تخمین سرعت موتور القایی تکفاز و بهینه‌سازی گشتاور آن بدون استفاده از حسگر مکانیکی

صادق واعظزاده و علیرضا پیمان

چکیده: بهبود رفتار موتورهای القایی تکفاز و کنترل سرعت آنها اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. این موارد نیازمند سیگنال سرعت ماشین می‌باشد. در این مقاله روشی برای تخمین سرعت موتور القایی تکفاز ارائه می‌شود و کاربرد آن در بهبود گشتاور ماشین مورد مطالعه و بررسی مشروح قرار می‌گیرد. بدین منظور با استفاده از معادلات حاکم بر موتور القایی تکفاز در دستگاه مرجع ساکن، سرعت موتور بر حسب پارامترهای موتور و مؤلفه‌های شار پیوندی استاتور بدست می‌آید. با بدست آوردن شارهای پیوندی از ولتاژ و جریان سیم‌پیچیهای موتور، سرعت موتور با دقت نسبتاً زیاد تخمین زده می‌شود. سپس سرعت تخمینی در افزایش گشتاور متوسط، کاهش گشتاور نوسانی و بهینه سازی کلی گشتاور ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرد و نتایج شبیه‌سازی در شرایط استفاده از سرعت واقعی و سرعت تخمینی مقایسه می‌شود. ناچیز بودن خطای موجود مؤید کارآمدی روش پیشنهادی در تخمین سرعت می‌باشد.

***کلید واژه:* بهینه‌سازی گشتاور، تخمین سرعت، دستگاه مرجع ساکن، موتور القایی تکفاز.**

۱- مقدمه

موتورهای القایی تکفاز به طور سنتی کاربرد زیادی در مصارف خانگی داشته‌اند و در شرایط عدم دسترسی به برق سه‌فاز در برخی کاربردهای غیر خانگی نیز استفاده می‌شده‌اند. کاربردهای مذکور به توانهای کم و سرعت ثابت محدود بوده و دستیابی به تعدادی سرعت معین با استفاده از روشهای غیر الکترونیکی محقق می‌شده است [۱]. این وضعیت در سالهای اخیر دستخوش تحول گردیده است. از یک طرف این موتورها به تدریج در محدوده توانهای بیشتر ساخته می‌شوند و از طرف دیگر کاربردهای سرعت متغیر آنها مورد توجه قرار گرفته است [۲] تا [۶] بنابراین مرتفع ساختن مشکلات عملکردی این موتورها که عمدتاً ناشی از عدم تقارن ساختاری به علت تکفاز بودن آنها است، بیش از گذشته ضرورت یافته است. زیرا وجود هارمونیکهای شار و جریان و در نتیجه نوسانات گشتاور که از معایب ذاتی موتورهای تکفاز است منجر به افزایش دمای سیم‌پیچیها و ازدیاد تلفات ماشین می‌گردد [۷]. با افزایش توان موتورها، رفع این مشکل اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. همچنین کاربردهای سرعت متغیر اغلب نیازمند دینامیک سریع ماشین و در نتیجه گشتاور راه‌اندازی زیاد است که در تعارض با خاصیت کم بودن گشتاور متوسط تحت شرایط راه‌اندازی در این موتورها است. بنابراین تامین گشتاور زیاد و بدون نوسان در گستره وسیع سرعت موتور بیش از پیش مورد نیاز می‌باشد.

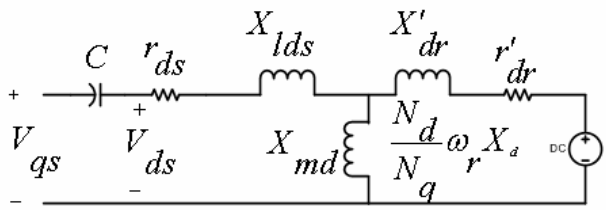
این مقاله در تاریخ ۲ دی ماه ۱۳۸۱ دریافت و در تاریخ ۲۶ تیر ۱۳۸۲ بازنگری شد.

صادق واعظزاده، دانشیار دانشکده فنی، دانشگاه تهران (email: vaezs@ut.ac.ir).

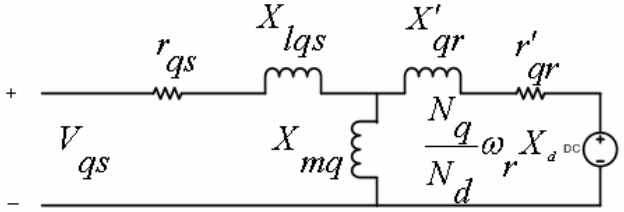
علیرضا پیمان، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق ـ قدرت، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.(email: a.payman@ece.ut.ac.ir).

برای پاسخگویی به این نیاز، از موتورهای دو خازنی در صنعت استفاده می‌گردد. خازن بزرگتر در طول دوره راه‌اندازی و به منظور افزایش گشتاور متوسط به کار گرفته می‌شود و خازن کوچکتر، در حالت کار دائم و به منظور کاهش نوسانات گشتاور، با سیم‌پیچی کمکی سری می‌شود [۸]. لیکن استفاده از دو خازن با معایبی همچون افزایش قیمت سیستم و نیازمندی به کلید گریز از مرکز همراه می‌باشد. علاوه بر این، ثابت بودن ظرفیت خازنها، دستیابی به حداکثر گشتاور یا حداقل نوسانات آنرا در گستره وسیع سرعت نامیسر می‌سازد. از اینرو استفاده از یک خازن کلیدزنی شده پیشنهاد گردیده است [۴] و [۵]. در این روش، با کنترل کلیدزنی برحسب سرعت ماشین، ظرفیت خازنی مؤثر به طور پیوسته قابل تنظیم است و بنابراین گشتاور مطلوب ماشین در تمام گستره سرعت قابل دستیابی می‌باشد. عموماً هدف از کلیدزنی خازن برحسب سرعت ماشین افزایش گشتاور بوده است [۱] و [۳] تا [۶]. اخیراً نیز روشی برای کنترل بهینه گشتاور با استفاده از خازن کلیدزنی شده با ظرفیت مؤثر متغیر ارائه شده است که در آن همزمان با افزایش گشتاور متوسط، به کاهش نوسانات گشتاور نیز توجه می‌شود [۷]، [۹] و [۱۰]. در همه این روشها، تغییر ظرفیت مؤثر خازن با توجه به سرعت موتور انجام می‌شود. لذا اطلاع دقیق از سیگنال سرعت ضروری است. در کاربردهای سرعت متغیر نیز، سیگنال سرعت علاوه بر کاربرد احتمالی در بهینه‌سازی گشتاور، به عنوان فیدبک در حلقه سرعت به کار می‌رود. بدین ترتیب عموم کاربردهای جدید موتورهای القایی تکفاز به اطلاع از سرعت دقیق موتور نیازمندند.

