

تخمین همزمان سرعت و مقاومتهای رتور و استاتور ماشین القایی در شرایط موتوری و ژنراتوری

اسماعیل رضایی^۱، محمد ابراهیمی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری قدرت، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار گروه قدرت، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

*اصفهان، صندوق پستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶

mehrahim@cc.iut.ac.ir

(دریافت مقاله: بهمن ۱۳۸۸، پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۹)

چکیده- بیشتر روشهایی که برای تخمین سرعت ماشینهای القایی ارائه شده به مقاومت رتور وابسته اند. مقاومت رتور نیز ثابت نبوده و با تغییر دمای ماشین تغییر می کند. از طرفی بیشتر روشهای تخمین مقاومت رتور نیز به سرعت ماشین وابسته اند. در این مقاله با بررسی این مطلب، روشی برای تخمین همزمان سرعت، مقاومت رتور و مقاومت استاتور ماشین القایی در شرایط مختلف موتوری و ژنراتوری ارائه می شود. در این روش یک مؤلفه فرکانسی اضافی به شار مرجع اعمال شده و سرعت و مقاومت رتور با توجه به معادلات رتور با استفاده از تبدیل سریع فوری محاسبه می شود. تغییرات مقاومت استاتور نیز با توجه به اندازه شار تخمینی و با استفاده از نوعی تخمینگر فازی تخمین زده می شود. در پایان عملکرد مطلوب سیستم کنترل دور ماشین القایی بدون سنسور سرعت همراه با تخمین همزمان مقاومت رتور و مقاومت استاتور در شرایط کاری مختلف به ویژه در سرعتهای پایین و عملکرد ژنراتوری، با استفاده از شبیه سازی ارائه می شود.

کلیدواژگان: ماشین القایی، کنترل برداری مستقیم، تخمین سرعت، تخمین مقاومت رتور، تخمین مقاومت استاتور.

۱- مقدمه

کاربرد ماشینهای القایی قفسه سنجابی به دلیل مزایای بسیار همواره در حال افزایش است. این ماشینها به عنوان موتور در درایوهای سرعت متغیر و به عنوان ژنراتور در نیروگاههای جدیدی مانند نیروگاههای بادی استفاده می شوند. در بیشتر این کاربردها به کنترل سرعت با دقت بالا و به سنسور

سرعت نیاز است. اما استفاده از سنسور باعث افزایش قیمت و اندازه سیستم شده و همچنین در بعضی از کاربردها نصب سنسور سرعت مشکل است. بنابراین در سالهای اخیر کنترل دور بدون سنسور سرعت ماشینهای القایی به شدت مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است [۱].

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

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

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

$$\frac{1}{L'_s} \frac{d|\psi_s|}{dt} + \frac{|\psi_s|}{L'_s T'_r} = \frac{di_{sx}}{dt} + \frac{i_{sx}}{T'_r} - \omega_{sl} i_{sy} \quad (3)$$

$$\omega_{sl} \left(\frac{|\psi_s|}{L'_s} - i_{sx} \right) = \frac{di_{sy}}{dt} + \frac{i_{sy}}{T'_r} \quad (4)$$

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

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

ساختار قالبی سیستم کنترل برداری مستقیم در این پژوهش مطابق شکل (۱) است.

۲-۱- تخمینگر شار استاتور

در کنترل برداری مستقیم، انجام صحیح کنترل منوط به اندازه‌گیری یا تخمین صحیح اندازه و زاویه فازور فضایی شار استاتور است. در قسمت‌های بعدی همچنین نشان داده خواهد شد که برای تخمین سرعت و مقاومت رتور به شار رتور نیاز است. برای آنکه بتوان از شار تخمینی در تخمینگر سرعت و مقاومت رتور نیز استفاده کرد، در تخمینگر شار نباید از سرعت و مقاومت رتور تخمینی استفاده شود. راه

روشهای مختلف تخمین سرعت در مراجع متعددی بررسی و مقایسه شده است [۱] تا [۵]، اما بیشتر این روشها به مقاومت رتور وابسته‌اند. از سوی دیگر بیشتر روشهای تخمین مقاومت رتور نیز به سرعت وابسته‌اند [۶] تا [۸]، بنابراین مسأله تخمین همزمان سرعت و مقاومت رتور یا تخمین سرعت مستقل از مقاومت رتور باید مورد توجه خاص قرار گیرد [۹] تا [۱۶].

در این مقاله، نخست شرایط تخمین همزمان سرعت و مقاومت رتور بررسی و سپس روش پیشنهادی برای تخمین همزمان سرعت و مقاومت رتور ارائه می‌شود. در این روش سیگنالی سینوسی به شار مرجع اعمال و با استفاده از تبدیل فوریه، سرعت و مقاومت رتور تخمین زده می‌شود. سیستم کنترل برداری و همچنین تخمینگر سرعت و مقاومت رتور، به اطلاع از شار ماشین نیاز دارد، بنابراین شار ماشین با استفاده از معادلات ولتاژ استاتور ماشین القایی تخمین زده می‌شود. این روش به دلیل استفاده از انتگرالگیر خالص دارای مشکل آفست dc بوده و همچنین به مقاومت استاتور حساس است. بنابراین در این مقاله برای حل مشکل آفست dc و تخمین مقاومت استاتور از روش ارائه شده در [۱۷] و [۱۸] استفاده می‌شود.

در ادامه ابتدا روش کنترل برداری مستقیم با امتدادیابی شار استاتور ارائه می‌شود. سپس مسأله تخمین سرعت ماشین القایی و شرایط تخمین همزمان سرعت و مقاومت رتور بررسی خواهد شد. در پایان تخمینگر پیشنهادی ارائه و عملکرد سیستم با استفاده از شبیه‌سازی مطالعه می‌شود.

۲- کنترل برداری مستقیم ماشین القایی با امتدادیابی شار استاتور

هدف از کنترل برداری ماشین القایی، کنترل مستقل شار و

تخمینگر حلقه بسته‌ای مانند مشاهده‌گر مرتبه کامل تخمین زده شده و مقاومت رتور نیز با اضافه کردن سیگنالی اضافی به شار مرجع به‌طور همزمان با سرعت و به صورت حلقه بسته توسط مشاهده‌گر تخمین زده می‌شود.

با توجه به مطالب بالا و در ادامه پس از بررسی شرایط تخمین همزمان سرعت و مقاومت رتور، روش تخمین با استفاده از معادلات ولتاژ رتور بررسی و روش پیشنهادی ارائه می‌شود.

