

استفاده از روش جابه‌جایی قطب‌ها در یک رؤیت‌گر جدید مرتبه کاهش‌یافته برای روش کنترل مستقیم گشتاور در موتور القایی

ارمغان علی‌عسکری^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ سید علیرضا داوری^۲، استادیار؛ بهاره زارعی^۳، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - a.aliaskari@srttu.edu

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - davari@srttu.edu

۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - b.zarei@srttu.edu

چکیده: در این مقاله، یک رؤیت‌گر حلقه بسته شار استاتور جدید بر مبنای مدل ولتاژ (مرتبه کاهش‌یافته) در کاربردهای روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC) برای موتورهای القایی ارائه شده است. قاعده روش کنترل مستقیم گشتاور، بر پایه کنترل شار و اندازه آن بوده، لذا تخمین شار یکی از مباحث کلیدی در این روش است. استفاده از رؤیت‌گرهای مرسوم حلقه باز مدل ولتاژ می‌تواند سبب بروز مشکلاتی از قبیل ظاهر شدن آفست^۱ دی‌سی در خروجی، اشباع انتگرال‌گیر و تخمین نادرست در سرعت‌های پایین شود. یکی از راه‌حل‌های موجود برای جبران این نارسایی‌ها و بهبود عملکرد سیستم محرکه، استفاده از رؤیت‌گرهای حلقه بسته است. رؤیت‌گر ارائه‌شده در این مقاله، یک رؤیت‌گر حلقه بسته جدید کاهش مرتبه یافته بر مبنای جابه‌جایی قطب‌های تابع تبدیل آن به سمت چپ در صفحه مختصات مختلط است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که عملکرد DTC در نقاط کار مختلف به‌خصوص، در سرعت‌های پایین بهبود یافته و همچنین رؤیت‌گر در شرایط بحرانی قادر به حفظ پایداری خود است.

واژه‌های کلیدی: کنترل مستقیم گشتاور، تخمین شار استاتور، مدل استاتور، مدل ولتاژ، موتور القایی، نقاط کار.

Using the Poles Shifting Method in a New Reduced-Order Observer for Direct Torque Control Technique in Induction Motor

A. Aliaskari¹, MSc Student; S. A. Davari², Assistant Professor; B. Zarei³, MSc Student

1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran, Email: a.aliaskari@srttu.edu

2- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran, Email: davari@srttu.edu

3- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran, Email: b.zarei@srttu.edu

Abstract: In this paper, a new closed-loop stator flux observer based on the voltage model (reduced-order) in direct torque control (DTC) applications for induction motors is proposed. The rule of DTC is based on controlling flux and its angle. Therefore, flux estimation is one of the fundamental issues in this method. Using the conventional open-loop voltage model observers can cause some problems such as, appearing dc offset in output, integrator saturation and incorrect estimation in low-speeds. One of the available solutions for compensating these shortcomings and improving the drive system performance is using closed-loop observers. The proposed observer in this paper is a novel closed-loop reduced-order observer based on shifting poles of its transfer function to the left in the complex plane. The simulation results show that the DTC performance is improved in different operation points, especially in low-speeds and also the observer is able to keep its stability in critical conditions.

Keywords: Direct torque control, stator flux estimation, stator model, voltage model, induction motor, operation points.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۹ و ۱۳۹۵/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۹

نام نویسنده مسئول: سید علیرضا داوری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - لویزان - خیابان شهید شعبانلو - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

امروزه در بسیاری از کاربردهای صنعتی موتورهای القایی، به‌منظور بهبود راندمان و ارتقا کیفیت از روش‌های محرکه سرعت متغیر (ASD)^۲ استفاده می‌شود. یکی از روش‌های متعدد ابداع‌شده برای این منظور، روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC)^۳ است، که به‌عنوان یکی از روش‌های دقیق و سریع، کاربردهای زیادی در صنایع مختلف دارد [۱]. این روش دارای ساختار ساده و منظم، سرعت عملکرد دینامیکی مناسب برای گشتاور و شار بوده و دارای مزیت عدم وابستگی به پارامترهای ماشین است. اساس این روش کنترلی بر پایه کنترل شار و گشتاور ماشین بوده، به همین سبب تخمین دقیق شار و زاویه آن از مباحث اصلی برای عملکرد دقیق و صحیح این روش به‌حساب می‌آید [۱].

برای تخمین شار استاتور چندین روش وجود دارد که به سه گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند [۲]: (۱) رؤیت‌گرهای شار بر مبنای مدل ولتاژ (استاتور). (۲) رؤیت‌گرهای شار بر مبنای مدل جریان (روتور) و (۳) رؤیت‌گرهای مرتبه کامل^۴ بر مبنای هر دو مدل ولتاژ و جریان. رؤیت‌گر حلقه باز شار استاتور بر مبنای مدل ولتاژ (مرتبه کاهش‌یافته)^۵ با استفاده از انتگرال‌گیر، ساده‌ترین روش تخمین است. علاوه بر این، مهم‌ترین مزیت این رؤیت‌گر عدم وابستگی ذاتی آن به تخمین سرعت است [۴-۲]؛ زیرا تخمین سرعت در آخرین مرحله در سیستم محرکه انجام می‌شود. از این‌رو، نویز و اغتشاشات اجتناب‌ناپذیر موجود، اثر مخرب و سوء خود را بر سرعت تخمینی گذاشته و سبب بروز خطا در آن می‌شوند [۵]. از آن‌جایی‌که این روش مستقل از سرعت تخمینی است، بنابراین خطای تخمین سرعت تأثیری بر شار حاصل از این روش ندارد. با این حال، در این نوع رؤیت‌گر مشکلاتی از قبیل حساسیت به انحراف دی‌سی موجود در سیگنال ورودی و شرایط اولیه انتگرال‌گیر خالص وجود دارد که به‌ترتیب منجر به اشباع رفتن انتگرال‌گیر و همچنین به‌وجود آمدن یک آفست دی‌سی نامطلوب در خروجی تخمین‌گر می‌گردد [۶، ۷]. یکی دیگر از دغدغه‌های اصلی این روش، شرایط کاری در سرعت‌های پایین است. استفاده از این رؤیت‌گر در سرعت‌های پایین منجر به عملکرد نادرست و ناپایداری روش DTC و در نتیجه ناپایداری کل سیستم درایو موتور القایی می‌شود. علت این است که در این شرایط ولتاژ محرکه استاتور مقادیر کمی دارد و در نتیجه افت ولتاژ در مقاومت استاتور، قابل‌قیاس با ولتاژ محرکه می‌شود و روند تخمین شار استاتور را مختل می‌نماید [۲].

رؤیت‌گرهای متعددی برای جبران کمبودهای روش حلقه باز مدل ولتاژ ارائه شده‌اند که به دو گروه رؤیت‌گرهای مرتبه کاهش‌یافته و رؤیت‌گرهای مرتبه کامل دسته‌بندی می‌شوند.

رؤیت‌گرهای بهبودیافته بر اساس مدل ولتاژ (مرتبه کاهش‌یافته) شامل رؤیت‌گرهای فیلتر پایین‌گذر (LPF)^۶ با فرکانس قطع ثابت [۳، ۸، ۹] و یا با فرکانس قطع متغیر قابل‌برنامه‌ریزی [۱۴-۱۰] و رؤیت‌گر حلقه بسته مدل ولتاژ با حلقه اصلاح [۱۵] می‌شوند. در رؤیت‌گرهای

فیلتر پایین‌گذر به‌منظور جبران و کاهش معایب استفاده از انتگرال‌گیر خالص از یک فیلتر پایین‌گذر استفاده شده است [۲]. این نوع از رؤیت‌گرها در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس قطع، عملکرد مشابه با انتگرال‌گیر خالص دارند ولی در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس قطع سبب مختل شدن عملکرد سیستم محرکه می‌شوند، زیرا در این شرایط خطای اندازه و زاویه در شار تخمینی خروجی ظاهر می‌شود [۳]. در مقابل روش حلقه باز، روش‌های حلقه بسته هستند که در آن‌ها از یک روند تصحیح خطای داخلی استفاده می‌شود؛ یعنی دارای مسیر فیدبک از خروجی رؤیت‌گر به ورودی آن هستند. این روش‌ها بیش‌تر بر مبنای استفاده از سیستم‌های تطبیقی مرجع (MRAS)^۷، رؤیت‌گرهای خطی و غیرخطی مرتبه کامل و مرتبه کاهش‌یافته شامل لیونبرگر^۸، مود لغزشی^۹، فیلتر کالمن^{۱۰}، تکنیک‌های فازی و شبکه‌های عصبی هستند [۱۶]. رؤیت‌گر ارائه‌شده در [۱۵] از نوع حلقه بسته مرتبه کاهش‌یافته است. در آن از یک جبران‌ساز PI^{۱۱} در حلقه فیدبک منفی استفاده شده است. خروجی جبران‌ساز برابر با ولتاژ آفست است که با اعمال آن به مدل ولتاژ اثر شار آفست در خروجی رؤیت‌گر حذف شده و مسیر شار استاتور اصلاح می‌گردد. اگرچه استفاده از این رؤیت‌گر در سرعت‌های پایین معایب روش اولیه تخمین شار را ندارد ولی سبب افزایش پیچیدگی سیستم درایو شده و از طرفی در شرایط سرعت‌پایین سبب بروز تأخیر فاز در خروجی می‌شود [۱۵].

گروه دیگری از رؤیت‌گرهای جایگزین، رؤیت‌گرهای مرتبه کامل هستند. مبنای آن‌ها تلفیق دو مدل ولتاژ برای سرعت‌های بالا و مدل جریان برای سرعت‌های پایین با یکدیگر است [۲] که به دو گروه رؤیت‌گرهای تطبیق سرعت [۴-۲] و رؤیت‌گرهای عدم تطبیق سرعت [۵، ۱۵، ۱۷] دسته‌بندی می‌شوند. مزیت این رؤیت‌گرها عملکرد مناسب در بازه وسیعی از سرعت است. ولی به‌دلیل استفاده از هر دو مدل ولتاژ و جریان، حجم محاسبات سنگین شده و از این‌رو سبب کندی سیستم کنترل ماشین می‌شود. همچنین مدل جریان به پارامترهای دقیق ماشین حساس و وابسته است.

سیستم‌های تطبیقی مدل مرجع، گروهی دیگر از رؤیت‌گرهای مرتبه کامل هستند که در آن‌ها، هر دو مدل استفاده‌شده به قاب مرجع ساکن انتقال داده می‌شوند [۲]. عملکرد آن‌ها بر پایه به صفر رساندن خطای حاصل از تخمین یک متغیر (جریان استاتور، جریان روتور، شار استاتور، شار روتور و ...) از دو مدل مرجع و تطبیقی است [۱۸]. اگرچه این رؤیت‌گرها نسبت به روش‌های دیگر تخمین سرعت، مزیت‌های بیش‌تری دارند ولی دارای معایب رؤیت‌گرهای مرتبه کامل که پیش‌تر ذکر شد، می‌باشند. از طرفی استفاده از انتگرال‌گیر خالص در مدل مرجع منجر به بروز آفست در سرعت‌های پایین می‌شود [۱۹].

