

تخمین مقاومت استاتور در کنترل برداری مستقیم به منظور کنترل دقیق گشتاور موتور القایی در شرایط مختلف

محمد ابراهیمی^{۱*}، اسماعیل رضایی^۲

۱- استادیار مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشجوی دکترای مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

*اصفهان، صندوق پستی ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱

mebrahim@cc.iut.ac.ir

(دریافت مقاله: مرداد ۱۳۸۴، پذیرش مقاله: بهمن ۱۳۸۵)

چکیده - در بسیاری از سیستمهای صنعتی، کنترل گشتاور در محدوده وسیع سرعت ضروری است. با استفاده از روشهای پیشرفته کنترل مانند کنترل برداری، موتورهای القایی به طور گسترده‌ای در این کاربردها استفاده می‌شوند. کنترل برداری مستقیم بر روی مختصات شار استاتور، یکی از روشهای ساده‌ای است که می‌توان برای کنترل گشتاور موتور القایی به کار برد. در این روش برای حذف سنسور سرعت، شار استاتور با انتگرالگیری از ولتاژ و جریان استاتور تخمین زده می‌شود. این روش، به تغییر مقاومت استاتور بسیار حساس است و به دلیل استفاده از انتگرالگیر خالص، مشکل آفست dc دارد. سیستم کنترل برداری ارائه شده در این مقاله فاقد فیدبک شار و گشتاور بوده و برای حل مشکل آفست dc از روش انتگرالگیری اصلاح شده استفاده می‌کند. همچنین برای تخمین مقاومت استاتور، روشی پیشنهاد شده است که براساس خطای شار تخمینی نسبت به شار مرجع عمل می‌کند. این روش در تمامی سرعتها و در شرایط مختلف موتوری و ژنراتوری، توانایی تخمین مقاومت را دارد. همچنین در گشتاورهای بار مختلف و از جمله گشتاور بار صفر دارای عملکرد مطلوبی می‌باشد.

کلید واژگان: موتور القایی، کنترل برداری مستقیم، تخمین مقاومت استاتور، انتگرالگیر اصلاح شده.

۱- مقدمه

در کاربردهایی نظیر سیستمهای حمل و نقل الکتریکی، کنترل گشتاور در محدوده وسیع سرعت مورد نیاز است. بدین منظور در روشهای کلاسیک معمولاً از درایوهای dc به دلیل سادگی سیستم کنترل استفاده می‌شود اما به دلیل پیشرفت در ساخت پردازشگرهای دیجیتال و همچنین بهبود عملکرد کلیدهای نیمه‌هادی پر قدرت، امکان پیاده‌سازی روشهای کنترل پیشرفته موتورهای القایی

فراهم شده و به همین دلیل درایوهای موتور القایی به طور گسترده‌ای جایگزین درایوهای dc شده‌اند. کنترل برداری یکی از روشهایی است که در درایوهای موتور القایی کاربرد زیادی پیدا کرده است [۱]. کنترل برداری به روشهای مختلفی قابل انجام است، که با توجه به نوع امتدادیابی بردار شار، این روشها به دو دسته کنترل برداری مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. در روش مستقیم، بردار شار مغناطیسی به طور مستقیم

اندازه‌گیری یا با استفاده از کمیتهای موتور تخمین زده می‌شود در حالی‌که در روش غیرمستقیم با محاسبه فرکانس لغزش، شار امتدادیابی می‌شود [۲].

در صورتی‌که از روش کنترل برداری غیرمستقیم برای کنترل گشتاور موتور القایی استفاده شود، سیستم کنترل به سرعت موتور نیاز دارد. در صورت استفاده از سنسور سرعت، قیمت و اندازه درایو افزایش می‌یابد، همچنین در بعضی کاربردها نصب سنسور سرعت مشکل است. بنابراین در سالهای اخیر درایوهای بدون سنسور سرعت مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای حذف سنسور، سرعت باید با استفاده از معادلات موتور و از روی ولتاژ و جریان استاتور تخمین زده شود که کار مشکلی است و باعث پیچیدگی درایو شده و همچنین حساسیت آن به تغییر پارامترهای موتور افزایش می‌یابد [۱].

در روش کنترل برداری مستقیم، معمولاً شار با استفاده از معادلات موتور تخمین زده می‌شود. روشهای مختلفی برای تخمین شار وجود دارد که بیشتر آنها به اطلاع از سرعت نیاز داشته و مشکلاتی شبیه به کنترل برداری غیرمستقیم دارند. ساده‌ترین روش تخمین شار، استفاده از معادلات ولتاژ استاتور است که در آن شار استاتور با انتگرالگیری از مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ و جریان استاتور تخمین زده می‌شود. این روش نیازی به سرعت ندارد و فقط به اندازه مقاومت استاتور نیاز دارد. البته وجود انتگرالگیر خالص در این روش مشکل‌ساز است. برای مثال اگر اندکی آفست dc در ورودی انتگرالگیر وجود داشته باشد، به دلیل نداشتن فیدبک، انتگرالگیر شارژ شده و سیستم را دچار مشکل می‌سازد [۳]. برای حل مشکل انتگرالگیر خالص در تخمین شار، راه‌حلهای مختلفی پیشنهاد شده است [۳، ۵]. در این مقاله به منظور تخمین شار از روش انتگرالگیر اصلاح شده که در [۳] پیشنهاد شده، استفاده می‌شود. مسأله مهم دیگر در مورد تخمین شار، حساسیت به تغییر مقاومت استاتور، به خصوص در سرعتهای کم است. با توجه به اینکه اندازه مقاومت استاتور وابسته به

دمای موتور است و در حین کار موتور تغییر می‌کند، بنابراین برای تخمین دقیق شار لازم است مقاومت استاتور به‌طور دائمی اندازه‌گیری یا تخمین زده شود [۵]. در صورت استفاده از انتگرالگیر خالص، تخمین مقاومت استاتور در فرکانسهای کم به راحتی امکانپذیر نیست اما با استفاده از انتگرالگیر اصلاح شده، حساسیت به تغییر مقاومت استاتور کمتر شده و کار سیستم در شرایط تخمین مقاومت استاتور بهبود خواهد یافت. در این مقاله روشی برای تخمین مقاومت استاتور پیشنهاد می‌شود که براساس خطای بین شار تخمینی و شار مرجع عمل می‌کند. این روش در شرایط مختلف موتوری و ژنراتوری و در محدوده وسیعی از سرعتها، حتی در سرعت صفر قابل استفاده است. از دیگر مزایای مهم این روش، قابلیت تخمین در گشتاورهای بار متفاوت از جمله گشتاور بار صفر است.

در ادامه مقاله، پس از مرور روشهای مختلف تخمین مقاومت استاتور، کنترل برداری مستقیم با امتدادیابی شار استاتور و تخمینگر شار استاتور همراه با انتگرالگیر اصلاح شده بررسی خواهد شد. سپس روش پیشنهادی برای تخمین مقاومت استاتور ارائه و عملکرد سیستم با استفاده از نتایج شبیه‌سازی بررسی می‌شود.

۲- روشهای تخمین مقاومت استاتور

مسأله تخمین مقاومت استاتور نه تنها در کنترل برداری مستقیم بلکه در بسیاری از درایوهای بدون سنسور سرعت و همچنین در روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC) از اهمیت زیادی برخوردار است، بنابراین در سالهای اخیر در این زمینه تحقیقات زیادی انجام شده است. به‌طور کلی روشهای مختلف را در چهار دسته می‌توان قرار داد.

