

کنترل ظرفیت خازن در موتور القایی تکفاز بدون استفاده از حسگر سرعت به منظور افزایش گشتاور متوسط و کاهش نوسانات گشتاور

علیرضا پیمان

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق و کامپیوتر - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
صادق واعظ زاده

استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۲/۱۱/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۴/۲۶، تاریخ تصویب ۸۴/۱۰/۱۰)

چکیده

هدف از ارائه این مقاله، کنترل خازن در موتور القایی تکفاز، بدون استفاده از حسگر سرعت می باشد. کنترل خازن به منظور دستیابی به سه هدف حداکثر شدن گشتاور متوسط راه اندازی، حداقل شدن نوسانات گشتاور، و بهینه شدن گشتاور به صورت کنترل همزمان گشتاور متوسط و گشتاور نوسانی صورت می گیرد. بدین منظور گشتاور متوسط و گشتاور نوسانی بر حسب ظرفیت خازن متغیر و سرعت موتور بدست می آید و تابع گشتاور بهینه تعریف می شود. سپس ظرفیت خازن در هر سرعتی با توجه به هدف کنترل گشتاور، محاسبه می گردد. پس از آن سرعت موتور به سه روش مختلف و با کمک حسگرهای الکتریکی تخمین زده می شود و تغییر مقدار ظرفیت خازن، با استفاده از کلید الکترونیکی موازی با آن و با توجه به سرعت تخمینی، صورت می گیرد. نتایج شبیه سازی، مطلوب بودن روش کلیدزنی خازن بدون استفاده از حسگر سرعت را در دستیابی به هدف کنترل گشتاور موتور القایی تکفاز نشان می دهد.

واژه‌های کلیدی: موتور الکتریکی، موتور القایی تکفاز، تخمین سرعت، کنترل بدون حسگر، بهینه‌سازی

مقدمه

برای حل این مشکلات، از موتورهای دو خازنی در صنعت استفاده می گردد [۶]. لیکن استفاده از دو خازن دارای معایبی از قبیل افزایش قیمت سیستم و نیازمندی به کلید گریز از مرکز می باشد. از اینرو پیشنهاد استفاده از یک خازن کلید زنی شده مطرح شده است [۳-۴]. عموماً هدف از کلیدزنی خازن، افزایش گشتاور راه اندازی بوده است و اخیراً نیز روشی برای کنترل بهینه گشتاور با استفاده از یک خازن متغیر ارائه شده است که در آن همزمان با افزایش گشتاور متوسط راه اندازی، به کاهش نوسانات گشتاور نیز توجه می شود [۷]. در این روشها، تغییر مقدار خازن با توجه به سرعت موتور که از طریق حسگرهای مکانیکی مشخص می گردد، صورت می پذیرد. اما استفاده از حسگرهای مکانیکی با توجه به قیمت زیاد آنها راه حل مطلوبی نیست و بجای آن تخمین سرعت با استفاده از حسگرهای الکتریکی راه گشای این مشکل خواهد بود. زیرا استفاده از چند حسگر الکتریکی برای سنجش جریان و ولتاژ به مراتب ارزانتر از حسگر مکانیکی برای اندازه گیری سرعت می باشد. لازم به ذکر است که

موتورهای القایی تکفاز کاربردهای زیادی پیدا کرده اند، زیرا دستیابی به برق تکفاز در عموم مصارف خانگی و برخی مصارف صنعتی، ساده تر و ارزانتر از برق سه فاز است [۱]. این موتورها به طور سنتی در کاربردهای توان کم و سرعت ثابت نظیر لوازم خانگی مورد استفاده قرار گرفته اند و اخیراً به طور روزافزون بعنوان محرکه های سرعت ثابت و متغیر به کار گرفته می شوند [۲-۴]. بنابراین احساس نیاز به گشتاور زیاد و صاف در همه سرعتها بیشتر از گذشته نمایان شده است. در حالی که کم بودن گشتاور متوسط و زیاد بودن نوسانات گشتاور از مشکلات اساسی این موتورهاست.

اما کم بودن گشتاور متوسط بویژه در شرایط راه اندازی، مانع از عملکرد دینامیکی مطلوب در محرکه‌های صنعتی می شود. نوسانات گشتاور زیاد نیز در حالت کار دائم موجب بروز خطا در متغیرهای تحت کنترل و محدودیت کاربرد موتور در مصارفی که نیازمند دقت زیاد است می‌شود. این نوسانات همچنین باعث افزایش تلفات توان و ازدیاد دمای سیم پیچها می گردد [۵].

مؤلفه های جریانوشارروتور به صورت زیر در می آید:

$$v'_{qr} = r'_{qr} i'_{qr} - \frac{N_q}{N_d} \omega_r \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \quad (۳)$$

$$v'_{dr} = r'_{dr} i'_{dr} + \frac{N_d}{N_q} \omega_r \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \quad (۴)$$

ω_r سرعت روتور و N_q و N_d به ترتیب تعداد دورهای مؤثر سیم پیچیهای محور d و q استاتور می باشند. مؤلفه های جریان روتور بر حسب مؤلفه های شار استاتور و روتور نیز عبارتند از:

$$i'_{qr} = \frac{1}{L_{mq}} \left[\lambda_{qs} - (L_{lqs} + L_{mq}) i_{qs} \right] \quad (۵)$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{L_{md}} \left[\lambda_{ds} - (L_{lds} + L_{md}) i_{ds} \right] \quad (۶)$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{L'_{lqr} + L_{mq}} \left[\lambda'_{qr} - L_{mq} i_{qs} \right] \quad (۷)$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{L'_{ldr} + L_{md}} \left[\lambda'_{dr} - L_{md} i_{ds} \right] \quad (۸)$$

بطوریکه:

$$L_{qs} = L_{lqs} + L_{mq} \quad (۹)$$

$$L_{ds} = L_{lds} + L_{md} \quad (۱۰)$$

$$L'_{qr} = L'_{lqr} + L_{mq} \quad (۱۱)$$

$$L'_{dr} = L'_{ldr} + L_{md} \quad (۱۲)$$

گشتاور الکترومغناطیسی لحظه ای ماشین نیز بصورت

$$T_{el} = \frac{P}{2} \frac{N_d}{N_q} \frac{x_{mq}}{\omega_s} (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad (۱۳)$$

با افزایش قدرت محاسباتی پردازشگرهای موجود در بازار، محاسبات مربوط به تخمین سرعت که در این روش پیشنهاد شده است توسط همان پردازشگری که خازن بهینه را محاسبه می کند انجام می شود و از این لحاظ هزینه جدیدی به سیستم تحمیل نمی گردد.

حذف حسگر سرعت و تخمین سیگنال سرعت علاوه بر کاربرد در بهینه سازی گشتاور، در کنترل حلقه بسته سرعت نیز مفید است و موجب رواج بیشتر محرکه های دور متغیر این موتورها در مصارف خانگی و صنعتی خواهد شد.