سرعت موتور از طریق حسگرهای مکانیکی قابل اندازه‌گیری است. اما استفاده از حسگرهای مکانیکی با توجه به مشکلات متعدد و قیمت زیاد آنها مطلوب نیست و تخمین سرعت با استفاده از حسگرهای الکتریکی راه‌گشای مشکل خواهد بود. در واقع با توجه به ارزان بودن موتورهای تکفاز نسبت به موتورهای سه‌فاز، حذف حسگر مکانیکی در موتورهای تکفاز از توجیه اقتصادی قویتری برخوردار است. لیکن علیرغم آنکه تخمین سرعت در موتورهای القایی سه فاز از بلوغ علمی و فناوری زیادی برخوردار شده و حدود یک دهه است که در محصولات تجاری مورد استفاده می‌باشد، پژوهش در خصوص تخمین سرعت موتورهای تکفاز تاکنون گزارش نشده است. استفاده از روشهای مربوط به موتورهای سه‌فاز در موتورهای تکفاز نیز به لحاظ تفاوت ذاتی در ساختار و اصول کار ماشین تکفاز بدون تطبیق و تغییر اساسی عملاً میسر نیست. از این رو در مقاله حاضر تخمین سرعت و کنترل خازن موتور القایی تکفاز بدون استفاده از حسگر سرعت ارائه می‌شود. بدین منظور ابتدا مدل ریاضی موتور در دستگاه مرجع ساکن تحت بررسی قرار می‌گیرد و با استفاده از آن، روشی برای تخمین سرعت موتور پیشنهاد می‌شود. پس از آن سرعت تخمین زده شده با سرعت واقعی مقایسه و دقت تخمین سرعت ارزیابی می‌شود. سپس کلیدزنی خازن و بهینه‌سازی گشتاور ماشین با استفاده از سرعت واقعی وسرعت تخمینی شبیه‌سازی می‌گردد. نزدیکی نتایج این دو



(الف)



(ب)

شکل۱: مدار معادل موتور القایی تکفاز؛ (الف) محور d، (ب) محور q.

شبیه‌سازی موفقیت کاربرد تخمین سرعت را در بهینه‌سازی رفتار ماشین اثبات می‌کند.

۱- معادلات موتور القایی تکفاز

معادلات حاکم بر موتور القایی تکفاز را در دستگاه مرجع ساکن به منظور استفاده در تخمین سرعت موتور بدست می‌آوریم. علت انتخاب دستگاه مرجع ساکن این است که سیم‌پیچیهای استاتور موتور القایی تکفاز یکسان نیستند و تنها در این دستگاه، معادلات ولتاژ و شار با پارامترهای ثابت بدست می‌آید [۹] و [۱۱].

معادلات ولتاژ استاتور در دستگاه مذکور عبارتند از [۱۲]:

$$v_{qs} = r_{qs} i_{qs} + \frac{p}{\omega_s}\Psi_{qs} \qquad (۱)$$

$$v_{ds} = r_{ds} i_{ds} + \frac{p}{\omega_s}\Psi_{ds} \qquad (۲)$$

p عملگر مشتق گیر، Ψ شار پیوندی و r_{qs} و r_{ds} مقاومت سیم‌پیچهای استاتور اصلی و کمکی می‌باشند. همچنین متغیرهای با زیرنویس q و d به ترتیب بیانگر متغیرهای سیم‌پیچی اصلی و کمکی در دستگاه مرجع ساکن هستند. مؤلفه‌های شار پیوندی استاتور در محورهای q و d عبارتند از:

$$\Psi_{qs} = X_{lqs} i_{qs} + X_{mq}\left(i_{qs} + i'_{qr}\right) \qquad (۳)$$

$$\Psi_{ds} = X_{lds} i_{ds} + X_{md}\left(i_{ds} + i'_{dr}\right) \qquad (۴)$$

ω_S سرعت سنکرون، X_{mq} و X_{lqs} (X_{md} و X_{lds}) به ترتیب راکتانسهای مغناطیس کننده و پراکندگی سیم پیچی q (d) استاتور می‌باشند و علامت پریم نشان‌دهندهٔ انتقال از روتور به استاتور است. اگر متغیرهای محورهای q و d روتور را به محورهای هم‌نام آنها در استاتور منتقل کنیم، معادلات ولتاژ روتور به صورت زیر درخواهند آمد:

$$v'_{qr} = r'_{qr} i'_{qr} - \frac{N_q}{N_d}\cdot\frac{\omega_r}{\omega_s}\Psi'_{dr} + \frac{p}{\omega_s}\Psi'_{qr} \qquad (۵)$$

$$v'_{dr} = r'_{dr} i'_{dr} + \frac{N_d}{N_q}\cdot\frac{\omega_r}{\omega_s}\Psi'_{qr} + \frac{p}{\omega_s}\Psi'_{dr} \qquad (۶)$$

ω_r سرعت روتور و N_q و N_d تعداد دورهای مؤثر سیم‌پیچی در محورهای q و d استاتور می‌باشند. مؤلفه‌های شار پیوندی روتور انتقال یافته به محورهای همنام در استاتور عبارتند از:

$$\Psi'_{qr} = X'_{lqr} i'_{qr} + X_{mq}\left(i_{qs} + i'_{qr}\right) \qquad (۷)$$

$$\Psi'_{dr} = X'_{ldr} i'_{dr} + X_{md}\left(i_{ds} + i'_{dr}\right) \qquad (۸)$$

X'_{lqr} و X'_{ldr} راکتانسهای پراکندگی روتور منتقل شده به سیم‌پیچیهای q و d استاتور می‌باشند. براساس روابط فوق، مدار معادل محورهای q و d به صورت شکل ۱ در می‌آید.

گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای ماشین بصورت

$$T_{el} = \frac{P}{۲}\frac{N_d}{N_q}\frac{X_{mq}}{\omega_s}\left(i^s_{qs} i'^s_{dr} - i^s_{ds} i'^s_{qr}\right) \qquad (۹)$$

تعریف می‌شود و معادله الکترومکانیکی ماشین عبارتست از:

$$P.\omega_r = \frac{۱}{J_m}\left(T_{el} - T_l\right) \qquad (۱۰)$$

که J_m ثابت اینرسی موتور و بار و T_l گشتاور بار خارجی می‌باشد. در مدار معادل محور d (سیم‌پیچی کمکی) داریم:

$$v^s_{ds} = v^s_{qs} - \frac{۱}{C}\int i^s_{ds} dt \qquad (۱۱)$$

که C ظرفیت خازن سری شده با سیم‌پیچی کمکی است. با محاسبه گشتاور بر حسب فازورهای جریان، مشخص می‌شود که گشتاور الکتریکی لحظه‌ای درحالت دائمی سینوسی، از دو جمله ثابت و متغیر نسبت به زمان تشکیل یافته است. جمله ثابت بعنوان گشتاور متوسط عبارتست از:

$$T_{avg} = n\frac{P}{۲}\cdot\frac{X_{mq}}{\omega_s}.\mathrm{Re}\left(I_{qs} I'^{\,*}_{dr} - I_{ds} I'^{*}_{qr}\right) \qquad (۱۲)$$