دسته اول روشهایی است که در آنها از روتگرها برای تخمین شار استفاده شده که در بیشتر این روشها، سرعت نیز تخمین زده می‌شود. این روشها به محاسبات زیادی نیاز دارند

و به پارامترهای موتور به‌ویژه مقاومت استاتور حساسند. بنابراین در این روشها سعی می‌شود با استفاده از خطای جریان تخمینی، مقاومت استاتور نیز تخمین زده شود. در [۶]، روش ساده‌ای برای تخمین مقاومت استاتور ارائه شده که فقط در ناحیه موتوری کاربرد دارد. در [۷] روش قبلی اصلاح شده و با تنظیم بهره تخمینگر، امکان تخمین مقاومت در ناحیه ژنراتوری نیز فراهم شده است؛ اما این روش محاسبات زیادی دارد و در گشتاور صفر توانایی تخمین مقاومت استاتور را ندارد. روش two-time-scale برای تخمین همزمان سرعت و مقاومت استاتور در [۸] ارائه شده است. در شرایط به‌کارگیری سنسور سرعت، مقاومت استاتور در این روش به‌خوبی تخمین زده می‌شود اما در حالت تخمین همزمان سرعت و مقاومت استاتور، در بارهای سبک دچار مشکل می‌شود [۹]. در [۹] روش فوق برای بارهای سبک اصلاح شده اما این روش نیز در گشتاور صفر مشکل دارد.

دسته دوم روشهایی است که در کنترل برداری غیرمستقیم استفاده شده و در آنها برای تخمین سرعت، اطلاع از مقاومت استاتور ضروری است. در بیشتر این روشها با استفاده از ترکیب مدل ولتاژ و مدل جریان، مقاومت استاتور تخمین زده می‌شود، بنابراین مشکلات مربوط به انتگرالگیر خالص نیز باید در نظر گرفته شود [۱۰، ۱۱].

دسته سوم روشهایی است که برای درایوهای کنترل مستقیم گشتاور (DTC) ارائه شده‌اند. در [۱۲، ۱۳]، از خطای جریان استاتور برای تخمین مقاومت استفاده شده، اما از آنجاکه در روش کنترل مستقیم گشتاور، جریان مرجع تولید نمی‌شود، ابتدا جریان مرجع محاسبه شده و سپس با استفاده از خطای جریان واقعی نسبت به جریان مرجع، مقاومت استاتور تخمین زده می‌شود. در [۱۴] روش ساده‌ای ارائه شده که در آن فقط از خطای شار تخمینی نسبت به شار مرجع برای تخمین مقاومت استاتور استفاده می‌شود.

در دسته چهارم روشهایی قرار می‌گیرند که برای تخمین مقاومت استاتور در کنترل برداری مستقیم ارائه

شده‌اند و همچنین روشهایی که در حالت کلی معتبر بوده و به سیستم کنترل وابسته نیستند. در این دسته، روشهای مختلفی ارائه شده است. در [۱۵] دمای سیم‌پیچ استاتور اندازه‌گیری و سپس مقاومت استاتور در دمای اندازه‌گیری شده تخمین زده می‌شود؛ لذا این روش به سنسورهای دما احتیاج دارد. در [۱۶]، ابتدا دما از روی فرکانس و جریان استاتور با استفاده از کنترل فازی تخمین زده و سپس مقاومت استاتور در دمای تخمینی محاسبه می‌شود.

تخمین مقاومت استاتور با اعمال سیگنال dc به استاتور موتور، روش دیگری است که در [۱۷] پیشنهاد شده است. البته این سیگنال dc بر عملکرد موتور تأثیر گذاشته و باعث نوسان گشتاور می‌شود. در [۱۸] به‌جای سیگنال dc، یک مؤلفه صفر به ولتاژ موتور اعمال شده و از روی مدار معادل مؤلفه صفر موتور، مقاومت استاتور تخمین زده می‌شود. در این حالت از آنجاکه مؤلفه صفر، گشتاور تولید نمی‌کند، لذا گشتاور موتور دچار اختلال نمی‌شود اما جاری شدن جریان مؤلفه صفر، به سیم نول نیاز دارد.

در [۱۹] مقاومت استاتور از اختلاف بین توان حقیقی ورودی سیم‌پیچ استاتور و توان فاصله هوایی تخمین زده می‌شود. در این روش به‌دلیل اینکه مقاومت از روی اختلاف کوچک بین دو کمیت بزرگ تخمین زده می‌شود، تخمین دقت مناسبی ندارد [۲۰].

در [۲۱] از مدل شار ترکیبی استفاده شده، یعنی در سرعتهای کم، شار از روی مدل جریان - که وابسته به سرعت و مقاومت رتور است - محاسبه شده و از روی آن مقاومت استاتور تخمین زده می‌شود. در سرعتهای زیاد، مقاومت استاتور تخمین زده شده در سرعتهای کم، ثابت در نظر گرفته می‌شود و شار با استفاده از مدل ولتاژ محاسبه شده و مقاومت رتور نیز تخمین زده می‌شود. بنابراین در این روش سرعت باید اندازه‌گیری شود، همچنین ممکن است این روش از نظر همگرایی دچار مشکل شود [۱۲].

با استفاده از معادلات ولتاژ استاتور در مختصات

رابطه (۵) گشتاور الکتریکی موتور القایی را در مختصات شار استاتور نشان می‌دهد. این رابطه مشابه گشتاور الکتریکی موتور dc است و اگر بتوان اندازه شار استاتور را - مستقل از گشتاور - توسط جریان i_{sx} کنترل کرد، کنترل برداری محقق می‌شود. اما با دقت در رابطه (۳) مشخص می‌شود که شار استاتور توسط جریان i_{sx} - به صورت مستقل از i_{sy} - قابل کنترل نیست و هر گونه تغییر گشتاور - اگر با i_{sx} جبران نشود - موجب تغییر شار استاتور می‌شود. برای حل این مشکل، جریان i_{sx} به صورت حاصل جمع دو جریان $\hat{i}_{sx}$ و i_{dx} در نظر گرفته می‌شود که $\hat{i}_{sx}$ جریان مرجعی است که با توجه به شار مرجع و مستقل از i_{sy} تعیین می‌شود و i_{dx} جریان دکوپله‌ساز است که از رابطه (۶) محاسبه می‌شود و اثر i_{sy} را جبران می‌کند [۱].

$$i_{dx} = \frac{L'_s i_{sy}}{(|\psi_s| - L'_s i_{sx})} \quad (6)$$

با توجه به مطالب فوق، نمودار جعبه‌ای سیستم کنترل برداری مستقیم استفاده شده در این مقاله مطابق شکل ۱ است. در این سیستم مقادیر جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده استاتور به تخمین‌گر شار ارسال می‌شوند. در تخمین‌گر، دامنه و زاویه شار استاتور و مؤلفه‌های جریان استاتور در مختصات شار استاتور محاسبه شده و به سیستم کنترل‌کننده اعمال می‌شوند. $\hat{i}_{sx}$ بر حسب شار مرجع محاسبه شده و با اضافه شدن به جریان دکوپله‌ساز، مقدار مرجع جریان مؤلفه محور x محاسبه می‌شود. مقدار مرجع جریان مؤلفه محور y نیز با استفاده از گشتاور و شار مرجع محاسبه می‌شود. در ادامه، ولتاژهای مرجع در مختصات شار استاتور از عبور خطای جریانهای مرجع و واقعی از کنترل‌کننده‌های PI به دست آمده و سپس با استفاده از زاویه شار استاتور تخمینی، به مختصات ساکن منتقل می‌شوند.

سنکرون جریان استاتور، روش ساده‌ای برای تخمین مقاومت استاتور در [۲۰، ۲۲] ارائه شده است. در این روش به اطلاع از اندازه شار استاتور نیاز است در [۲۰] از معادلات ولتاژ رتور برای محاسبه شار استاتور استفاده شده است، لذا این روش، به سرعت و پارامترهای رتور وابسته است. در [۲۲] شار مرجع به کار رفته و در نتیجه سیستم بسیار ساده‌تر شده است.