در این مقاله یک رؤیت‌گر جدید حلقه بسته مرتبه کاهش‌یافته برای تخمین شار استاتور ارائه شده است. رؤیت‌گر پیشنهادی بر اساس مدل ولتاژ و به‌صورت حلقه بسته است که در حلقه فیدبک آن از بهره‌های استاتیکی استفاده شده است. همچنین شار مرجع استاتور

اساس کار آن، جابه‌جایی قطب‌های تابع تبدیل رؤیت‌گر به سمت چپ در مختصات قطبی است. در این حالت پایداری رؤیت‌گر و در نتیجه عملکرد سیستم محرکه بهبود می‌یابد. رؤیت‌گر پیشنهادی در این مقاله بر مبنای مدل ولتاژ و اصول جابه‌جایی قطب، همراه با تغییراتی در مقایسه با رؤیت‌گر مرتبه کامل در [۴] است.

۳-۱- رؤیت‌گر حلقه بسته مدل ولتاژ همراه با فیدبک جریان

در رؤیت‌گر ارائه شده در [۴] از فیدبک خطای جریان برای پیاده‌سازی اساس جابه‌جایی قطب‌های تابع تبدیل رؤیت‌گر استفاده شده است. در این حالت، خطای حاصل از مقایسه جریان تخمینی و جریان اندازه‌گیری شده از طریق بهره‌های استاتیکی به مدل‌های ولتاژ و جریان استفاده شده در رؤیت‌گر اعمال می‌شود تا پایداری آن افزایش یافته و شار تخمینی خروجی، اصلاح گردد. اگرچه استفاده از سیگنال خطای جریان در مسیر فیدبک برای رؤیت‌گر مرتبه کامل مناسب و کارساز است ولی در رؤیت‌گر مرتبه کاهش یافته مدل ولتاژ تأثیری بر قطب‌های سیستم ندارد. این موضوع را می‌توان اثبات نمود. به این منظور ابتدا روابط رؤیت‌گر مرتبه کامل حلقه باز در قاب مرجع ساکن بررسی می‌شوند. $\hat{i}_s$ و $\hat{i}_r$ به عنوان متغیرهای حالت در نظر گرفته شده‌اند:

$$\frac{d}{dt} \hat{i}_s = -R_s \hat{i}_s + u_s \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{i}_r = \left(-\frac{1}{T_s \sigma} - \frac{1}{T_r \sigma} + j \hat{\omega}_r \right) \hat{i}_s + \frac{1}{L_s \sigma} \left(\frac{1}{T_r} - j \hat{\omega}_r \right) \hat{i}_r + \frac{1}{L_s \sigma} u_s \quad (8)$$

که $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ و $T_r = L_r / R_r$ ، $T_s = L_s / R_s$ است.

با در نظر گرفتن صورت ماتریسی معادلات حالت، $\dot{X} = [A]X + [B]U$ ، ماتریس A رؤیت‌گر حلقه باز (۷) و (۸) به دست می‌آید.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -R_s \\ a_2 & a_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

در آن $a_2 = 1/L_s \sigma (1/T_r - j \hat{\omega}_r)$ و $a_1 = (-1/T_s \sigma - 1/T_r \sigma + j \hat{\omega}_r)$ است. قطب‌های معادلات حالت با استفاده از معادله مشخصه محاسبه می‌شوند، $|sI - A| = 0$:

$$s_{1,2} = \frac{a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2 R_s}}{2} \quad (10)$$

لذا برای مقاوم‌سازی و بهبود پایداری رؤیت‌گر به خصوص در سرعت‌های پایین، قطب‌های s_1 و s_2 با ثابت ماندن جزء موهومی، به اندازه k ($k > 0$) در صفحه مختصات قطبی جابه‌جا می‌شوند که k مقدار جابجایی قطب‌های تابع تبدیل است. با اعمال این تغییرات، معادله مشخصه جدیدی به دست می‌آید که در واقع همان معادله مشخصه مطلوب است و هدف دست یافتن به آن با اعمال فیدبک است. معادله مشخصه جدید بعد از جابه‌جایی قطب‌ها برابر است با:

به عنوان ورودی در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است. در گام نخست شار استاتور تخمین زده می‌شود و سپس در گام بعد با استفاده از روابط میان شارها و جریان‌ها، جریان استاتور به دست می‌آید. در ادامه با استفاده از مقادیر مرجع و تخمینی شار استاتور و مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی جریان استاتور، خطاهای شار و جریان استاتور حاصل می‌شوند که در نهایت از طریق بهره‌های استاتیکی به انتگرال‌گیر اعمال می‌شوند. هدف از افزودن مسیر فیدبک با بهره‌های استاتیکی، انتقال قطب‌های رؤیت‌گر شار به سمت چپ محور موهومی مختصات مختلط است. این کار به منظور افزایش پایداری رؤیت‌گر و در نتیجه عملکرد درایو موتور در سرعت‌های پایین و در نقاط کار مختلف، تحت خطای مقاومت استاتور انجام شده است. در ادامه، تعیین بهره‌ها با جزئیات بیان می‌شود.

۳-۲ مدل دینامیکی موتور القایی

با استفاده از معادلات مدل موتور القایی (۴)-(۱) در قاب دو محوری مرجع با سرعت چرخش اختیاری، رؤیت‌گرهای شار به دست می‌آیند. این معادلات عبارت‌اند از:

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d}{dt} \underline{\lambda}_s + j \omega \underline{\lambda}_s \quad (1)$$

$$0 = R_r \underline{i}_r + \frac{d}{dt} \underline{\lambda}_r + j (\omega - \omega_r) \underline{\lambda}_r \quad (2)$$

$$\underline{\lambda}_s = L_s \underline{i}_s + L_m \underline{i}_r \quad (3)$$

$$\underline{\lambda}_r = L_m \underline{i}_s + L_r \underline{i}_r \quad (4)$$

در معادلات فوق $\underline{u}_s$ ولتاژ استاتور، $\underline{i}_s$ جریان استاتور، $\underline{i}_r$ جریان روتور، $\underline{\lambda}_s$ شار استاتور، $\underline{\lambda}_r$ شار روتور، R_s مقاومت استاتور، R_r مقاومت روتور، L_s اندوکتانس استاتور، L_r اندوکتانس روتور، L_m اندوکتانس متقابل، ω سرعت چرخش قاب اختیاری و ω_r سرعت روتور است.

گشتاور الکترومغناطیسی موتور القایی نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_e = 1.5p (\underline{\lambda}_s \times \underline{i}_s) \quad (5)$$

که در آن p تعداد زوج قطب موتور است.

رؤیت‌گر حلقه باز شار استاتور بر مبنای مدل ولتاژ از رابطه (۱) در قاب مرجع ساکن $\alpha-\beta$ ($\omega = 0$) به دست می‌آید.

$$\hat{\lambda}_s = \int (u_s - R_s i_s) dt \quad (6)$$

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، این رؤیت‌گر به انتگرال‌گیر خالص با معایب ذکر شده، نیاز دارد.

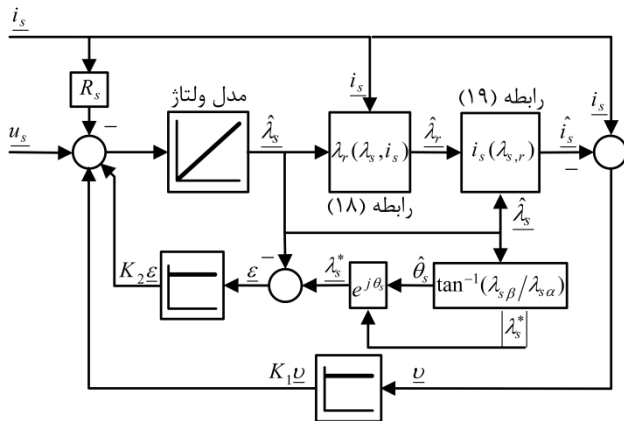
۳-۳ رؤیت‌گر بهبود یافته شار استاتور

رؤیت‌گرهای شار از تنوع گسترده‌ای برخوردار هستند. یکی از این رؤیت‌گرها که در [۴] ارائه شده، رؤیت‌گر حلقه بسته مرتبه کامل است.

$$\underline{\varepsilon} = (\hat{\lambda}_{s\alpha}^* - \hat{\lambda}_{s\alpha}) + j(\hat{\lambda}_{s\beta}^* - \hat{\lambda}_{s\beta}) \quad (20)$$

که $\hat{\lambda}_{s\alpha}^*$ و $\hat{\lambda}_{s\beta}^*$ از اندازه شار مرجع $|\hat{\lambda}_s^*|$ و زاویه شار تخمینی استاتور $\hat{\theta}_s$ محاسبه می‌شوند.

$$\hat{\theta}_s = \tan^{-1} \frac{\hat{\lambda}_{s\beta}}{\hat{\lambda}_{s\alpha}} \quad (21)$$



شکل ۱: دیاگرام بلوکی رؤیت‌گر پیشنهادی

همان‌طور که در معادلات و شکل ۱ مشخص است، رؤیت‌گر پیشنهادی بر پایه یک معادله دیفرانسیل (معادله ولتاژ) و روابط جبری است و به همین دلیل در گروه رؤیت‌گرهای مرتبه کاهش‌یافته قرار دارد.

۳-۳- تعیین ضرایب بهره‌های مسیر فیدبک

روند انتقال قطب‌های رؤیت‌گر بر عهده بهره‌های استاتیکی قرار داده‌شده در مسیرهای فیدبک است. به‌منظور بهبود پایداری و عملکرد رؤیت‌گر، این بهره‌ها باید به‌اندازه کافی بزرگ انتخاب شوند [۱۷].

بهره‌ها به‌صورت رابطه (۲۲) تعریف می‌شوند:

$$K_1 = k_{1\alpha} + jk_{1\beta} \quad \text{و} \quad K_2 = k_{2\alpha} + jk_{2\beta} \quad (22)$$

در رابطه فوق $k_{1\alpha}$ و $k_{2\alpha}$ جز حقیقی و $k_{1\beta}$ و $k_{2\beta}$ جز موهومی K_1 و K_2 هستند. این ضرایب در سرعت مرجع نقطه کار موتور محاسبه شده تا بهره‌های فیدبک متناسب با آن در رؤیت‌گر به کار گرفته شوند؛ بنابراین در نقطه کار موردنظر با استفاده از ضرایب، قطب‌های رؤیت‌گر p_o به‌اندازه k نسبت به قطب‌های موتور p_m به سمت چپ انتقال پیدا می‌کنند، $p_o = p_m - k$. با در نظر گرفتن این شرایط برای قطب‌های رؤیت‌گر، ضرایب فیدبک برابرند با:

$$k_{1\alpha} = \Re \left[\frac{k^2 + a_1 k}{a_2} \right] \quad \text{و} \quad k_{1\beta} = \Im \left[\frac{k^2 + a_1 k}{a_2} \right] \quad (23)$$

$$k_{2\alpha} = \Re [2k] \quad \text{و} \quad k_{2\beta} = \Im [2k] \quad (24)$$

با توجه به شکل ۱، اگرچه رؤیت‌گر پیشنهادی دارای روند محاسباتی بیش‌تری نسبت به رؤیت‌گر مدل ولتاژ حلقه باز است، ولی به دلیل نوع رؤیت‌گر (مرتبه کاهش‌یافته) حجم محاسباتی چشم‌گیری

$$s^2 + (2k - a_1)s + k^2 + a_2 R_s - a_1 k = 0 \quad (11)$$

اثبات رابطه فوق در پیوسته‌ها آمده است.