در مقاله حاضر، ابتدا روشهایی برای تخمین سرعت موتور القایی تکفاز پیشنهاد می گردد و سپس کنترل گشتاور موتور بدون استفاده از حسگر سرعت ارائه می شود. بدین منظور ابتدا مدل ریاضی موتور در دستگاه مرجع ساکن بدست می آید. پس از آن روابط تخمین سرعت موتور و رابطه گشتاور بر حسب سرعت و ظرفیت خازن ارائه می گردد. سپس نتایج شبیه سازی با نتایج روش استفاده از حسگر سرعت مقایسه می شود و نشان داده می شود که تخمین سرعت با دقت زیاد و به خوبی حسگر سرعت، بهینه سازی گشتاور را امکان پذیر می سازد.

مدل ریاضی موتور القایی تکفاز

از آنجایی که سیم پیچیهای اصلی و کمکی استاتور موتور القایی تکفاز یکسان نیستند ماشین، نامتقارن است. در ماشین نامتقارن، فقط در دستگاه مرجع ساکن ضرایب متغیر با زمان ظاهر نمی شود [۸-۹]. لذا برای دستیابی به معادلات ولتاژ با پارامترهای ثابت، از این دستگاه مرجع استفاده می شود. معادلات ولتاژ در دستگاه مرجع ساکن دو محوری به صورت زیر است:

$$v_{qs} = r_{qs} i_{qs} + p \lambda_{qs} \quad (۱)$$

$$v_{ds} = r_{ds} i_{ds} + p \lambda_{ds} \quad (۲)$$

p عملگر مشتق گیر و r_{qs} و r_{ds} مقاومت سیم پیچیهای محور q و d استاتور می باشند. اگر متغیرهای محورهای q و d روتور را به محورهای هم نام آنها در استاتور منتقل کنیم، معادلات ولتاژ روتور بر حسب

$$C_{avg} = \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{NA - MB}{MD - QA - \Delta_1} \quad (19)$$

$$C_{pl} = \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{NE - MF}{MG - QE - \Delta_2} \quad (20)$$

Δ_1 و Δ_2 نیز تابعی از پارامترها و سرعت موتور هستند [۷]. ملاحظه می شود که C_{pl} و C_{avg} وابسته به سرعت موتورند. بنابراین اگر در هر سرعتی مقدار خازن مشخص شود و در رابطه گشتاور مربوطه قرار گیرد، هدف حداکثر کردن گشتاور متوسط و حداقل نمودن گشتاور نوسانی تامین می شود.

از آنجاییکه معمولاً شرایط راه اندازی، حداکثر بودن گشتاور متوسط و در شرایط کار دائم، حداقل بودن نوسانات گشتاور مهم است، می توان تابع گشتاور بهینه را در همه سرعتها، بصورت زیر تعریف نمود [۷]:

$$\mathfrak{S} = \rho T_{avg} - (1 - \rho) T_{pl} \quad (21)$$

پارامتر $0 \leq \rho \leq 1$ بعنوان ضریب اهمیت گشتاور تعریف می شود. اگر \mathfrak{S} حداکثر شود، بسته به مقدار ضریب اهمیت گشتاور که با توجه به کاربرد مورد نظر انتخاب می شود، هر دو هدف بهینه سازی یعنی گشتاور متوسط زیاد و گشتاور نوسانی کم قابل حصول است. با حل معادله مربوط به حداکثر نمودن تابع گشتاور بهینه مقدار خازن بهینه محاسبه می شود:

$$C_{opt} = \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{NA_{op} - MB_{op}}{MD_{op} - QA_{op} - \Delta_{op}} \quad (22)$$

واضح است که به ازای $\rho = 0$ ، $C_{opt} = C_{pl}$ و به ازای $\rho = 1$ ، $C_{opt} = C_{avg}$ می باشد. همچنین به ازای $\rho = 0.5$ رابطه (۲۱) به صورت $\mathfrak{S} = 0.5(T_{avg} - T_{pl})$ در می آید که به مفهوم آنست که اهمیت یکسانی به افزایش گشتاور متوسط و کاهش گشتاور نوسانی داده می شود. بنابراین با انتخاب مناسب ضریب اهمیت گشتاور، مقدار خازنی که عملکرد مطلوب موتور را با توجه به مقدار گشتاورهای متوسط و نوسانی ممکن می سازد، در همه سرعتها مشخص می شود.

تعریف می شود. همچنین در مدار معادل محور d داریم:

$$v_{ds} = v_{qs} - \frac{1}{C} \int i_{ds} dt \quad (14)$$

که C ظرفیت خازن سری شده با سیم پیچی کمکی می باشد. با اتکا به روابط فوق، می توانیم گشتاور را در حالت دائمی سینوسی بر حسب فازورهای جریان بیان کنیم. برای انجام این منظور مقدار لحظه ای جریان سیم پیچیه را در (۱۳) بر حسب فازور آنها قرار دهیم [۱۰].

بعد از ساده سازی های ممکن، مشخص می شود که گشتاور الکتریکی لحظه ای در حالت دائمی، از دو جمله ثابت و متغیر با زمان تشکیل یافته است. جمله ثابت بعنوان گشتاور متوسط بصورت زیر می باشد:

$$T_{avg} = n \frac{P}{2} l_{mq} \cdot \text{Re}(I_{qs} I_{dr}^* - I_{ds} I_{qr}^*) \quad (15)$$

جمله متغیر با زمان با فرکانس دو برابر فرکانس شبکه نوسان می کند و مقدار حداکثر آن بعنوان گشتاور نوسانی بصورت زیر تعریف می شود:

$$T_{pl} = n \frac{P}{2} l_{mq} |I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}| \quad (16)$$

استراتژی کنترل خازن

با استفاده از معادلات ماشین، گشتاور متوسط و حداکثر گشتاور نوسانی بر حسب راکتانس خازن محاسبه می شود:

$$T_{avg} = \frac{nP}{2} \cdot l_{mq} \cdot \frac{DC^2 \omega_b^2 + BC \omega_b + A}{QC^2 \omega_b^2 + NC \omega_b + M} \cdot V_{qs}^2 \quad (17)$$

$$T_{pl} \cong \frac{nP}{2} \cdot l_{mq} \cdot \frac{GC^2 \omega_b^2 + FC \omega_b + E}{QC^2 \omega_b^2 + NC \omega_b + M} \cdot V_{qs}^2 \quad (18)$$

ضرایب $Q, N, M, G, F, E, D, B, A$ تابعی از پارامترها و سرعت موتور هستند و n نسبت به $N_d N_q$ است [۷]. با حل مشتق دو رابطه فوق نسبت به C ، مقدار خازن به منظور حداکثر کردن گشتاور متوسط و حداقل نمودن گشتاور نوسانی محاسبه می شود [۷]:

$$\omega_r = \frac{Nq}{N_d} \left\{ \frac{1}{\lambda'_{qr}} \left[-r'_{dr} i'_{dr} - p\lambda'_{dr} \right] \right\} \quad (26)$$