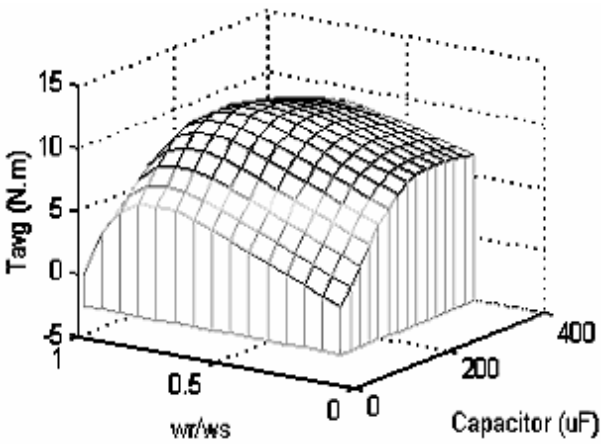
و مقدار پیک جمله متغیر با زمان بعنوان گشتاور نوسانی بصورت زیر می‌باشد:

$$T_{pl} = n\frac{P}{۲}\cdot\frac{X_{mq}}{\omega_s}.\left|I_{qs}.I'_{dr} - I_{ds}.I'_{qr}\right| \qquad (۱۳)$$

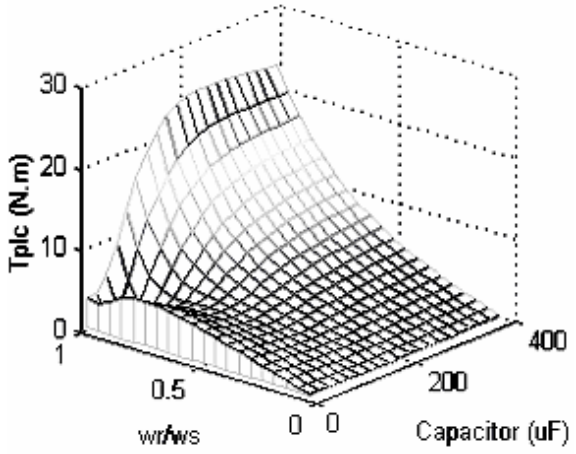
$n = \frac{N_d}{N_q}$ و علامت ستاره بر روی متغیرها بیانگر مزدوج متغیر است.

۲- تخمین سرعت موتور

با توجه به این که در روشهای تخمین سرعت، از حسگرهای الکتریکی استفاده می‌شود و از این طریق مقادیر لحظه‌ای ولتاژ و جریان مشخص می‌باشد، مهمترین متغیر در برآورده ساختن هدف تخمین، محاسبه شار می‌باشد. یکی ازروشهای بدست آوردن شار، اندازه‌گیری آن با استفاده از حسگرهای اثر هال می‌باشد که در شکاف هوایی نصب می‌گردند. اشکال این روش این است که خروجی این حسگرها با حرارت تغییر می‌کند و جبران‌سازی این اثر مشکل است. با توجه به اینکه شار تابعی از ولتاژ و جریان می‌باشد، می‌توان با استفاده از روابط مناسب، شارهای پیوندی را بر حسب ولتاژ و جریان استاتور محاسبه نمود و در نهایت با بهره‌گیری از معادلات ولتاژ، سرعت موتور را تخمین زد. این روش به موتورهای سه‌فاز اعمال شده و پیاده‌سازی آن نیز صورت گرفته است اما تاکنون روشی در مورد موتورهای تکفاز ارائه نشده است. با توجه به عدم تقارن موتور تکفاز و وجود سیم‌پیچیهایی با مقاومت و اندوکتانس متفاوت در استاتور،



(الف)



(ب)

شکل ۲: منحنی گشتاور–خازن–سرعت؛ (الف) گشتاور متوسط، (ب) گشتاور نوسانی.

محاسبات مربوط به تخمین سرعت این موتور پیچیده‌تر و گسترده‌تر از موتور سه‌فاز خواهد بود.

از آنجایی که موتورهای تکفاز عمدتاً با روتور قفسی ساخته می‌شوند و لذا دسترسی به متغیرهای روتور و اندازه‌گیری آنها امکان‌پذیر نیست، باید این متغیرها را از روابط حذف کنیم. بنابراین با محاسبهٔ جریانهای انتقال یافته روتور از روابط شارهای پیوندی استاتور و جایگذاری آنها در روابط مربوط به شارهای پیوندی انتقال یافته روتور (۷) و (۸)، این شارها برحسب جریانها و مؤلفه‌های شار پیوندی استاتور به دست می‌آید:

$$\Psi'_{dr} = K_{dd}\left(\Psi_{ds} - X_{dd} i_{ds}\right) \qquad (۱۴)$$

$$\Psi'_{qr} = K_{qq}\left(\Psi_{qs} - X_{qq} i_{qs}\right) \qquad (۱۵)$$

در روابط بالا پارامترهای K_{dd}، K_{qq}، X_{dd} و X_{qq} به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$K_{dd} = ۱ + \frac{X'_{ldr}}{X_{md}} \qquad (۱۶)$$

$$K_{qq} = ۱ + \frac{X'_{lqr}}{X_{mq}} \qquad (۱۷)$$

$$X_{dd} = X_{ds} - \frac{X_{md}^{۲}}{X_{md} + X'_{ldr}} \qquad (۱۸)$$

$$X_{qq} = X_{qs} - \frac{X_{md}^{۲}}{X_{mq} + X'_{lqr}} \qquad (۱۹)$$

که در آنها X_{qs} و X_{ds} راکتانسهای محورهای q و d استاتور می‌باشند. اگراز رابطه ولتاژ محور d روتور (۶)، سرعت محاسبه شود:

$$\omega_r = \frac{N_q}{N_d}\left\{\frac{\omega_s}{\Psi'_{qr}}\left[-r'_{dr} i'_{dr} - \frac{p}{\omega_s}\Psi'_{dr}\right]\right\} \qquad (۲۰)$$

در این رابطه نیز جریان محور d روتور به چشم می‌خورد. با استفاده از شار پیوندی محور d روتور، می‌توان این متغیر را حذف نمود. لذا

$$\omega_r = \frac{۱}{n\Psi'_{qr}} \cdot \left[\xi(-\Psi'_{dr} + X_{md} i_{ds}) - p\Psi'_{dr}\right] \qquad (۲۱)$$