با در نظر گرفتن فیدبک جریان برای مدل ولتاژ (۷)، رابطه رؤیت‌گر حلقه بسته برابر خواهد بود با:

$$\frac{d}{dt} \hat{\lambda}_s = -R_s \hat{i}_s + u_s + K_1 \underline{v} \quad (12)$$

که در آن K_1 بهره مسیر فیدبک جریان و بردار اصلاح $\underline{v}$ ناشی از جریان عبارت است:

$$\underline{v} = (i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}) + j(i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta}) \quad (13)$$

معادله دیفرانسیلی دوم در عملکرد رؤیت‌گر تأثیری ندارد ولی در مدل آن حضور دارد:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \hat{i}_s = & \left(-\frac{1}{T_s \sigma} - \frac{1}{T_r \sigma} + j\hat{\omega}_r \right) \hat{i}_s + \frac{1}{L_s \sigma} \left(\frac{1}{T_r} - j\hat{\omega}_r \right) \hat{\lambda}_s \\ & + \frac{1}{L_s \sigma} u_s \end{aligned} \quad (14)$$

ماتریس A رؤیت‌گر حلقه بسته بر اساس روابط (۱۲) و (۱۴) به‌دست می‌آید:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -R_s - K_1 \\ a_2 & a_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

معادله مشخصه آن نیز برابر است با:

$$s^2 - a_1 s + a_2 (R_s + K_1) = 0 \quad (16)$$

با مقایسه معادلات مشخصه (۱۱) و (۱۶) با یکدیگر می‌توان دریافت که مقدار بهره فیدبک جریان K_1 برابر با صفر به دست می‌آید. این به این معنی است که حضور فیدبک جریان به‌تنهایی در رؤیت‌گر مدل ولتاژ قابلیت جابه‌جایی و انتقال قطب‌های آن را ندارد.

۳-۲- رؤیت‌گر حلقه بسته مدل ولتاژ پیشنهادی

به‌منظور ارتقا رؤیت‌گر مدل ولتاژ حلقه باز علاوه بر فیدبک خطای جریان، فیدبک خطای شار باهدف انتقال قطب‌ها به‌سمت چپ نیز به مدل اضافه می‌شود. شکل ۱، دیاگرام بلوکی رؤیت‌گر پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این شکل، مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ و جریان استاتور و اندازه شار مرجع استاتور به ورودی رؤیت‌گر داده می‌شوند.

معادلات رؤیت‌گر پیشنهادی بر اساس روابط (۱)، (۳) و (۴) مدل موتور القایی برابر است با:

$$\frac{d}{dt} \hat{\lambda}_s = -R_s \hat{i}_s + u_s + K_1 \underline{v} + K_2 \underline{\varepsilon} \quad (17)$$

$$\hat{\lambda}_r = \frac{L_r}{L_m} \hat{\lambda}_s - \frac{L_s L_r \sigma}{L_m} \hat{i}_s \quad (18)$$

$$\hat{i}_s = \frac{L_r \hat{\lambda}_s - L_m \hat{\lambda}_r}{L_s L_r \sigma} \quad (19)$$

که بهره استاتیکی مسیر فیدبک شار و $\underline{\varepsilon}$ بردار اصلاح ناشی از شار استاتور است.

قطب‌ها را در تمامی سرعت‌ها به اندازه k جابه‌جا می‌کند. این در حالی است مقدار جابه‌جایی قطب آهسته در سرعت‌های پایین در روش ارائه‌شده در [۴]، کاهش می‌یابد.

پایداری رؤیت‌گر پیشنهادی نیز بر طبق قضایای پایداری موجود در [۲۰] برای معادلات خطی قابل‌بیان است. در این قضایا، شرط پایداری این است که کلیه مقادیر ویژه ماتریس A قسمت‌های حقیقی غیرمثبت داشته باشند. با توجه به شکل ۲ (مکان هندسی قطب‌های رؤیت‌گر)، برقراری شرط این مشهود است.

۴-۳- تخمین سرعت

از سرعت روتور در روش DTC در حلقه کنترل سرعت برای تعیین گشتاور مرجع و برای تعیین ضرایب فیدبک‌های استاتیکی مسیره‌های فیدبک در رؤیت‌گر پیشنهادی استفاده می‌شود. لذا تخمین سرعت از مباحث موردنیاز است. سرعت روتور از سرعت شار روتور (سرعت سنکرون) $\hat{\omega}_s$ و سرعت لغزش $\hat{\omega}_{sl}$ محاسبه می‌شود:

$$\hat{\omega}_r = \hat{\omega}_s - \hat{\omega}_{sl} \quad (25)$$

سرعت سنکرون از شار روتور تخمینی $\hat{\lambda}_r$ حاصل می‌شود:

$$\hat{\omega}_s = \frac{d}{dt} \left(\tan^{-1} \left(\frac{\hat{\lambda}_{r\beta}}{\hat{\lambda}_{r\alpha}} \right) \right) \quad (26)$$

در رابطه فوق $\hat{\lambda}_{r\alpha}$ و $\hat{\lambda}_{r\beta}$ مؤلفه‌های حقیقی و موهومی شار تخمینی روتور هستند. سرعت لغزش نیز از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود:

$$\hat{\omega}_{sl} = \frac{R_r \hat{T}_e}{1.5p |\hat{\lambda}_r|^2} \quad (27)$$

که در آن $|\hat{\lambda}_r|$ اندازه شار تخمینی روتور و $\hat{T}_e(i_s, \hat{\lambda}_s)$ گشتاور تخمینی حاصل از رابطه (۵) است.

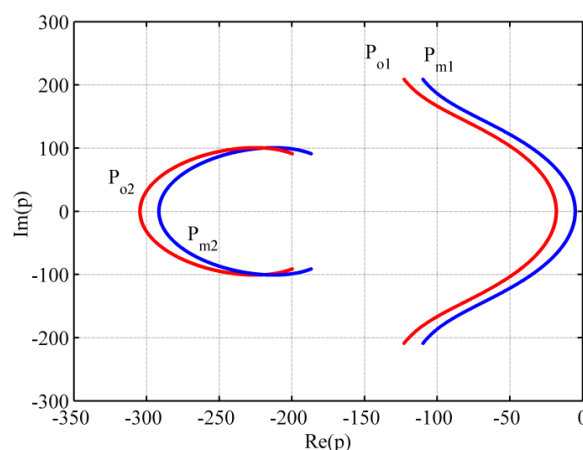
روش تخمین سرعت روتور ارائه‌شده در این مقاله از مشتق شار تخمینی روتور استفاده می‌کند. از این‌رو به نویز حساس است. در عمل برای استفاده از سرعت تخمینی روتور در سیستم درایو DTC موتور باید از یک فیلتر پایین‌گذر برای فیلتر کردن آن استفاده نمود.

شکل ۴ دیاگرام بلوکی کلی درایو موتور القایی به روش DTC را نشان می‌دهد. این دیاگرام شامل رؤیت‌گر پیشنهادی شار استاتور (۱۷) تا تخمین‌گر سرعت (۲۵) تا (۲۷)، رؤیت‌گر گشتاور (۵)، حلقه کنترل سرعت و روش DTC ارائه‌شده در [۱] است.

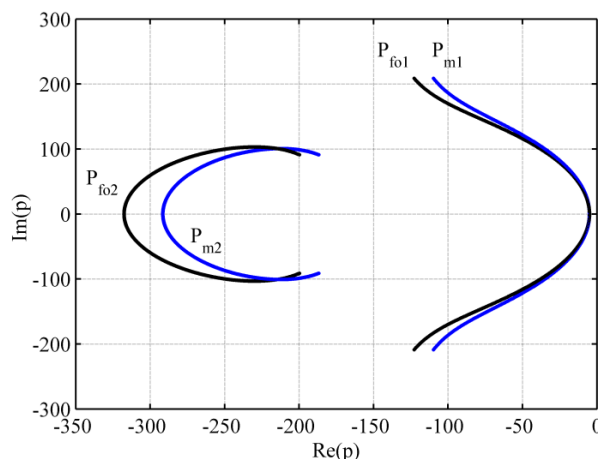
اصول روش DTC که در [۲۱] بیان شده است بر مبنای کنترل گشتاور و شار موتور القایی است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقادیر تخمینی گشتاور و شار با مقادیر مرجع مقایسه شده و میزان خطای آن‌ها تعیین می‌شوند. برای محدود کردن میزان خطا و تعیین جهت موردنیاز برای تغییرات گشتاور و شار از دو کنترل‌کننده هیستریزاس استفاده می‌شود. از خروجی این کنترل‌کننده‌ها و محل قرارگیری شار برای انتخاب بردار ولتاژ مناسب بر طبق جدول کلیدزنی

ندارد. همچنین این رؤیت‌گر در مقایسه با رؤیت‌گرهای مرتبه کامل موجود برای روش DTC که بر مبنای معادلات ولتاژ و جریان هستند، دارای ساختاری ساده‌تر و محاسباتی سبک‌تر است. شایان‌ذکر است محاسبات مربوط به جابه‌جایی قطب‌ها تنها یک‌بار و قبل از شروع روش کنترلی انجام می‌پذیرد؛ بنابراین تأثیری در حجم محاسباتی روش کنترلی ندارد.

در شکل ۲ مکان هندسی ریشه‌های موتور و رؤیت‌گر پیشنهادی، به‌صورت تابعی از سرعت برای بازه سرعت $(-300 < \omega_r < 300)$ و $k=13$ (میزان جابه‌جایی قطب‌ها) با روش ارائه‌شده برای محاسبه ضرایب فیدبک‌ها رسم شده است. همچنین مکان هندسی ریشه‌های موتور و رؤیت‌گر مرتبه کامل به روش ارائه‌شده برای تعیین ضرایب فیدبک در [۴]، در شکل ۳ با در نظر گرفتن $\omega_b = 300$ و $k=13$ نشان داده شده است.

