

کنترل بدون حسگر سرعت موتور سنکرون آهنربایی (PMSM) با استفاده از روتنگر کالمن توسعه یافته EKF

چکیده - این مقاله یک ساختار کنترلی بدون حسگر موقعیت را برای موتور سنکرون آهنربایی، براساس روتنگر فیلتر کالمن توسعه یافته ارائه میکند. این روتنگر میتواند با استفاده از جریانها و ولتاژهای استاتوراندازه گیری شده، سرعت و موقعیت موتور را تخمین بزند. سرعت و موقعیت تخمین زده شده توسط روتنگر، به عنوان فیدبک به کنترل کنندهی سرعت داده میشود. نتایج شبیه سازی نشاندهنده عملکرد مناسب فیلتر کالمن توسعه یافته در رنج وسیعی از سرعت می باشد.

کلیدواژه: فیلتر کالمن، تخمینگر، موتور سنکرون، روتنگر، موتور مغناطیس دائم

سنسورها وزن و هزینه سیستم را افزایش داده و قابلیت اعتماد کل سیستم را کاهش می دهد. هدف این مقاله کنترل بدون حسگر موتور سنکرون مغناطیس دائم می باشد. روش های مختلفی وجود دارد که فیلتر کالمن توسعه یافته یک روتنگر احتمالی بهینه است. که اغتشاشات درون سیستمی را نیز بصورت بهینه فراهم می آورد.

2- فیلتر کالمن:

در سال 1960 میلادی توسط رادلف کالمن بعنوان فیلتری برای حداقل کردن واریانس خطا ارائه شد. معلوم بودن خصوصیات آماری نویزهای اندازه گیری و فرآیند و سفید بودن آنها عدم در نظرگیری دینامیک های مدل نشده نویز و سیستم از خصوصیات فیلتر کالمن است.

فیلتر کالمن یک فیلتر بازگشتی کارآمد است که حالت های سیستم خطی را از یک سری اندازه گیری های نویزی تخمین میزند. به همراه یک تنظیم کننده خطی مرتبه دوم (LQR - linear-quadratic regulator) فیلتر کالمن مسائل Gaussian control خطی مرتبه دوم (linear-quadratic-) LQG (Gaussian control LQG) را حل می کند. فیلتر کالمن، LQR و LQG راه حلی هستند برای آنچه شاید اساسی ترین مسائل تئوری کنترل می نامند.

1- مقدمه

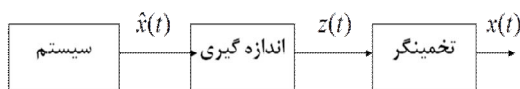
مدلهای ریاضی سیستمهای فیزیکی شامل خطاهای مدل سازی است. در تئوری کلاسیک کنترل، مرز پایداری معیار مناسبی برای در نظر گرفتن خطای مدل سازی برای سیستم کنترل فیدبک است. مراحل طراحی و کیفیت سیستم طراحی شده به صورت مستقیمی به توانایی ها و دانش طراح وابسته است. در تئوری کنترل مدرن با مفاهیمی مثل فضای حالت طراحان قادرند دید بهتری به سیستم مورد نظر و سیستم کنترلر داشته باشند. اگر چه مدل ها و تئوری ها هنوز فاصله قابل توجهی را با واقعیت دارند. این مسئله بیشتر بخاطر خطای مدلسازی، وجود نویز و عدم قطعیت می باشد. در دو دهه گذشته پیشرفتهای زیادی در تئوری صورت گرفته که بسیاری از مشکلات را رفع نموده است. ترکیب حد پایداری در کنترل سنتی و فضای حالت در کنترل مدرن به انجامیده است.

با توجه به اینکه موتورهای سنکرون مغناطیس دائم دارای ساختمانی ساده و بازده زیاد هستند در صنعت بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. در سیستم درایو موتور سنکرون مغناطیس دائم متداول کنترل سرعت بوسیله بدست آوردن اطلاعات سرعت و وضعیت موتور بوسیله سنسورهای شفت از جمله اینکدرهای نوری، سنسورهای اثر هال و ... انجام می شود. استفاده از این

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bw(t) \\ y(t) = Cx(t) + v(t) \\ z(t) = h(x(t)) + v(t) \end{cases} \quad (2)$$

