

تخمین سرعت در ماشینهای ترکشن القایی با استفاده از فیلتر کالمن تعمیم یافته (EKF)

مهرداد نزهتی شعاری mnezhati@yahoo.com

دانشجوی مقطع فوق لیسانس مهندسی راه آهن برقی

دانشکده راه آهن - دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده: سادگی کنترل و ارزانی پیاده سازی روشهای کنترلی موتورهای DC و از سوی دیگر پیچیدگیهای روشهای کنترلی برای موتورهای القایی در کاربردهای سرعت متغیر باعث شد که سالها موتورهای ترکشن DC در صنعت راه آهن به عنوان انتخاب اول مطرح باشند. در سالهای اخیر و با توجه به پیشرفت های انجام شده در زمینه نیمه هادی، تولید مدولار قطعات و تجهیزات الکترونیکی، ارزان شدن هزینه های پیاده سازی و به بازار آمدن ریزپردازنده های قدرتمند با قابلیت های کنترلی مناسب، این امکان پدید آمده است که بتوان کنترل بسیار پیچیده ماشینهای القایی را در کاربردهای سرعت متغیر بصورت ساده تر و اقتصادی تری پیاده سازی نمود. روشهای کنترل برداری امروزه بطور گسترده ای اتخاذ میشوند. در این روشها از یک سنسور سرعت برای فیدبک گرفتن از متغیر سرعت ماشین استفاده میشود. با توجه به محیط پرلغزش، شرایط دمایی نامناسب و... استفاده از روشهای کنترل برداری سنسورلس امروزه مورد توجه قرار گرفته اند. در این روشها به جای استفاده از سنسور سرعت، متغیر سرعت را با تکنیکهای خاصی محاسبه میکنند. یکی از ساده ترین روشها استفاده از رویتگرهای لیونبرگر یا فیلترهای کالمن است. در این مقاله از یک فیلتر کالمن تعمیم یافته (EKF) برای تخمین سرعت یک ماشین القایی استفاده شده است. شبیه سازی ها در محیط سیمولینک انجام شده و تمامی پارامترهای تخمین زده شده با مقادیر اصلی مقایسه شده و تطابق مناسبی مشاهده شده است.

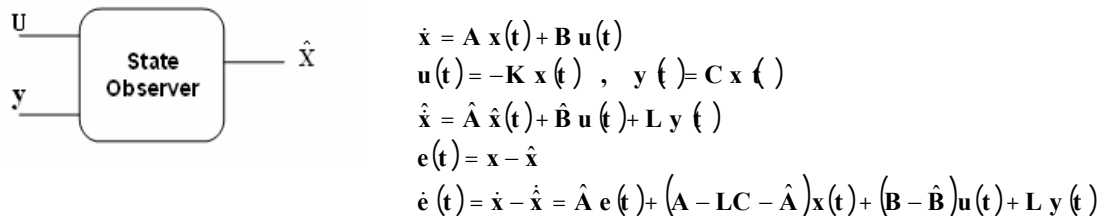
لغات کلیدی: کنترل سنسورلس - تخمین متغیرهای حالت - رویتگرهای لیونبرگر - فیلتر کالمن تعمیم یافته

۱- مقدمه: سیستم دینامیکی ای که متغیرهای حالت آن تخمینی از متغیرهای حالت سیستم دیگری باشد، را رویتگر آن سیستم نامند [۱]. این عبارت اولین بار توسط لیونبرگر استفاده شد. وی نشان داد که برای یک سیستم رویت پذیر میتوان رویتگری طرح کرد که خطای تخمین آن با هر سرعت دلخواهی صفر گردد [۱]. رویتگرها دارای دو

ورودی هستند که ورودی و خروجی سیستم اصلی اند و یک خروجی دارند که تخمینی از متغیرهای حالت سیستم اصلی است.