بطوری که:

$$\xi = \frac{\omega_S r'_{dr}}{X'_{ldr} + X_{md}} \qquad (۲۲)$$

با بهره‌گیری از روابط شارهای پیوندی روتور که در (۷) و (۸) محاسبه شده‌اند، رابطهٔ تخمین سرعت موتور بر حسب متغیرهای استاتور بدست می‌آید:

$$\omega_r = \frac{\omega_s K_{dd}}{n K_{qq}}\left[\frac{-v_{ds} - X_{dd} p i_{ds} - \xi\Psi_{ds} + (r_{ds} + \xi X_{ds}) i_{ds}}{\Psi_{qs} - X_{qq} i_{qs}}\right] \qquad (۲۳)$$

در رابطه اخیر شارهای پیوندی استاتور وجود دارد که برای محاسبه آنها از روابط ولتاژ استاتور استفاده می‌شود. مشتق این شارهای پیوندی از (۱) و (۲) قابل حصول است:

$$\frac{p}{\omega_s}\Psi_{qs} = v_{qs} - r_{qs} i_{qs} \qquad (۲۴)$$

$$\frac{p}{\omega_s}\Psi_{ds} = v_{ds} - r_{ds} i_{ds} \qquad (۲۵)$$

با انتگرال‌گیری از روابط فوق، شارهای پیوندی استاتور محاسبه و در (۲۳) جایگذاری می‌شوند. بدین ترتیب سرعت ماشین بر حسب جریان و ولتاژ ماشین محاسبه می‌گردد.

۳- بهینه سازی گشتاور

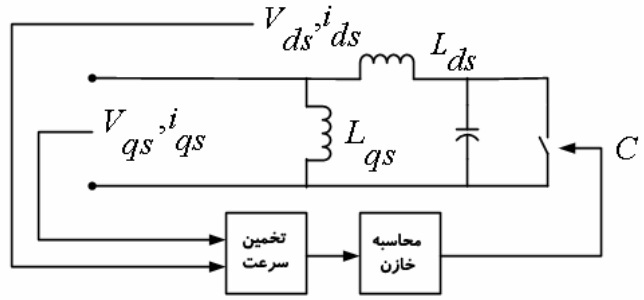
با استفاده از معادلات ماشین، گشتاور متوسط و پیک گشتاور نوسانی بر حسب راکتانس خازن محاسبه می‌شود:

$$T_{avg} = n\frac{P}{۲} \cdot \frac{X_{mq}}{\omega_s} \cdot v_{qs}^{۲} \cdot \frac{AX_c^{۲} + BX_c + D}{MX_c^{۲} + NX_c + Q} \qquad (۲۶)$$

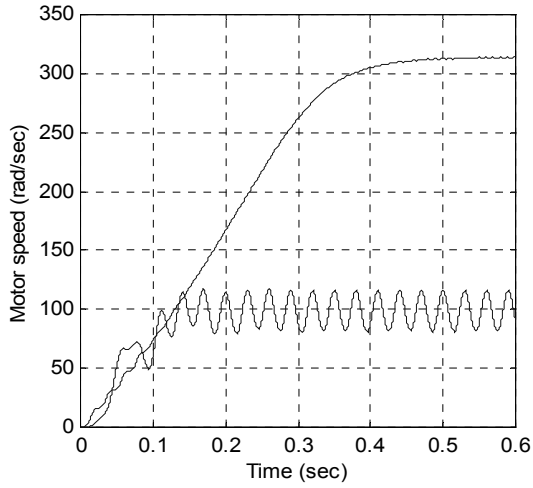
$$T_{pl} \cong n\frac{P}{۲} \cdot \frac{X_{mq}}{\omega_s} \cdot v_{qs}^{۲} \cdot \frac{EX_c^{۲} + FX_c + G}{MX_c^{۲} + NX_c + Q} \qquad (۲۷)$$

ضرایب A، B، D، E، F، G، M، N و Q تابعی از پارامترها و سرعت موتور هستند [۹]. شکل ۲ منحنی گشتاور متوسط و پیک گشتاور نوسانی را که با استفاده از معادلات فوق ترسیم شده است، نشان می‌دهد.

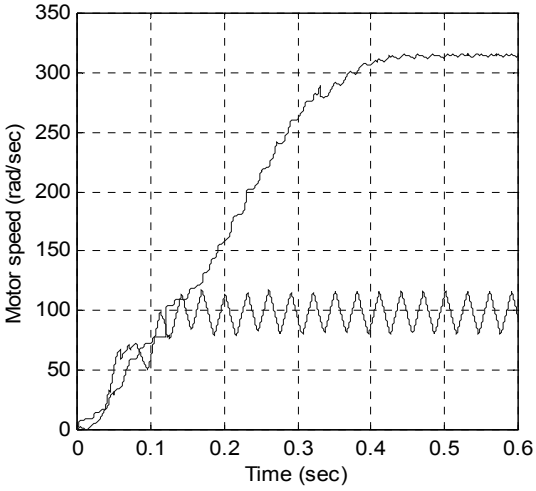
همانطور که ملاحظه می‌شود، یک خازن متغیر اهداف حداکثر شدن گشتاور متوسط و حداقل شدن گشتاور نوسانی را در سرعتهای مختلف



شکل ۳: بلوک دیاگرام کلی سیستم شبیه‌سازی شده.



(الف)



(ب)

شکل ۴: سرعت موتور؛ (الف) سرعتهای واقعی، (ب) سرعتهای تخمین‌زده شده.

برآورده می‌سازد. با حل مشتق دو رابطه فوق نسبت به ظرفیت خازن، مقدار این ظرفیت به منظور حداکثر کردن گشتاور متوسط وحداقل نمودن گشتاور نوسانی محاسبه می‌شود [۹]:

$$C_{avg} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{NA - MB}{MD - QA - \Delta_1} \qquad (۲۸)$$

$$C_{pl} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{NE - MF}{MG - QE - \Delta_2} \qquad (۲۹)$$

Δ_1 و Δ_2 نیز تابعی از پارامترها و سرعت موتور هستند [۹]. از آنجائی که در شرایط راه‌اندازی، معمولاً حداکثر بودن گشتاور متوسط و در شرایط کار دائم، حداقل بودن نوسانات گشتاور مهم است، می‌توان تابع گشتاور بهینه را در همه سرعتها، بصورت زیر تعریف نمود [۱۰]:

$$T_{optimum} = \rho T_{avg} - (1-\rho) T_{pl} \qquad (۳۰)$$

متغیر $0 \le \rho \le 1$ بعنوان پارامتر بهینه‌سازی تعریف می‌شود. اگر $T_{optimum}$ حداکثر شود، بسته به مقدار پارامتر که مطابق کاربرد مورد نظر انتخاب می‌شود، هر دو هدف افزایش گشتاور متوسط و کاهش گشتاور نوسانی قابل حصول است. با حل معادله مربوط به حداکثر نمودن تابع گشتاور بهینه مقدار خازن مورد نظر محاسبه می‌شود [۹]:

$$C_{opt} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{NA_{op} - MB_{op}}{MD_{op} - QA_{op} - \Delta_{op}} \qquad (۳۱)$$

واضح است که به ازای $\rho = 0$، $C_{opt} = C_{pl}$ و به ازای $\rho = 1$، $C_{opt} = C_{avg}$ می‌باشد. بنابراین با انتخاب مناسب ضریب بهینه‌سازی، مقدار خازنی که عملکرد مطلوب موتور را با توجه به مقدار گشتاورهای متوسط و نوسانی ممکن می‌سازد، در همه سرعتها مشخص می‌شود.