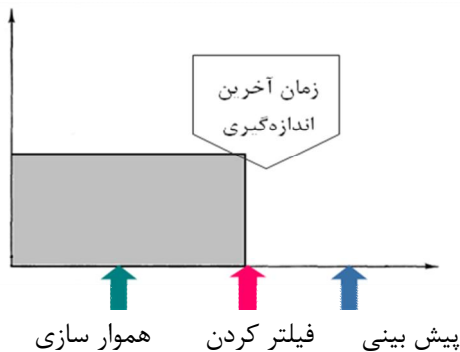
می توان فرآیند تخمین را به صورت شکل 1 نشان داد. در این شکل تخمینگر با استفاده از سیگنال اندازه گیری شده و اطلاعات اولیه در مورد سیگنال های نویز به تخمین حالت های سیستم می پردازد.

اطلاعات اولیه منابع خطای اندازه گیری منابع خطای سیستم



تخمین را بر اساس زمان آخرین اندازه گیری و زمان تخمین ، در قالب سه مسئله شکل 2 به صورت زیر تقسیم می شود :

- 1- مسئله هموار سازی Smoothing: $t_e < t_m$
- 2- مسئله فیلتر کردن Filtering: $t_e = t_m$
- 3- مسئله پیش بینی Prediction: $t_e > t_m$



فیلتر کالمن در حقیقت یک تخمین گر حالت های سیستم خطی است که می تواند متغیرها را در رنج وسیعی از فرآیند تخمین بزند. فیلتر کالمن نه تنها در عمل خوب کار می کند بلکه از نظر ریاضی هم جذاب است چرا که در بین تمام فیلترهای ممکن، ملاحظه می شود که فیلتر کوواریانس خطای تخمین را مینیمم می کند. کالمن نشان داد که تخمین حالت، نسبت به نویز اندازه گیری و مشاهده پذیری، بهینه است.

مسئله تخمین پارامترها یا حالت های سیستم بر پایه مشاهدات در محیط آلوده به نویز برای سالهای متمادی موضوع اصلی تحقیقات بوده است. حالت خاصی از مسئله یعنی شرایطی که سیستم خطی و نویز اندازه گیری و پروسه گوسی جمع شونده و مستقل فرض شوند، مسئله تخمین با یک راه حل بازگشتی و با بعد محدود با فیلتر کالمن قابل حل است. در تئوری بیزین هر مؤلفه ناشناخته ای به صورت یک متغیر تصادفی فرض می شود. برای توصیف مسئله فرض کنید که توزیع اولیه ای از متغیر تصادفی مورد نظر در دست باشد. مسئله تخمین عبارت است از محاسبه تابع چگالی احتمال این متغیر تصادفی در هر مرحله از پروسه پس از اندازه گیری یا نمونه برداری با حضور نویز. در حالت کلی که با یک سیستم غیر خطی و نویز غیر گوسی سروکار داریم نمی توان یک جواب به فرم بسته ریاضی مانند مسئله فیلتر کالمن بدست آورد. مسئله بازگشتی تخمین فوق برای یک سیستم گسسته در زمان را می توان به صورت معادله (1) فرموله کرد [1]:

$$p(x_{t+1} | Y_t) = \int_{R^n} p(x_{t+1} | x_t) p(x_t | Y_t) dx \quad (1)$$

$$p(x_t | Y_t) = \frac{p(y_t | x_t) p(x_t | Y_{t-1})}{p(y_t | Y_{t-1})}$$

مشاهدات تا لحظه t می باشند و تخمین برای متغیر تصادفی حالت پس از آخرین مشاهده می باشد. این دو رابطه که از دو بخش به روزرسانی زمان و به روزرسانی اندازه گیری تشکیل شده است به فرمول های تخمین بیزین مشهور هستند. این معادلات با استفاده از قضیه مارکوف و تئوری بیزین و محاسبات تئوری احتمال محاسبه شده اند. در نتیجه بدلیل عدم امکان استناد به مدل فضای حالت به جهت وجود نویز و نامعینی در مدل سیستم نیاز به تخمین داریم.

