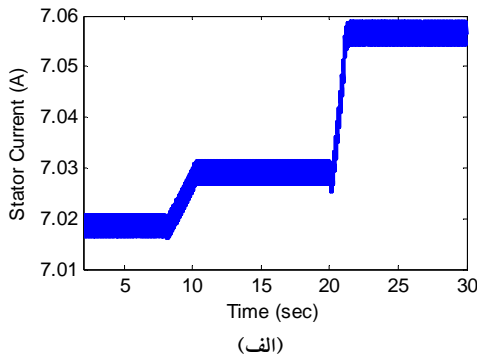
شکل‌های (الف-۸) و (ب-۸)، تغییرات دامنه شار دربرگیرنده استاتور را به ترتیب در اثر تغییرات مقاومت استاتور و پس از تخمین مقاومت استاتور، نشان می‌دهد. مطابق شکل (ب-۸) تغییرات شار دربرگیرنده استاتور پس از تخمین مقاومت استاتور بسیار کاهش یافته و تغییرات بسیار کمی نیز که مشاهده می‌شود، در اثر عدم تخمین صحیح مقاومت استاتور در شرایط گذرا و در اثر تاخیر مدار تخمین بوجود آمده است. با توجه به تثبیت دمای ماشین در حالت مانا، مقاومت استاتور نیز تثبیت شده و از آن به بعد تخمین مقاومت استاتور دقیق بوده و بنابراین تغییرات شار دربرگیرنده استاتور نزدیک به صفر خواهد بود.

شکل‌های (الف-۹) و (ب-۹) نیز تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی ماشین را به ترتیب قبل از تخمین مقاومت استاتور و پس از تخمین مقاومت استاتور، نشان می‌دهد. مطابق شکل (ب-۹) تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی پس از تخمین مقاومت استاتور کاهش قابل توجهی یافته است.



بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

مقاومت استاتور در حالتی که از روش اصلاح شده استفاده شده است را نشان می‌دهد. در این شکل در هر دو حالت مانا، هنگامی که دمای ماشین به یک حالت پایدار رسیده و در نتیجه تغییرات مقاومت استاتور به یک حالت پایدار می‌رسد، تخمین مقاومت دقیق بوده و هیچ خطایی بین این دو وجود ندارد.

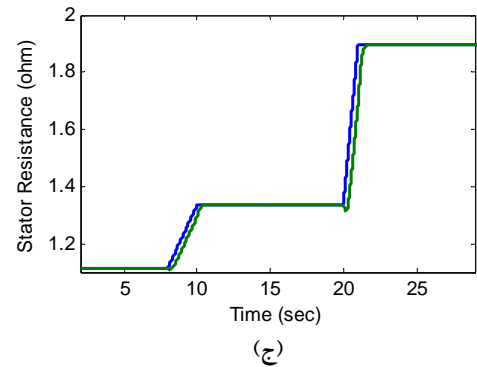
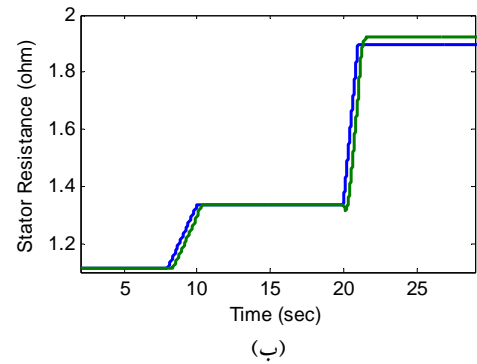
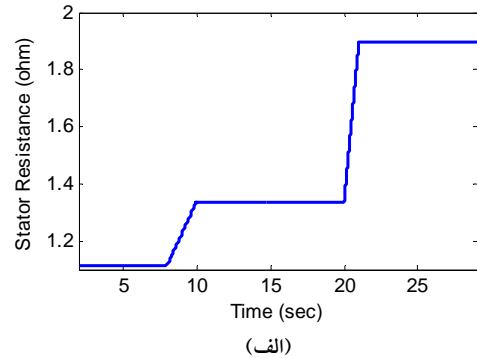