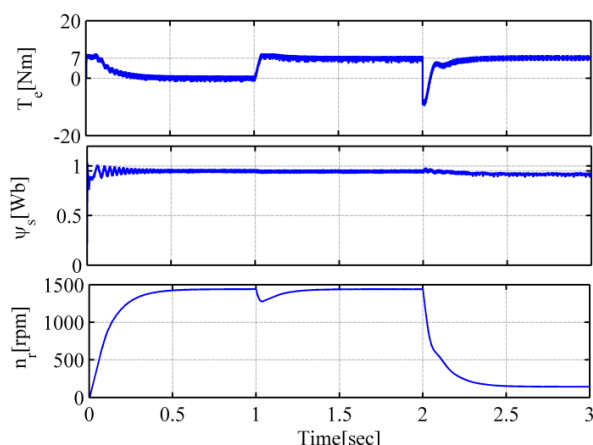


شکل ۲: مکان هندسی قطب‌های موتور القایی $(P_{m1,2})$ و قطب‌های رؤیت‌گر پیشنهادی $(P_{o1,2})$ برای $-300 < \omega_r < 300$ و $k=13$.



شکل ۳: مکان هندسی قطب‌های موتور القایی $(P_{m1,2})$ و قطب‌های رؤیت‌گر مرتبه کامل در [۴] $(P_{fo1,2})$ برای $-300 < \omega_r < 300$ و $k=13$.

می‌توان از این شکل‌ها استنباط کرد که قطب آهسته‌تر در سرعت‌های پایین به مرز پایداری (محور موهومی) نزدیک می‌شود و روش تعیین ضرایب به‌صورت برخط که در این مقاله ارائه‌شده است



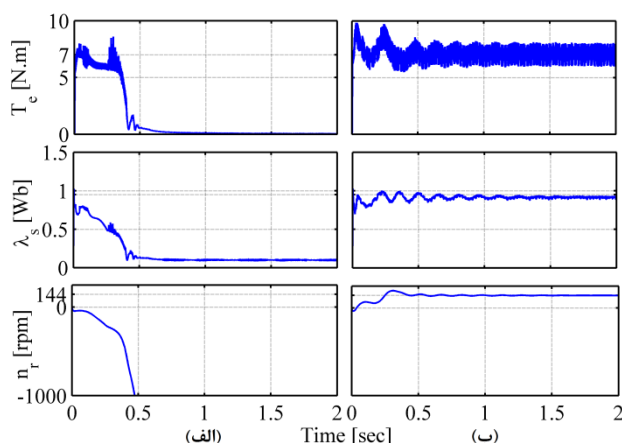
شکل ۵: منحنی گشتاور، شار و سرعت شبیه‌سازی شده

همان‌طور که مشاهده می‌گردد پاسخ دینامیکی رُویت‌گر پیشنهادی برای عملکرد روش DTC مطلوب است.

۲-۴- نتایج شبیه‌سازی در سرعت پایین

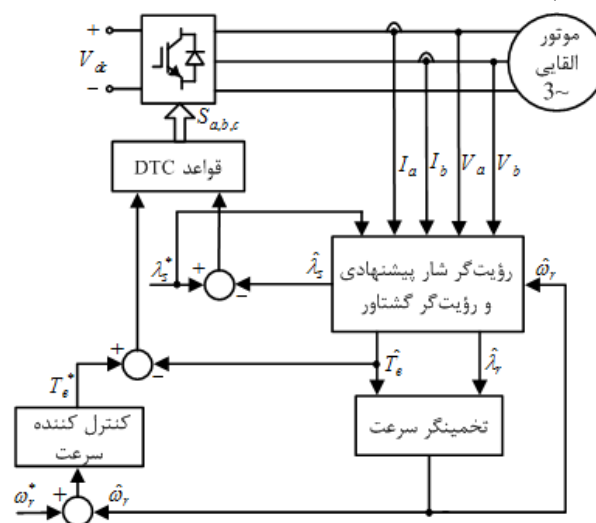
پیش‌تر ذکر شد که یکی از مسائل مهم در روش DTC، عملکرد آن در سرعت‌های پایین است. در این بخش نتایج شبیه‌سازی رُویت‌گر مدل ولتاژ حلقه باز، رُویت‌گر مرجع [۶] و رُویت‌گر پیشنهادی در سرعت پایین تحت بارهای مختلف ارائه شده است.

شکل ۶ پاسخ‌های گشتاور، شار و سرعت روتور موتور القایی حاصل از رُویت‌گرهای مدل ولتاژ حلقه باز و پیشنهادی و شکل ۷ خطای سرعت روتور ناشی از این دو رُویت‌گر را نشان می‌دهد. در شکل ۸ پاسخ‌های گشتاور، شار و سرعت روتور حاصل از رُویت‌گر فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع متغیر [۶] و رُویت‌گر پیشنهادی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۹ پاسخ‌های واقعی و تخمینی حاصل از رُویت‌گر پیشنهادی ارائه شده است. این نتایج در سرعت پایین (۱۰٪ سرعت نامی) و تحت بار نامی با ۱۰٪ خطای مقاومت استاتور به‌دست‌آمده‌اند. مقدار جابجایی قطبها k در این شرایط برابر با ۱۳ است.



شکل ۶: پاسخ گشتاور، شار و سرعت رُویت‌گرهای؛ (الف) حلقه باز و (ب) پیشنهادی در سرعت پایین و بار نامی با ۱۰٪ خطای مقاومت R_s

استفاده می‌شود. معمولاً اینورتر مورد استفاده از نوع منبع ولتاژی (VSI) است.



شکل ۴: دیاگرام بلوکی سیستم محرکه موتور القایی

۴-۱- بررسی دینامیک گشتاور، سرعت و شار

باهدف بررسی عملکرد رُویت‌گر ارائه‌شده برای شار استاتور، روش پیشنهادی در محیط نرم‌افزار سیمولینک متلب شبیه‌سازی شده است. لازم به‌ذکر است در شبیه‌سازی‌ها، بازه زمانی نمونه‌برداری $30 \mu s$ انتخاب شده است. پارامترهای موتور نیز در جدول ۱ در پیوست نشان داده شده است. ولتاژ لینک dc اینورتر دوسطحی منبع ولتاژ (VSI) $U_{dc} = 600V$ و $U_{dc} = 195V$ در نظر گرفته شده است.

به‌منظور انجام شبیه‌سازی‌ها در شرایط نزدیک به شرایط عملی، ۱۰ درصد خطا برای مقاومت استاتور R_s از لحظه راه‌اندازی موتور در نظر گرفته شده است.

همچنین در این بخش به‌منظور اعتبار سنجی پاسخ‌های رُویت‌گر پیشنهادی، رُویت‌گر مدل ولتاژ حلقه باز و روش ارائه‌شده در مرجع [۶] نیز شبیه‌سازی شده‌اند تا محاسن و معایب روش پیشنهادی مشخص گردد. روش ارائه‌شده در مرجع [۶] ازجمله دقیق‌ترین رُویت‌گرهای مرتبه کاهش یافته شار استاتور بوده که اخیراً منتشر شده است. این رُویت‌گر بر مبنای محاسبه فرکانس قطع متغیر بنا به شرایط عملکرد برای فیلتر پایین‌گذر است که در آن از سیگنال آفست دی-سی در حلقه تصحیح استفاده شده است.

۴-۱-۱- بررسی دینامیک گشتاور، سرعت و شار

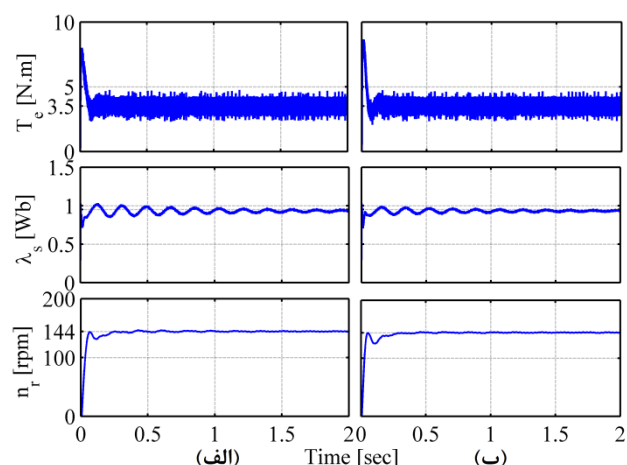
شکل ۵ نشان‌دهنده پاسخ گشتاور، سرعت و شار است. هدف از ارائه نتایج در این شکل، بررسی تأثیر روش پیشنهادی برای تخمین شار بر روی دینامیک کلی سیستم درایو موتور القایی است.

در این شبیه‌سازی از ابتدا تا ثانیه ۲، سرعت مرجع برابر با ۱۴۴۰ دور بر دقیقه و از ثانیه ۲ تا ثانیه ۳، سرعت مرجع به ۱۴۴ دور بر دقیقه کاهش پیدا می‌کند. همچنین موتور تا ثانیه ۱ در حالت بی‌باری قرار داشته و از ثانیه ۱ تا ثانیه ۳، بار نامی (۷ N.m) به آن اعمال می‌شود.

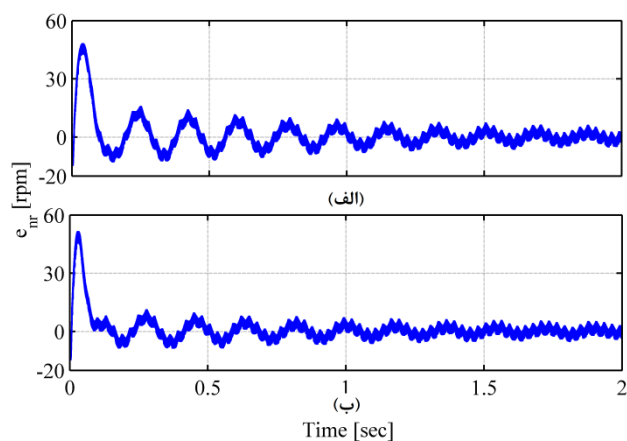
رویت‌گر پیشنهادی می‌تواند خطای موجود را جبران کرده و عملکرد DTC را پایدار سازد.

در شکل ۸ نیز مشخص است که رویت‌گر مرجع [۶] و رویت‌گر پیشنهادی قادر به حفظ پایداری در شرایط ذکر شده هستند. با این تفاوت که پاسخ سرعت و گشتاور رویت‌گر پیشنهادی بهتر و از طرفی نوسانات شار استاتور حاصل از روش مرجع [۶] کمتر از روش پیشنهادی است. همچنین شکل ۹ تخمین قابل قبولی را برای روش DTC با استفاده از روش پیشنهادی نشان می‌دهد.