مؤلفه مستقیم جریان روتور در (۲۶) قابل دسترسی نیست. لذا با جایگذاری رابطه (۸) در (۲۶) خواهیم داشت:

$$\omega_r = -\frac{1}{n\lambda'_{qr}} \cdot \left[\xi_d (\lambda'_{dr} - L_{md} i_{ds}) + p\lambda'_{dr} \right] \quad (27)$$

اکنون ملاحظه می شود (۲۷) شامل مؤلفه های شار روتور می باشد. پس از انجام محاسبات ریاضی بر روی معادلات (۱)-(۸) و ساده سازیهای ممکن، می توان مؤلفه های شار روتور را بر حسب مؤلفه های ولتاژ و جریان استاتور بدست آورد و در (۲۷) جایگزین کرد. آنگاه رابطه نهایی تخمین سرعت به صورت زیر حاصل می شود:

$$\omega_r = -\frac{1}{n} \cdot \frac{K_{dd}}{K_{qq}} \cdot \frac{1}{\int \left(v_{qs} - r_{qs} i_{qs} - L_{qq} p i_{qs} \right) dt} \cdot \left\{ \xi_d \left[\int \left(v_{ds} - r_{ds} i_{ds} - L_{dd} p i_{ds} \right) dt - \frac{L_{md}}{K_{dd}} p i_{ds} \right] + \left(v_{ds} - r_{ds} i_{ds} - L_{dd} p i_{ds} \right) \right\} \quad (28)$$

ملاحظه می شود که در رابطه اخیر برای تخمین سرعت موتور، متغیرهای بکار رفته ولتاژ و جریان سیم پیچیهای اصلی و کمکی می باشند.

روش دوم

در این بخش با استفاده از معادلات موتور در دستگاه مرجع ساکن، رابطه دیگری برای تخمین سرعت موتور القایی تکفاز پیشنهاد می شود. همانطور که مشاهده گردید، در روش قبل برای محاسبه مؤلفه های شار پیوندی روتور انتقال یافته به استاتور، از معادلات بدست آمده انتگرال گیری صورت گرفت. از آنجا که انتگرال گیریهای خالص بعلاوه مشخص نبودن مقدار اولیه، دارای خطایی هستند که می تواند خطای تخمین سرعت را افزایش دهد، در روش دوم برای محاسبه شار، از فیلتر پایین گذر بجای انتگرال گیر خالص استفاده می شود که

یکی از روشهای تغییر خازن در موتورهای القایی تکفاز، اتصال کوتاه کردن آن در مدت زمانی از یک پریود معین است. این کار می تواند توسط یک کلید الکترونیکی موازی با خازن انجام شود. بنابراین رابطه راکتانس خازن مؤثر و راکتانس خازن دائم به صورت زیر با هم ارتباط خواهند داشت [۳-۴]:

$$\begin{aligned} X_{ce} &= \frac{t_{off}}{T} X_{cr} \\ &= \frac{T - \gamma}{T} X_{cr} \\ &= (1 - d) X_{cr} \end{aligned} \quad (23)$$

$$d = \frac{\gamma}{T}, \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (24)$$

که X_{ce} و X_{cr} به ترتیب راکتانس خازن مؤثر متغیر و راکتانس خازن دائم، T پریود کلیدزنی (مجموع زمان روشن و خاموش بودن کلید) و d نسبت زمان روشن بودن کلید به T می باشد. اگر رابطه فوق بر اساس ظرفیت خازن بیان شود آنگاه:

$$C_e = \frac{C_r}{1 - d} \quad (25)$$

که به راحتی می توان با تغییر زمان اتصال کوتاه شدن (روشن بودن کلید) ظرفیت خازن را تغییر داد.

تخمین سرعت

روابط بدست آمده برای محاسبه خازن بهینه موتور که تابع گشتاور بهینه را حداکثر می سازد، نشان می دهد که مقدار این خازن وابسته به سرعت موتور است. سرعت را با استفاده از حسگرهای مکانیکی می سنجند. اما این حسگرها گران قیمتند و استفاده از آن موجب پیچیدگی سیستم می شود. از اینرو بهترین راه بدست آوردن سرعت، تخمین زدن آن با استفاده از متغیرهای الکتریکی است.

روش اول

در این روش سرعت موتور از معادلات ولتاژ روتور قابل حصول است. با استفاده از رابطه (۴):

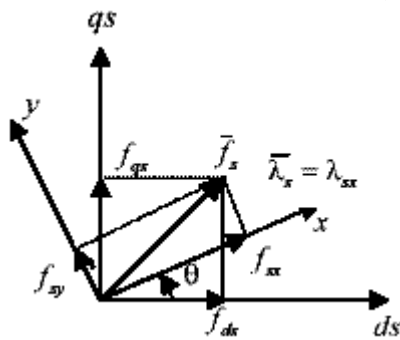
محاسبه شد. اما در روش سوم، مؤلفه های شار با استفاده از معادلات ولتاژ در دستگاه مرجع منطبق بر شار استاتور بدست می آید. شکل (۱) ارتباط میان دستگاه مرجع ساکن و دستگاه مرجع منطبق بر شار استاتور را نشان می دهد. با توجه به شکل می توان ارتباط میان مؤلفه های شار در دو دستگاه مرجع را به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_s &= \left| \bar{\lambda}_s \right| e^{j\rho_s} = \lambda_{ds} + j\lambda_{qs} \\ &= \left| \bar{\lambda}_s \right| \cos \rho_s + j \left| \bar{\lambda}_s \right| \sin \rho_s\end{aligned}\quad (31)$$

بنابراین برای بدست آوردن مؤلفه های شار استاتور، باید دامنه و زاویه فازور شار محاسبه شود:

$$\begin{aligned}\left| \bar{\lambda}_s \right| &= \int \left\{ \left(\cos \rho_s v_{ds} + \sin \rho_s v_{qs} \right) - \right. \\ &\quad \left. r_{ds} \left(\cos \rho_s i_{ds} + \sin \rho_s i_{qs} \right) \right\} dt\end{aligned}\quad (32)$$

$$\begin{aligned}\rho_s &= \int \omega_{ms} dt = \int \left\{ \left(-\sin \rho_s V_{ds} + \cos \rho_s V_{qs} \right) \right. \\ &\quad \left. - r_{ds} \left(-\sin \rho_s V_{ds} + \cos \rho_s V_{qs} \right) \right\} dt\end{aligned}\quad (33)$$



شکل ۱: نمایش ارتباط میان دستگاه مرجع ساکن و دستگاه مرجع منطبق بر شار استاتور.