جدول ۱: مشخصات موتور شبیه‌سازی شده.

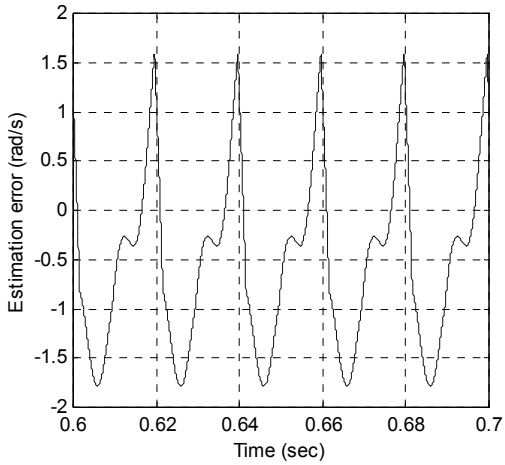
r_{qs}	$5.2\,\Omega$	r'_{qr}	$7.5\,\Omega$
r_{ds}	$14.75\,\Omega$	r'_{dr}	$4.12\,\Omega$
L_{lqs}	$0.0179\,H$	L'_{qr}	$0.0118\,H$
L_{lds}	$0.0118\,H$	L'_{dr}	$0.00668\,H$
L_{mq}	$0.3\,H$	J_m	$0.02488\,Kgm^2$
L_{md}	$0.168\,H$	n	0.749

۴- شبیه سازی و بررسی نتایج

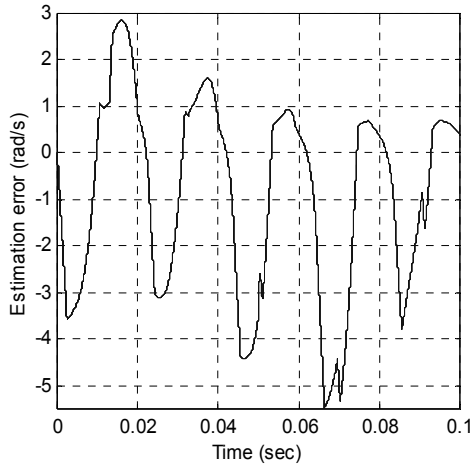
۴-۱ شبیه‌سازی سیستم

به منظور بررسی عملکرد روش ارائه شده برای تخمین سرعت، یک موتور القایی تکفاز که مقادیر نامی و پارامترهای آن در جدول ۱ داده شده است، با استفاده از نرم افزار MATLAB-Simulink شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۳ بلوک دیاگرام کلی سیستم شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در بلوک موتور القایی تکفاز، معادلات دینامیک ماشین (۱) تا (۸) که در بخش دوم بیان شد مورد استفاده قرار می‌گیرد. جریانها و ولتاژهای سیم‌پیچیهای استاتور که با استفاده از حسگرهای الکتریکی بدست می‌آیند، بعنوان ورودی بلوک تخمین سرعت در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از این ورودیها، عملیات مربوط به محاسبهٔ شارهای پیوندی استاتور و تخمین سرعت مطابق با روابط (۱۴) تا (۲۵) انجام می‌شود. محاسبات مربوط به کنترل خازن نیز بر طبق روابط (۲۸) یا (۲۹) یا (۳۱) در بلوک محاسبه خازن صورت می‌پذیرد.

در شکل ۴ سرعت تخمین زده شده به همراه سرعت واقعی موتور در دو مقدار مختلف سرعت ارایه شده است. ملاحظه می‌شود در سرعت کم، سیگنال سرعت واقعی دارای نوسانات ذاتی است که در سرعت تخمینی نیز خود را نشان می‌دهد. خطای تخمین (تفاضل سرعت واقعی و سرعت تخمینی) در دو مقدار سرعت کم و سرعت زیاد، در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد. ملاحظه می‌شود خطای تخمین دارای شکل موج نوسانی است که با توجه به تأخیر ناشی از محاسبات مربوط قابل توجیه است. مقدار خطا در سرعت کم، ۵/۵ و در سرعت زیاد، ۱/۸ رادیان بر ثانیه می‌باشد که به ترتیب در حدود ۵/۵٪ و ۰/۵۶٪ سرعت واقعی است. زیادتر بودن

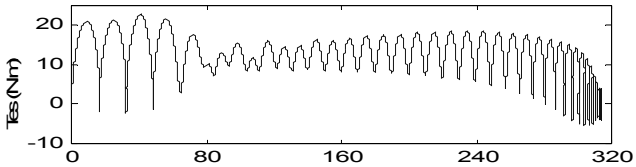


(الف)

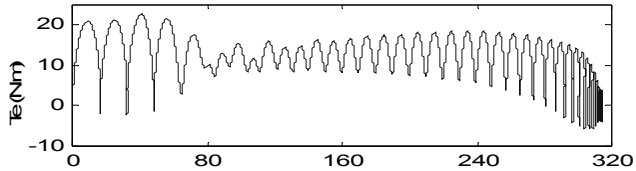


(ب)

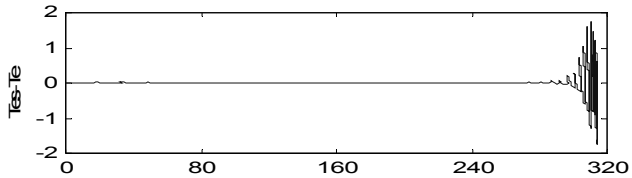
شکل ۵: خطای تخمین؛ (الف) در سرعت زیاد، (ب) در سرعت کم.



(الف)

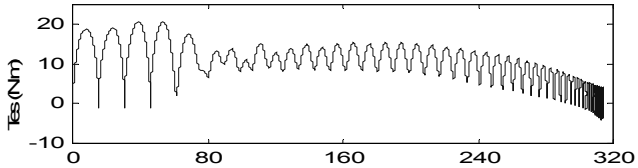


(ب)

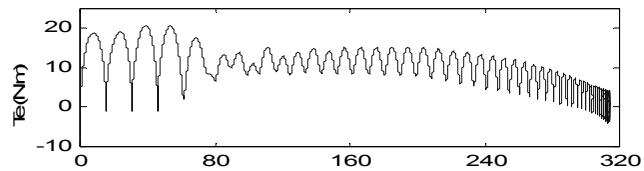


(ج)

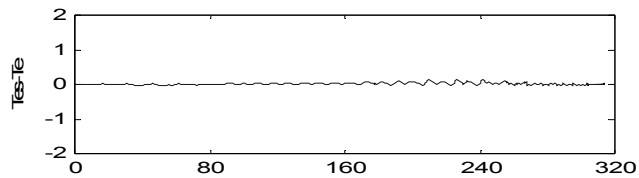
شکل ۶: راه‌اندازی موتور براساس حداکثر شدن گشتاور متوسط راه‌اندازی؛ (الف) کلیدزنی خازن با استفاده ازسرعت تخمینی، (ب) کلیدزنی خازن با استفاده از حسگر سرعت، (ج) مقایسه گشتاورهای شرایط (الف) و (ب).