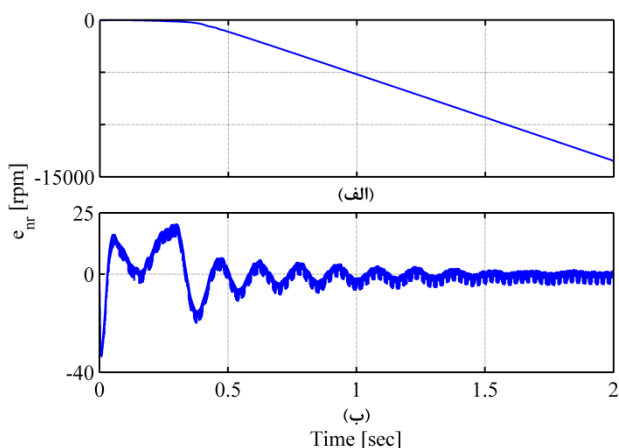
شکل ۱۰ نشان‌دهنده پاسخ‌های گشتاور، شار استاتور و سرعت روتور حاصل از عملکرد رویت‌گرهای مدل ولتاژ و مرتبه کاهش یافته پیشنهادی است و شکل ۱۱ نشان‌دهنده خطای سرعت روتور آن‌هاست. شرایط این نتایج برابر با سرعت پایین تحت ۵۰٪ بار نامی است. در شکل ۱۲ مقایسه پاسخ‌های حاصل از دو رویت‌گر فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع متغیر در [۶] و پیشنهادی در شرایط کاری یکسان آورده شده است. شکل ۱۳ نیز پاسخ‌های مقادیر واقعی و تخمینی توسط رویت‌گر پیشنهادی را نشان می‌دهد.



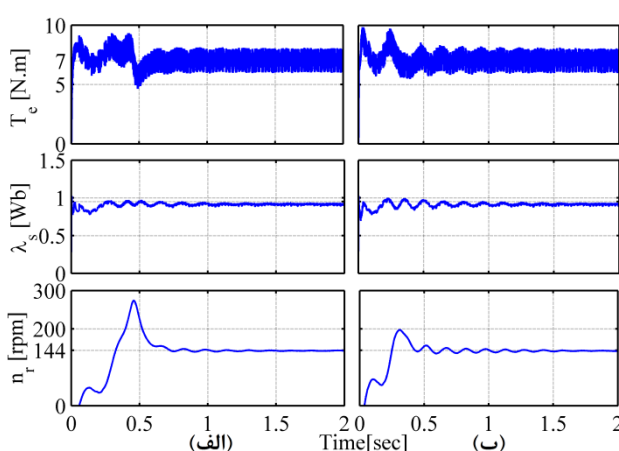
شکل ۱۰: پاسخ گشتاور، شار و سرعت رویت‌گرهای؛ (الف) حلقه باز و (ب) پیشنهادی در سرعت پایین و ۵۰٪ بار نامی با ۱۰٪ خطای R_s



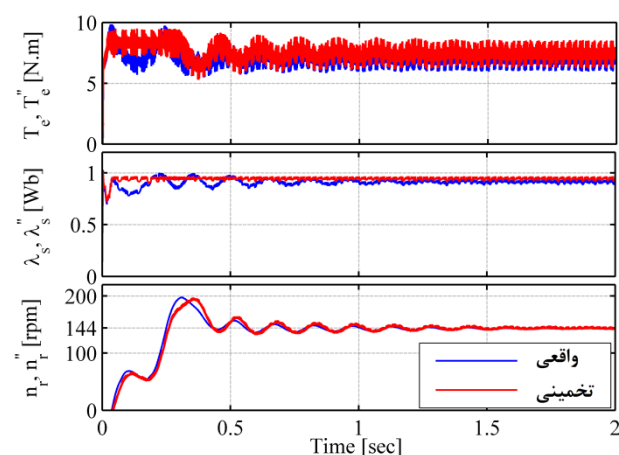
شکل ۱۱: خطای سرعت رویت‌گرهای؛ (الف) حلقه باز و (ب) پیشنهادی در سرعت پایین و ۵۰٪ بار نامی با ۱۰٪ خطای مقاومت R_s



شکل ۱۲: خطای سرعت رویت‌گرهای؛ (الف) حلقه باز و (ب) پیشنهادی در سرعت پایین و بار نامی با ۱۰٪ خطای مقاومت R_s

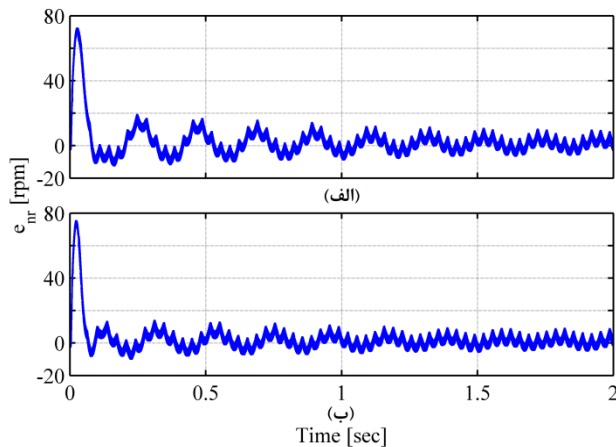


شکل ۱۳: پاسخ گشتاور، شار و سرعت رویت‌گرهای؛ (الف) مرجع [۶] و (ب) پیشنهادی در سرعت پایین و بار نامی با ۱۰٪ خطای مقاومت R_s

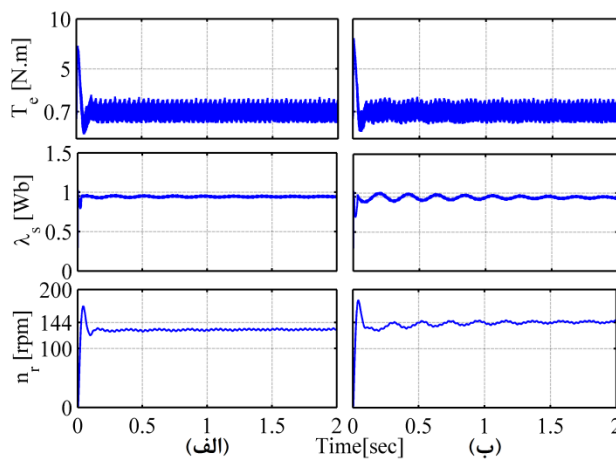


شکل ۱۴: پاسخ‌های گشتاور، شار و سرعت حاصل از عملکرد رویت‌گر پیشنهادی؛ (الف) مقادیر واقعی و (ب) مقادیر تخمینی در سرعت پایین و بار نامی با ۱۰٪ خطای مقاومت R_s

از این دو شکل ۶ و ۷ می‌توان دریافت که رویت‌گر حلقه باز از ابتدای شبیه‌سازی تحت تأثیر خطای موجود مقاومت استاتور قرار گرفته و پاسخ‌های مطلوبی برای عملکرد DTC ارائه نمی‌دهد ولی

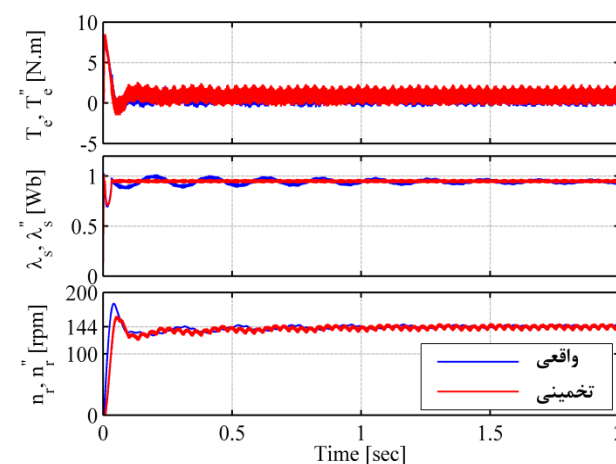


شکل ۱۵: خطای سرعت رؤیت‌گرهای: الف) حلقه باز و ب) پیشنهادی در سرعت پایین و ۱۰٪ بار نامی با ۱۰٪ خطای مقاومت R_s

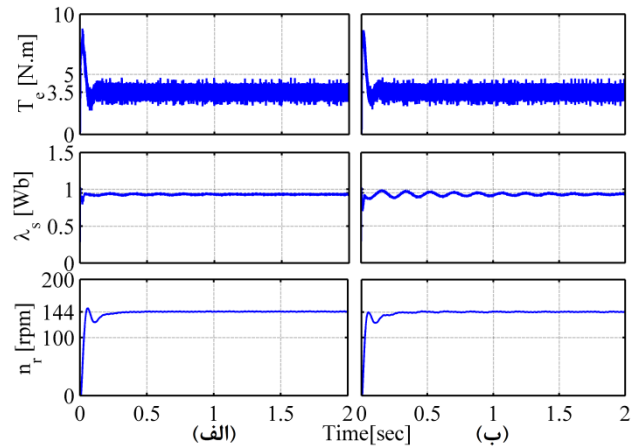


شکل ۱۶: پاسخ گشتاور، شار و سرعت رؤیت‌گرهای: الف) مرجع [۶] و ب) پیشنهادی در سرعت پایین و بار کم با ۱۰٪ خطای مقاومت R_s

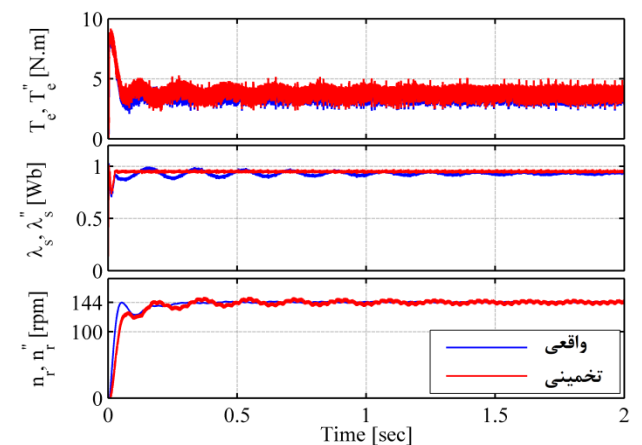
مقدار جابه‌جایی قطب‌ها (k) در رؤیت‌گر پیشنهادی در این سرعت برابر با ۱۳ است. شکل ۱۷ نیز مقادیر واقعی و تخمینی پاسخ‌های رؤیت‌گر پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷: پاسخ‌های گشتاور، شار و سرعت حاصل از عملکرد رؤیت‌گر پیشنهادی؛ الف) مقادیر واقعی و ب) مقادیر تخمینی در سرعت پایین و بار ۱۰٪ نامی با ۱۰٪ خطای مقاومت R_s

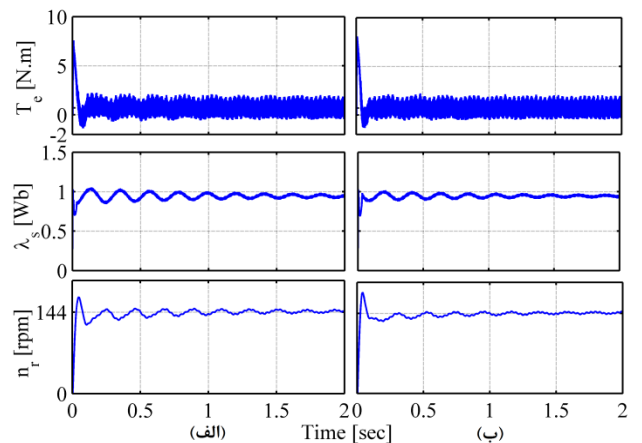


شکل ۱۸: پاسخ گشتاور، شار و سرعت رؤیت‌گرهای: الف) مرجع [۶] و ب) پیشنهادی در سرعت پایین و ۵۰٪ بار نامی با ۱۰٪ مقاومت R_s