سپس مؤلفه های شار استاتور عبارت خواهند بود از:

$$\lambda_{ds} = \left| \bar{\lambda}_s \right| \cos \rho_s \quad (34)$$

$$\lambda_{qs} = \left| \bar{\lambda}_s \right| \sin \rho_s \quad (35)$$

با جایگذاری این مؤلفه ها در (۲۹)، رابطه نهایی برای

قادر است اثرات شرایط اولیه را توسط ثابت زمانی خود از میان بردارد.

در این روش با استفاده از روابط موتور که در بخش مدل ریاضی موتور ذکر شد رابطه ای برای تخمین سرعت بر حسب مؤلفه های شار پیوندی استاتور بدست می آید:

$$\begin{aligned}\omega_r &= -\frac{K_{dd}}{nK_{qq}} \cdot \frac{1}{\left(\lambda_{qs} - L_{qq} i_{qs} \right)} \cdot \\ &\quad \left\{ v_{ds} + \xi_d \lambda_{ds} - \left(r_{ds} + \xi_d L_{ds} \right) i_{ds} - L_{dd} p i_{ds} \right\}\end{aligned}\quad (29)$$

اگر مؤلفه های شار پیوندی استاتور در دستگاه مرجع ساکن و به کمک فیلتر پایین گذر بجای انتگرال گیر خالص محاسبه شود رابطه تخمین سرعت عبارت می شود از:

$$\begin{aligned}\omega_r &= \frac{K_{dd}}{nK_{qq}} \cdot \frac{1}{\left[\frac{T}{Ts+1} \left(v_{qs} - r_{qs} i_{qs} \right) - L_{qq} i_{qs} \right]} \cdot \\ &\quad \left\{ v_{ds} - L_{dd} p i_{ds} + \xi_d \left[\frac{T}{Ts+1} \left(v_{ds} - r_{ds} i_{ds} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. - \left(r_{ds} + \xi_d L_{ds} \right) i_{ds} \right\}\end{aligned}\quad (30)$$

T ثابت زمانی فیلتر است که فرکانس قطع آنرا معین می کند و با انتخاب مناسب آن، انتگرال گیر خالص در گسترده ترین محدوده تقریب زده می شود. از آنجاییکه استفاده از فیلتر پایین گذر، باعث انتقال فاز موج خروجی می شود، باید در انتخاب ثابت زمانی فیلتر دقت نمود. هر چه مقدار ثابت زمانی فیلتر بزرگتر باشد، فرکانس قطع فیلتر کمتر و فیلتر به انتگرال گیر نزدیکتر می شود و مقدار انتقال فاز متغیر مورد نظر کاهش می یابد. اما با افزایش ثابت زمانی، اثر شرایط اولیه انتگرال گیر بیشتر نمایان می شود که باعث افزایش خطا می گردد.

روش سوم

مشاهده گردید که روابط بدست آمده برای تخمین سرعت موتور القایی تکفاز تابعی از مؤلفه های شار استاتور می باشد. در دو روش قبل، این مؤلفه ها با استفاده از معادلات ولتاژ در دستگاه مرجع ساکن

محرکی که از تخمینگرها استفاده می کنند اثر می گذارد مقاومت سیم پیچیهای استاتور، در سرعتهای کم تاثیر زیادی بر شار پیوندی استاتور دارد و چون شار پیوندی روتور با استفاده از آن محاسبه می شود، مقاومت سیم پیچیهای استاتور روی این متغیر نیز تاثیرگذار خواهند بود. اما استفاده از مدل گرمایی ماشین القایی، تخمین نسبتاً صحیح مقاومتیهای استاتور را ممکن می سازد. علاوه بر مقاومت استاتور، بواسطه اشباع مغناطیسی آهن، اندوکتانس مغناطیس کننده می تواند تغییر کند و بنابراین پارامتر مذکور نیز باعث بروز خطا در محاسبه شار و در نتیجه تخمین سرعت خواهد شد. از طرف دیگر اجتناب از انتگرال گیر خالص در محاسبه شار باعث افزایش دقت تخمین سرعت خواهد شد

بنابراین روشی در تخمین سرعت مناسبتر است که از عواملی که باعث بروز خطا می شوند، کمتر استفاده کند. جدول (۱) بعضی از مشخصات سه روش ارائه شده را از این نظر نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، روش سوم از نظر تعداد عملگر مشتق گیر، مناسبتر از روشهای اول و دوم است. البته می توان در این روش نیز بجای انتگرال گیر خالص از فیلتر پایین گذر استفاده نمود که در اینصورت انتظار می رود خطای تخمین حاصل کمتر از سایر روشها باشد.

جدول ۱: مقایسه روشهای تخمین سرعت.

شاخصهای مقایسه	تعداد انتگرال گیر خالص	دفعات استفاده از پارامترها	تعداد مشتق گیر	تعداد حسگر الکتریکی
روش اول	۲	۲۳	۲	۳
روش دوم	---	۲۵	۲	۳
روش سوم	۲	۲۵	۱	۳

از نظر پیاده سازی، هر سه روش حداقل به سه حسگر الکتریکی نیاز دارند. اما پیاده سازی روش اول و سوم ساده تر از روش دیگر است زیرا از انتگرال گیر خالص بجای فیلتر پایین گذر استفاده می نمایند. همچنین از نظر تعداد دفعات استفاده از پارامترهای موتور در تخمین سرعت، روش اول مناسبتر از دو روش دیگر است.

تخمین سرعت به روش سوم بدست می آید. در روابط بالا پارامترهای ساختگی به شرح زیر تعریف می شوند:

$$K_{qq} = 1 + \frac{L'_{lqr}}{L_{mq}} \quad (۳۶)$$

$$K_{dd} = 1 + \frac{L'_{ldr}}{L_{md}} \quad (۳۷)$$

$$L_{qq} = L_{qs} - \frac{L_{mq}^2}{L'_{lqr} + L_{mq}} \quad (۳۸)$$

$$L_{dd} = L_{ds} - \frac{L_{md}^2}{L'_{ldr} + L_{md}} \quad (۳۹)$$

$$\xi_d = \frac{r'_{dr}}{L'_{ldr} + L_{md}} \quad (۴۰)$$

مقایسه روشهای تخمین سرعت

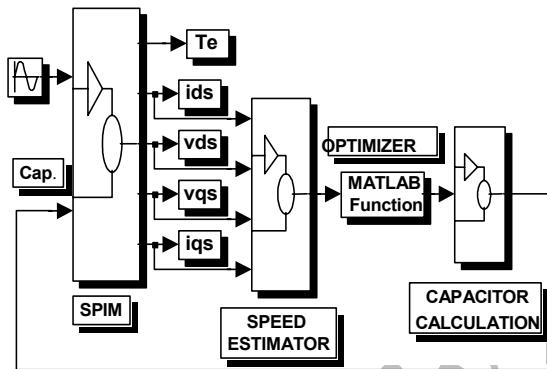
در بالا سه روش برای تخمین سرعت موتورهای القایی تکفاز ارائه شد. تفاوت این روش ها عمدتاً ناشی از شیوههای مختلف محاسبه مؤلفه های شار پیوندی استاتور است. این روشها دارای معایب و مزایایی نسبت به هم می باشند که عموماً انتخاب روش برتر را مشکل می سازد. شیوه های ذکر شده علاوه بر تفاوت در معادلات و محاسبات مربوط، در نیاز به پارامترهای ماشین، استفاده از انتگرال گیر خالص یا فیلتر و دستگاه مرجع مورد استفاده در محاسبه شار با هم تفاوت دارند. این موارد از این جهت دارای اهمیت هستند که هر یک می توانند در خطای تخمینگر اثر گذار باشند.