شکل ۱۱: تغییرات جریان استاتور، قبل و پس از تخمین مقاومت استاتور به روش اصلاح شده

شکل (الف-۱۱) نمودار جریان استاتور را در حالتی نشان می‌دهد که مقاومت استاتور مطابق شکل (الف-۱۰) تغییر نموده است اما این تغییرات در سیستم کنترل لحاظ نشده است. با استفاده از روش PSO-PI اصلاح شده، تخمین مقاومت استاتور مطابق شکل (ج-۱۰) دقیق‌تر انجام می‌شود. با لحاظ شدن این مقاومت در سیستم کنترل، تغییرات جریان استاتور کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. شکل (۱۱) نشان دهنده کاهش اعوجاج جریان استاتور با استفاده از این روش می‌باشد.

شکل (الف-۱۲) تغییرات دامنه شار دربرگیرنده استاتور را در اثر تغییرات مقاومت استاتور نشان می‌دهد. پس از تخمین

پس از چند ثانیه دو مرتبه و این بار با شیب تندتری به $1/7$ برابر مقدار نامی خود افزایش می‌یابد.

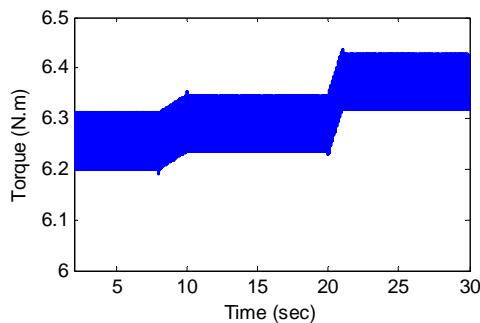


شکل ۱۰: تخمین مقاومت استاتور به کمک روش اصلاح شده

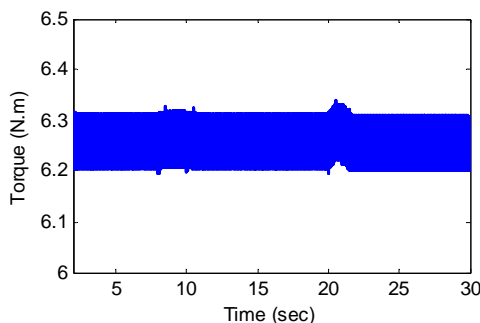
شکل (ب-۱۰) مقاومت استاتور و مقدار تخمین زده شده مقاومت استاتور را بدون استفاده از روش اصلاح شده نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نیز مشخص است، با توجه به تغییر مجدد مقاومت استاتور، در اثر عدم بهینه بودن ضرایب کنترل کننده PI، حتی در حالت مانا نیز بین مقاومت تخمین زده شده و مقاومت واقعی استاتور مقداری خطا وجود دارد. شکل (ج-۱۰) مقاومت استاتور و مقدار تخمین زده شده

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

جریان و شار دربرگیرنده استاتور، اعوجاج گشتاور نیز کاهش چشمگیری می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۳: بررسی دقت تخمین مقاومت استاتور

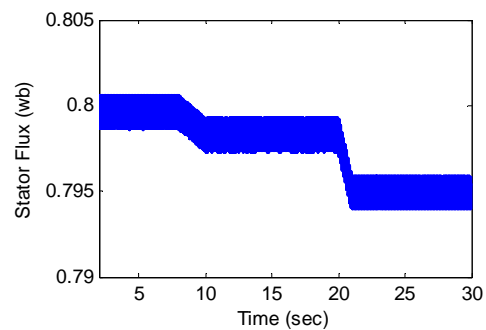
جدول (۱)

۵	توان نامی خروجی (اسب بخار)
۴۶۰	ولتاژ نامی (ولت)
۶۰	فرکانس نامی (هرتز)
۲	تعداد قطب‌ها
۱۷۵۰	سرعت نامی (دور در دقیقه)
۱/۱۱۵	مقاومت استاتور (اهم)
۱/۰۸۳	مقاومت روتور (اهم)
۲۰۳/۷	اندوکتانس متقابل (میلی هانری)
۵/۹۷۴	اندوکتانس نشی استاتور (میلی هانری)
۵/۹۷۴	اندوکتانس نشی روتور (میلی هانری)
۰/۰۲	اینرسی (کیلو گرم-متر مربع)