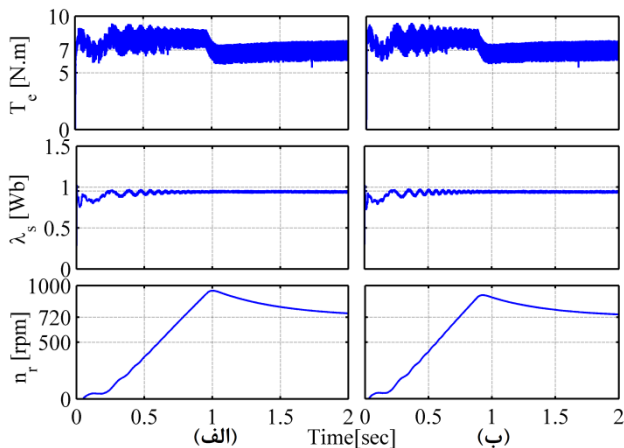


شکل ۱۹: پاسخ‌های گشتاور، شار و سرعت حاصل از عملکرد رؤیت‌گر پیشنهادی؛ الف) مقادیر واقعی و ب) مقادیر تخمینی در سرعت پایین و بار ۵۰٪ نامی با ۱۰٪ خطای مقاومت R_s

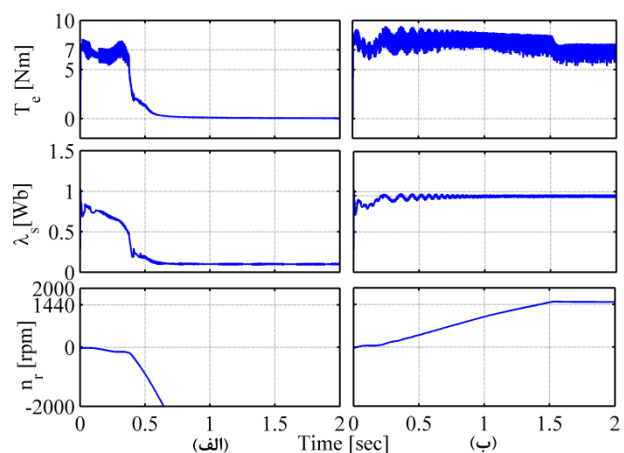
شکل ۱۴ و شکل ۱۵ پاسخ‌های منتج از شبیه‌سازی رؤیت‌گرهای حلقه باز و پیشنهادی و شکل ۱۶ پاسخ‌های حاصل از رؤیت‌گرهای مرجع [۶] و پیشنهادی را در سرعت پایین و ۱۰٪ بار نامی نشان می‌دهند.



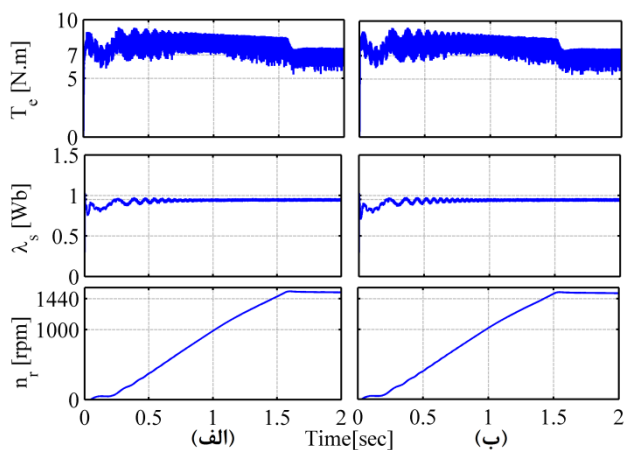
شکل ۲۰: پاسخ گشتاور، شار و سرعت رؤیت‌گرهای: الف) حلقه باز و ب) پیشنهادی در سرعت پایین و ۱۰٪ بار نامی با ۱۰٪ خطای R_s



شکل ۱۹: پاسخ گشتاور، شار و سرعت رؤیت‌گرهای؛ (الف) مرجع [۶] و (ب) پیشنهادی در سرعت میانی و بار نامی با ۱۰٪ خطای مقاومت R_s



شکل ۲۰: پاسخ گشتاور، شار و سرعت رؤیت‌گرهای؛ (الف) حلقه باز و (ب) پیشنهادی در سرعت نامی و بار نامی با ۱۰٪ خطای مقاومت R_s



شکل ۲۱: پاسخ گشتاور، شار و سرعت رؤیت‌گرهای؛ (الف) مرجع [۶] و (ب) پیشنهادی در سرعت نامی و بار نامی با ۱۰٪ خطای مقاومت R_s

از شکل‌های فوق در سرعت‌های میانی و نامی برداشت می‌شود که در حضور خطای موجود مقاومت استاتور، رؤیت‌گر پیشنهادی و رؤیت‌گر مرجع [۶] پایداری خود و روش DTC را حفظ نموده و پاسخ‌های مناسبی برای این روش ارائه می‌دهند که در نتیجه عملکرد

می‌توان استنباط کرد که رؤیت‌گر پیشنهادی در بارهای متوسط و کم می‌تواند تا حدودی نوسانات و اعوجاج‌های ناشی از خطای مقاومت را نسبت به رؤیت‌گر حلقه باز حذف کرده، سرعت همگرایی پاسخ سرعت روتور را افزایش داده و دینامیک پاسخ‌های گشتاور، شار و سرعت را بهبود بخشد.

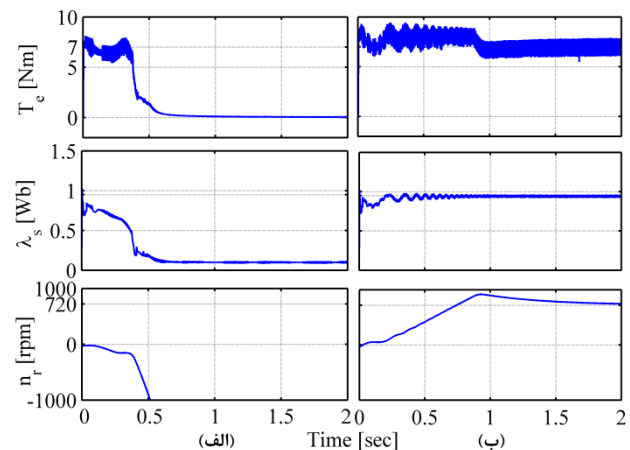
همچنین می‌توان از مقایسه روش فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع متغیر در مرجع [۶] با روش پیشنهادی برای تخمین شار استاتور، دریافت کرد که به‌طور کلی تحت بارهای معمولی (میانی و کم)، میان پاسخ‌های حاصل از این دو رؤیت‌گر تفاوت چندانی نیست جز اینکه نوسانات حالت گذرای شار حاصل از رؤیت‌گر فیلتر پایین‌گذر در مرجع [۶] کمتر است. با بررسی شکل‌های ۱۳ و ۱۷ نیز مشاهده می‌گردد که خروجی رؤیت‌گر پیشنهادی با وجود خطای مقاومت از تقریب مناسبی در بارهای مختلف برخوردار است.

۳-۴- نتایج شبیه‌سازی در سرعت‌های ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سرعت نامی و در بار نامی

رؤیت‌گرهای حلقه باز، فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع متغیر و پیشنهادی تحت بار نامی در سرعت‌های میانی و نامی شبیه‌سازی شده‌اند تا با ارزیابی روش پیشنهادی با این دو رؤیت‌گر در بازه وسیعی از سرعت تحت شرایط بار بحرانی، بتوان تأثیر روش ارائه‌شده را به‌خوبی مشاهده کرد.

پاسخ‌های گشتاور، شار استاتور و سرعت روتور رؤیت‌گرها در سرعت میانی (۷۸۰ دور بر دقیقه) تحت بار نامی (۷ N.m) به‌ترتیب در شکل ۱۸ و شکل ۱۹ نشان داده شده‌اند. شکل ۱۸ به نتایج حاصل از رؤیت‌گر حلقه باز و پیشنهادی اختصاص یافته و شکل ۱۹ نتایج رؤیت‌گر فیلتر پایین‌گذر در مرجع [۶] و پیشنهادی را در کنار هم نشان می‌دهد.

همچنین نتایج حاصل از این رؤیت‌گرها در سرعت نامی (۱۴۴۰ دور بر دقیقه) تحت بار نامی در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ آورده شده‌اند. شایان ذکر است که مقدار جابه‌جایی قطب‌ها k در سرعت میانی ۱۱/۵ و در سرعت نامی ۱۰ قرار داده شده است.



شکل ۱۸: پاسخ گشتاور، شار و سرعت رؤیت‌گرهای؛ (الف) حلقه باز و (ب) پیشنهادی در سرعت میانی (۵۰٪ نامی) و بار نامی با ۱۰٪ خطای R_s

جدول ۴: درصد خطای کنترلی رویت‌گر مدل ولتاژ حلقه باز در نقاط کار مختلف

رویت‌گر مدل ولتاژ حلقه باز			بار	سرعت
درصد خطای گشتاور	درصد خطای شار	درصد خطای سرعت		
۰٪/۵۱	۰٪/۳۷	۰٪/۳۱	۱۰٪ نامی	۱۰٪ نامی
۰٪/۱۲	۱٪/۹	۰٪/۲	۵۰٪ نامی	
۹۸٪	۸۹٪	۵۰۰٪	نامی (ناپایدار)	
۰٪/۰۰۴	۰٪/۱۴	۰٪/۲۵	۱۰٪ نامی	۵۰٪ نامی
۰٪/۲	۰٪/۴۸	۰٪/۳۴	۵۰٪ نامی	
۹۹٪	۸۹٪	۱۳۰۰٪	نامی (ناپایدار)	
۰٪/۰۸	۰٪/۰۹	۰٪/۲۶	۱۰٪ نامی	نامی
۰٪/۲۶	۰٪/۲۸	۰٪/۸	۵۰٪ نامی	
۹۹٪	۸۹٪	۹۰۰٪	نامی (ناپایدار)	

درصد خطاهای تخمینی پاسخ‌های گشتاور، شار و سرعت حاصل از این رویت‌گرها در نقاط کار مختلف در جداول ۵، ۶ و ۷ آمده است.