خطای تخمینگرها بستگی زیادی به دقت پارامترهای مورد استفاده دارد. در سرعتهای کم، دقت این تخمینگرها کاهش می یابد و بخصوص اختلاف پارامترها با مقادیر واقعیشان بر عملکرد گذرا و دائم سیستمهای

($\rho = 1$)، نوسانات گشتاور حداقل ($\rho = 0$) و گشتاور بهینه ($\rho = 0.5$) می‌باشد.

جدول ۲: مشخصات موتور شبیه سازی شده.

P	0.5 hp	f	50 Hz
r_{qs}	5.2 Ω	r'_{qr}	7.5 Ω
r_{ds}	14.75 Ω	r'_{dr}	4.12 Ω
L_{lqs}	0.0179 H	L'_{qr}	0.0118 H
L_{lds}	0.0118 H	L'_{dr}	0.00668 H
L_{mq}	0.3 H	J_m	0.025 Kgm^2
L_{md}	0.168 H	n	0.749



شکل ۲: بلوک دیاگرام کلی بهینه سازی گشتاور موتور القایی تکفاز بدون استفاده از حسگر سرعت.

همانگونه که انتظار می‌رود، مقادیر خازن واقعی و تخمینی در کلیه حالات کاملاً به هم نزدیک می‌باشند. مطابق شکل، مقدار خازن با کاهش ρ و افزایش سرعت، کاهش می‌یابد و خیلی سریعتر به مقدار دایم خود می‌رسد. این نحوه تغییر مقدار خازن مطلوب می‌باشد زیرا گشتاور متوسط زیاد، در سرعت‌های کم؛ و نوسانات گشتاور کم، در سرعت‌های زیاد از اهمیت بیشتری برخوردارند.

شکل (۵) نسبت زمان هدایت کلید به پریود کلیدزنی را مطابق با رابطه (۲۴) و به ازای مقادیر مختلف ρ نشان می‌دهد. این نسبت نشانگر مقادیر خازن مطابق با رابطه (۲۵) می‌باشد. بنابراین مقادیر خازن شکل (۴) در هر مقدار ρ ، مطابق با نسبت زمان رسم شده در شکل (۵) تغییر می‌کند.

شبیه سازی و بررسی نتایج

به منظور بررسی و مقایسه نتایج حاصل از کلید زنی خازن مبتنی بر تخمین سرعت با روش مبتنی بر حسگر سرعت، یک موتور القایی تکفاز با مشخصات مندرج در جدول (۲) در سه حالت زیر، با استفاده از نرم افزار MATLAB-Simulink شبیه سازی می‌شود:

- ۱- حداکثر شدن گشتاور متوسط ($\rho = 1$)
- ۲- حداقل شدن گشتاور نوسانی ($\rho = 0$)
- ۳- راه اندازی بر اساس شرایط بهینه ($\rho = 0.5$)

شکل (۲) بلوک دیاگرام کلی سیستم شبیه سازی شده را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، ولتاژ و جریان سیم پیچ‌های اصلی و کمکی استاتور بعنوان ورودی‌های بلوک تخمینگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. استراتژی کلیدزنی و تغییر خازن بر مبنای اهداف مختلف بهینه سازی که با انتخاب مقدار ρ مشخص می‌گردد، در بلوکی مجزا تعیین می‌شود. این سیستم به منظور بررسی عملکرد تخمینگر سرعت در تغییر مقدار خازن برای بهبود گشتاور موتور، شبیه سازی می‌گردد.

شکل (۳) سیگنال‌های سرعت واقعی و تخمینی را در دو گستره سرعت‌های کم و زیاد به ازای هر سه روش تخمین سرعت نشان می‌دهد. در این شکل سیگنال سرعت واقعی با خطوط پیوسته و سرعت تخمینی با خطوط گسسته نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اختلاف سیگنال‌های سرعت واقعی و تخمینی در سرعت‌های کم قابل قبول و در سرعت‌های زیاد ناچیز است. از آنجاییکه در هر یک از روش‌های تخمین سرعت، شیوه خاصی برای بدست آوردن شار مورد استفاده قرار گرفته است، طبیعتاً سرعت‌های تخمینی با هم متفاوت خواهند بود. این تفاوت ناشی از خطاها و مقادیر اولیه تابع انتگرالگیری و همچنین ثابت زمانی فیلتر پایین گذر می‌باشد.

مقدار خازنی که با استفاده از سرعت واقعی و سرعت تخمینی بدست می‌آید نیز در شکل (۴) قابل مشاهده می‌باشد. شکل‌های (۴-a)، (۴-b) و (۴-c) مقادیر خازن کلیدزنی شده واقعی و تخمینی‌ای را نشان می‌دهد که به ترتیب از روش‌های اول و دوم و سوم برای تخمین سرعت استفاده می‌کند. هر یک از این شکل‌ها از سه قسمت تشکیل شده است که متناظر با گشتاور متوسط حداکثر

تخمینی در مقایسه با خازن واقعی ناچیز و مطلوب می باشد. این امر استفاده موفقیت آمیز از هر سه روش تخمین سرعت را در بهبود گشتاور موتور نشان می دهد.

نتیجه گیری

این مقاله روش کلیدزنی خازن به منظور کنترل گشتاور موتور القایی تکفاز را بر اساس سرعت تخمین زده شده پیشنهاد کرده است. سه روش مختلف برای تخمین سرعت مورد استفاده قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا خازن متغیر حاصل از این روشها با خازن متغیری که از حسگر سرعت برای کلیدزنی استفاده می کند مقایسه شده است. سپس استراتژیهای مختلف کنترل گشتاور در حالت استفاده از سرعت تخمینی و حالت استفاده از حسگر سرعت مورد بررسی قرار گرفته اند.