۱-۱- ساختار و خواص رویتگرها: معادلات حالت سیستم اصلی و سیستم رویتگر را بصورت زیر در نظر

بگیرید:



برای آنکه مستقل از وضعیت حالات x و ورودی u (که خود بردار فیدبک حالت است)، خطای رویت بطور مجانبی صفر شود لازم است که ضرایب این جملات ورودی و خروجی صفر شود [۱]:

$$\hat{A} = A - LC, \hat{B} = B$$

مشاهده میشود که انتخاب ماتریس \hat{B} دلخواه نبوده و \hat{A} نیز پس از انتخاب L تعیین میشود. لذا فقط L در اختیار

است. معادله خطای رویت پس از انتخاب مناسب L بصورت زیر است:

$$\dot{e} = \hat{A} e(t)$$

برای صفر شدن خطا بصورت مجانبی لازم است که \hat{A} ماتریسی پایدار باشد. یعنی مقادیر ویژه آن در سمت چپ محور موهومی قرار گیرند. برای همگرایی سریعتر لازم است که قطبهای رویتگر- که همان مقادیر ویژه ماتریس \hat{A} هستند- در فواصل دورتری نسبت به محور موهومی باشند که این خود باعث بزرگ شدن بهره ماتریس L شده و حساسیت به نویز را زیاد میکند.

۱-۲- فیلتر کالمن: در ادامه فرض کنید که اطلاعات مخدوش به نویز باشد. همانطوریکه اشاره شد، L در

رفتار سیستم با نویز بسیار تاثیرگذار است. در این موارد باید مصالحه ای برای بزرگ بودن بهره L و اثرات نویز داشت. رویتگری که ورودیهای تصادفی و آلوده به نویز داشته باشد فیلتر کالمن نامیده میشود. با فرض V و W به عنوان بردارهای نویز ورودی و اندازه گیری، معادلات حالت را میتوان بصورت زیر نوشت [۱]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A x(t) + B [u(t) + v(t)] \\ u(t) &= -K x(t), \quad y(t) = C x(t) + w(t) \end{aligned}$$

فرض میشود که درایه های بردارهای V و W نویزهای سفید هستند. هرچفت درایه ای از هم مستقل و لذا ناهمبسته اند. بنابراین در باب همبستگی آنها میتوان نوشت:

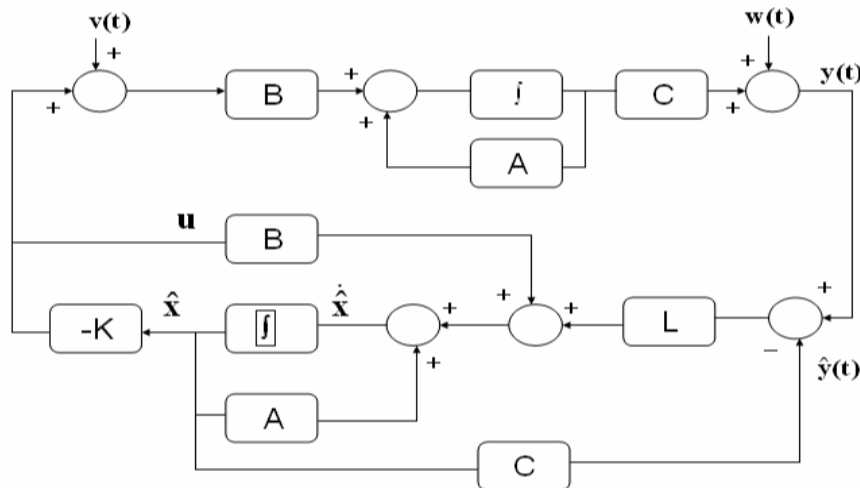
$$\begin{aligned} \Phi_{vw}(\tau) &= E [v(t) w^T(t + \tau)] = 0 \\ \Phi_{vv}(\tau) &= E [v(t) v^T(t + \tau)] = Q \delta(\tau) \\ \Phi_{ww}(\tau) &= E [w(t) w^T(t + \tau)] = R \delta(\tau) \end{aligned}$$

که در آن δ و τ به ترتیب تابع ضربه و فاصله بین نمونه برداریهای متوالی است.