2-1- تعریف تخمین

تخمین، الگوریتم محاسباتی برای بدست آوردن حالت های سیستم از روی اندازه گیری های انجام شده است. دینامیک سیستم و اندازه گیری را به صورت رابطه (2) در نظر می گیریم که در آن حالت سیستم، خروجی سیستم، سیگنال اندازه گیری، تابعی خطی یا غیر خطی و از جنس نویز هستند. مشخصات آماری نویزهای سیستم و اندازه گیری مانند میانگین و واریانس، اطلاعات اولیه ای است که در الگوریتم تخمین به کار گرفته می شود [3,4].



$$\begin{aligned} i_a^\circ &= -\left(\frac{Ra}{L}\right)ia + (\lambda/L)\omega_r \sin \theta_r + (1/L)u_a \\ i_b^\circ &= -\left(\frac{Ra}{L}\right)ib + (\lambda/L)\omega_r \cos \theta_r + (1/L)u_b \\ \omega_r^\circ &= -\left(\frac{3\lambda}{2J}\right)ia \sin \theta_r + (3\lambda/2J)ib \cos \theta_r \\ &\quad - (F/J)\omega_r - (1/J)TL \\ \dot{\theta}_r &= \omega_r \end{aligned} \quad (3)$$

در معادلات (3) I_a, I_b : جریان های سیم پیچ ها ، R_a, L : مقاومت و اندوکتانس سیم پیچ ها ، θ_r, ω_r : موقعیت زاویه ای و سرعت روتور، λ : شار ثابت روتور ، U_a, U_b : ولتاژ اعمالی به دو سیم پیچ، J : ممان اینرسی روتور ، F : میزان اصطکاک روتور، TL : گشتاور بار
برای رسیدن به معادلات خطی با استفاده از معادلات حالت بصورت زیر عمل میکنیم:

$$x = [i_a \quad i_b \quad \omega_r \quad \theta_r]^T \quad (4)$$

$$y = [i_a \quad i_b]^T \quad (5)$$

$$\dot{x} = [\dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad \dot{x}_3 \quad \dot{x}_4]^T \quad (6)$$

$$x = Ax + Bu + M TL \quad (7)$$

$$y = Cx \quad (8)$$

حال با استفاده از دسته معادلات (4,5,6,7,8) و (3) میتوان معادلات زیر را بدست آورد:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L} & 0 & \frac{\lambda}{L} \sin x_4 & 0 \\ 0 & -\frac{R_a}{L} & -\frac{\lambda}{L} \cos x_4 & 0 \\ -\frac{3\lambda}{2J} \sin x_4 & \frac{3\lambda}{2J} \cos x_4 & -\frac{F}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

فرض کنید یک مدل سیستم خطی داریم. می خواهیم اندازه گیری های موجود را برای تخمین حالت سیستم به کار ببریم تخمینگری می خواهیم که تخمینی صحیح از حالت را حتی اگر نتوان آنرا مستقیماً اندازه گیری کنیم، ارائه دهد.

2-2- تعریف تخمین

بدلیل وجود سیگنال های اغتشاش و نویز در محیط، وجود خطای مدل سازی در سیستم ها و دقیق نبودن ابزار اندازه گیری، نیاز به کارگیری تخمین زن احساس می شود. از کاربردهای تخمین می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- به کارگیری در مسائل فضایی مانند فرود فضا پیما روی سیاره ها و تعیین مسیر دوران ماهواره ها.
- به کارگیری در صنایع نظامی همچون هدایت موشک
- به کارگیری در هدایت ربات ها
- به کارگیری در تعقیب هدف

2-3- معیار تخمینگر

1- میانگین تخمین حالت را برابر میانگین حالت واقعی در نظر بگیریم (بدون بایاس). از نظر ریاضی مقدار مورد انتظار تخمین برابر مقدار مورد انتظار حالت باشد.

2- تغییرات تخمین حالت، از حالت صحیح تا حد امکان کم باشد. یعنی متوسط تخمین حالت برابر متوسط حالت صحیح باشد. و تخمینگر به کمترین تغییرات ممکن تخمین حالت، منجر شود. از نظر ریاضی تخمینگری با کمترین کوواریانس خطای ممکن می خواهیم.

فیلتر کالمن این دو معیار را ارضا می کند اما برای استفاده از فیلتر کالمن نیاز به فرضیاتی در مورد نویزی که بر سیستم ما تأثیر می گذارد، داریم [4].