جدول ۵: درصد خطای تخمینی رویت‌گر پیشنهادی در نقاط کار مختلف

رویت‌گر پیشنهادی			بار	سرعت
درصد خطای گشتاور	درصد خطای شار	درصد خطای سرعت		
۲۸٪/۴	۰٪/۵	۱٪/۰۳	۱۰٪ نامی	۱۰٪ نامی
۶٪/۱۶	۱٪/۸۴	۰٪/۱	۵۰٪ نامی	
۵٪/۵۸	۳٪/۴	۰٪/۰۱	نامی	
۸٪/۸	۰٪/۱۱	۰٪/۰۴	۱۰٪ نامی	۵۰٪ نامی
۲٪/۲۹	۰٪/۴۲	۰٪/۰۲	۵۰٪ نامی	
۱٪/۸	۰٪/۷۳	۰٪/۳۴	نامی	
۹٪/۲	۰٪/۰۵	۰٪/۰۲	۱۰٪ نامی	نامی
۲٪/۱	۰٪/۲۶	۰٪/۱	۵۰٪ نامی	
۱٪/۵۳	۰٪/۰۴	۰٪/۰۲	نامی	

جدول ۶: درصد خطای تخمینی رویت‌گر ارائه شده در مرجع [۶] در نقاط کار مختلف

رویت‌گر ارائه شده در مرجع [۶]			بار	سرعت
درصد خطای گشتاور	درصد خطای شار	درصد خطای سرعت		
۲۹٪/۲۲	۰٪/۵۳	۱٪/۵	۱۰٪ نامی	۱۰٪ نامی
۶٪/۷	۱٪/۹۳	۰٪/۳۵	۵۰٪ نامی	
۵٪/۹۵	۳٪/۴۵	۰٪/۶۲	نامی	
۹٪/۱۲	۰٪/۰۹۷	۰٪/۱۱۱	۱۰٪ نامی	۵۰٪ نامی
۲٪/۳	۰٪/۴۳	۰٪/۰۲	۵۰٪ نامی	
۱٪/۸۲	۰٪/۷۵	۰٪/۳۲۳	نامی	
۹٪/۳۹	۰٪/۰۴۱	۰٪/۰۴۱	۱۰٪ نامی	نامی
۲٪/۲	۰٪/۲۲	۰٪/۰۱۶	۵۰٪ نامی	
۱٪/۵۶	۰٪/۰۴۱	۰٪/۰۲۱۶	نامی	

مطلوب موتور را در پی دارند و همچنین می‌توان مشاهده کرد که در سرعت‌های معمول و بالا تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان پاسخ‌های این دو رویت‌گر نیست. این در حالی است که رویت‌گر حلقه باز تحت بار نامی (شرایط بحرانی) ناپایدار است.

۴-۴- مقایسه سه رویت‌گر مدل ولتاژ حلقه باز، مرتبه کاهش یافته مرجع [۶] و پیشنهادی

در بخش‌های قبل نتایج شبیه‌سازی حاصل از رویت‌گرهای مدل ولتاژ حلقه باز، فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع متغیر ارائه شده در [۶] و مرتبه کاهش یافته پیشنهادی ارائه و بررسی شده‌اند. در این قسمت به منظور مقایسه سه رویت‌گر با یکدیگر از میانگین خطای کنترلی و خطای تخمینی پاسخ‌های گشتاور، شار و سرعت روتور استفاده شده است. جداول ۲ و ۳ و ۴ به ترتیب درصد خطاهای کنترلی گشتاور، شار و سرعت روتور حاصل از این رویت‌گرها در بازه وسیعی از نقاط کار (سرعت‌ها و بارهای مختلف) را نشان می‌دهند.

جدول ۲: درصد خطای کنترلی رویت‌گر پیشنهادی در نقاط کار مختلف

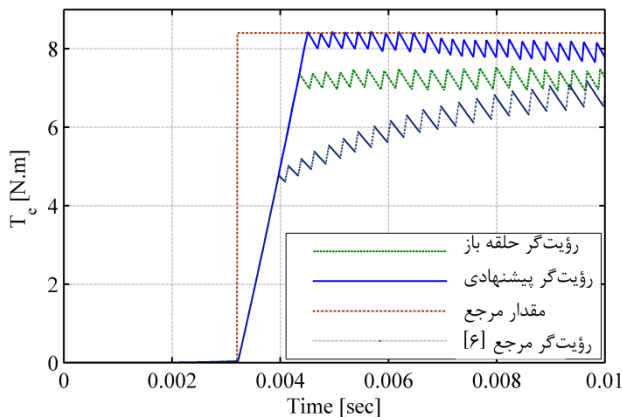
رویت‌گر پیشنهادی			بار	سرعت
درصد خطای گشتاور	درصد خطای شار	درصد خطای سرعت		
۰٪/۲۹	۰٪/۵۴	۰٪/۴۹	۱۰٪ نامی	۱۰٪ نامی
۰٪/۰۲	۱٪/۹	۰٪/۱۲	۵۰٪ نامی	
۰٪/۵۴	۳٪/۸	۰٪/۰۹	نامی	
۰٪/۰۷	۰٪/۱۶	۰٪/۰۲	۱۰٪ نامی	۵۰٪ نامی
۰٪/۰۸	۰٪/۴۸	۰٪/۱۴	۵۰٪ نامی	
۱٪/۸	۰٪/۸۴	۱۰٪/۶۲	نامی	
۰٪/۰۸	۰٪/۱۱	۰٪/۰۹	۱۰٪ نامی	نامی
۱٪/۱۱	۰٪/۳۴	۰٪/۲	۵۰٪ نامی	
۰٪/۳	۰٪/۵	۰٪/۴	نامی	

جدول ۳: درصد خطای کنترلی رویت‌گر ارائه شده در مرجع [۶] در نقاط کار مختلف

رویت‌گر ارائه شده در مرجع [۶]			بار	سرعت
درصد خطای گشتاور	درصد خطای شار	درصد خطای سرعت		
۰٪/۰۶۶	۰٪/۵۹	۸٪/۵۶	۱۰٪ نامی	۱۰٪ نامی
۰٪/۰۳۹	۱٪/۹۹	۰٪/۲۶	۵۰٪ نامی	
۰٪/۱۶	۳٪/۸۶	۰٪/۴۳	نامی	
۰٪/۲۸	۰٪/۱۴	۰٪/۳۶	۱۰٪ نامی	۵۰٪ نامی
۱۰٪/۳	۰٪/۵	۰٪/۲۲	۵۰٪ نامی	
۲٪/۳	۰٪/۸۵	۱۱٪/۲	نامی	
۰٪/۶۸	۰٪/۱۰۳	۰٪/۵۵	۱۰٪ نامی	نامی
۰٪/۱۷	۰٪/۳	۰٪/۴۸	۵۰٪ نامی	
۰٪/۳	۰٪/۵	۶٪/۵۲	نامی	

۴-۵- ارزیابی پاسخ دینامیکی گشتاور

شکل ۲۲ لحظات اولیه پاسخ گشتاور رؤیت‌گرهای پیشنهادی و مدل ولتاژ حلقه باز و مرجع [۶] که پیش‌تر در شکل‌های ۱۰ و ۱۲ نشان داده شده‌اند را ارائه می‌دهد.



شکل ۲۲: پروفایل دینامیک گشتاور حاصل از عملکرد رؤیت‌گرهای حلقه باز و پیشنهادی و مرجع [۶] در حضور ۱۰٪ خطای مقاومت R_s

با بررسی این شبیه‌سازی مشاهده می‌گردد که دینامیک پاسخ رؤیت‌گر پیشنهادی به‌طور قابل قبولی در مقایسه با دو رؤیت‌گر دیگر بهبود یافته است.

۴-۶- حساسیت به پارامترهای موتور القایی

با توجه به این‌که رؤیت‌گرهای موجود برای تخمین شار استاتور از معادلات دینامیکی موتور به‌دست می‌آیند، معادلات آن‌ها به پارامترهای موتور وابسته هستند. ساده‌ترین رؤیت‌گر موجود (مدل ولتاژ حلقه باز) به مقاومت استاتور حساس است. این نکته از نتایج شبیه‌سازی فوق نیز مشخص است و به‌علت تأثیر مقاومت بر آن، در شرایط بحرانی ناپایدار می‌شود.

رؤیت‌گر پیشنهادی شار استاتور در این مقاله از نوع مرتبه کاهش‌یافته بر مبنای مدل ولتاژ است. لذا پارامتری که رؤیت‌گر به آن حساسیت نشان می‌دهد، مقاومت استاتور است. البته باید به این نکته اشاره نمود که کل سیستم درایو مطرح‌شده در این مقاله با توجه به روش تخمین سرعت روتور به مقاومت روتور نیز وابسته است ولی رؤیت‌گر پیشنهادی به این پارامتر وابسته نیست.

میزان حساسیت روش پیشنهادی و کل سیستم درایو به پارامترهای موتور (مقاومت استاتور و مقاومت روتور) در سرعت‌های پایین و در بارهای مختلف بررسی و در جدول ۸ جمع‌بندی شده است. علت انتخاب شرایط با سرعت پایین برای سنجیدن میزان مقاومت رؤیت‌گر به این پارامترها، افت ولتاژ قابل قیاس با ولتاژ محرکه در سرعت‌های پایین است. در سرعت‌های بالاتر این افت ولتاژ با توجه به مقدار ولتاژ محرکه قابل چشم‌پوشی است.

جدول ۷: درصد خطای تخمینی رؤیت‌گر مدل ولتاژ حلقه باز در

نقاط کار مختلف

رؤیت‌گر مدل ولتاژ حلقه باز			بار	سرعت
درصد خطای گشتاور	درصد خطای شار	درصد خطای سرعت		
۲۹٪/۶	۰٪/۳۲	۰٪/۸۹	۱۰٪ نامی	۱۰٪ نامی
۶٪/۸	۱٪/۸۶	۰٪/۰۹	۵۰٪ نامی	
۷۳۴۶٪	۸۳۴٪	۹۹٪	نامی (ناپایدار)	
۹٪/۲	۰٪/۱	۰٪/۰۵	۱۰٪ نامی	۵۰٪ نامی
۲٪/۳۲	۰٪/۴۲	۰٪/۰۲	۵۰٪ نامی	
۱۳۴۲۸٪	۸۵۹٪	۹۹٪	نامی (ناپایدار)	
۹٪/۴	۰٪/۰۲	۰٪/۰۲	۱۰٪ نامی	نامی
۳٪/۱	۰٪/۲	۰٪/۰۰۶	۵۰٪ نامی	
۱۸۴۱۵٪	۸۶۱٪	۱۰۰٪	نامی (ناپایدار)	

با توجه به درصد خطاهای کنترلی و تخمینی و نتایج شبیه‌سازی حاصل از رؤیت‌گر حلقه باز، رؤیت‌گر مرجع [۶] و رؤیت‌گر پیشنهادی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر می‌توان به جمع‌بندی زیر رسید:

- رؤیت‌گر پیشنهادی و رؤیت‌گر مرجع [۶] قادر به حفظ پایداری سیستم درایو تحت بار نامی (بار بحرانی) هستند.
- در این شرایط، رؤیت‌گرهای مرجع [۶] و پیشنهادی پایدار بوده و پاسخ‌های قابل قبول با درصد خطای کم ارائه می‌دهند. این در حالی است که رؤیت‌گر حلقه باز مدل ولتاژ پاسخ‌های نامطلوبی داشته و سبب ناپایداری سیستم محرکه می‌گردد.
- عملکرد روش پیشنهادی در سرعت‌های پایین به‌خصوص تحت بارهای بحرانی مطلوب‌تر است.

- در بازه سرعت‌های متوسط تا نامی، پاسخ‌های حاصل از رؤیت‌گرهای پیشنهادی و فیلتر پایین‌گذر ارائه شده در [۶] با یکدیگر تفاوت چندانی ندارند.