رویه فیلتر کالمن در بلوک دیاگرام شکل ۱ نشان داده شده است. هدف تعیین حالات از ورودیهای آلوده به نویز

است که در واقع نمایشی از معادله زیر در بخش تخمین حالت است:

$$\dot{\hat{x}} = A \hat{x}(t) + B u(t) + L[y(t) - C \hat{x}(t)]$$



شکل ۱- نمایش بلوک دیاگرامی فیلتر کالمن

۳-۱- عوامل تاثیرگذار در دقت تخمین سرعت: این عوامل را میتوان بصورت زیر لیست نمود:

الف: تغییرپذیری پارامترهای ماشین با زمان

ب: تغییرپذیری ثابتهای زمانی استاتور و رتور

ج: تغییرات مقاومت استاتور

موثرترین عامل، تغییر مقاومت استاتور است که خصوصاً در سرعتهای پایین مشکلساز میشود [۲]. رویه هایی

مشابه با رویه تخمین سرعت و بصورت سنسورلس برای تخمین مقاومت استاتور اختیار میشود. با رابطه زیر تخمینی از

مقاومت استاتور بدست می آید:

$$\Delta A_{R_s} = \begin{bmatrix} \frac{I_2}{L_s'} & O_2 \\ O_2 & O_2 \end{bmatrix}$$

$$\hat{R}_s = -K_p' (e_{sd} \hat{i}_{sd} - e_{sq} \hat{i}_{sq}) + K_i' \int (e_{sd} \hat{i}_{sd} - e_{sq} \hat{i}_{sq}) dt$$

با استفاده توام رویه تخمین مقاومت و رویه های کنترل گشتاور، درایور میتواند حتی در سرعتهای پایین بطور

مناسبی پاسخ دهد.

۲- اعمال و کاربرد EKF روی ماشینهای القایی: با توجه به ماهیت آماری الگوریتم EKF، ورودیهای آلوده

به نویز و همچنین خطاهای مدلسازی پوشش داده میشوند. علاوه بر آن در رویتگرها سرعت در ماتریس حالت، خود

یک پارامتر است و حال آنکه در فیلتر کالمن سرعت بصورت یک متغیر حالت مطرح میشود. اعمال EKF شامل دو فاز

اصلی است. در مرحله اول، متغیرهای حالت با استفاده از یک مدل محاسباتی پیش بینی شده و در مرحله دوم مقادیر بدست آمده از مرحله اول با استفاده از طرح تصحیح فیدبک بطور پیوسته اصلاح میشوند. مراحل EKF در تخمین سرعت عبارتند از:

- انتخاب مدلی در حوزه زمان برای ماشین القایی

- گسسته سازی مدل

- تعیین ماتریسهای کواریانس حالت و نویزهای ورودی و خروجی (P,Q,R)

- پیاده سازی الگوریتم گسسته سازی شده EKF و تنظیم؛ ذیلاً هر مرحله تشریح میشود.

۲-۱: انتخاب مدلی در حوزه زمان برای ماشین القایی: مدل‌های گوناگونی در فریمهای مرجع متفاوت برای

ماشین القایی وجود دارد. ولی به دلیل مزایای زیر از فریم مرجع ایستان در استاتور استفاده میکنیم:

(۱) کاهش زمان محاسبات به دلیل کاهش اثرات غیرخطی

(۲) زمانهای کوچکتر نمونه برداری

(۳) دقت بالاتر و رفتار پایداری بهتر و مناسبتر

معادلات در فریم مرجع ایستان استاتور بصورت زیر قابل بیان است (۲) و (۳):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sD} \\ i_{sQ} \\ \psi_{rD} \\ \psi_{rQ} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s^*} & 0 & \frac{L_m}{L_r T_r L_s'} & \frac{\omega_r L_m}{L_s' L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_s^*} & -\frac{\omega_r L_m}{L_s' L_r} & \frac{L_m}{L_r T_r L_s'} & 0 \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & \frac{-1}{T_r} & -\omega_r & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & \omega_r & \frac{-1}{T_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sD} \\ i_{sQ} \\ \psi_{rD} \\ \psi_{rQ} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s'} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s'} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sD} \\ u_{sQ} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{sD} \\ i_{sQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sD} & i_{sQ} & \psi_{rD} & \psi_{rQ} & \omega_r \end{bmatrix}^T \\ = C \begin{bmatrix} i_{sD} & i_{sQ} & \psi_{rD} & \psi_{rQ} & \omega_r \end{bmatrix}^T$$

where T_s^* is defined as :

$$\frac{1}{T_s^*} = \frac{1}{T_s'} + \frac{1-\sigma}{T_r'} = \frac{R_s + R_{rref}}{L_s'}$$