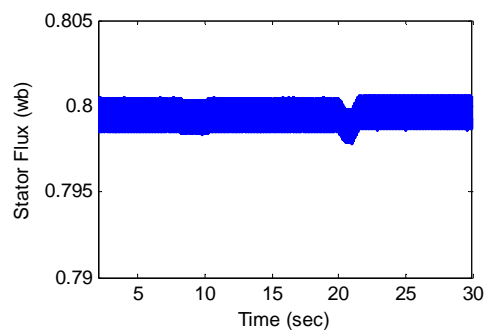
۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تاثیر تغییرات مقاومت استاتور بر کارایی محرکه کنترل مستقیم گشتاور بررسی شد. بعد از آن یک سیستم تخمین مقاومت استاتور مبتنی بر کنترل کننده‌های انتگرالی-

مقاومت استاتور با استفاده از روش اصلاح شده، تغییرات شار دربرگیرنده استاتور مطابق شکل (ب-۱۲) بسیار کاهش یافته و تغییرات بسیار اندکی نیز که به چشم می‌خورد، در اثر عدم تخمین صحیح مقاومت استاتور در شرایط گذرا و در اثر تاخیر مدار تخمین بوجود آمده است. در حالت مانا با توجه به تثبیت دمای ماشین، مقاومت استاتور نیز تثبیت شده است؛ در این حالت تخمین مقاومت استاتور دقیق بوده و بنابراین تغییرات شار دربرگیرنده استاتور نزدیک به صفر خواهد بود.



(الف)



(ب)

شکل ۱۴: بررسی دقت تخمین مقاومت استاتور

شکل‌های (الف-۱۳) و (ب-۱۳) نیز تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی ماشین را به ترتیب قبل از تخمین مقاومت استاتور و پس از تخمین مقاومت استاتور با استفاده از روش اصلاح شده، نشان می‌دهد. مطابق شکل (ب-۱۳) تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی قبل از تخمین مقاومت استاتور بسیار شدید می‌باشد. این تغییرات در حقیقت در اثر عدم تخمین صحیح شار دربرگیرنده استاتور و تغییرات جریان استاتور بوجود آمده است. هنگامی که مقاومت استاتور مطابق شکل (ج-۱۰) تخمین زده می‌شود، با به حداقل رسیدن اعوجاج

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

تناسبی بهینه‌سازی شده پیشنهاد گردید. ضرایب این کنترل کننده با بکارگیری روش بهینه‌سازی هجوم ذرات در حین عملکرد ماشین همواره بصورت بهینه تنظیم گردید. نتایج شبیه سازی، نشان دهنده دقت عملکرد سیستم تخمین مقاومت استاتور و تاثیر آن بر افزایش کارایی محرکه می‌باشد.

۸- مراجع

- [1] Takahashi, I.; Noguchi, T., "A New Quick Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor", IEEE Trans. Ind. Applicat. Vol. 22, pp. 820-827, Sept./Oct. 1986.
- [2] Depenbrock, M., "Direct Self-Control (DSC) of Inverter-Fed Induction Machine", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 3, No. 4, pp. 420-429, Oct. 1988.
- [3] Yang Xia, Oghanna W., "Fuzzy Direct Torque Control of Induction Motor with Stator Flux Estimation Compensation", IECON97, vol.2, pp. 505-510, Nov 1997.
- [4] Mir, S.; Elbuluk, M.E.; Zinger, D.S.; "PI and fuzzy estimators for tuning the stator resistance in direct torque control of induction machines", Power Electronics, IEEE Transactions on pp. 279-287, Volume 13, Issue 2, March 1998.
- [5] Zhong, L.; Rahman, M.F.; Lim, K.W.; "A fuzzy observer for induction motor stator resistance for application in direct torque control, Power Electronics and Drive Systems", Proceedings., 1997 International Conference, pp. 91 - 96 , vol.1, May 1997.
- [6] Kennedy, J. and Eberhart, R. C. "Particle swarm optimization", Proc. IEEE int'l conf. on neural networks, Vol. IV, pp. 1942-1948. IEEE service center, Piscataway, NJ, 1995.
- [7] Eberhart, R. C. and Kennedy, J. "A new optimizer using particle swarm theory", Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science, pp. 39-43. IEEE service center, Piscataway, NJ, Nagoya, Japan, 1995.