۴- شرایط تخمین همزمان سرعت و مقاومت رتور

در شرایطی که اندازه شار رتور ثابت است، تخمین همزمان مقاومت رتور و سرعت، ناممکن است. این وضعیت برای حالت دائمی سینوسی که ولتاژها و جریان‌ها کاملاً سینوسی باشند یا در حالتی که ولتاژها و جریان‌ها سینوسی نیستند، اما هدف سیستم کنترل، ثابت نگاه داشتن اندازه شار رتور است، روی می‌دهد [۱]. برای بررسی این مطلب، معادلات ولتاژ رتور ماشین القایی را در مختصات ساکن در نظر می‌گیریم:

$$R_r i_{rd} + \omega_r \psi_{rq} = -\frac{d\psi_{rd}}{dt} \quad (11)$$

$$R_r i_{rq} - \omega_r \psi_{rd} = -\frac{d\psi_{rq}}{dt} \quad (12)$$

با در نظر گرفتن سرعت و مقاومت رتور به‌عنوان مقادیر مجهول، این مقادیر برحسب مؤلفه‌های دو محوری جریان و ولتاژ رتور در مختصات ساکن، به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\omega_r = \frac{i_{rd} \frac{d\psi_{rq}}{dt} - i_{rq} \frac{d\psi_{rd}}{dt}}{i_{rd} \psi_{rd} + i_{rq} \psi_{rq}} = \frac{\bar{i}'_r \times \frac{d\bar{\psi}'_r}{dt}}{\bar{i}'_r \cdot \bar{\psi}'_r} \quad (13)$$

سرعت کاربرد ندارند [۶] تا [۸]. بنابراین تخمین همزمان سرعت و مقاومت رتور کار آسانی نیست. در مباحث بعدی نشان داده خواهد شد که اگر اندازه شار رتور ثابت باشد، تخمین همزمان این دو پارامتر ناممکن است.

در زمینه تخمین سرعت مستقل از مقاومت رتور یا تخمین همزمان سرعت و مقاومت رتور، تحقیقاتی انجام شده است. روشهای ارائه شده در این زمینه را می‌توان به دو دسته تخمینگرهای حلقه باز و تخمینگرهای حلقه بسته تقسیم کرد. در تخمینگرهای حلقه باز [۱۰] تا [۱۵]، اساس کار حل معادلات ولتاژ رتور و محاسبه سرعت و مقاومت رتور برحسب شارهای تخمینی است؛ البته شار با استفاده از معادلات ولتاژ استاتور و به‌طور مستقل از روی سرعت و مقاومت رتور تخمین زده می‌شود. اگر اندازه شار رتور ثابت باشد، حل چنین معادلاتی امکان‌پذیر نیست.

در مراجع مختلف، چگونگی و شرایط حل این معادلات مطالعه شده است. برای مثال در [۱۰] این معادلات با استفاده از رایبل ناشی از اینورتر و به‌روشی ساده حل شده و سرعت و مقاومت رتور محاسبه شده است. [۱۱] با اضافه کردن سیگنالی اضافی به شار مرجع و با حل معادلات به روش *Fixed Trace* سرعت و مقاومت رتور را تخمین می‌زند. در [۹] سیگنال اضافی به گشتاور مرجع اعمال و مقاومت رتور تخمین زده می‌شود و سپس سرعت با استفاده از مقاومت رتور تخمینی محاسبه می‌شود. در [۱۲] معادلات فقط در هنگام تغییر سرعت حل شده و مقاومت رتور تخمین زده می‌شود. در شرایطی که سرعت ثابت است، مقاومت تخمینی رتور نیز ثابت در نظر گرفته می‌شود.

در تخمینگرهای حلقه بسته [۱۴] تا [۱۶]، سرعت توسط

۵- روش پیشنهادی برای تخمین همزمان

سرعت و مقاومتهای رتور و استاتور

همانطور که دیدیم تخمین همزمان سرعت و مقاومت رتور در شرایطی که اندازه شار رتور ثابت است امکانپذیر نیست. برای حل این مشکل روشی مطابق شکل (۲) پیشنهاد می شود. اساس این روش اعمال سیگنال اضافی به شار مرجع و استفاده از تبدیل فوریه برای تخمین سرعت و مقاومت رتور است. همچنین مقاومت استاتور با نوعی تخمینگر فازی از روی خطای شار تخمین زده می شود. در ادامه روش پیشنهادی به صورت جزء به جزء ارائه می شود.

۵-۱- اعمال سیگنال اضافی به شار مرجع

در سیستم کنترل برداری اندازه شار مرجع ثابت در نظر گرفته می شود. در این تحقیق علاوه بر مقدار ثابت، سیگنال سینوسی اضافی با فرکانس f_i به شار مرجع اضافه و سرعت و مقاومت رتور با استفاده از روابط قسمت قبل، تخمین زده می شود. در این شرایط شکل موجهای مربوط به صورت و مخرج روابط (۱۳) و (۱۴)، به صورت سینوسی با فرکانس f_i خواهند بود و در نتیجه با انتخاب مناسب f_i با دقت خوبی، می توان سرعت و مقاومت رتور را محاسبه کرد.

مسئله مهم در این روش انتخاب فرکانس و دامنه سیگنال اضافی است. اگر فرکانس سیگنال اضافی بزرگ باشد، به سنسورها و مبدل‌های A/D با دقت بالا نیاز است و همچنین اثر پوستی و تلفات سیستم افزایش می یابد. بنابراین باید تا حد امکان فرکانس سیگنال اضافی کوچک انتخاب شود. دامنه باید طوری انتخاب شود که از اغتشاشها و نویز قابل تشخیص باشد. اما از طرفی سرعت پاسخ تخمینگر ارتباط مستقیمی با فرکانس

(۱۴)

$$R_r = -\frac{\psi_{rd} \frac{d\psi_{rd}}{dt} + \psi_{rq} \frac{d\psi_{rq}}{dt}}{i_{rd}\psi_{rd} + i_{rq}\psi_{rq}} = -\frac{\bar{\psi}'_r \cdot \frac{d\bar{\psi}'_r}{dt}}{i'_r \cdot \bar{\psi}'_r}$$

که علامت "×" ضرب برداری (ضرب خارجی) و "·" ضرب اسکالر (ضرب داخلی) فازورهای فضایی را نشان می دهد [۱۰].

اگر اندازه شار رتور ثابت باشد، از روابط فوق نمی توان سرعت و مقاومت رتور را تخمین زد. برای بررسی این مطلب، رابطه زیر را برای مشتق اندازه شار رتور در نظر می گیریم:

$$\frac{d|\bar{\psi}_r|^2}{dt} = 2\psi_{rd} \frac{d\psi_{rd}}{dt} + 2\psi_{rq} \frac{d\psi_{rq}}{dt} \quad (15)$$

با جایگذاری روابط (۱۱) و (۱۲) در رابطه فوق، معادله زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} \frac{d|\bar{\psi}_r|^2}{dt} &= -2R_r(\psi_{rd}i_{rd} + \psi_{rq}i_{rq}) \\ &= -2R_r \bar{i}'_r \cdot \bar{\psi}'_r \end{aligned} \quad (16)$$

بنابراین اگر اندازه شار رتور ثابت باشد، فازورهای فضایی شار و جریان رتور بر یکدیگر عمود بوده و $\bar{i}'_r \cdot \bar{\psi}'_r$ برابر صفر می شود. لذا در روابط (۱۳) و (۱۴)، مخرج کسرها صفر شده و لذا سرعت و مقاومت رتور قابل محاسبه نیست. البته در این شرایط فازورهای فضایی شار رتور و $\frac{d\bar{\psi}'_r}{dt}$ نیز بر یکدیگر عمود بوده و در نتیجه صورت کسرها نیز برابر صفر است و بنابراین کسرها به صورت صفر/صفر خواهند بود [۱۱].