۲-۲: گسسته سازی مدل: از مدل گسسته شده زیر استفاده میشود:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k)$$

$$\mathbf{A}_d \approx \exp(\mathbf{A}T) \approx \mathbf{I}_4 + \mathbf{A}T + \frac{(\mathbf{A}T)^2}{2}$$

$$\mathbf{B}_d \approx \mathbf{B}T + \frac{\mathbf{A}\mathbf{B}T^2}{2}$$

با صرفنظر کردن از جملات مرتبه دوم به بالا داریم [۴]:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k)$$

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T}{T_s} & 0 & \frac{T L_m}{L_r T_r L_s'} & \frac{\omega_r T L_m}{L_s' L_r} & 0 \\ 0 & 1 - \frac{T}{T_s} & -\frac{\omega_r T L_m}{L_s' L_r} & \frac{T L_m}{L_r T_r L_s'} & 0 \\ T \frac{L_m}{T_r} & 0 & 1 - \frac{T}{T_r} & -T \omega_r & 0 \\ 0 & T \frac{L_m}{T_r} & T \omega_r & 1 - \frac{T}{T_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} \frac{T}{L_s'} & 0 \\ 0 & \frac{T}{L_s'} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}(k) = [\mathbf{i}_{sD}(k) \quad \mathbf{i}_{sQ}(k) \quad \psi_{rD}(k) \quad \psi_{rQ}(k) \quad \omega_r(k)] \quad \mathbf{u}(k) = [\mathbf{u}_{sD}(k) \quad \mathbf{u}_{sQ}(k)]$$

با درنظر گرفتن نویز های پروسه و اندازه گیری معادلات به فرم زیر در می آید:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) + \mathbf{v}(k)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k)$$

۳-۲- تعیین ماتریسهای کواریانس حالت و نویز (P,Q,R): در مرحله اول فیلتر کالمن- پیشگویی

حالات- مقادیر جدید حالات یعنی $\mathbf{x}(k+1)$ با استفاده از مدل ریاضی و مقادیر قبلی حالات بدست می آیند. علاوه بر آن، ماتریس کواریانس پیش بینی شده \mathbf{P} قبل از انجام اندازه گیریهای جدید تولید میشود و به این منظور مدل ریاضی و ماتریس کواریانس سیستم \mathbf{Q} مورد استفاده قرار میگیرد. در مرحله دوم- فیلترینگ- حالات تخمینی جدید یعنی $\hat{\mathbf{x}}(k+1)$ از تخمین پیشگویی شده $\mathbf{x}(k+1)$ بعلاوه یک عبارات اصلاحی بدست می آید. ماتریس بهره کالمن طوری تعیین میشود که واریانس تخمین حالات را کمینه سازد.

بخش مهم الگوریتم، مقداردهی اولیه به ماتریسهای کواریانس است. این را میتوان از ملاحظه مشخصات آماری نویزهای موجود بررسی نمود.

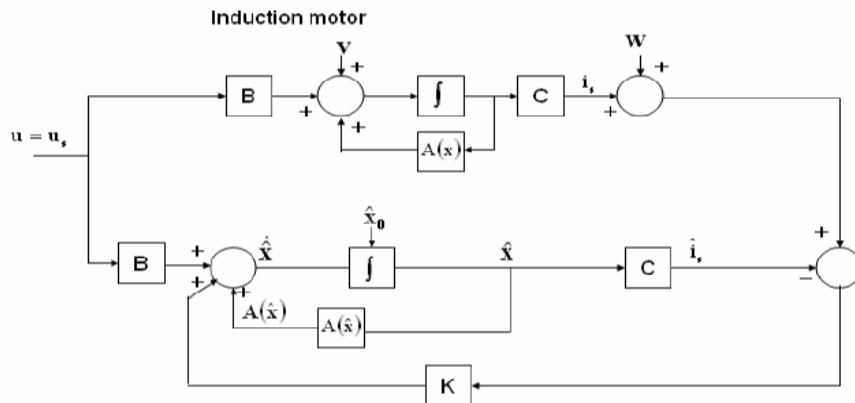
۴-۲: پیاده سازی الگوریتم گسسته سازی شده EKF و تنظیم: در مرحله پیشگویی، حالات پیش بینی