اگر سیستم فاقد کنترل‌کننده جریان باشد، به بیان دیگر اگر در سیستم کنترل‌کننده، جریانهای واقعی با مقادیر مرجع مقایسه نشوند، می‌توان از اختلاف بین مقادیر مرجع (که به مقاومت استاتور وابسته است) و مقادیر واقعی جریان، مقاومت استاتور را تخمین زد. در [۵] و [۲۳] از مورد فوق استفاده شده و از روی خطای بین مقادیر مرجع و واقعی جریان تولید کننده شار، مقاومت استاتور تخمین زده می‌شود.

۳- سیستم پیشنهادی برای کنترل برداری مستقیم با امتدادیابی شار استاتور

هدف از کنترل برداری موتور القایی، کنترل مستقل شار و گشتاور - مشابه موتور dc تحریک مستقل - است. در کنترل برداری با امتدادیابی شار استاتور، معادلات ولتاژ استاتور و رتور موتور القایی در مختصات مرجع منطبق بر فازور فضایی شار استاتور در نظر گرفته می‌شود [۱]:

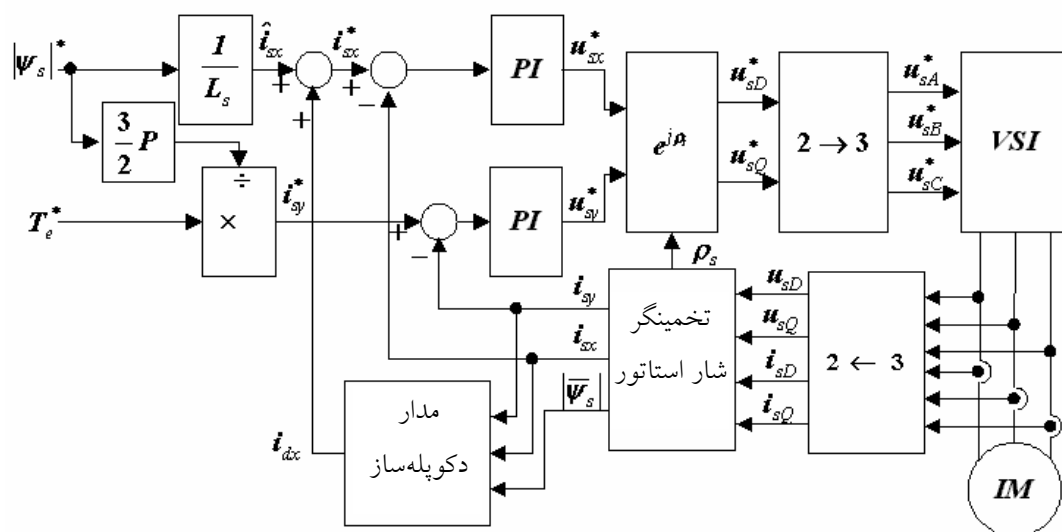
$$u_{sx} = R_s i_{sx} + \frac{d|\psi_s|}{dt} \quad (1)$$

$$u_{sy} = R_s i_{sy} + \omega_{ms} |\psi_s| \quad (2)$$

$$\frac{1}{L'_s} \frac{d|\psi_s|}{dt} + \frac{|\psi_s|}{L_s T_r} = \frac{di_{sx}}{dt} + \frac{i_{sx}}{T_r} - \omega_{sl} i_{sy} \quad (3)$$

$$\omega_{sl} \left(\frac{|\psi_s|}{L'_s} - i_{sx} \right) = \frac{di_{sy}}{dt} + \frac{i_{sy}}{T_r} \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P |\psi_s| i_{sy} \quad (5)$$



سیگنال شار اندازه‌گیری شده، به علت وجود هارمونیکهای شار، دچار اعوجاج می‌شود و به دلیل اینکه فرکانس این هارمونیکها متناسب با سرعت تغییر می‌کند، این اعوجاج قابل فیلتر کردن نیست.

به جای اندازه گیری مستقیم شار، مقدار آن را با استفاده از مدل موتور می توان تخمین زد، در این صورت تخمین به پارامترهای موتور حساس می شود اما دیگر نیازی به موتور خاص نیست و برای تمامی سیستمها قابل اجرا است.

در روشهای معمول کنترل برداری مستقیم، از اندازه شار تخمینی نیز فیدبک گرفته شده و با عبور خطای شار تخمینی نسبت به شار مرجع از کنترل‌کننده PI، مقدار مرجع جریان $\hat{i}_{sx}$ محاسبه می‌شود [۱، ۲] و [۹]. در سیستم کنترل برداری پیشنهادی (شکل ۱)، فیدبک شار حذف شده و جریان $\hat{i}_{sx}$ مستقیماً از روی شار مرجع محاسبه می‌شود. در قسمتهای بعدی نشان داده خواهد شد که در این شرایط، از خطای شار تخمینی نسبت به شار مرجع می‌توان برای تخمین مقاومت استاتور استفاده کرد.

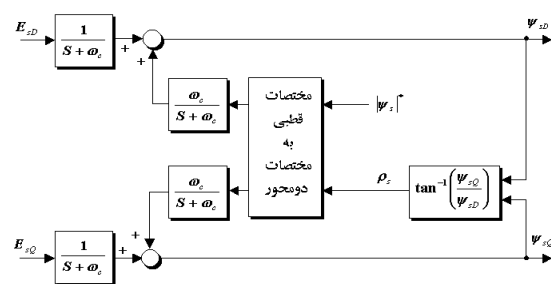
در کنترل برداری مستقیم، انجام صحیح کنترل برداری منوط به اندازه‌گیری یا تخمین صحیح اندازه و زاویه فازور فضایی شار استاتور است. شار فاصله هوایی توسط ادوات اثر هال یا سیم‌پیچ جستجوگر استاتور قابل اندازه‌گیری است. اما هر دو روش به موتوری با ساختمان خاص نیاز دارند. از طرف دیگر سنسورهای اثر هال به دما و نوسانات مکانیکی، به شدت حساس بوده و همچنین

$$\bar{\psi}_1 = \frac{1}{S + \omega_c} \bar{E}_s \quad (15)$$

$$\bar{\psi}_2 = \frac{\omega_c}{S + \omega_c} \bar{\psi}_s^* \quad (16)$$

کمیت‌های به شکل $\hat{X}$ بیانگر کمیت‌های تخمینی هستند و علامت "*" برای مقادیر مرجع استفاده شده است.

در فرکانسهای کم، در شار تخمینی فازور فضایی $\bar{\psi}_2$ غالب است و هر چه فرکانس بیشتر افزایش می‌یابد، اثر $\bar{\psi}_2$ کاهش و اثر $\bar{\psi}_1$ افزایش می‌یابد. بنابراین در فرکانسهای کم، اثر ورودی در خروجی کاهش می‌یابد و در نتیجه مشکل آفست dc برطرف می‌شود.