3- مدل دینامیکی موتور سنکرون مغناطیس دائم

این موتور بسیار عملکرد غیر خطی دارد و نمی توان از هر سیستمی برای بدست آوردن متغیرهای حالت استفاده کرد [5]. اما اگر بتوانیم معادلات را حول نقطه کار خطی کنیم سپس میتوان از سیستم های خطی برای کنترل آن استفاده نمود (3).



با جایگزاری معادلات (13) در (14) و (15):

$$S_w = E \begin{pmatrix} \left(\frac{T}{L}\right)^2 \Delta u_a^2 & \left(\frac{T}{L}\right)^2 \Delta u_a \Delta u_b & -\left(\frac{T^2}{JL}\right) \Delta u_a \Delta T_L & 0 \\ \left(\frac{T}{L}\right)^2 \Delta u_a \Delta u_b & \left(\frac{T}{L}\right)^2 \Delta u_b^2 & -\left(\frac{T^2}{JL}\right) \Delta u_b \Delta T_L & 0 \\ -\left(\frac{T^2}{JL}\right) \Delta u_a \Delta T_L & -\left(\frac{T^2}{JL}\right) \Delta u_b \Delta T_L & \left(\frac{T}{J}\right)^2 \Delta T_L^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_v = E \begin{pmatrix} \Delta i a^2 & \Delta i a \Delta i b \\ \Delta i a \Delta i b & \Delta i b^2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

3-1- مدل سازی موتور مغناطیس دائم و تخمین پارامترها بر اساس تئوری تخمین با استفاده از کدنویسی در نرم افزار متلب:

مشخصات موتور مغناطیس دائم استفاده شده در شبیه سازی:

2Ω	Ra	مقاومت سیم پیچ استاتور
3 mH	L	اندوکتانس سیم پیچ استاتور
0.1	λ	شار پیوندی
0.05 rad/sec ²	σ _T	انحراف معیار نویز گشتاور بار
0.1 A	σ _m	انحراف معیار از مقدار اندازه گیری شده نویز
0.002	J	ممان اینرسی
1HZ	f	فرکانس
0.001 A	σ _i	انحراف معیار از کنترل نویز ورودی

جدول (1) مشخصات موتور مغناطیس دائم

بر اساس معادلات قبل و مقادیر انتخابی از یک موتور واقعی خروجی های بدست آمده از نرم افزار متلب برای تخمین پارامترها بصورت شکل های () خواهند بود. بدین صورت که مقادیر واقعی و مقادیر تخمینی بصورت همزمان در هر تصویر نشان داده شده اند.

اگر معادله موتور (7) را بصورت گسسته بازنویسی تا بتوانیم بصورت دیجیتالی پیاده سازی را انجام دهیم [2]، خواهیم داشت:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + M_k TL \quad (10)$$

$$y_k = C_k x_k \quad (11)$$

Ak و Bk بصورت سیستم گسسته (ماتریسی) می باشند. معادلات را بازنویسی میکنیم:

$$a_{11} = 1 - \frac{R_a}{L}, \quad a_{13} = \frac{\lambda T}{L}, \quad a_{31} = \frac{3\lambda T}{2J}$$

$$a_{33} = 1 - \frac{FT}{J}, \quad a_{43} = T, \quad b_{11} = \frac{T}{T}$$

خواهیم داشت:

$$A_k = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} \sin x_4 & 0 \\ 0 & a_{11} & -a_{13} \cos x_4 & 0 \\ a_{31} \sin x_4 & -a_{31} \cos x_4 & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{43} \end{bmatrix}$$

$$B_k = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{11} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{T}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

و حال اگر بردارهای نویزهای ورودی و خروجی سیستم (13) را w_k و v_k در نظر بگیریم و نیز می دانیم که Δu_a و Δu_b نویزهای اضافه شده به ورودیهای u_a و u_b هستند.

$$W_k = \begin{bmatrix} (T/L)\Delta u_a \\ (T/L)\Delta u_b \\ -(T/L)\Delta T_L \\ 0 \end{bmatrix}, \quad V_k = \begin{bmatrix} \Delta I_a \\ \Delta I_b \end{bmatrix} \quad (13)$$