شده و نیز ماتریس کواریانس \mathbf{P}^* پیشگویی شده بدست می آیند. بدین منظور از معادلات فضای حالت ماشین و ماتریس کواریانس سیستم استفاده میشود. در خلال مرحله فیلترینگ، $\hat{\mathbf{x}}$ از تخمینهای پیش بینی شده و با افزودن عبارات اصلاحی به \mathbf{x}^* بدست می آید. این عبارات اصلاحی $\mathbf{ke} = \mathbf{k}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})$ است که در آن $\mathbf{e} = (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})$ یک عبارت

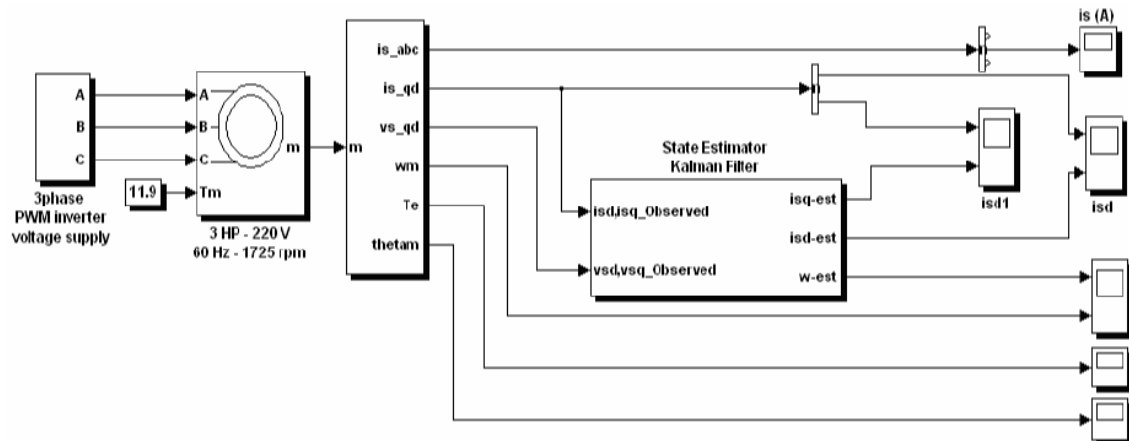
خطاست و از جریانهای استاتور استفاده میکند. این خطا در EKF کمینه میشود. معادله EKF عبارتست از:

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + k(i_s - \hat{i}_s)$$

در شکل زیر ساختار EKF نشان داده شده است.



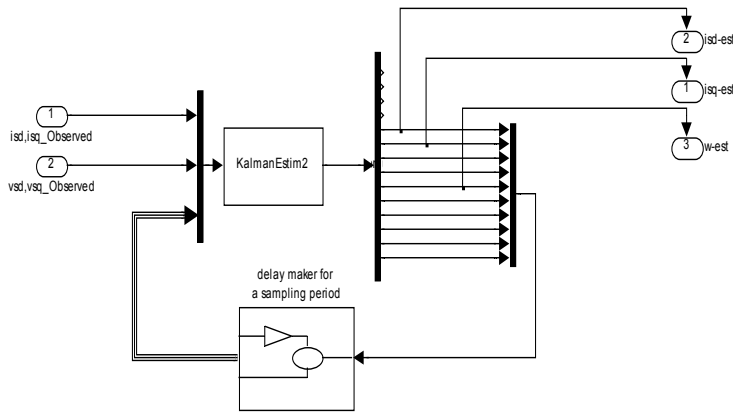
شکل ۲- نمایش بلوک دیاگرامی اعمال فیلتر کالمن به یک ماشین القایی



شکل ۳- نمایش بلوک دیاگرامی شبیه سازی انجام شده از اعمال فیلتر کالمن به یک ماشین القایی در محیط سیمولینک