همان‌طور که از نتایج شبیه‌سازی در سرعت‌های بالا در حضور خطای R_s برمی‌آید، گشتاور، سرعت روتور و شار استاتور موتور القایی در هر دو حالت استفاده از رؤیت‌گر پیشنهادی و رؤیت‌گر فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع متغیر، مشابه با یکدیگر هستند. با توجه به اینکه در روش ارائه‌شده در مرجع [۶]، فرکانس قطع فیلتر (ω_c) مضربی از سرعت سنکرون بوده ($\omega_c = K_d \omega_s$)، لذا به تخمین این سرعت وابسته است. همچنین تعیین ضریب K_d مناسب برای این روش مشکل است.

اعوجاج و نوسانات کمتری در مقایسه با رُویت‌گر مدل ولتاژ حلقه باز، در بارهای میانی و کم هستند. پس نتیجه گرفته می‌شود که عملکرد روش DTC با استفاده از این رُویت‌گر بدون نیاز به تطبیق مقاومت بهبود می‌یابد.

پیوست‌ها

جدول ۱: پارامترهای ماشین برای شبیه‌سازی

مقادیر نامی پارامترهای ماشین	
$P_n = 1/1$ (kW)	$R_s = 5/46$ (Ω)
$V_n = 380$ (V)	$R_r = 4/45$ (Ω)
$I_n = 2/77$ (A)	$L_s = 0/492$ (H)
$\omega_n = 1440$ (rpm)	$L_r = 0/492$ (H)
$f_{sn} = 50$ (Hz)	$L_m = 0/475$ (H)
$T_n = 7$ (N.m)	$p = 2$

اثبات معادله ۱۱.

$$\begin{aligned} (s - \frac{a_1}{2} - \frac{\sqrt{a_1^2 - 4a_2R_s}}{2} + k)(s - \frac{a_1}{2} + \frac{\sqrt{a_1^2 - 4a_2R_s}}{2} + k) &= 0 \Rightarrow \\ (s - \frac{a_1}{2} + k - \frac{\sqrt{a_1^2 - 4a_2R_s}}{2})(s - \frac{a_1}{2} + k + \frac{\sqrt{a_1^2 - 4a_2R_s}}{2}) &= 0 \Rightarrow \\ (s - \frac{a_1}{2} + k)^2 - \frac{a_1^2 - 4a_2R_s}{4} &= 0 \Rightarrow (s - \frac{a_1}{2} + k)^2 - \frac{a_1^2}{4} + a_2R_s = 0 \Rightarrow \\ s^2 + k^2 + \frac{a_1^2}{4} - a_1k + 2s(k - \frac{a_1}{2}) - \frac{a_1^2}{4} + a_2R_s &= 0 \Rightarrow \\ s^2 + (2k - a_1)s + k^2 + a_2R_s - a_1k &= 0 \end{aligned}$$

مراجع

- [1] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 1A-22, pp. 820-827, Sept./Oct. 1986.
- [2] J. Holtz, "Sensorless Control of Induction Machines-Without Signal Injection?", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 1, pp. 7-30, Feb. 2006.
- [3] N. R. N. Idris and A. H. M. Yatim, "An Improved Stator Flux Estimation in Steady-State Operation for Direct Torque Control of Induction Machines", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 38, no. 1, pp. 110-116, Jan./Feb. 2002.
- [4] C. Lascu, I. Boldea and F. Blaabjerg, "Comparative Study of Adaptive and Inherently Sensorless Observers for Variable-Speed Induction-Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 1, pp. 57-65, Feb. 2006.
- [5] C. Lascu, I. Boldea and F. Blaabjerg, "A class of speed-sensorless sliding-mode observers for high-performance induction motor drives", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 9, pp. 3394-3403, Sep. 2009.
- [6] D. Stojic, M. Milinkovic, S. Veinovic and I. Klasnic, "Improved Stator Flux Estimator for Speed Sensorless Induction Motor Drives", IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 4, pp. 2363-2371, Apr. 2015.
- [7] J. Hu, B. Wu, "New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range.", IEEE Trans. Power Electron., vol. 13, no. 5, pp. 969-977, Sep. 1998.

جدول ۸: میزان حساسیت رُویت‌گر پیشنهادی به پارامترهای

ماشین		
رُویت‌گر پیشنهادی		
تغییر R_r	تغییر R_s	
۴۰۰٪	۴۴۰٪	۱۰٪ بار نامی
۳۰۰٪	۱۴۰٪	۵۰٪ بار نامی
۱۵۰٪	۴۱٪	بار نامی

با توجه به نوع رُویت‌گر (مرتبه کاهش یافته)، به مقاومت استاتور وابسته بوده و عملکرد سیستم درایو نسبت به تغییرات آن حساس‌تر است. رُویت‌گر ارائه شده در مرجع [۶] تحت شرایط یکسان باهدف مقایسه بین دو رُویت‌گر، شبیه‌سازی شده و مشاهده شد که حد مقام بودن رُویت‌گر به تغییرات مقاومت استاتور و روتور برابر با نتایج به‌دست‌آمده برای رُویت‌گر پیشنهادی است. هر دو روش به مقاومت استاتور وابسته بوده و مستقل از مقاومت روتور هستند زیرا بر اساس معادله ولتاژ به‌دست‌آمده‌اند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک رُویت‌گر حلقه بسته جدید شار استاتور بر مبنای مدل ولتاژ (مرتبه کاهش یافته) برای کاربرد در روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC) موتورهای القایی پیشنهاد گردید. در این رُویت‌گر از روش جابه‌جایی قطب‌های تابع تبدیل با استفاده از سیگنال‌های فیدبک خطای جریان و خطای شار استاتور، به‌منظور افزایش پایداری آن و بهبود عملکرد روش DTC استفاده شده است.

صحت و درستی عملکرد این رُویت‌گر با استفاده از شبیه‌سازی در نقاط کار مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین به‌منظور بررسی محاسن و معایب رُویت‌گر پیشنهادی، عملکرد آن با دو رُویت‌گر مدل ولتاژ حلقه باز و رُویت‌گر فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع متغیر با حلقه تصحیح آفست مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده بیان‌گر این نکته هستند که تحت بارهای بحرانی (تحت بارهای زیاد تا مقدار نامی) رُویت‌گر حلقه باز مدل ولتاژ ناپایدار شده و عملکرد سیستم کنترلی ماشین مطلوب نخواهد بود. این در حالی است که رُویت‌گرهای مرتبه کاهش یافته پیشنهادی و مرجع [۶] قادر هستند تحت این شرایط پایداری خود و همچنین سیستم را بدون نیاز به تخمین و تطبیق مقاومت حفظ نمایند. نتایج شبیه‌سازی بیان می‌کنند که رُویت‌گر پیشنهادی در سرعت‌های پایین به‌خصوص تحت بار نامی پاسخ گشتاور مطلوب‌تری دارد و دینامیک پاسخ حاصل از این رُویت‌گر بهبود یافته است.

با توجه به این که فرکانس قطع رُویت‌گر فیلتر پایین‌گذر مذکور مضری از فرکانس سنکرون است، رُویت‌گر به‌صورت مستقیم به تخمین سرعت سنکرون که در گام آخر در سیستم محرکه انجام می‌شود، وابسته خواهد بود. لذا رُویت‌گر پیشنهادی از این نظر برتری دارد زیرا تخمین سرعت در گام آخر سبب بروز خطای انباشته می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که پاسخ‌های حاصل از رُویت‌گر ارائه شده، دارای

- Motors", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 3, pp. 785–794, Jun. 2006.
- [16] ابوالفضل حلویی نیاسر، علیرضا فرجی، « کنترل بدون حسگر موتور بدون جاروبک آهنربای دائم غیر سینوسی بر مبنای روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی و با استفاده از رؤیت‌گر مود لغزشی مرتبه کامل»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۱، صفحه ۵۵–۶۸، بهار ۱۳۹۶.
- [17] C. Lascu, I. Boldea and F. Blaabjerg, "Direct torque control of sensorless induction motor drives: A sliding-mode approach", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 2, pp. 582–590, Mar./Apr. 2004.
- [18] C. Lascu, I. Boldea, F. Blaabjerg, "A class of speed-sensorless sliding-mode observers for high-performance induction motor drives", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 9, pp. 3394–3403, Sep. 2009.
- [19] R. Cárdenas, R. Pena, J. Clare, G. Asher and J. Proboste, "MRAS observers for sensorless control of doubly-fed induction generators", IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 3, pp. 1075–1084, May 2008.
- [20] علی خاکی صدیق، اصول کنترل مدرن، تهران، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۲.
- [21] مجید ولی زاده، محمدرضا فیضی، ابراهیم بابایی، مهران صباحی، « اینورتر امیدانسی دو خروجی برای درایو دو موتور القایی کنترل‌شده به روش DTC در خودرو هیبرید پیل سوختی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۴، شماره ۳، صفحه ۶۹–۵۳، پاییز ۱۳۹۳.
- [8] M. Hinkkanen and J. Luomi, "Modified integrator for voltage model flux estimation of induction motors", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 50, pp. 818–820, 2003.
- [9] A. Choudhury, P. Pillay and S. S. Williamson, "Modified stator flux estimation based direct torque controlled PMSM drive for hybrid electric vehicle," in IECON 2012—38th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2012, pp. 2965–2970.
- [10] M. H. Shin, D. S. Hyun, S. B. Cho and S. Y. Choe, "An improved stator flux estimation for speed sensorless stator flux orientation control of induction motors", IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, no. 2, pp. 312–318, Mar. 2000.
- [11] M. Comanescu and L. Xu, "An improved flux observer based on PLL frequency estimator for sensorless vector control of induction motors," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, pp. 50–56, 2006.
- [12] G. Tan, X. Wu, Z. Ye, Y. Han and P. Guo, "Dual three-level double fed induction motor control based on novel stator flux observer," in Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on, 2010, pp. 3668–3671.
- [13] Y. Wang and Z. Deng, "An integration algorithm for stator flux estimation of a direct-torque-controlled electrical excitation flux-switching generator", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 27, no. 2, pp. 411–420, Jun. 2012.
- [14] Y. Wang and Z. Deng, "Improved Stator Flux Estimation Method for Direct Torque Linear Control of Parallel Hybrid Excitation Switched-Flux Generator", IEEE Trans. Energy Convers, vol. 27, no. 3, pp. 747–756, Sep. 2012.
- [15] C. Lascu and G. D. Andreescu, "Sliding-Mode Observer and Improved Integrator With DC-Offset Compensation for Flux Estimation in Sensorless-Controlled Induction

زیر نویس‌ها

- ¹ Off-set
- ² Adjustable speed drive
- ³ Direct torque control
- ⁴ Full-order
- ⁵ Reduced-order
- ⁶ Low pass filter
- ⁷ Model reference adaptive system
- ⁸ Luenberger
- ⁹ Sliding mode
- ¹⁰ Kalman filter
- ¹¹ proportional integral
- ¹² Voltage source inverter