می‌شوند. برای N_p نمونه اول، A_I و B_I از حاصل جمع مقادیر دو آرایه محاسبه می‌شوند. برای نمونه‌های N_p به بعد، با توجه به روابط (۲۵) و (۲۶) در هر دوره نمونه‌برداری قدیمی‌ترین نمونه (نمونه N_p ام قبلی) در هر آرایه، از جمع نمونه‌ها - که برابر A_I و B_I است - کم می‌شود و نمونه‌های جدید در آرایه‌ها قرار گرفته و با حاصل جمع‌های قبلی جمع شده و A_I و B_I جدید به دست می‌آید. به این ترتیب با توجه به شکل (۳) برای محاسبه ضرایب A_I و B_I ، یک جمع، یک تفریق و یک ضرب نیاز است و زمان محاسبه به شدت کاهش می‌یابد و لذا تغییرات سیگنالها به صورت لحظه‌ای قابل محاسبه است [۱۹]:

(۲۵)

$$A_1 = \frac{2}{N_p} \sum_{j=N_C-1}^{N_C+N_p-1} x(j\tau) \cos(\omega j\tau) - \frac{2}{N_p} x((N_C-1)\tau) \cos(\omega(N_C-1)\tau) + \frac{2}{N_p} x((N_C+N_p-1)\tau) \cos(\omega(N_C+N_p-1)\tau) \quad (26)$$

$$B_1 = \frac{2}{N_p} \sum_{j=N_C-1}^{N_C+N_p-1} x(j\tau) \sin(\omega j\tau) - \frac{2}{N_p} x((N_C-1)\tau) \sin(\omega(N_C-1)\tau) + \frac{2}{N_p} x((N_C+N_p-1)\tau) \sin(\omega(N_C+N_p-1)\tau)$$

با روش فوق دامنه سیگنالهای سینوسی مربوط به صورت و مخرج روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه شده و از تقسیم آنها سرعت و مقاومت محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه دامنه محاسبه شده برای سیگنالها، همواره مثبت است از تقسیم آنها قدرمطلق سرعت و مقاومت به دست می‌آید. بنابراین علامت سرعت تخمینی نیز باید به روش مناسبی تعیین شود. اما

چنین نیست و هنگامی که نمونه جدیدی به دست می‌آید، نقطه شروع محاسبات به نقطه بعدی منتقل می‌شود. در این روش، ضرایب فوریه به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۹]:

$$A_i = \frac{2}{N_p} \sum_{j=N_C}^{N_C+N_p-1} x(j\tau) \cos(i\omega j\tau) \quad (20)$$

$$B_i = \frac{2}{N_p} \sum_{j=N_C}^{N_C+N_p-1} x(j\tau) \sin(i\omega j\tau) \quad (21)$$

در تناوب اول یعنی برای N_p نمونه اول، N_C برابر صفر در نظر گرفته می‌شود و سپس از آن با هر نمونه مقدار آن یک واحد افزایش می‌یابد.

در اینجا فقط لازم است ضرایب برای مؤلفه اصلی محاسبه شوند، بنابراین زمان محاسبه زیاد نیست:

$$x_1(k\tau) = A_1 \cos(\omega k\tau) + B_1 \sin(\omega k\tau) = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \sin(\omega k\tau + \arctg(\frac{B_1}{A_1})) \quad (22)$$

$$A_1 = \frac{2}{N_p} \sum_{j=N_C}^{N_C+N_p-1} x(j\tau) \cos(\omega j\tau) \quad (23)$$

$$B_1 = \frac{2}{N_p} \sum_{j=N_C}^{N_C+N_p-1} x(j\tau) \sin(\omega j\tau) \quad (24)$$

برای اینکه دامنه و فاز سیگنال در هر لحظه مشخص باشد، باید ضرایب A_I و B_I در هر لحظه معلوم باشند، بنابراین معادلات فوق باید در مدت زمان فاصله بین دو نمونه محاسبه شوند اما این محاسبه به زمان نسبتاً زیادی نیاز دارد. برای حل این مشکل، نمونه‌های متوالی مرتبط با دو

معادله فوق که برابر $\frac{2}{N_p} x(j\tau) \cos(\omega j\tau)$ و $\frac{2}{N_p} x(j\tau) \sin(\omega j\tau)$ هستند، در دو آرایه ذخیره

۳-۵- تخمینگر شار استاتور و حل مشکل آفست dc

همان طور که گفته شد برای محاسبه شار مستقل از سرعت و مقاومت رتور از معادلات ولتاژ استاتور که در بخش ۲-۱ ارائه شد استفاده می شود. با وجود سادگی، این روش به دلیل استفاده از انتگرالگیر خالص با چند مشکل روبه رو است. مهمترین مشکل ناشی از وجود آفست dc در ورودی انتگرالگیرها است. آفست به دلیل وجود المانهای آنالوگ در سیستم و همچنین خطاهای محاسباتی به وجود می آید و هر چند کوچک، باعث شارژ شدن خروجی انتگرالگیر می شود. چنانچه مقداری dc به صورت دائمی در ورودی انتگرالگیر وجود داشته باشد، dc خروجی انتگرالگیر نسبت به سیگنال اصلی به شدت افزایش می یابد، به طوری که سیگنال اصلی از آن قابل تفکیک نبوده و تخمینگر و در نتیجه کل سیستم دچار مشکل می شود.

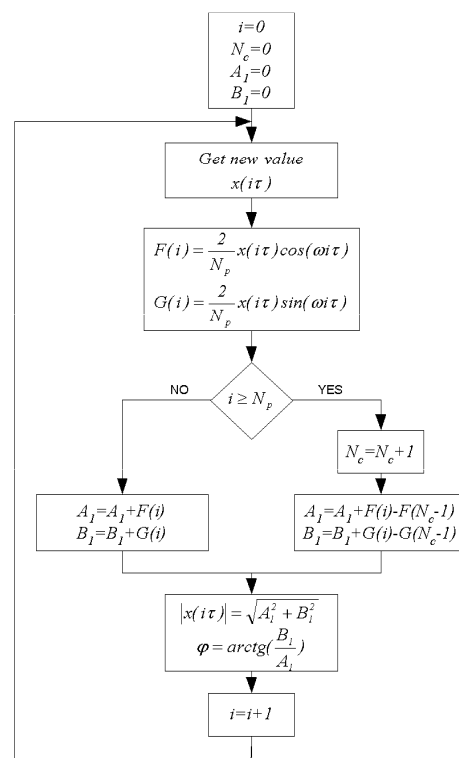
برای حل مشکل آفست، از انتگرالگیر اصلاح شده که در [۲۰] ارائه شده، استفاده شد. ساختار این روش در شکل (۴) نشان داده شده است.