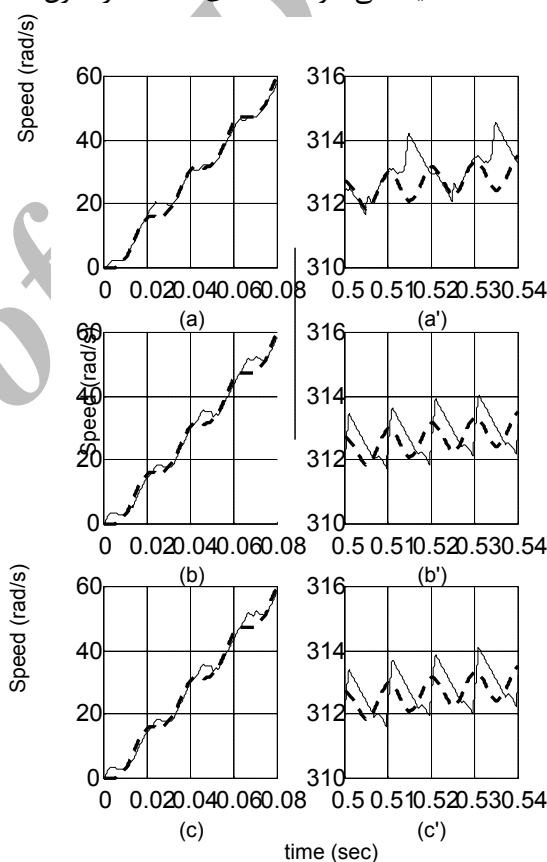
نتایج شبیه سازی حاکی از آن است که کنترل خازن با استفاده از سرعت تخمین زده شده در هر سه روش پیشنهادی، نتایجی تقریباً به خوبی کنترل خازن با بهره گیری از حسگر سرعت بوجود می آورد.

روابط ارائه شده برای تخمین سرعت در این مقاله حاکی از وابستگی سرعت تخمینی به پارامترهای ماشین است. لذا احتمال می رود تغییرات شدید این پارامترها بویژه در اثر بار زیاد و اشباع مغناطیسی آهن به بروز خطای تخمین منجر شود. ارزیابی این خطا و بررسی روشهای جبران آن، از جمله استفاده از تخمینگر پارامترها، در تداوم این پژوهش مفید بنظر می رسد.

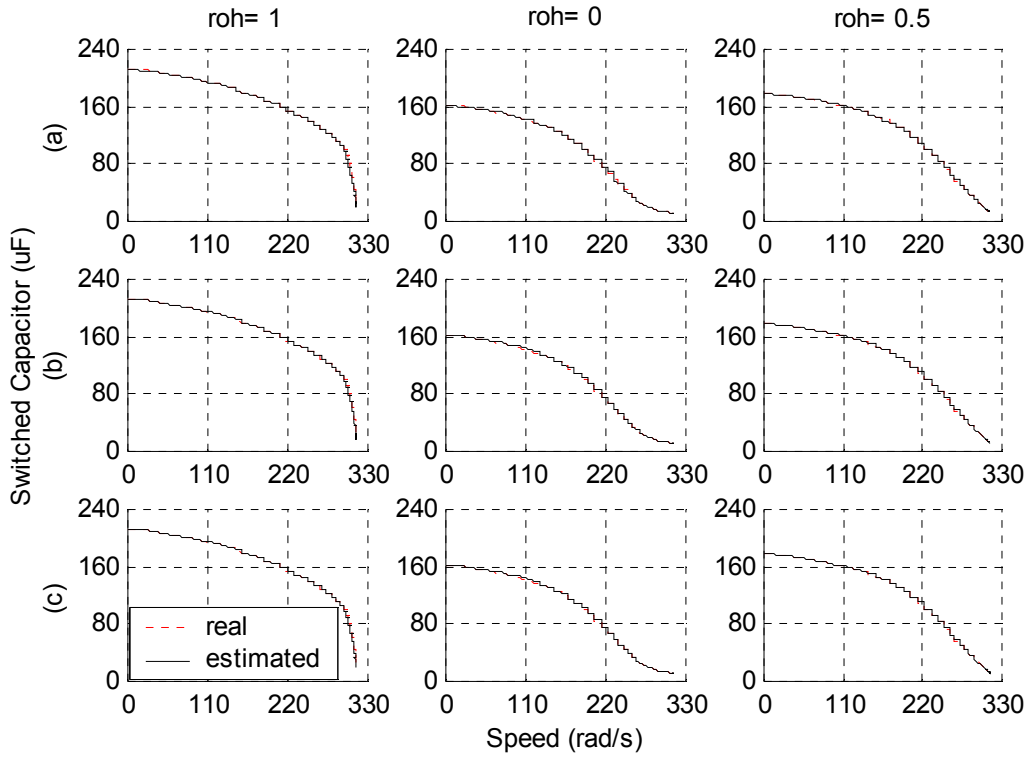
سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت قطب علمی سیستمهای کاربردی الکترومغناطیسی و در قالب طرح پژوهش کنترل موتورهای صنعتی در آزمایشگاه پژوهشی سیستمهای حرکت پیشرفته به انجام رسیده است. مؤلفان بدینوسیله مراتب تشکر خود را از قطب مذکور ابراز می دارند.

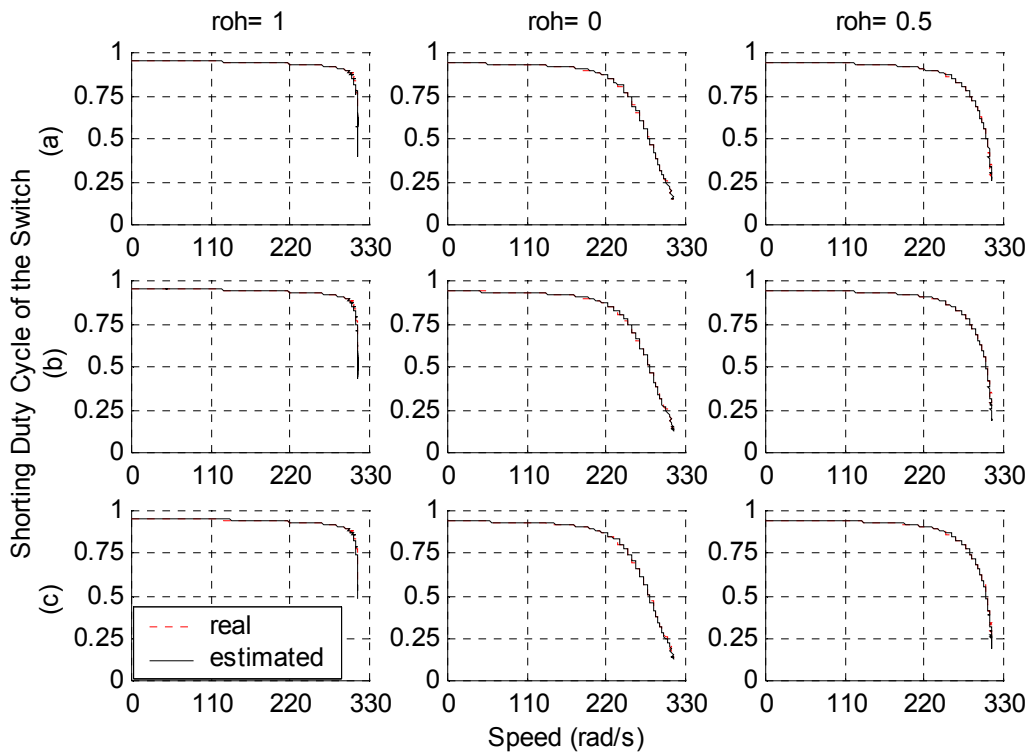
گشتاور موتور با استفاده از مقادیر خازن شکل (۴) در شکلهای (۶)، (۸) و (۱۰) به ترتیب به ازای $(\rho = 1)$ ، $(\rho = 0.5)$ و $(\rho = 0)$ نشان داده شده است. هر یک از این شکلها از چهار قسمت تشکیل شده است که سه قسمت اول، با استفاده از خازن تخمینی ای بدست آمده است که به ترتیب از روشهای اول و دوم و سوم برای تخمین سرعت استفاده می کند. قسمت چهارم نیز گشتاوری است که با استفاده از خازن واقعی بدست آمده است. اختلاف هر یک از سه قسمت اول با قسمت چهارم، به ازای مقادیر مختلف ρ در شکلهای (۷)، (۹) و (۱۱) ارایه شده است. دیده می شود که خطای استفاده از خازن