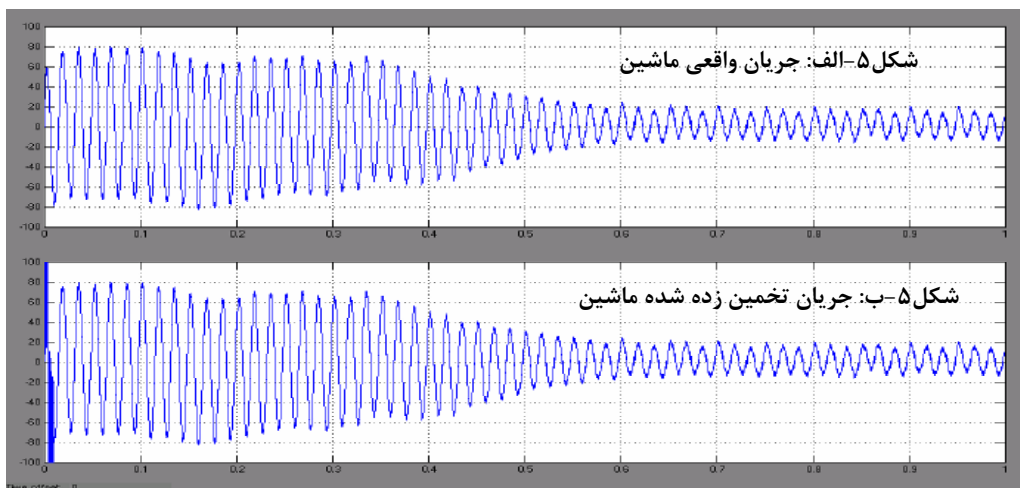
۳- شبیه سازی به کمک نرم افزار متلب: در شبیه سازی به کمک نرم افزار متلب، ابتدا یک ماشین القایی

با یک اینورتر از نوع PWM مطابق شکل تغذیه شده است. سپس کمیت های جریان استاتور و ولتاژ آن به عنوان کمیات مشاهده شده به بلوک تخمین زننده حالت فیلتر کالمن تحویل شده است. در این بلوک مدل مرتبه پنجم ماشین القایی مورد استفاده قرار گرفته است. خروجی این بلوک تخمین متغیرهای حالت جریان استاتور (مولفه های d و q)، شار استاتور (مولفه های d و q) و سرعت رتور است. زیر سیستم فیلتر کالمن از دو واحد اصلی تشکیل شده که یکی بلوک S-Function تعریف شده برای فیلتر کالمن و دیگری بلوک تاخیر است.

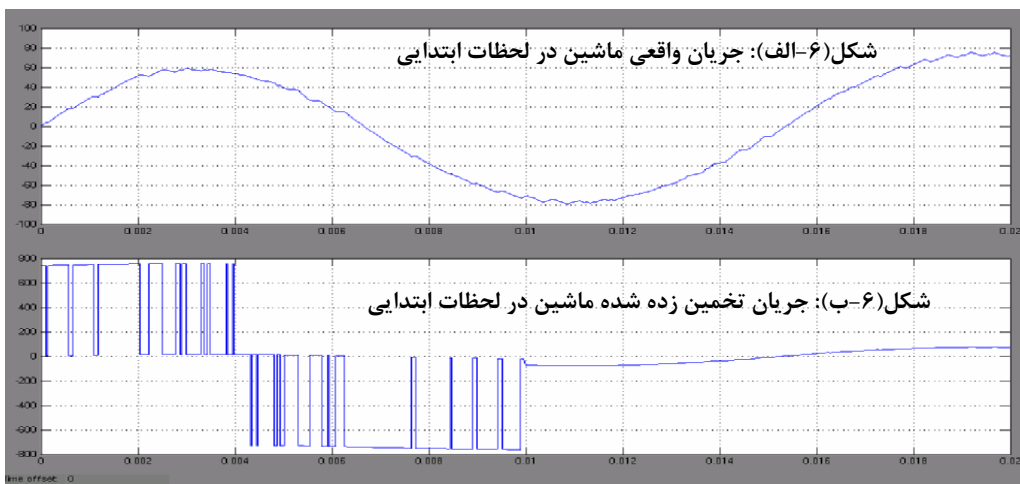


شکل ۴- نمایش بلوک دیاگرامی واحد تخمینگر حالت فیلتر کالمن

در شکل ۵ جریان مشاهده شده و واقعی ماشین با جریان تخمینی مقایسه شده است. در شکل ۶، دو جریان اصلی و تخمینی در لحظات ابتدایی نشان داده شده اند. مشاهده میشود که علی رغم عدم تطابق مناسب در لحظات اولیه پاسخهای خوبی در محدوده زمانی بسیار کوتاه کمتر از چند صدم ثانیه حاصل آمده که حاکی از همگرایی سریع است.