در سیستم کنترل برداری شکل (۱)، جریان \hat{i}_{sx} با فرض ثابت بودن شار مرجع محاسبه می شود. اگر شار مرجع ثابت نباشد، جریان \hat{i}_{sx} از رابطه (۳) به صورت زیر به دست می آید:

$$\hat{i}_{sx} = \frac{1+T_r p}{1+T_r' p} \frac{|\psi_s|^*}{L_s} \quad (27)$$

مقاومت همواره مثبت است و نیازی به تعیین علامت ندارد. اگر از علامت رابطه (۱۳) برای سرعت تخمینی استفاده شود، در نقاطی که مشکل صفر/صفر وجود دارد علامت واقعی سرعت مشخص نمی شود. برای حل این مشکل از اختلاف فاز سیگنال صورت و مخرج استفاده می شود. این دو سیگنال یا همفازند یا اختلاف فاز ۱۸۰ درجه دارند. بنابراین علامت کسینوس اختلاف فاز سیگنال صورت و مخرج، علامت سرعت را مشخص می کند.

در این روش همان طور که دیده می شود، سرعت تخمینی به مقاومت رتور وابسته نیست، اما اگر در سیستم کنترل برداری از مقاومت رتور استفاده شده باشد، می توان از این مقاومت تخمینی استفاده کرد.



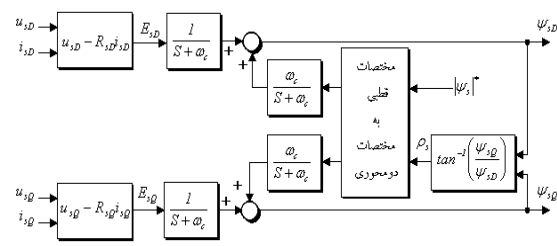
شکل ۳ روندنمای روش تبدیل فوریه استفاده شده در تخمین سرعت و مقاومت رتور

پایین، اندازه مقاومت استاتور استفاده شده در تخمینگر شار باید با مقدار واقعی آن برابر باشد. از سوی دیگر مقاومت استاتور به علت تغییر دمای ماشین تا ۵۰ درصد تغییر کرده و این باعث بروز خطا در تخمینگر شار می شود [۱۷]. این خطا به ویژه در سرعتهای پایین - که افت ولتاژ روی مقاومت استاتور در مقایسه با ولتاژ استاتور بزرگ است - اهمیت می یابد و می تواند تخمینگر و کل سیستم را دچار مشکل سازد. البته با استفاده از انتگرالگیرهای اصلاح شده، حساسیت تخمینگر شار نسبت به مقاومت استاتور کاهش می یابد اما باز هم به ویژه در فرکانسهای پایین، تغییر مقاومت استاتور باعث ایجاد خطا در شار تخمینی می شود. بنابراین برای عملکرد صحیح کنترل برداری و همچنین تخمینگر سرعت و مقاومت رتور لازم است مقاومت استاتور به روش مناسبی تخمین زده شود.

ساختار قالبی تخمینگر مقاومت استاتور در شکل (۵)

نشان داده شده است. تخمینگر شار استاتور، اندازه شار استاتور را با استفاده از ولتاژ و جریان استاتور تخمین می زند. این تخمینگر فقط به مقاومت استاتور وابسته است، بنابراین با استفاده از مقادیر واقعی جریان و ولتاژ در تخمینگر شار، خطای شار تخمینی فقط ناشی از خطای مقاومت استاتور استفاده شده در تخمینگر است و از خطای شار تخمینی نسبت به شار مرجع می توان برای تخمین مقاومت استاتور استفاده کرد.

اثر خطای مقاومت استاتور تخمینی وابسته است به علامت گشتاور و فرکانس تغذیه، در نتیجه خطای شار با توجه به شرایط کاری ماشین تغییر علامت می دهد [۱۷]. این تغییر علامت وابسته است به علامت $\omega_{ms} \times i_{sy}$ ، بنابراین علامت خطای شار تخمینی اصلاح شده و به تخمینگر فازی اعمال می شود. اندازه خطای



شکل ۴ ساختار قالبی تخمینگر شار اصلاح شده

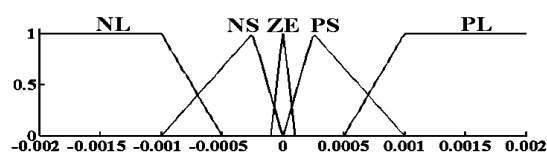
در سیستم پیشنهادی نیز، مانند سیستم کنترل برداری شکل (۱) از تقسیم شار مرجع بر اندوکتانس استاتور محاسبه می شود، البته در صورتی که شار مرجع مقداری ثابت و سینوسی باشد. اما شار مرجع مورد نیاز تخمینگر شار با توجه به رابطه (۲۷) از \hat{i}_{sx} و به صورت زیر به دست می آید:

$$|\psi_s|^* = \frac{1 + T_r' p}{1 + T_r p} L_s \hat{i}_{sx} \quad (28)$$

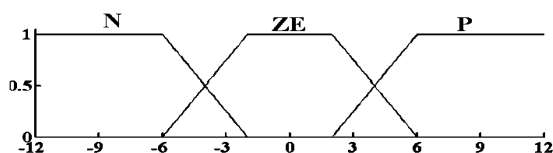
در واقع در این روش سیگنال اضافی به \hat{i}_{sx} اضافه شده و سپس شار مرجع متناسب با این سیگنال اضافی محاسبه شده و به تخمینگر شار اعمال می شود. بنابراین به دلیل استفاده از انتگرالگیر اصلاح شده توسط شار مرجع در تخمینگر شار، با اضافه کردن سیگنال اضافی، سیستم به مقاومت رتور وابسته می شود. البته با استفاده از روش پیشنهادی این وابستگی بسیار کم می شود اما برای تخمین دقیق سرعت بهتر است مقاومت رتور نیز تخمین زده شود.