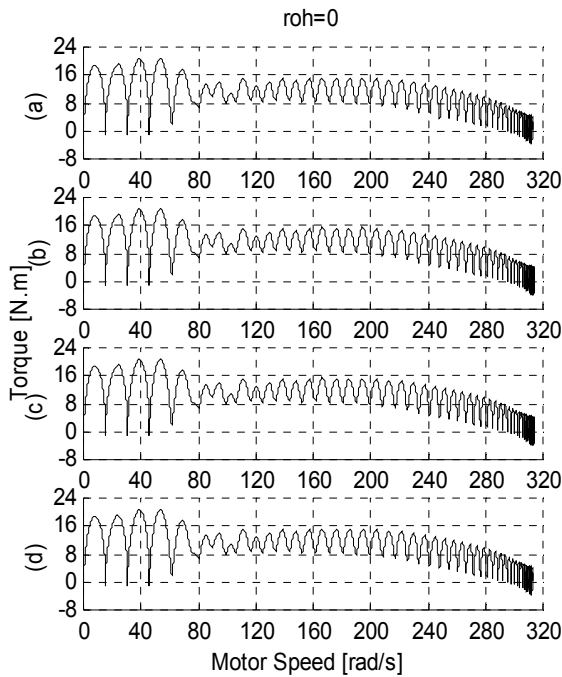
شکل ۳: سرعت واقعی و سرعت تخمینی موتور خازن متغیر در گستره سرعتهای کم (a-c) و زیاد (a'-c')؛
(a' و a) نتایج روش اول، (b' و b) نتایج روش دوم و (c' و c) نتایج روش سوم تخمین سرعت
خط پیوسته: سرعت واقعی
خط گسسته: سرعت تخمینی.



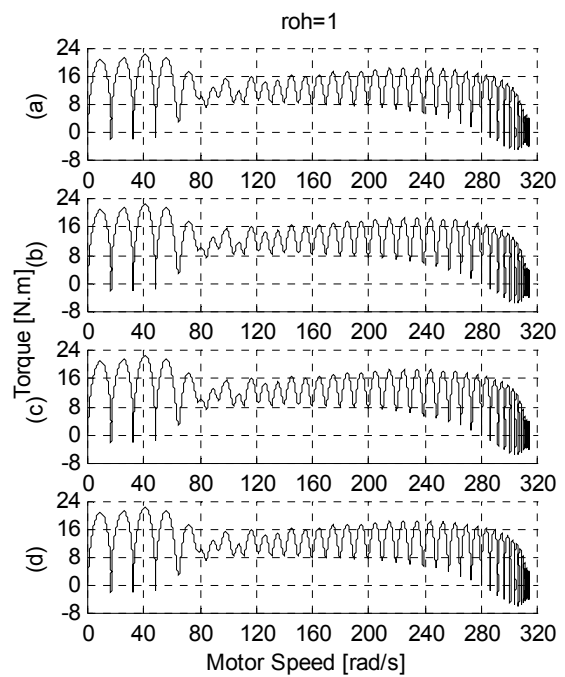
شکل ۴: ظرفیت خازن کلیدزنی شده به ازای مقادیر مختلف ρ با استفاده از سرعت واقعی و سرعت تخمینی به سه روش تخمین سرعت؛ روش اول (b) روش دوم (c) روش سوم.



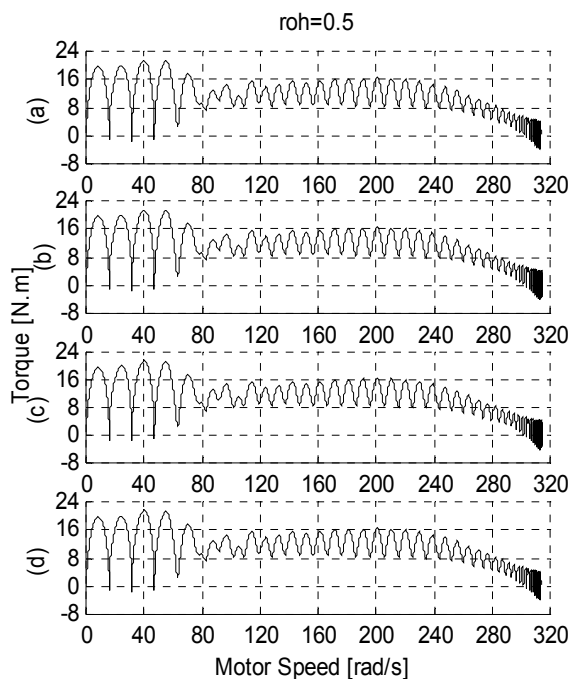
شکل ۵: نسبت زمان هدایت کلید به پریود کلیدزنی به ازای مقادیر مختلف ρ با استفاده از سرعت واقعی و سرعت تخمینی به سه روش تخمین سرعت؛ روش اول (a) روش دوم (b) روش سوم.