(الف)



(ب)

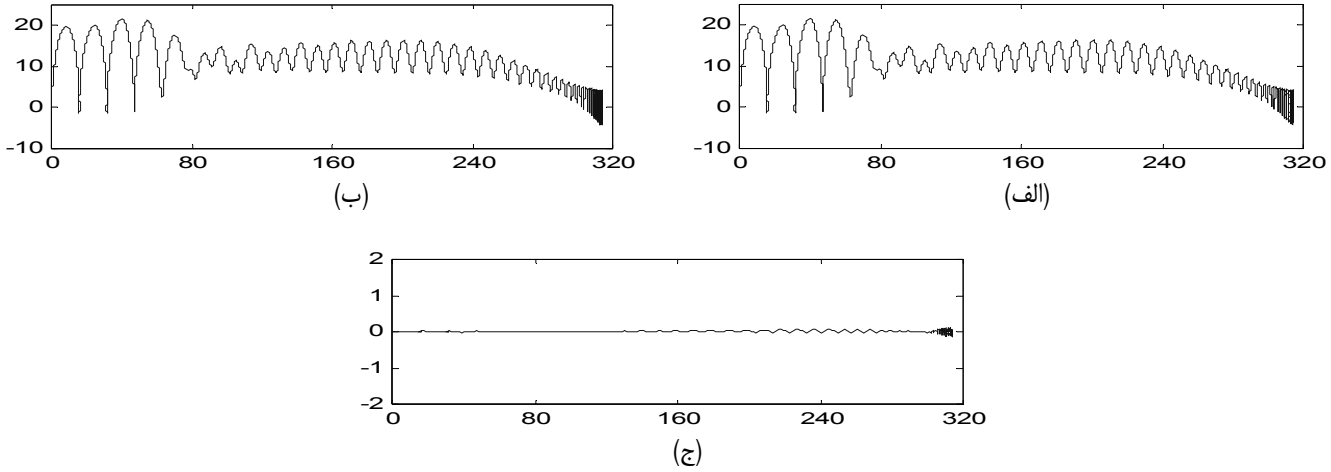


(ج)

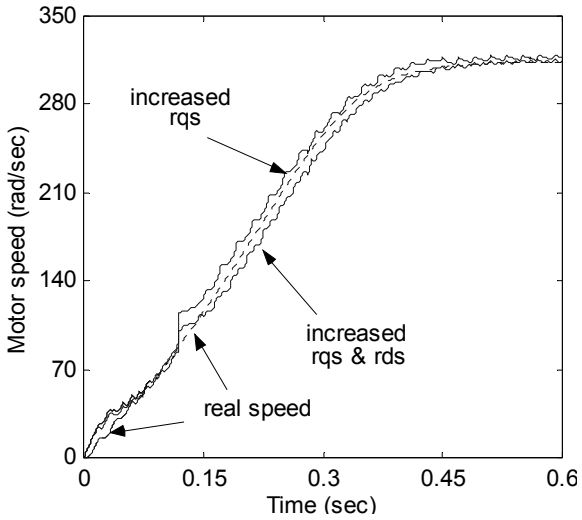
شکل ۷: راه‌اندازی موتور براساس حداقل شدن نوسانات گشتاور حالت دائم؛ (الف) کلیدزنی خازن با استفاده ازسرعت تخمینی، (ب) کلیدزنی خازن با استفاده از حسگر سرعت، (ج) مقایسه گشتاورهای شرایط (الف) و (ب).

خطای تخمین در سرعت کم به علت افزایش خطای محاسبه شار در محدوده سرعتهای کم است که به نوبه خود ناشی از خطای انتگرال‌گیری از تفاضل ولتاژ در (۲۴) و (۲۵) می‌باشد. نوسانی بودن خطا به مفهوم آن است که میانگین خطا به ویژه در سرعت کم بسیار کمتر از درصدهای مذکور است.

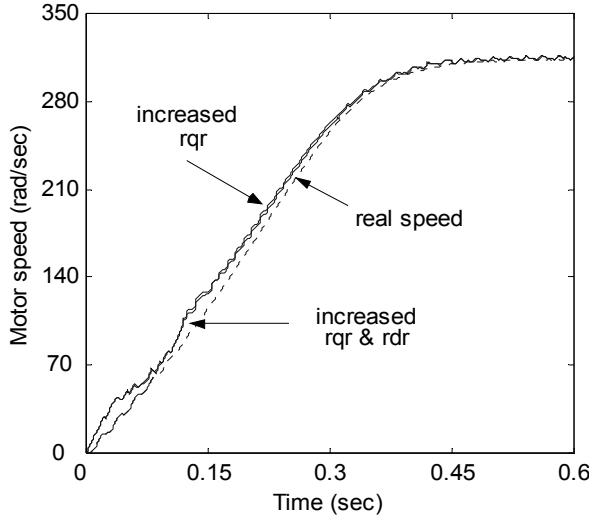
نمودارهای شکل ۶ گشتاور ماشین تحت روش کلیدزنی خازن به منظور حداکثر شدن گشتاور متوسط ($\rho=۱$) را نشان می‌دهد. نمودار (الف) با استفاده از سرعت تخمینی و نمودار (ب) با استفاده از سرعت واقعی بدست آمده است. در نمودار (ج) این دو گشتاور با هم مقایسه می‌شوند و ملاحظه می‌شود که مقدار خطای گشتاور ناشی از خطای تخمین سرعت ناچیز است. در این استراتژی، با وجود گشتاور راه‌اندازی مطلوب، مقدار نوسانات گشتاور زیاد می‌باشد. در شکل ۷ خازن در دو حالت استفاده از سرعت تخمینی و سرعت واقعی به گونه‌ای کلیدزنی می‌شود که نوسانات گشتاور به حداقل مقدار ممکن برسد. برای دسترسی به این هدف، مقدار ρ برابر صفر قرار داده می‌شود. مقدار خطای گشتاور در این حالت نیز همانند حالت اول، کمتر از ۱ rad/s می‌باشد. در این استراتژی، موتور از شرایط حداکثر بودن گشتاور متوسط فاصله دارد. با انتخاب $\rho=۰/۵$ افزایش گشتاور متوسط و کاهش گشتاور نوسانی به طور همزمان تأمین می‌شود. شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی دینامیکی این حالت را نشان می‌دهد. از مقایسه نمودارهای (الف) و (ب) این شکل با نمودارهای مشابه در شکلهای ۶ و ۷ ملاحظه می‌شود که در این استراتژی گشتاور متوسط بیشتر از مقدار آن در شکل ۷ و گشتاور نوسانی کمتر از مقدار آن در شکل ۶ می‌باشد. گشتاور موتور در این استراتژی نیز به ازای کلیدزنی خازن با سرعت واقعی و سرعت تخمینی بسیار نزدیک بهم هستند و اختلاف آنها کمتر از ۱ rad/s می‌باشد. در مجموع نتایج شبیه‌سازی کارآمدی روش پیشنهادی تخمین سرعت را در این کاربرد نمونه به خوبی نشان می‌دهد.