۵-۴- تخمین مقاومت استاتور با استفاده از خطای شار تخمینی

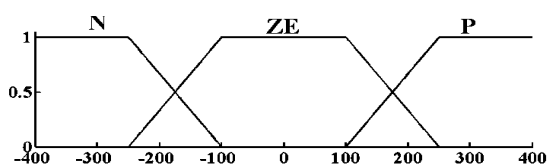
با توجه به روابط (۷) و (۸) مشخص است که برای تخمین دقیق شار و به ویژه عملکرد پایدار در سرعتهای



شکل ۶ توابع عضویت خطای شار

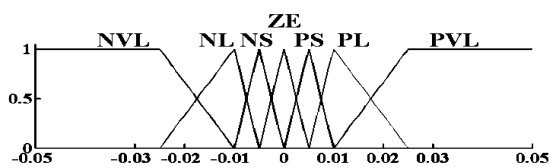


شکل ۷ توابع عضویت گشتاور مرجع



شکل ۸ توابع عضویت سرعت زاویه ای

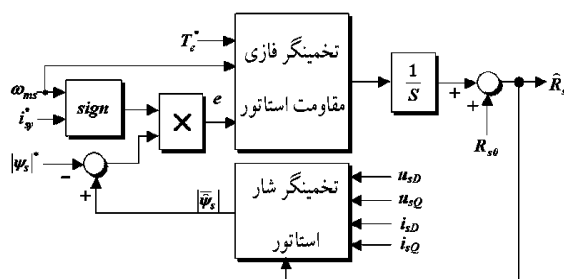
خروجی تخمینگر، تغییرات مقاومت استاتور است که توابع عضویت آن در شکل (۹) نشان داده شده است. برای خروجی هفت محدوده، NVL , VL , NS , ZE , PS , PL , PVL در نظر گرفته شده و محدوده تغییر آن -0.05 تا $+0.05$ است. با توجه به اینکه این خروجی تغییرات مقاومت استاتور را تعیین می‌کند، برای محاسبه مقاومت استاتور، از خروجی تخمینگر انتگرال گرفته شده و حاصل با مقدار اولیه مقاومت استاتور جمع می‌شود.



شکل ۹ توابع عضویت خروجی

تعداد قوانین فازی در مجموع برابر سی بوده و که در جدول (۱) آورده شده است. برای تعیین این قوانین از این

شار به فرکانس و گشتاور نیز وابسته است، به همین دلیل این دو کمیت نیز به عنوان ورودی به تخمینگر فازی اعمال می‌شوند.



شکل ۵ ساختار قالبی تخمینگر مقاومت استاتور

تخمینگر فازی سه ورودی دارد. ورودی اول خطای شار تخمینی است که علامت آن با توجه شرایط کاری ماشین اصلاح شده است. ورودی دوم گشتاور مرجع و ورودی سوم فرکانس زاویه‌ای بردار شار استاتور است. خروجی تخمینگر، تغییرات مقاومت استاتور است که با انتگرالگیری از آن و جمع با مقدار اولیه، مقاومت استاتور تخمین زده می‌شود.

توابع عضویت خطای شار تخمینی در شکل (۶) نشان داده شده است. این ورودی پنج محدوده، NL , NS , ZE , PS , PL دارد. محدوده خطای شار -0.002 و 0.002 در نظر گرفته شده است. در شکل (۷) توابع عضویت مربوط به ورودی دوم یعنی گشتاور مرجع نشان داده شده است. برای این ورودی سه محدوده مثبت، منفی و صفر و محدوده تغییر بین گشتاور مرجع، مثبت و منفی در نظر گرفته شده است. توابع عضویت استفاده شده برای این ورودی از نوع دوزنقه‌ای است. سرعت زاویه‌ای توابع عضویتی مطابق شکل (۸) دارد. محدوده تغییرات این ورودی -400 تا 400 رادیان بر ثانیه بوده و سه محدوده مثبت، منفی و صفر دارد.

آمده است، ارائه می‌شود. برای این منظور سیستم کنترل سرعت ماشین القایی به روش کنترل برداری مستقیم بدون استفاده از سنسور سرعت مطابق شکل (۱۰) مطالعه می‌شود.

در مرحله اول، فرکانس سیگنال اضافی برابر ۳۰ هرتز و دامنه آن برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است. در این صورت دامنه نوسان اندازه شار حدود ۴/۵ درصد شار نامی می‌شود. فرکانس استفاده شده برای تبدیل فوریه برابر ۳۰ هرتز در نظر گرفته شده است. در این شرایط نتایج شبیه‌سازی سیستم در شکل (۱۱) آورده شده است.

سرعت مرجع برابر ۵، ۱۸۰ و ۱۸۰- رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده است. گشتاور بار در سرعت‌های مختلف مقادیر صفر، ۱۲ و ۱۲- نیوتن-متر را داشته و این گشتاورها به صورت تغییرات پله‌ای به ماشین اعمال می‌شود.

همان‌طور که از شکل‌های (۱۱-الف) و (۱۱-ب) مشخص است، سیستم در تمامی شرایط موتوری و ژنراتوری عملکرد مطلوبی داشته و خطا در سرعت تخمینی در حالت پایدار کمتر از ۰/۱ رادیان بر ثانیه است. البته در هنگام تغییر سرعت، خطا تا حدود ۵ رادیان بر ثانیه افزایش می‌یابد اما در حالت پایدار خطا بسیار کم است. تخمینگر مقاومت استاتور نیز به خوبی عمل کرده است، (شکل‌های ۱۱-ه، و).

برای بررسی عملکرد تخمینگر مقاومت رتور، اندازه مقاومت واقعی رتور برابر ۰/۸ اهم در نظر گرفته شده که از ثانیه ۲ با شیب ثابت افزایش یافته و به مقدار ۱ اهم می‌رسد. همان‌طور که از نتایج ارائه شده در شکل‌های (۱۱-ز) و (۱۱-ح) مشخص است، تخمینگر به‌درستی

واقعیت استفاده شده که خطای شار به گشتاور و فرکانس تغذیه وابسته است. بنابراین برای فرکانس‌های بالا و همچنین برای گشتاورهای پایین و خطاهای کوچک ورودی نیز خروجی بزرگ در نظر گرفته شده است.

برای پیاده‌سازی تخمینگر از جعبه‌ابزار فازی متلب استفاده شده است. روش ممدانی به کار رفته و برای محاسبه خروجی از روش نافازی سازی مرکز ثقل استفاده شده است [۲۱].

جدول ۱ قوانین فازی تخمینگر مقاومت استاتور

ω_{ms} is ZE			
T_e	N	ZE	P
NL	NL	NVL	NL
NS	NL	NL	NS
ZE	ZE	ZE	ZE
PS	PS	PL	PS
PL	PL	PVL	PL
ω_{ms} is not ZE			
T_e	N	ZE	P
NL	NVL	NVL	NVL
NS	NL	NL	NL
ZE	ZE	ZE	ZE
PS	PL	PL	PL
PL	PVL	PVL	PVL

۸- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی سیستم در متلب برای ماشین القایی ۳ اسب بخار که مشخصات آن در ضمیمه

در شکل (۱۲) عملکرد سیستم در سرعت ۵ رادیان بر ثانیه نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود در هنگام اعمال گشتاور بار، به دلیل تأخیر ناشی از تخمینگر، سرعت نوسان‌هایی دارد. برای حل این مشکل می‌توان فرکانس سیگنال اضافی را افزایش داد اما این روش مناسبی نیست.