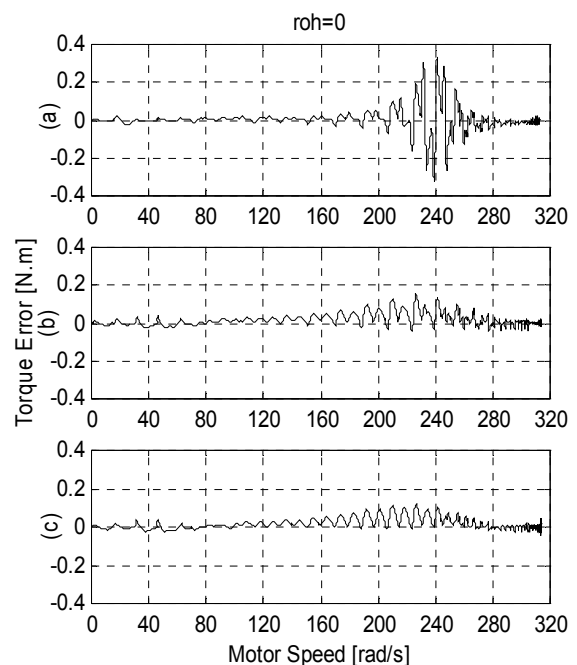
شکل ۸: گشتاور موتور به ازای $\rho = 0$ با استفاده از سرعت واقعی و سرعت تخمینی به سه روش تخمین سرعت: (a) روش اول (b) روش دوم (c) روش سوم (d) با استفاده از سرعت واقعی.



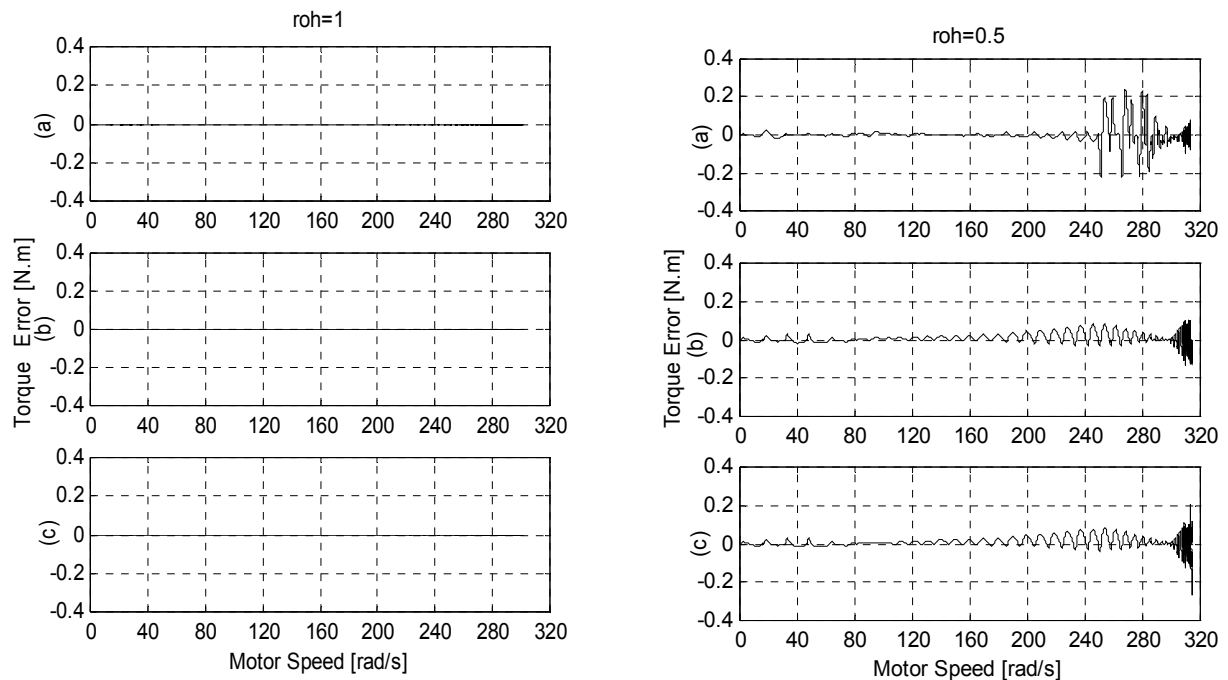
شکل ۶: گشتاور موتور به ازای $\rho = 1$ با استفاده از سرعت واقعی و سرعت تخمینی به سه روش تخمین سرعت: (a) روش اول (b) روش دوم (c) روش سوم (d) با استفاده از سرعت واقعی.



شکل ۹: خطای گشتاور شکل ۸: (a) خطای روش اول (b) خطای روش دوم (c) خطای روش سوم.



شکل ۷: خطای گشتاور شکل ۶ (a) خطای روش اول (b) خطای روش دوم (c) خطای روش سوم.



شکل ۱۱: خطای گشتاور شکل ۱۰؛ (a) خطای روش اول (b) خطای روش دوم (c) خطای روش سوم.

شکل ۱۰: گشتاور موتور به ازای $\rho = 0.5$ با استفاده از سرعت واقعی سرعت و تخمینی به سه روش تخمین سرعت؛ (a) روش اول (b) روش دوم (c) روش سوم (d) با استفاده از سرعت واقعی.

مراجع

- 1 - Liu, T. H., Wu, H. Ch. and Lin, M. T. (1997). "A Single-phase induction motor drive with efficiency and torque improvement." *Proc. of IEEE ISIE'97*, Vol. 2, PP. 637-642.
- 2 - Lettenmaier, T. A., Novotny, D. W. and Lipo, T. A. (1991). "Single-phase induction motor with an electronically controlled capacitor." *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 27, No. 1, PP. 38-43.
- 3 - Muljadi, E., Zhao, Y., Liu, T. H. and Lipo, T. A. (1993). "Adjustable AC Capacitor for a single-phase induction motor." *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 29, No. 3, PP. 479-485.
- 4 - Liu, T. H. (1995). "A maximum torque control with a controlled capacitor for a single-phase induction motor." *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, Vol. 42, No. 1, PP. 17-24.
- 5 - Langari, H. and Vaez-Zadeh, S. (2001). "DSP Based optimal torque control of single-phase induction motors." *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'2001*, PP. 850-855.
- 6 - de Almeida, J. F. M., Valdenebro, L. R. and Bim, E. (1999). "Fuzzy logic based maximum torque control for a single-phase induction motor." *Proc. of IEEE IECON'99*, Vol. 2, PP. 619-624.
- ۷ - ص. واعظ زاده و ح. لنگری. "کنترل ظرفیت خازن متغیر در موتور القایی تکفاز به منظور کشتاور زیاد و ضربان کم." نشریه دانشکده فنی جلد ۳۴ شماره ۲ ص ۳۲-۲۳، (۱۳۷۹).
- 8 - Walls, T. A. and Sudhoff, S. D. (1996). "Analysis of a single-phase induction machine with a shifted auxiliary winding." *IEEE Trans. on Energy Con.*, Vol. 11, no. 4, PP. 681-686.
- 9 - Krause, P. C. (1987). *Analysis of electric machinery*, New York: Mc Graw Hill.
- ۱۰ - ج. فیض، آ. ثروتیان و م. معلم. "تجزیه و تحلیل موتورهای تکفاز." انتشارات دانشگاه امام رضا(ع) مشهد، چاپ اول، (۱۳۷۵).