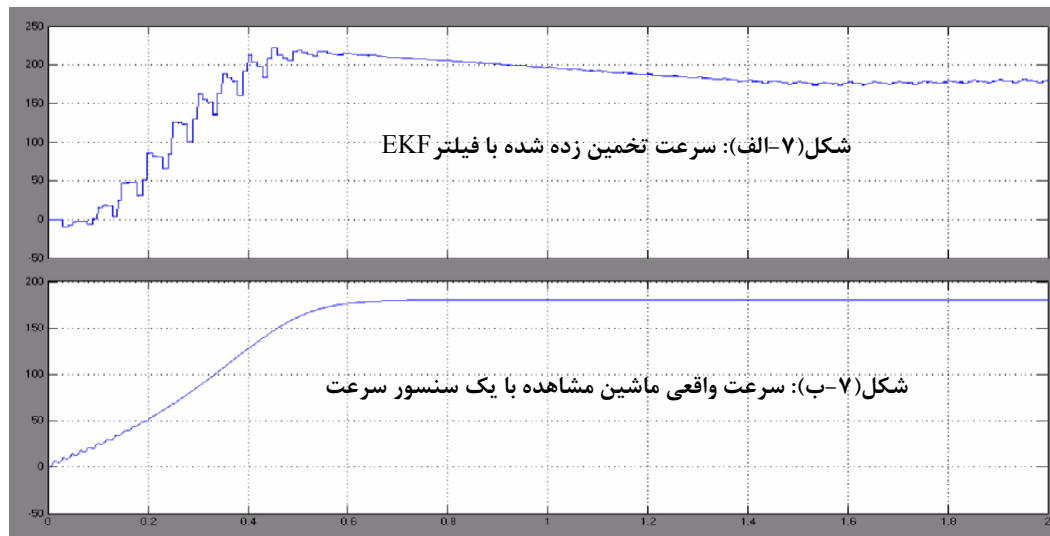


شکل ۵- مقایسه مقادیر واقعی و تخمین زده شده جریان



شکل ۶- مقایسه مقادیر واقعی و تخمین زده شده جریان در لحظات ابتدایی

در باب تخمین سرعت نیز نتایج بسیار خوبی حاصل شده است. همانطوریکه در شکل ۷ مشخص است، هر چند که در لحظات ابتدایی دو منحنی سرعت مشاهده شده و تخمینی مطابقت ندارند اما در فاصله بسیار کوتاهی همگرایی حاصل شده است.



شکل ۷- مقایسه مقادیر واقعی و تخمین زده شده سرعت در محیط سیمولینک

۴- نتیجه گیری: در این مقاله روش فیلتر کالمن تعمیم یافته جهت تخمین متغیرهای حالت یک ماشین القایی مورد استفاده قرار گرفت. در محیط سیمولینک از سنسورهای خاصی برای اثبات تطابق مقادیر تخمین زده شده متغیرهای حالت سرعت و جریان استاتور را با مقادیر اصلی استفاده شد و عملکرد دقیق تخمینگر کالمن طرح شده اثبات گردید. برای بهبود تخمین میتوان در رویه هایی محاسبه مقاومت رتور و استاتور را نیز صورت داد و از اثر منفی تغییرات آنها با زمان در دقت تخمین جلوگیری نمود.

۵- مراجع:

- 1) اصول کنترل مدرن تألیف دکتر علی خاکی صدیق- انتشارات دانشگاه تهران
- 2) Ch. El Moucary, G. Garcia Soto, E. Mendes "Robust Rotor Flux, Rotor Resistance and Speed Estimation of an Induction Machine Using The Extended Kalman Filter" IEEE transactions on power engineering-2005
- 3) F.Z.Peng, and T.Fukao, "Robust speed identification for speed sensorless vector control of induction motors," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 30, no. 5, pp.1234-1239, Oct.1994.
- 4) J. Holtz. "Sensorless Control of Induction Motor Drives," Proceedings of IEEE, vol. 90, pp. 1359-1394, August 2002.

Surf and download all data from SID.ir: www.SID.ir

Translate via STRS.ir: www.STRS.ir

Follow our scientific posts via our Blog: www.sid.ir/blog

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: www.sid.ir/workshop