شکل ۲ نمودار جعبه‌ای انتگرالگیر اصلاح شده

۵- تخمین مقاومت استاتور با استفاده از

خطای شار تخمینی

با توجه به روابط (۷) و (۸)، مشخص است که برای تخمین دقیق شار و به‌خصوص عملکرد پایدار در سرعت‌های کم، اندازه مقاومت استاتور استفاده شده در تخمین شار باید با مقدار واقعی مقاومت برابر باشد. از طرف دیگر مقاومت استاتور بر اثر تغییر دمای موتور تا حدود ۵۰ درصد تغییر کرده و باعث بروز خطا در تخمین شار می‌شود [۵]. این خطا به‌خصوص در سرعت‌های کم - که افت ولتاژ روی مقاومت استاتور در مقابل ولتاژ استاتور قابل ملاحظه است - اهمیت پیدا می‌کند و می‌تواند تخمینگر و لذا کل روش را دچار مشکل سازد. البته با استفاده از انتگرالگیرهای اصلاح شده، حساسیت تخمینگر شار به مقاومت استاتور کاهش

$$\psi_{sD} = \int (u_{sD} - R_s i_{sD}) dt \quad (7)$$

$$\psi_{sQ} = \int (u_{sQ} - R_s i_{sQ}) dt \quad (8)$$

با مشخص شدن مؤلفه‌های شار استاتور در مختصات ساکن، اندازه و زاویه فازور فضایی شار استاتور به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$|\bar{\psi}_s| = \sqrt{\psi_{sD}^2 + \psi_{sQ}^2} \quad (9)$$

$$\rho_s = \tan^{-1} \left(\frac{\psi_{sQ}}{\psi_{sD}} \right) \quad (10)$$

علی‌رغم سادگی، این روش به‌دلیل استفاده از انتگرالگیر خالص، مشکلاتی دارد. مهمترین مشکل، ناشی از وجود آفست dc در ورودی انتگرالگیرها است. آفست dc به‌دلیل وجود المانهای آنالوگ و همچنین خطاهای محاسباتی به‌وجود می‌آید و حتی اگر کوچک باشد، باعث شارژ شدن خروجی انتگرالگیر می‌شود. چنانچه مقدار dc به‌صورت دائمی در ورودی انتگرالگیر وجود داشته باشد، مقدار شارژ dc در خروجی انتگرالگیر نسبت به سیگنال اصلی به‌شدت افزایش می‌یابد، به‌طوری که سیگنال اصلی از dc قابل تفکیک نیست و تخمینگر و در نتیجه کل روش، دچار مشکل می‌شود.

برای حل مشکل آفست dc، از انتگرالگیر اصلاح شده که در [۳] ارائه شده، استفاده می‌شود. نمودار جعبه‌ای این روش در شکل ۲ نشان داده شده است. در این بلوک به جای انتگرالگیر خالص، فیلتر پایین‌گذر به‌کار رفته و برای جبران اثر فیلتر پایین‌گذر، در فرکانسهای کم، از شار مرجع استفاده می‌شود. رابطه زیر عملکرد این روش را مشخص می‌سازد:

$$\bar{\psi}_s = \frac{1}{S + \omega_c} \bar{E}_s + \frac{\omega_c}{S + \omega_c} \bar{\psi}_s^* = \bar{\psi}_1 + \bar{\psi}_2 \quad (11)$$

در این رابطه:

$$\bar{E}_s = \bar{u}_s - \bar{R}_s \bar{i}_s \quad (12)$$

$$\bar{\psi}_s^* = |\bar{\psi}_s|^* e^{j\bar{\rho}_s} \quad (13)$$

$$\bar{\psi}_s = |\bar{\psi}_s| e^{j\bar{\rho}_s} \quad (14)$$

در این رابطه $\bar{R}_s$ مقاومت تخمینی استاتور است. فرض کنید مقاومت تخمینی استاتور نسبت به مقاومت واقعی موتور دارای خطای ΔR_s باشد:

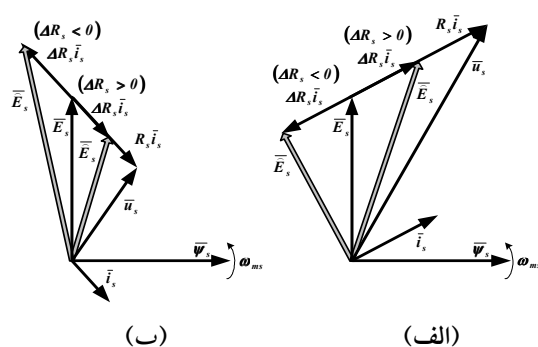
$$\bar{R}_s = R_s - \Delta R_s \quad (18)$$

با جایگذاری رابطه فوق در ۱۷، emf تخمینی برحسب emf واقعی به صورت زیر به دست می آید:

$$\bar{E}_s = \bar{u}_s - (R_s - \Delta R_s) \bar{i}_s = \bar{E}_s + \Delta R_s \bar{i}_s \quad (19)$$

اگر فرکانس چرخش فازور فضایی شار استاتور، ثابت و مثبت باشد (مثبت بودن فرکانس به این معنا است که فازور فضایی شار استاتور در جهت مثلثاتی می چرخد)، نمودار برداری سیستم در مختصات شار استاتور مطابق شکل ۴ است. در این دو نمودار برداری، اثر خطای مقاومت استاتور در اندازه emf تخمینی برای گشتاورهای مثبت و منفی نشان داده شده است.

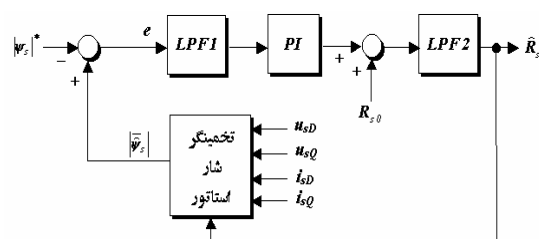
برای گشتاورهای مثبت، جریان i_{sy} نیز مثبت است و همانطور که از شکل ۴-الف مشخص است، اگر ΔR_s مثبت باشد - یعنی مقاومت تخمینی کوچکتر از مقدار واقعی باشد - اندازه emf تخمینی بزرگتر از مقدار واقعی آن می شود. اما اگر ΔR_s منفی باشد، اندازه emf تخمینی کوچکتر از مقدار واقعی می شود.



شکل ۴ اثر خطای مقاومت استاتور در emf تخمینی در شرایطی که فازور فضایی شار استاتور در جهت مثبت مثلثاتی می چرخد، (الف) در شرایط گشتاور مثبت، (ب) در شرایط گشتاور منفی

می یابد؛ اما باز هم به خصوص در فرکانسهای کم، تغییر مقاومت استاتور باعث ایجاد خطا در شار تخمینی می شود، بنابراین برای عملکرد صحیح کنترل برداری لازم است مقاومت استاتور به روش مناسبی تخمین زده شود.

با استفاده از مقادیر واقعی جریان و ولتاژ در تخمینگر شار، خطای شار تخمینی، تنها ناشی از خطای مقاومت استاتور استفاده شده در تخمینگر است، بنابراین با استفاده از خطای شار تخمینی نسبت به شار مرجع، می توان مقاومت استاتور را تخمین زد. چنانچه سیستم کنترل برداری فیدبک شار داشته باشد، این خطا همواره برابر صفر خواهد بود. لذا سیستم کنترل برداری که در این مقاله پیشنهاد شده، فاقد فیدبک شار است و می توان با عبور خطای اندازه شار تخمینی نسبت به شار مرجع از کنترل کننده PI مطابق شکل ۳، مقاومت استاتور را تخمین زد. این روش در حالت موتوری به درستی عمل می کند، اما در حالت ژنراتوری عملکرد مطلوبی ندارد و دچار ناپایداری می شود. در ادامه، علل بروز این مشکل بررسی و راه حلی برای برطرف ساختن آن ارائه می شود.