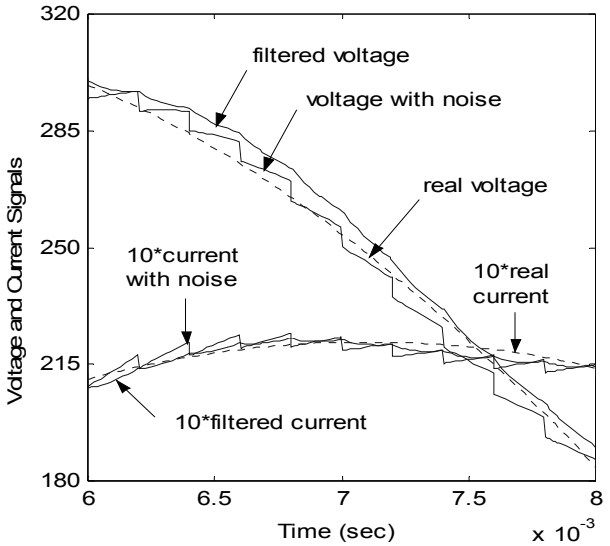
شکل ۸: راه‌اندازی موتور براساس شرایط بهینه؛ (الف) کلیدزنی خازن با استفاده ازسرعت تخمینی، (ب) کلیدزنی خازن با استفاده از حسگر سرعت، (ج) مقایسه گشتاورهای شرایط (الف) و (ب).



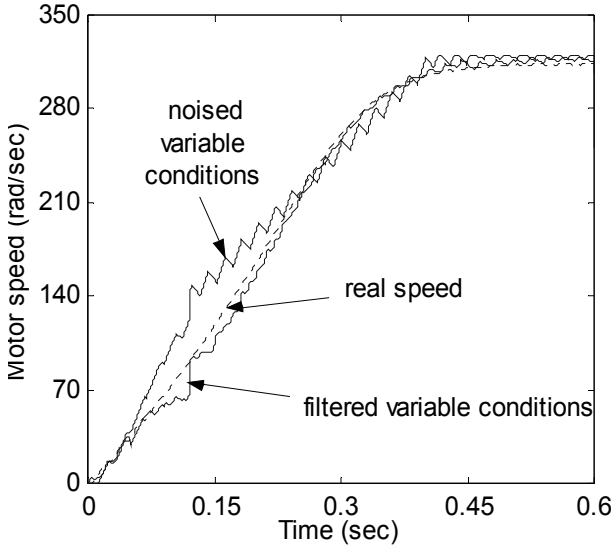
شکل ۹: اثر افزایش مقاومت سیم‌پیچیهای استاتور بر سرعت تخمینی.



شکل ۱۰: اثر افزایش مقاومت سیم‌پیچیهای روتور بر سرعت تخمینی.



شکل ۱۱: شکل موجهای ولتاژ و جریان سیم پیچی اصلی موتور.



شکل ۱۲: سرعت تخمینی موتور با استفاده از متغیرهای شکل ۱۱.

۴-۲ بررسی اثر پارامترها و نویز

همانگونه که (۲۳) نشان می‌دهد، رابطه تخمین سرعت موتور تابعی از پارامترهای موتور و متغیرهای ولتاژ و جریان استاتور می‌باشد. بنابراین هرگونه تغییری در آنها می‌تواند در سرعت تخمینی و خطای آن تاثیرگذار باشد. بدین منظور اثر تغییر چند پارامتر و متغیر موتور در شکلهای ۹ تا ۱۲ بررسی شده است.

شکل ۹ اثر تغییر مقاومتهای استاتور را بر سرعت تخمینی نشان

می‌دهد. در شکل، افزایش ۵٪ مقاومت سیم‌پیچی اصلی موتور، می‌تواند تا ۲۰٪ خطای سرعت تخمینی را نسبت به سرعت واقعی افزایش دهد. در حالیکه افزایش همزمان مقاومت سیم‌پیچی کمکی به همان حد ۵٪، باعث کاهش این اختلاف می‌شود؛ بطوریکه در حالت دائم، اثر افزایش مقاومت سیم‌پیچی اصلی را تا حدود زیادی از بین می‌برد. همچنین مشاهده می‌شود که اثر افزایش مقاومت سیم‌پیچی کمکی بیشتر از مقاومت سیم‌پیچی اصلی می‌باشد که این مطلب از (۲۳) قابل توجیه است.

شکل ۱۰ اثر افزایش مقاومتهای روتور را نشان می‌دهد. مطابق با شکل، افزایش ۵٪ مقاومت محور q روتور، خطای تخمین را تا ۱۵٪ افزایش می‌دهد و این افزایش در سرعت‌های پایین بیشتر است. همچنین افزایش مقاومت محور d روتور، اثر زیادی بر تخمین سرعت موتور نخواهد داشت. در مجموع می‌توان اظهار نمود که اثر تغییر مقاومتهای استاتور بیشتر از مقاومتهای روتور است و خطای تخمین را بویژه در حالت گذرا افزایش می‌دهد. بنابراین در مواردی که تغییر مقدار پارامترها نسبت به مقادیر نامی آنها زیاد است، لازم است از تخمین پارامترها برای کاهش خطا استفاده نمود.