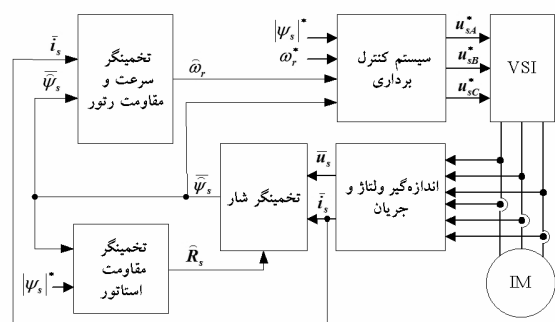
راه حل پیشنهادی دیگر آن است که فرکانس تبدیل فوریه دو برابر فرکانس سیگنال اضافی در نظر گرفته شود. به بیانی دیگر سیگنال اضافی با فرکانس ۳۰ هرتز به سیستم اعمال شده و در تخمینگر سرعت و مقاومت رتور، فرکانس تبدیل فوریه برابر ۶۰ هرتز در نظر گرفته شود. دلیل این انتخاب آن است که دو سیگنالی که از روی نسبت آنها سرعت تخمین زده می‌شود، سینوسی و همفازند. بنابراین با دو برابر کردن فرکانس تبدیل فوریه، تغییر در صورت و مخرج یکسان بوده و لذا تغییری در مقدار سرعت تخمین ایجاد نمی‌شود اما به دلیل دو برابر شدن فرکانس تبدیل فوریه، سرعت تخمینگر افزایش یافته و تغییرات سرعت را بهتر دنبال می‌کند.

در شکل (۱۳) نتایج شبیه‌سازی برای حالتی که فرکانس سیگنال اضافی برابر ۳۰ هرتز و فرکانس تبدیل فوریه برابر ۶۰ هرتز بوده نشان داده شده است. همانطور که می‌بینیم سرعت تخمینگر بهبود یافته و حالت‌های گذرا در هنگام اعمال گشتاور بار کمتر شده است. به این روش هم تغییرات سرعت در هنگام تغییرات بار کاهش یافته و هم سرعت، سریعتر به حالت پایدار خود می‌رسد. خطای سرعت در حالت پایدار کمتر از ۰/۱ رادیان بر ثانیه بوده و در حالت‌های گذرا نیز در حدود ۳ رادیان بر ثانیه است.

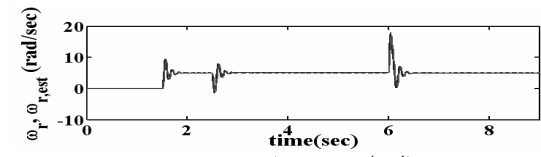
عمل کرده و مقاومت تخمینی به‌خوبی مقاومت واقعی را دنبال می‌کند. خطای مقاومت تخمینی در سرعت‌های مختلف کمتر از ۰/۱ درصد است.

همان‌طور که پیشتر گفته شد، در این روش مقاومت رتور تخمینی فقط برای تعیین شار مرجع در بلوک تخمینگر شار مورد نیاز است و تأثیر چندانی بر عملکرد سیستم ندارد. در نتایج ارائه شده، مقدار اولیه مقاومت رتور استفاده شده در سیستم برابر ۰/۶ اهم در نظر گرفته شده و در زمان ۰/۷ ثانیه، مقاومت رتور تخمینی به سیستم اعمال شده است.

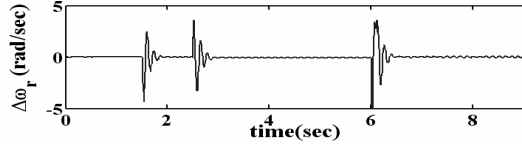
مقاومت استاتور نیز به‌طور همزمان با سرعت تخمین زده می‌شود که نتایج در شکل‌های (۱۱-ه) و (۱۱-و) آورده شده است. در این حالت مقاومت استاتور ماشین برابر ۰/۴ اهم در نظر گرفته شده که از ثانیه ۲ با شیب ثابت افزایش یافته و به ۰/۵ اهم می‌رسد. مقدار اولیه مقاومت استاتور که در سیستم کنترل و تخمینگر مقاومت استفاده شده، برابر ۰/۳۵ اهم است. دیده می‌شود که تخمینگر به‌خوبی مقاومت واقعی را تخمین زده و تغییرات آن را دنبال می‌کند.



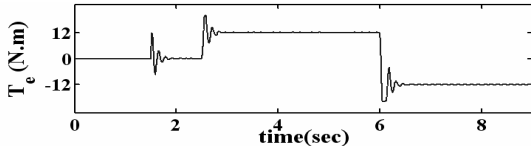
شکل ۱۰ بلوک دیاگرام نهائی سیستم کنترل سرعت ماشین القایی