شکل ۳ نمودار جعبه ای اولیه تخمینگر مقاومت استاتور

۵-۱- علل بروز مشکل در عملکرد تخمینگر مقاومت استاتور

برای بررسی علل بروز مشکل در ناحیه ژنراتوری، رابطه emf تخمینی (ورودی انتگرالگیر) را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$\bar{E}_s = \bar{u}_s - \bar{R}_s \bar{i}_s \quad (17)$$

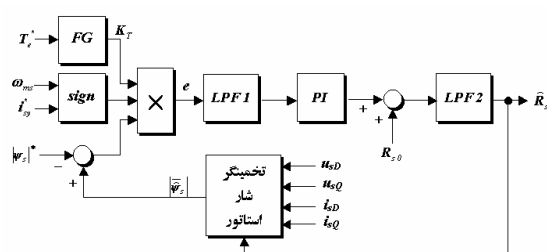
را می توان در تمامی شرایط اعم بر موتوری یا ژنراتوری با استفاده از خطای شار تخمینی نسبت به شار مرجع مطابق شکل ۶ تخمین زد. در این شکل، پس از محاسبه خطای شار تخمینی نسبت به شار مرجع، این مقدار به تابع زیر اعمال می شود:

$$e = K_T \cdot \text{sign}(i_{sy}^* \omega_{ms}) \cdot (|\bar{\psi}_s| - |\psi_s|) \quad (20)$$

در رابطه فوق، sign تابع علامت است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (21)$$

برای فرکانس صفر یا گشتاور صفر، خطای شار تخمینی مشابه حالت موتوری است، بنابراین در تعریف تابع علامت، برای ورودی صفر نیز خروجی برابر یک در نظر گرفته می شود.

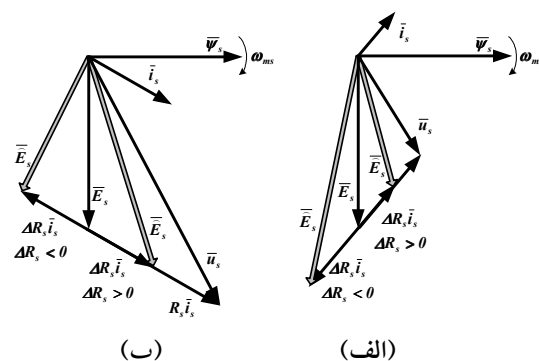


شکل ۶ نمودار جعبه ای پیشنهادی تخمینگر مقاومت استاتور

با توجه به نمودارهای برداری شکل های ۴ و ۵، مشخص است که هر چه گشتاور بزرگتر باشد، اثر خطای مقاومت استاتور تخمینی بیشتر می شود، لذا خطای شار تخمینی متناسب با گشتاور تغییر می کند. بنابراین برای اینکه در گشتاورهای کم نیز مقاومت استاتور با دقت خوبی تخمین زده شود، ضریب K_T که تابع گشتاور مرجع است نیز در خطای شار ضرب می شود. در شکل ۷ تابع مربوط به K_T

در شکل ۴- ب نمودار برداری برای گشتاورهای منفی نشان داده شده است. در این حالت، اثر ΔR_s بعکس حالت قبل است، یعنی اگر ΔR_s مثبت باشد، اندازه emf تخمینی کوچکتر از مقدار واقعی می شود و اگر ΔR_s منفی باشد، اندازه emf تخمینی از مقدار واقعی بزرگتر می شود.

نمودار برداری سیستم برای حالتی که فازور فضایی شار استاتور در خلاف جهت قبل می چرخد، در شکل ۵ نشان داده شده است. در این حالت اثر ΔR_s به خلاف اثر آن به ازای فرکانسهای مثبت است، به عنوان مثال در این حالت به ازای گشتاورهای مثبت، چنانچه ΔR_s هم مثبت باشد، اندازه emf تخمینی کوچکتر از مقدار واقعی می شود و اگر ΔR_s منفی باشد، اندازه emf تخمینی از مقدار واقعی بزرگتر می شود. بنابراین مشخص است که علت بروز مشکل در ناحیه ژنراتوری، تغییر علامت خطای شار تخمینی است و در ادامه، راه حلی برای برطرف ساختن این مشکل ارائه می شود.



شکل ۵ اثر خطای مقاومت استاتور بر emf تخمینی در شرایطی که فازور فضایی شار استاتور در جهت منفی مثلثاتی می چرخد، (الف) در شرایط گشتاور مثبت، (ب) در شرایط گشتاور منفی

۵-۲-۱ اصلاح تخمینگر مقاومت استاتور به منظور عملکرد در ناحیه ژنراتوری و گشتاور بار صفر

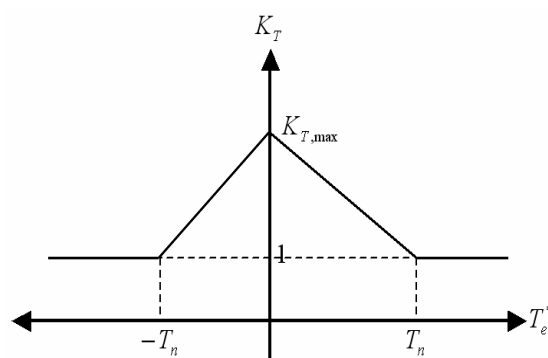
اثر خطای مقاومت استاتور تخمینی وابسته به علامت گشتاور و فرکانس تغذیه است و بنابراین مقاومت استاتور

۶- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی سیستم کنترل برداری با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برای موتور القایی ۳ اسب بخاری که مشخصات آن در ضمیمه آمده، ارائه می‌شود.

با استفاده از انتگرالگیر اصلاح شده، حساسیت سیستم به تغییر مقاومت استاتور کاهش می‌یابد اما همچنان برای عملکرد صحیح سیستم در سرعت‌های کم، لازم است اندازه واقعی مقاومت استاتور به‌منظور استفاده در سیستم کنترل تخمین زده شود. برای بررسی اثر تغییر مقاومت استاتور، سیستم کنترل برداری مطابق نمودار جعبه‌ای شکل ۱ همراه با انتگرالگیر اصلاح شده مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی را در شرایط وجود اختلاف بین مقدار واقعی مقاومت استاتور و مقاومت استفاده شده در سیستم کنترل نشان می‌دهد. در این نتایج، اندازه مقاومت استاتور استفاده شده در سیستم کنترل برابر 0.435 اهم (مقدار نامی) در نظر گرفته شده در صورتی که اندازه واقعی مقاومت استاتور - به دلیل گرم شدن - تا 50% درصد افزایش یافته و به 0.625 اهم رسیده است. تا قبل از ثانیه ۱، گشتاور مرجع صفر بوده و فقط شار مرجع به سیستم اعمال شده است. در ثانیه ۱ گشتاور مرجع برابر 12 نیوتن - متر (گشتاور نامی) به سیستم اعمال شده است. برای بررسی عملکرد سیستم در سرعت‌های کم، گشتاور بار برابر با ضریب بزرگی از سرعت در نظر گرفته شده است، در نتیجه موتور با سرعت کمی خواهد چرخید. گشتاور واقعی موتور با گشتاور مرجع اعمال شده مطابق شکل ۸- الف، در حدود 2 نیوتن - متر اختلاف دارد و این در شرایطی است که مطابق شکل ۸- ب سرعت موتور حدود 4 رادیان بر ثانیه است. در شکل‌های ۸- ج و ۸- د اندازه شار واقعی و شار تخمینی نشان داده شده است. هر چند اندازه شار واقعی نسبت به شار مرجع - که برابر 0.45 وبر است - اختلاف زیادی ندارد، اما اندازه شار تخمینی اختلاف نسبتاً زیادی

نشان داده شده که در این شکل T_n گشتاور نامی موتور است. بیشتر روش‌های تخمین مقاومت استاتور در گشتاورهای کم نمی‌تواند مقاومت استاتور را تخمین بزنند، اما با اعمال این ضریب، تخمینگر پیشنهادی در گشتاور صفر نیز مقاومت استاتور را با دقت خوبی تخمین می‌زند.