شکل ۱۱ متغیرهای ولتاژ و جریان سیم‌پیچی اصلی را که در سیستم تخمینگر مورد استفاده قرار می‌گیرند نشان می‌دهد. به منظور بررسی اثر خطای اندازه‌گیری و نویز بر تخمین سرعت، یک نویز متغیر به ولتاژ و جریان افزوده شده است که اثر آن بر سرعت در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. این نویز می‌تواند خطای تخمین را در کلیه سرعتها به میزان قابل توجهی افزایش دهد. با اعمال یک فیلتر پایین‌گذر به متغیرهای حامل نویز، شکل موجهای صافتری بدست می‌آید که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. اگرچه خروجی‌های فیلتر نسبت به شکل موجهای اصلی دارای انتقال فاز می‌باشند، سرعتی که با استفاده از آنها تخمین زده می‌شود با خطای کمتری همراه است. این کاهش خطا بخصوص در سرعتهای زیاد محسوستر است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تخمین سرعت موتور القایی تکفاز با استفاده از متغیرهای الکتریکی ماشین ارائه شد. برای این منظور سرعت ماشین بر حسب شار پیوندی استاتور محاسبه می‌شود و شار نیز به نوبه خود با انتگرال‌گیری از تفاضل ولتاژ روی سیم‌پیچیهای استاتور بدست می‌آید. شبیه‌سازی تخمین سرعت حاکی از آن است که متوسط خطای تخمین درمحدودهٔ وسیع سرعت ماشین ناچیز است. حداکثر خطای نسبی لحظه‌ای در سرعت کم تا حدودی افزایش می‌یابد که با اتخاذ روشهای دقیقتر برای محاسبه شار ماشین کاهش خواهد یافت. به کارگیری تخمین سرعت موجب حذف حسگر سرعت از کاربردهای سرعت متغیر و بهینه‌سازی رفتار ماشین می‌شود. کاربرد تخمین سرعت در افزایش گشتاور متوسط، کاهش گشتاور نوسانی و بهبود همزمان گشتاور متوسط و گشتاور نوسانی با استفاده از شبیه‌سازی گسترده ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که استفاده از سرعت تخمینی تقریباً به خوبی استفاده از سرعت واقعی در بهبود گشتاور ماشین مؤثر است. تغییر مقاومت سیم‌پیچیهای روتور و بویژه استاتور از مقادیر نامی موجب افزایش خطای تخمین می‌شود. در صورتی که این تغییر زیاد باشد، استفاده از تخمینگر برای اندازه‌گیری مقادیر دقیق مقاومتها ضروری است. وجود نویز در سیگنالهای ولتاژ و جریان ماشین موجب افزایش خطا در تخمین سرعت می‌شود. استفاده از فیلتر پایین‌گذر با مرتبه پایین بخوبی این مشکل را مرتفع می‌سازد.

مراجع

[1] T. H. Liu, H. Ch. Wu, and M. T. Lin, "A single-phase induction motor drive with efficiency and torque improvement," in *Proc. of IEEE ISIE'97*, vol. 2, pp. 637-642, 1997.

[2] F. S. Neves, *et al.*," Single-phase induction motor drives with direct torque control," in *Proc. of IEEE IECON'02*, pp. 241-246, Spain, 5-8 Nov. , 2002.

[3] T. A. Lettenmaier, D. W. Novotny, and T. A. Lipo, "Single-phase induction motor with an electronically controlled capacitor," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 27, no.1, pp. 38-43, Jan. /Feb. 1991.

[4] E. Muljadi, Y. Zhao, T. H. Liu, and T. A. Lipo, "Adjustable AC capacitor for a single-phase induction motor," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 29, no. 3, pp. 479-485, May/Jun. 1993.

[5] T. H. Liu, "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, Feb. 1995.

[6] J. F. M. de Almeida, L. R. Valdenebro, and E. Bim, " Fuzzy logic based maximum torque control for a single-phase induction motor," in *Proc. of IEEE IECON'99*, vol. 2, pp. 619-624, 1999.

[7] H. Langari and S. Vaez-Zadeh, "DSP based optimal torque control of single-phase induction motors," in *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'2001*, pp. 850-855, Canada, 2001.

[8] S. J. Chapman, *Electric Machinary Fundamentals*, NewYork: McGraw Hill, 1985.

[9] S. Vaez-Zadeh, H. Langari, "High average-low pulsating torque operation of single-phase induction motors," in *Proc. IEEE IAS'2000*, pp. 1513-1518, Italy, Oct. 2000.

[۱۰] ص. واعظ زاده و ح. لنگری "کنترل خازن متغیر در موتور القایی تکفاز به منظور تأمین گشتاور زیاد با ضربان کم"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، جلد ۳۴، شماره ۲، صفحات ۳۲-۲۳، شهریور ۱۳۷۹.

[11] T. A. Walls and S. D. Sudhoff, "Analysis of a single-phase induction machine with a shifted auxiliary winding," *IEEE Trans. on Energy Con.*, vol. 11, no. 4, pp. 681-686, Dec. 1996.

[12] P. C. Krause, *Analysis of Electric Machinery*, NewYork: McGraw Hill, 1987.

صادق واعظزاده در سال ۱۳۳۸ در مشهد مقدس به دنیا آمد و پس از طی تحصیلات ابتدائی و متوسطه در ۱۳۵۵ در رشته برق دانشگاه علم و صنعت ایران پذیرفته شد و پس از کسب درجه کارشناسی مهندسی برق (قدرت) از این دانشگاه، درجات کارشناسی ارشد و دکتری را در همین رشته از دانشگاه کویین کانادا در سال ۱۳۷۲ و ۱۳۷۶ دریافت کرد. وی در سال ۱۳۷۶ به عضویت هیئت علمی دانشگاه تهران درآمد و در سال ۱۳۸۰ به مرتبه دانشیاری ارتقاء یافت. زمینه‌های پژوهشی نامبرده شامل کنترل پیشرفته موتورها و محرکه‌های الکتریکی و سیستمهای کنترل حرکت، سیستمهای الکترومغناطیسی حرکت خطی و تعلیق مغناطیسی، خودروی برقی، دینامیک سیستمهای قدرت و مدیریت فناوری می‌باشد. از نامبرده بالغ بر هفتاد مقاله پژوهشی تخصصی در مجلات و مجموعه مقالات کنفرانسهای داخلی و خارجی به چاپ رسیده و ترجمه کتاب "موسسات فناوری، راهبردهای بهترین عملکرد" توسط دانشگاه تهران منتشر شده است. دکتر واعظزاده مسوولیتهای متعددی را در سطح آموزشی بر عهده داشته است. وی همچنین مدیر اسبق گرایش قدرت و سرپرست آزمایشگاه پژوهشی سیستمهای حرکت پیشرفته در دانشگاه تهران است.

علیرضا پیمان در سال ۱۳۵۶ در تهران به دنیا آمد. در سال ۱۳۷۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال ۱۳۸۲ مدرک کارشناسی ارشد خود را از دانشگاه تهران دریافت نمود. وی پس از فارغ‌التحصیلی نیز همکاری خود را با دانشگاه تهران قطع نکرده است و هم‌اکنون به عنوان کارشناس ارشد برق در آزمایشگاه پژوهشی سیستمهای حرکت پیشرفته و آزمایشگاه مبانی برق فعالیت می‌نماید. زمینه‌های پژوهشی نامبرده عبارتند از: کنترل پیشرفته موتورها و محرکه‌های الکتریکی، تخمین سرعت موتورهای الکتریکی و دینامیک سیستمهای قدرت.