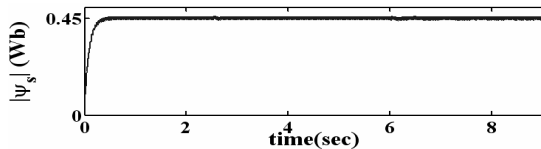
الف) سرعت واقعی و تخمینی



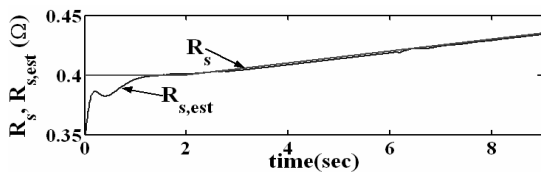
ب) خطای سرعت تخمینی



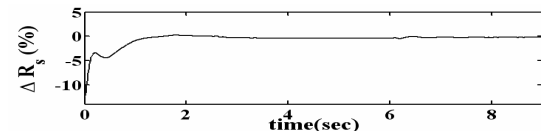
ج) گشتاور الکتریکی



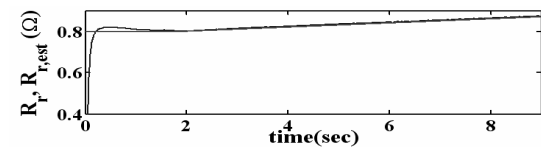
د) اندازه شار استاتور



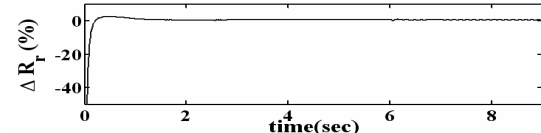
ه) مقاومت استاتور واقعی و تخمینی



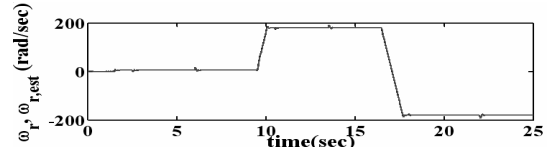
و) درصد خطای مقاومت استاتور تخمینی



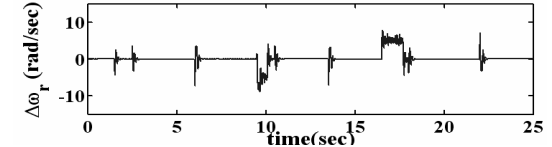
ز) مقاومت رتور واقعی و تخمینی



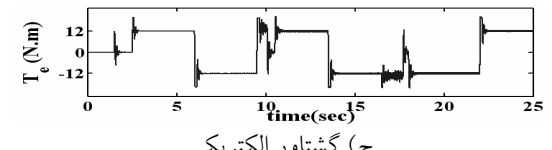
ح) درصد خطای مقاومت رتور تخمینی



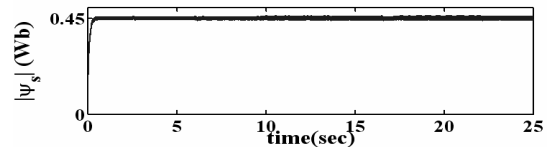
الف) سرعت واقعی و تخمینی



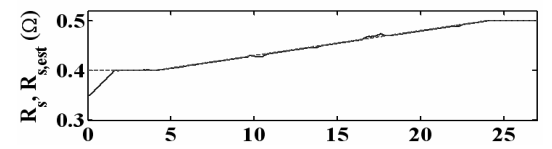
ب) خطای سرعت تخمینی



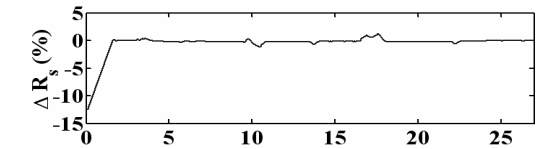
ج) گشتاور الکتریکی



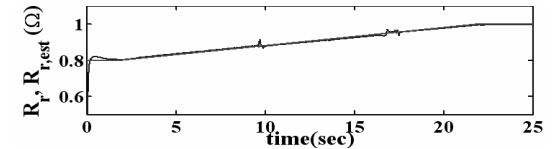
د) اندازه شار استاتور



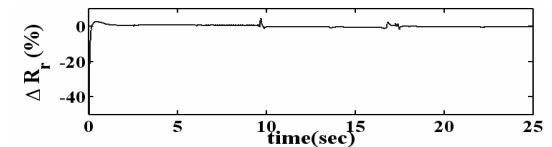
ه) مقاومت استاتور واقعی و تخمینی



و) درصد خطای مقاومت استاتور تخمینی



ز) مقاومت رتور واقعی و تخمینی



ح) درصد خطای مقاومت رتور تخمینی

شکل ۱۲ نتایج شبیه سازی در شرایط تخمین سرعتی پایین با استفاده

از روش پیشنهادی و فرکانس تبدیل فوری برابر ۳۰ هرتز

شکل ۱۱ نتایج شبیه سازی در شرایط تخمین سرعت با استفاده از

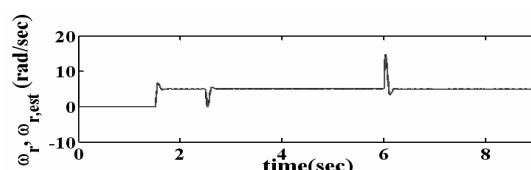
روش پیشنهادی و فرکانس تبدیل فوری برابر ۳۰ هرتز

۸- نتیجه گیری

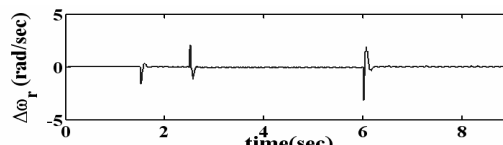
در این مقاله کنترل دور ماشین القایی بدون سنسور سرعت مطالعه شد. برای این منظور ابتدا شرایط تخمین سرعت مستقل از مقاومت رتور یا تخمین همزمان سرعت و مقاومت رتور مطالعه شد. سپس روش مبتنی بر معادلات ولتاژ رتور ارائه و مشکلات آن بررسی شد. در ادامه روشی برای تخمین همزمان سرعت و مقاومت رتور ارائه شد. برای این منظور یک سیگنال سینوسی به شار مرجع اضافه شده و با استفاده از تبدیل فوریه، سرعت و مقاومت رتور تخمین زده شد. برای تخمین شار ماشین از انتگرالگیری اصلاح شده استفاده و مقاومت استاتور نیز به کمک سیستمی فازی تخمین زده شد. در پایان عملکرد سیستم کنترل برداری بدون سنسور سرعت همراه با تخمین همزمان مقاومتهای رتور و استاتور با استفاده از نتایج شبیه‌سازی بررسی شد. این سیستم در شرایط موتور و ژنراتوری، برای سرعت‌های مختلف و گشتاورهای مختلف بار به خوبی رفتار کرده و دقت قابل قبولی دارد. با توجه به اینکه روش پیشنهادی نسبت به روشهای تخمین حلقه بسته مانند مشاهده‌گرها به محاسبات کمتری نیاز دارد و همچنین پارامترهای مهم ماشین - شامل مقاومت استاتور و مقاومت رتور - را نیز به‌طور همزمان تخمین می‌زند، این روش برای سیستمهای کنترل دور ماشین القایی بدون سنسور سرعت مناسب بوده و عملکرد مطلوبی دارد.

۹- فهرست علائم

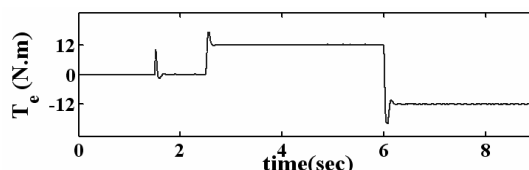
u_{sD}, u_{sQ}	مؤلفه‌های ولتاژ استاتور در مختصات ساکن
i_{sD}, i_{sQ}	مؤلفه‌های جریان استاتور در مختصات ساکن
ψ_{sD}, ψ_{sQ}	مؤلفه‌های شار استاتور در مختصات ساکن
ψ_{rD}, ψ_{rQ}	مؤلفه‌های شار رتور در مختصات ساکن