شکل ۷ تابع مربوط به ضریب K_T در تخمینگر مقاومت استاتور

مطابق نمودار جعبه‌ای شکل ۶ پس از محاسبه سیگنال e ، به‌منظور حذف مؤلفه‌های فرکانس بالای موجود در آن - که ناشی از اینورتر است - از فیلتر پایین‌گذر استفاده می‌شود. ثابت زمانی فیلتر باید بسیار کوچکتر از ثابت زمانی کنترل‌کننده PI باشد تا بر عملکرد آن تأثیری نداشته باشد. سپس خطا به کنترل‌کننده PI اعمال و خروجی این کنترل‌کننده با R_{s0} - که مقدار اولیه مقاومت استاتور است - جمع می‌شود و مقاومت تخمینی به‌دست می‌آید. برای حذف کامل نویز و ریپل ناشی از اینورتر، از فیلتر پایین‌گذر دیگری در خروجی استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه در فرکانس‌های بالا اثر مقاومت استاتور در تخمینگر شار کاهش می‌یابد، دقت تخمینگر مقاومت استاتور نیز کم می‌شود، اما این مسأله تأثیر چندانی بر سیستم نمی‌گذارد و با تنظیم ضرایب PI می‌توان پاسخ مطلوبی را در همه سرعت‌ها به‌دست آورد زیرا تغییر مقاومت استاتور بسیار کند است و تخمینگر می‌تواند آن را دنبال کند.

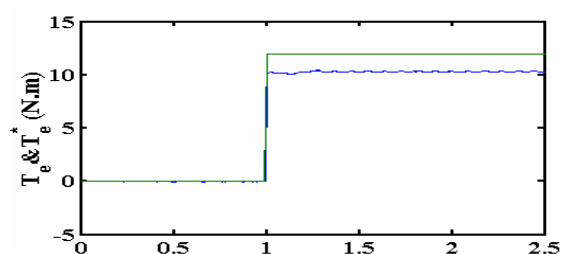
در صورتی که برای تخمین مقاومت استاتور از سیستم اولیه مطابق شکل ۳ استفاده شود، در حالت ژنراتوری سیستم کنترل دچار مشکل می شود. در شکل ۹ نتایج شبیه سازی در این حالت نشان داده شده است.

لازم است ذکر شود که برای بررسی عملکرد سیستم در سرعت های کم و زیاد و در شرایط کار موتوری و ژنراتوری، فرض شده که بار مکانیکی موتور، جزئی از درایو دیگری است که در شرایط کنترل سرعت مورد استفاده قرار می گیرد؛ لذا گشتاور الکتریکی توسط درایو کنترل برداری و سرعت توسط درایو بار مکانیکی کنترل می شود.

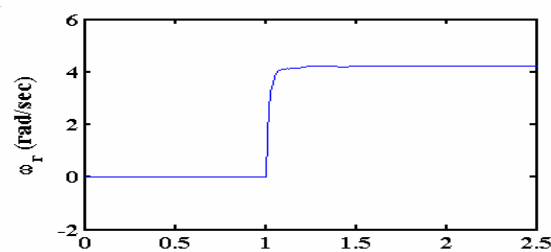
در این نتایج سرعت موتور برابر ۱۰ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده و در ثانیه ۲، گشتاور مرجع برابر ۲- نیوتن - متر، به سیستم اعمال شده است. در چنین شرایطی فرکانس چرخش فازور فضایی شار استاتور مثبت بوده و گشتاور منفی است در نتیجه علامت خطای شار تخمینی منفی شده و مقاومت تخمینی مطابق شکل ۹-۹ از مقدار واقعی دور می شود. البته در این شرایط فرکانس چرخش فازور فضایی شار استاتور نیز مطابق شکل ۹-۹ و کاهش می یابد و با منفی شدن آن علامت خطای شار تخمینی نیز تغییر کرده و مقاومت تخمینی مقدار واقعی را تخمین می زند اما مطابق شکل های ۹-۹ ب و ۹-۹ ج گشتاور و شار موتور برابر مقادیر مرجع نبوده و سیستم کنترل مختل شده است.

در شکل ۱۰ نتایج شبیه سازی سیستم در شرایط مشابه حالت قبل و با تخمینگر مقاومت استاتور اصلاح شده مطابق شکل ۶ نشان داده شده است. در این شرایط مقاومت تخمینی به خوبی توانسته مقدار واقعی را دنبال کند و شار و گشتاور موتور نیز برابر مقادیر مرجع است.

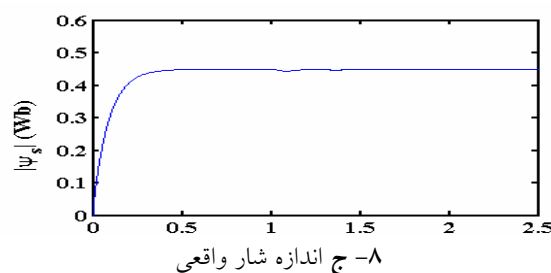
با اندازه شار واقعی و شار مرجع دارد، بنابراین می توان از خطای شار تخمینی نسبت به شار مرجع برای تخمین مقاومت استاتور استفاده کرد.



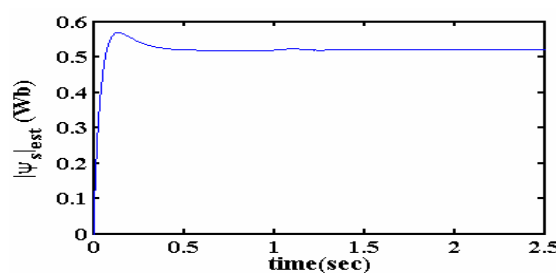
۸- الف گشتاور مرجع و گشتاور الکتریکی موتور



۸- ب سرعت موتور

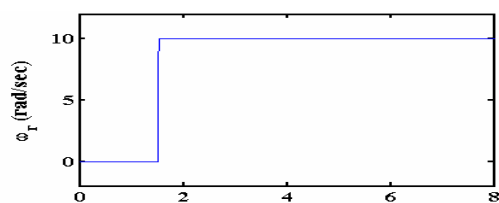


۸- ج اندازه شار واقعی

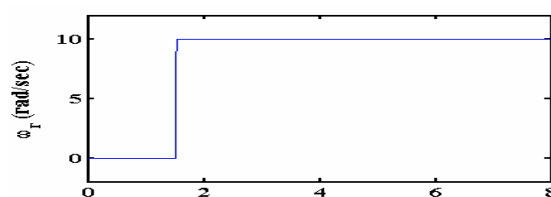


۸- د اندازه شار تخمینی

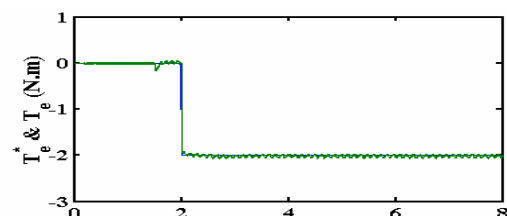
شکل ۸ عملکرد کنترل برداری با انتگرالگیر اصلاح شده در شرایط وجود ۵۰ درصد خطا در اندازه مقاومت استاتور



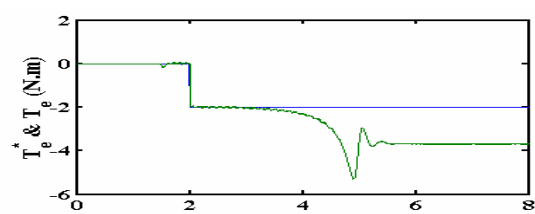
۱۰- الف سرعت موتور



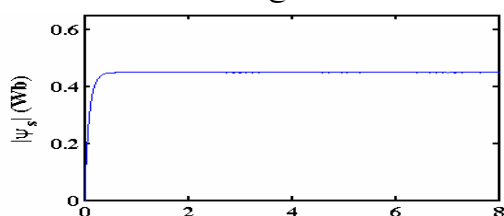
۹- الف سرعت موتور



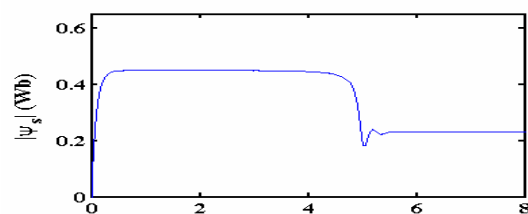
۱۰- ب گشتاور مرجع و گشتاور الکتریکی موتور