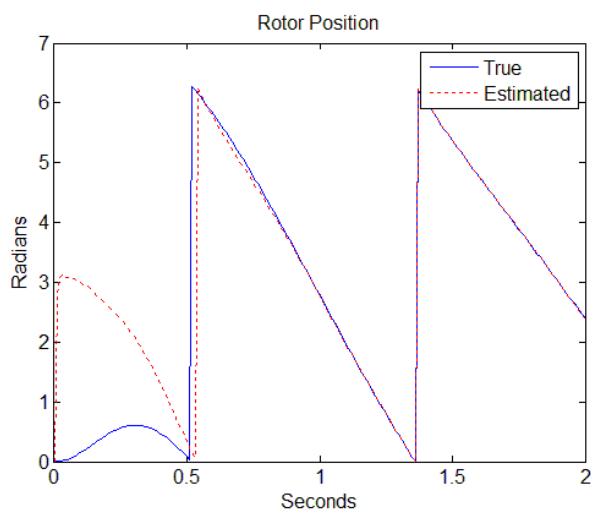
برای تحلیل توسط الگوریتم فیلتر کالمن نیاز به بدست آوردن ماتریس کواریانس داریم تا اغتشاشات ورودی و خروجی را تحلیل نماییم.

روند محاسبه کواریانس نویز:

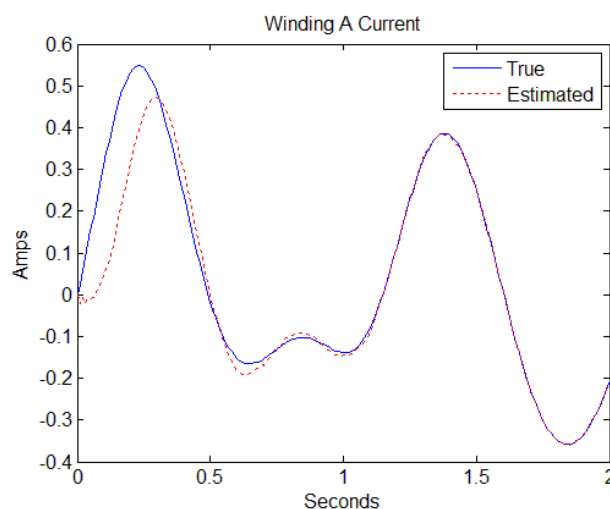
$$S_w = E(w_k \quad w_k^T) \quad (14)$$

روند اندازه گیری کواریانس نویز:

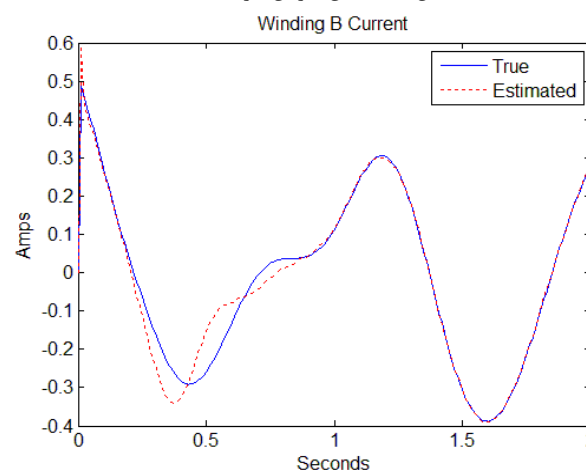
$$S_v = E(v_k \quad v_k^T) \quad (15)$$



شکل 6- تخمین موقعیت روتور



شکل 3- تخمین جریان فاز A



شکل 4- تخمین جریان فاز B

نتیجه گیری:

با توجه به نتایج بدست آمده در شکل های 3 تا 6 می توان گفت روشهای مبتنی بر تخمین علاوه بر دقت بالا باعث کاهش هزینه های ناشی از حذف سنسورها و سیم کشی های اضافه را در پی خواهد داشت.

مراجع

- [1] Bilal Akin, "State Estimation Techniques for Speed Sensorless Field Oriented Control of Induction Machine", Master's thesis, The Middle East technical university, 2003.
- [2] Bimal K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drive," University of Tennessee, Knoxville, Prentice Hall, 2006.
- [3] Dan Simon, "Using Nonlinear Kalman Filtering to Estimate Signals," 2003, (d.j.simon@csuohio.edu).
- [4] Dan Simon, "Optimal State Estimation: Kalman, ∞H , and Nonlinear Approaches," John Wiley & Sons Inc., 2006.
- [5] Gene F. Franklin et al, "Digital Control of Dynamic Systems," Addison-Wesley Longman, Inc., 1998.