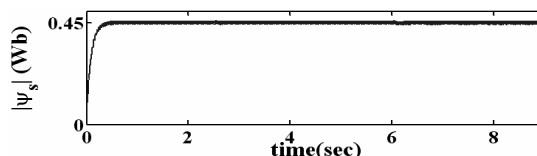
الف) سرعت واقعی و تخمینی



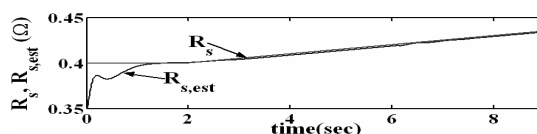
ب) خطای سرعت تخمینی



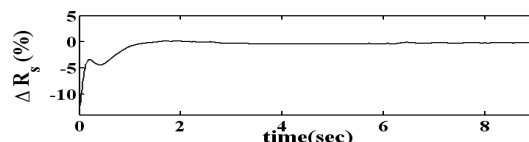
ج) گشتاور الکتریکی



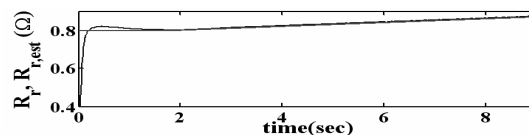
د) اندازه شار استاتور



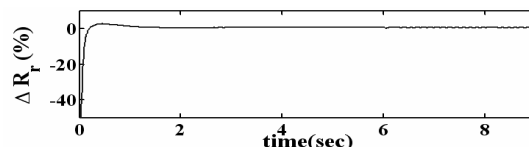
ه) مقاومت استاتور واقعی و تخمینی



و) درصد خطای مقاومت استاتور تخمینی



ز) مقاومت رتور واقعی و تخمینی



ح) درصد خطای مقاومت رتور تخمینی

شکل ۱۳ نتایج شبیه‌سازی در شرایط تخمین سرعت‌های پایین با استفاده از روش پیشنهادی و فرکانس تبدیل فوریه برابر ۶۰ هرتز

- Control*, Oxford University Press, 1998.
- [2] Trzynadlowski, A. M., *Control of Induction Motors*, Academic Press, 2001.
- [3] Ilaş, C., Bettini, A., Ferraris, L., Griva, G., Profumo, F., "Comparison of Different Schemes without Shaft Sensors for Field Oriented Control Drives", Conf. Rec. of the Ind. Appl. Society Annual Meeting, Vol. 4, 1994, pp. 1579-1588.
- [4] Senjyu T., Ochi Y., Kikunaga Y., "Sensor-less Maximum Power Point Tracking Control for Wind Generation System with Squirrel Cage Induction Generator", *Renewable Energy*, Vol. 3, 2009, pp. 994-999.
- [5] Bhattacharya, T. Umanand, L., "Rotor Position Estimator for Stator Flux-oriented Sensorless Control of Slip Ring Induction Machine", *Electric Power Applications*, IET, Vol. 3, 2009, pp. 67-76.
- [6] Ba-Razzonk, A., Cheriti, A., Sicard, P., "Implementation of a DSP Based Real-Time Estimator of Induction Motors Rotor Time Constant", *IEEE Trans. Power Elec.*, Vol. 17, No. 4, 2002, pp. 534-542.
- [7] Marino, R., Peresada, S., Tomei, D., "On-Line Stator and Rotor Resistance Estimation for Induction Motors", *IEEE*
- مؤلفه‌های جریان رتور در مختصات ساکن i_{rd}, i_{rq}
- مؤلفه‌های ولتاژ استاتور در مختصات سنکرون u_{sx}, u_{sy}
- مؤلفه‌های جریان استاتور در مختصات سنکرون i_{sx}, i_{sy}
- اندازه شار استاتور $|\psi_s|$
- بردار فضایی جریان رتور در مختصات ساکن \vec{i}'_r
- بردار فضایی شار رتور در مختصات ساکن $\vec{\psi}'_r$
- گشتاور الکترومغناطیسی T_e
- سرعت چرخش رتور ω_r
- سرعت سنکرون ω_{ms}
- فرکانس لغزش ω_{sl}
- مقاومت استاتور R_s
- اندوکتانس استاتور L_s
- مقاومت رتور R_r
- اندوکتانس رتور L_r
- اندوکتانس مغناطیس‌کننده L_m
- اندوکتانس گذرای استاتور L'_s
- ثابت زمانی گذرای استاتور T'_r
- تعداد زوج قطب P

۱۰- پیوست

مشخصات ماشین القایی استفاده شده در شبیه‌سازی [۲۲]

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

۱۱- منابع

- [1] Vas, P.,
- Sensorless Vector and Torque*

- [13] Akatsu, K., Kawamura, A., "Sensorless Very Low-Speed and Zero-Speed Estimations with Online Rotor Resistance Estimation of Induction Motor without Signal Injection", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 36, No. 3, 2000, pp. 764-771.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Ilas, C., Griva, G., Profumo, F., "Wide Range Speed Sensorless Induction Motor Drives with Rotor Resistance Adaptation", Conference Record PEDES'96, India, 1996, pp. 211-215.
- [17] ابراهیمی محمد، رضائی اسماعیل؛ «تخمین مقاومت استاتور در کنترل برداری مستقیم جهت کنترل دقیق گشتاور موتور القایی در شرایط کاری مختلف»؛ مجله فنی و مهندسی مدرس؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ ۱۳۸۶
- [18] رضائی اسماعیل، شیخ الاسلام فرید، ابراهیمی محمد؛ «تخمینگر فازی مقاومت استاتور جهت کنترل گشتاور موتور القایی با روش کنترل برداری مستقیم»؛ Trans. Cont. Sys. Tech., Vol. 8, No. 3, 2000, pp. 570-579.
- [8] Umanand, L., Bhat, S. R., "Adaptation of the Rotor Time Constant for Variation in the Rotor Resistance of an Induction Motor", Proceeding IEEE, Vol. 1, 1994, pp. 738-743.
- [9] Cardenas, R., Pena, R., "Sensorless Vector Control of Induction Machines for Variable-Speed Wind Energy Applications", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, 2004, pp. 196-205.
- [10] Kanmachi, T., Takahashi, I., "Sensorless Speed Control of an Induction Motor with No Influence of Secondary Resistance Variation", in Proceedings of IEEE Ind. Appl. Society Annual Meeting, 1993, pp. 408-413.
- [11] Pana, T., "Sensorless Vector-Controlled Induction Motor Drive System with Rotor Resistance Estimation Using Paralled Processing with Floating Point DSP", IEEE-IECON97, 1997, pp. 948-953.
- [12] Wang, W., Li, Y., Li, M., Dong, L., "Identification of Rotor Resistance for Induction Motor with Injection of Torque Disturbance", Proceedings of IEEE Ind. Appl. Annual Conference, 2001, pp. 2048-2053.

- Ind. Appl., Vol.28, No. 1, 1992, pp. 157-164.
- [21] A. Zilouchian and M. Jamshidi, *Intelligent Control Systems Using Soft Computing Methodologies*, CRC Press, 2001.
- [22] Krause, P. C., *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill International, 1987.
- شانزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران؛ دانشگاه تربیت مدرس ایران؛ ۱۳۸۷
- [19] El-habrouk, M., Darwish, M.K., "Design and Implementation of a Modified Fourier analysis Harmonic Current Computation Technique for Power Active Filters Using DSPs", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 148, No. 1, 2001, pp. 21-28.
- [20] Ohtani, T., Takada, N., Tanaka, K., "Vector Control of Induction Motor Without Shaft Encoder", IEEE Trans.