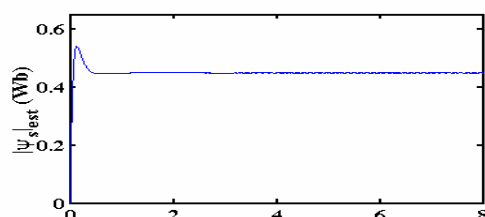
۹- ب گشتاور مرجع و گشتاور الکتریکی موتور



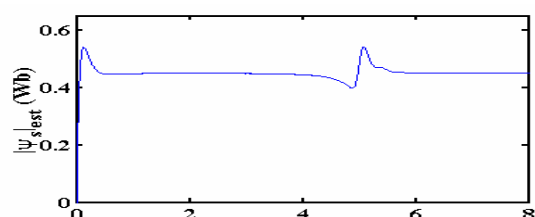
۱۰- ج اندازه واقعی شار



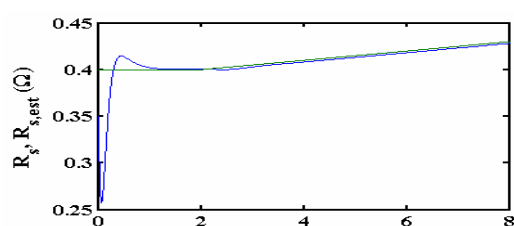
۹- ج اندازه واقعی شار



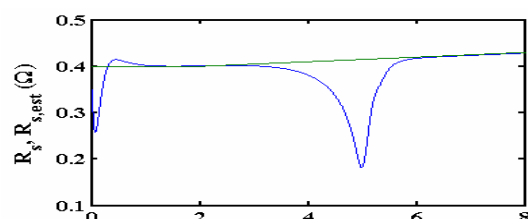
۱۰- د اندازه تخمینی شار



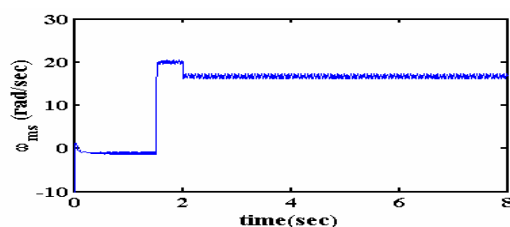
۹- د اندازه تخمینی شار



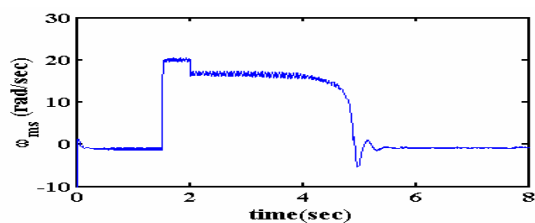
۱۰- ه اندازه مقاومت واقعی استاتور و مقاومت تخمینی



۹- ه اندازه مقاومت واقعی استاتور و مقاومت تخمینی



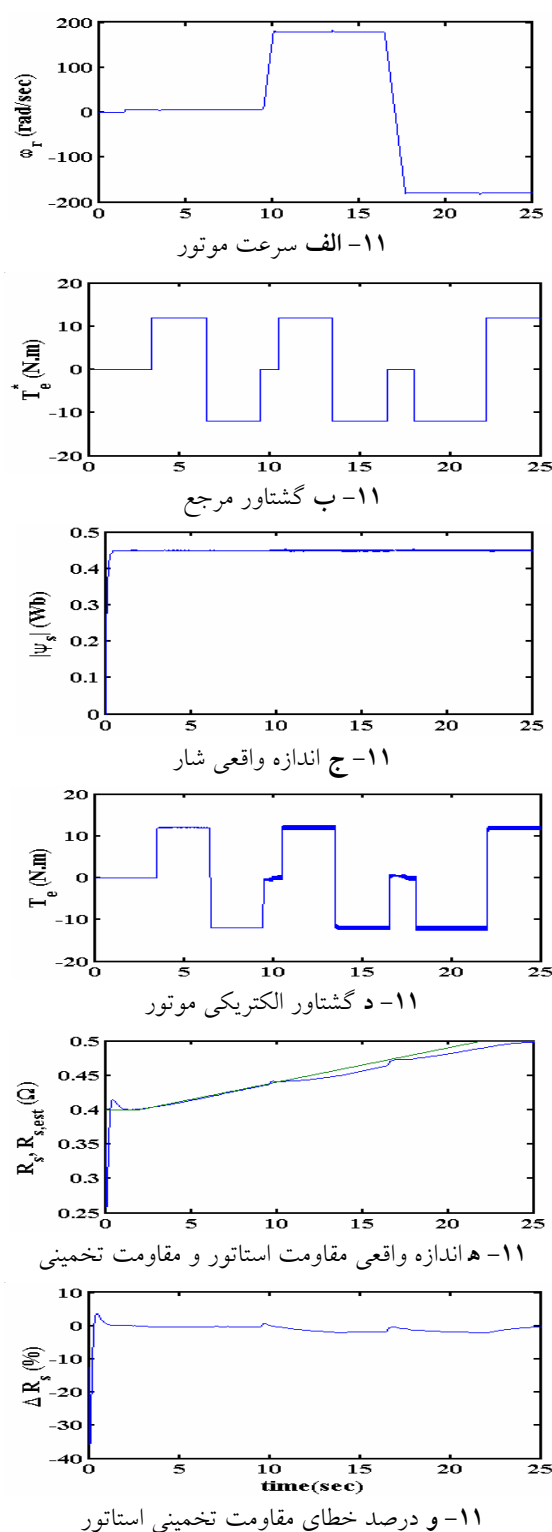
۱۰- و فرکانس چرخش فازور فضایی شار استاتور



۹- و فرکانس چرخش فازور فضایی شار استاتور

شکل ۱۰ عملکرد تخمینگر مقاومت استاتور اصلاح شده در حالت ژنراتوری

شکل ۹ عملکرد تخمینگر مقاومت استاتور مطابق شکل ۳ در حالت ژنراتوری



شکل ۱۱ عملکرد تخمینگر مقاومت استاتور اصلاح شده در شرایط کاری مختلف

شکل ۱۱ نتایج شبیه سازی سیستم فوق را در شرایط مختلف کاری شامل عملکرد موتوری و ژنراتوری و به ازای سرعت های کم و زیاد نشان می دهد. در این حالت مطابق شکل ۱۱- الف عملکرد سیستم در سرعت های صفر، ۵ و ± 180 رادیان بر ثانیه بررسی شده است. گشتاور مرجع اعمال شده به سیستم مطابق شکل ۱۱- ب است.

اندازه اولیه مقاومت استاتور استفاده شده در سیستم کنترل برابر 0.35 اهم و اندازه واقعی مقاومت موتور در ابتدا برابر 0.4 اهم است. این مقاومت مطابق شکل ۱۱- ه تا ثانیه ۲ ثابت باقی مانده و پس از آن به دلیل کار کردن موتور و افزایش دما، به طور خطی افزایش یافته و پس از ۲۰ ثانیه به مقدار 0.5 اهم رسیده است.

تخمینگر مقاومت استاتور از ابتدا فعال بوده و مطابق شکل های ۱۱- ه و ۱۱- و، با وجود خطای اولیه بین اندازه مقاومت واقعی و مقاومت استفاده شده در سیستم کنترل، تخمینگر به خوبی توانسته در تمامی شرایط کاری، اندازه مقاومت استاتور را تخمین زده و تغییرات آن را دنبال کند. البته خطای تخمین در سرعت های بالا کمی افزایش می یابد اما در این شرایط، سیستم به اندازه مقاومت استاتور حساس نبوده و دچار مشکل نمی شود. در شکل های ۱۱- ج و ۱۱- د تغییر شار و گشتاور الکتریکی موتور نشان داده شده و همانگونه که ملاحظه می شود این دو متغیر، در شرایط مختلف سرعت و گشتاور، به خوبی مقادیر مرجع را دنبال کرده و سیستم قابلیت عملکرد در هر دو ناحیه موتوری و ژنراتوری را دارد.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله روش ساده ای برای کنترل دقیق گشتاور موتور القایی بررسی شد. این روش براساس کنترل برداری مستقیم در مختصات شار استاتور عمل کرده و به سنسور سرعت نیاز ندارد.

- [2] Novotny, D. W., Lipo, T. A., Vector Control and Dynamics of AC Drives, NewYork, Oxford University Press Inc., 2000.
- [3] Ohtani, T., Takada, N., Tanaka, K., "Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 28, No. 1, 1992, pp. 157-164.
- [۴] قادری احمد، «ارزیابی روش PCLPF و ارائه یک روش جدید جهت حل مشکل dc offset در کنترل برداری مستقیم موتورهای القایی»، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۱.
- [5] Holtz, J., Quan, J., "Drift and Parameter Compensated Flux Estimator for Persistent Zero Stator Frequency Operation of Sensorless Controlled Induction Motors", IEEE IAS Annual Meeting, 2002, pp. 1687-1694.
- [6] Kubota, H., Matsuse, K., "Speed Sensorless Field-Oriented Control of Induction Motor with Rotor Resistance Adaptation", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 30, No. 5, 1994, pp. 1219-1224.
- [7] Kubota, H., Tamura, Y., "Stator Resistance Estimation for Sensorless Induction Motor Drives under Regenerating Condition", IEEE-IECON02, Vol. 1, 2002, pp. 426-430.
- [8] Guidi, G., Umida, H., "A Novel Stator Resistance Estimation Method for Speed-Sensorless Induction Motor Drives",

به منظور تخمین شار، از معادلات ولتاژ استاتور و برای حل مشکل آفست dc در تخمینگر شار، از انتگرالگیر اصلاح شده استفاده شد. همچنین به دلیل حساسیت زیاد تخمینگر شار به تغییر مقاومت استاتور - به خصوص در سرعت های کم - روشی برای تخمین مقاومت استاتور ارائه شد. در روش پیشنهادی از خطای شار تخمینی برای تخمین مقاومت استاتور استفاده شد اما مشاهده شد که این روش در شرایط کار ژنراتوری دارای مشکل است. با تحلیل روابط، مشخص شد که علت بروز مشکل، تغییر علامت شار تخمینی است و برای حل این مشکل راه حلی ارائه شد. در نهایت سیستم پیشنهادی در محدوده وسیع سرعت و برای شرایط موتوری و ژنراتوری به خوبی عمل می کند. همچنین عملکرد سیستم برای گشتاورهای متفاوت بار و از جمله گشتاور بار صفر مطلوب است.

۸- ضمیمه

مشخصات موتور القایی استفاده شده در شبیه سازی [۲۵]

P_n	۳ hp	R_s	0.435Ω
V_n	۲۲۰ volt	L_s	$0.0713H$
I_n	۵/۸ A	R_r	0.816Ω
T_n	۱۱/۹ N.m	L_r	$0.0713H$
f	۶۰ Hz	L_m	$0.0693H$
P	۲	J	0.0445 kg.m^2

۹- منابع

- [1] Vas, P., Sensorless Vector and Torque Control, NewYork, Oxford University Press, 1998.

- [14] Hoque, M. E., Rahman, M. F., "A PI Stator Resistance Compensator for a Direct Torque Controlled Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", Proceeding 3rd International Power Elec. & Motion Control Conf., 2000, pp. 175-179.
- [15] Crecelius, D. R., Implementation of Speed Sensorless Vector Controlled Induction Motor Drive with Zero Speed Start-Up, MS Thesis, University of Tennessee, Knoxville, 1994.
- [16] Bose, B. K., Patel, N. R., "Quasifuzzy Estimation of Resistance of Induction Motor", IEEE Trans. Power Elec., Vol. 13, 1998, pp. 401-409.
- [17] Ribeiro, L. A. D. D., Jacobina, C. B., Lima, A. M. N., "Linear Parameter Estimation for Induction Machines Considering the Operating Conditions", IEEE Trans. Power Elec., Vol. 14, No. 1, 1999, pp. 62-73.
- [18] Jacobina, C. B., Chaves Fl, J. E., Lima, A. M. N., "On-Line Estimation of the Stator Resistance of An Induction Motor", IEEE-PESC 98, Vol. 2, 1998, pp. 979-983.
- [19] Ha, I. J., Lee, S. H., "An Online Identification Method for Both Stator and Rotor Resistances of Induction Motors without Rotational Transducers", IEEE Trans. Elec., Vol. 47, No. 4, 2000, pp. 842-853.
- IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 36, No. 6, 2000, pp. 1619-1627.
- [9] Tajima, H., Guidi, G., Umida, H., "Consideration About Problems and Solutions of Speed Estimation Method and Parameter Tuning for Speed-Sensorless Vector Control of Induction Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 38, No. 5, 2002, pp. 1282-1289.
- [10] Tsuji, M., Chen, S., Izumi, K., Yamada, E., "A Sensorless Vector Control System for Induction Motors Using q-Axis Flux with Stator Resistance Identification", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. 48, No. 1, 2001, pp. 185-194.
- [11] Vasic, V., Vukosavic, S., "Robust MRAS-Based Algorithm for Stator Resistance and Rotor Speed Identification", IEEE Power Engineering Review, 2001, pp. 39-41.
- [12] Lee, B. S., Krishnan, R., "Adaptive Stator Resistance Compensator for High Performance Direct Torque Controlled Induction Motor Drives", Thirty-Third IAS Annual Meeting, Vol. 1, 1998, pp. 423-430.
- [13] Mir, S., Elbuluk, M. E., Zinger, D. S., "PI and Fuzzy Estimator for Tuning the Stator Resistance in Direct Torque Control of Induction Machines", IEEE Trans. Power Elec., Vol. 13, No. 2, 1998, pp. 279-287.

- [23] Boussak, M., Jarray, K., "A New Stator Resistance Estimation Method for High Performance Stator-Flux Oriented Sensorless Induction Motor Drives", IEEE-IECON02, Vol. 1, 2002, pp. 311-316.
- [24] Umanand, L., Bhat, S. R., "Online Estimation of Stator Resistance of an Induction Motor for Speed Control Applications", IEE Proc. Elec. Power Appl., Vol. 142, No. 2, 1995, pp. 97-103.
- [25] Krause, P. C., Analysis of Electric Machinery, MC Graw-Hill International, 1987.
- [20] Holtz, J., Quan, J., "Sensorless Vector Control of Induction Motors at Very Low Speed Using a Nonlinear Inverter Model and Parameter Identification", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 38, No. 4, 2002, pp. 1087-1095.
- [21] Habetler, T. G., Profumo, F., Griva, G., Pastorelli, M., Bettini, A., "Stator Resistance Tuning in a Stator-Flux Field-Oriented Drive Using An Instantaneous Hybrid Flux Estimator", IEEE Trans. Power Elec., Vol. 13, No. 1, pp. 125-132, 1998.
- [22] Kerkman, R. J., Seibel, B. J., Rowan, T. M., Schlegel, D., "A New Flux and Stator Resistance Identifier for AC Drive Systems", 30th IAS Annual Meeting, 1995, pp. 310-318.