

کنترل بدون سنسور موتور سوئیچ رلوکتانس با استفاده از کنترل کننده PID فازی و رویتگر باینری همراه با شناسایی مستقیم پارامترهای موتور

دکتر کارو لوکس
استاد
دانشگاه تهران

صبا صدقی زاده
کارشناسی ارشد
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

دکتر حسن غفوری فرد
دانشیار
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله کنترل بدون سنسور موتور سوئیچ رلوکتانس مطرح گردیده است. در بخش کنترل کننده از یک کنترل کننده PID فازی و در اعمال روش بدون سنسور از رویتگر باینری، که یک رویتگر حالت می باشد، استفاده شده است. در اعمال روش بدون سنسور مبتنی بر رویتگرهای حالت، به منظور اجتناب از بکارگیری جداول مدل موتور، که سبب وابستگی سیستم به پارامترهای مدل موتور می گردند، از یک الگوریتم شناسایی گر تطبیقی، جهت تخمین و شناسایی پارامترهای مدل غیر خطی موتور استفاده شده است، که هم زمان با راه اندازی موتور عمل تخمین و شناسایی را انجام می دهد. بکارگیری این روش علاوه بر افزایش دقت در تخمین موقعیت و سرعت زاویه ای موتور، به دلیل عدم وابستگی بخش رویتگر به جداول مدل موتور، سبب بالا رفتن مقاومت سیستم در برابر تغییرات پارامترهای مدل موتور نیز می گردد و جایگزین مناسبی برای جداول مدل موتور در روش بدون سنسور خواهد بود.

کلمات کلیدی

کنترل بدون سنسور - موتور سوئیچ رلوکتانس - رویتگر باینری - کنترل کننده PID فازی - شناسایی تطبیقی

Sensorless Control of SRM Drives Using Fuzzy PID Controller and Binary Observer with Online Parameters Identification

S. Sedghizadeh
M.Sc.

C. Lucas
Professor

H. Gafoorifard
Associate Professor

Abstract

In this paper sensorless control of SRM Drives is presented. A fuzzy PID controller is used and the fundamentals of the controller are illustrated. Sensorless operation is achieved through a binary observer based algorithm. In order to avoid using the look up tables of motor characteristics, which makes the system depends on motor parameters, an adaptive identification algorithm is used to estimate the nonlinear motor parameters. This method makes position and speed estimation more accurate and robust towards any model uncertainty, also it is a suitable replacement for a priori knowledge of the motor characteristics.

مقدمه

موتور سوئیچ رلوکتانس به دلیل ساختار ساده، قیمت ارزان و کارایی خوبی که در محدوده وسیعی از سرعتها دارد، قابل رقابت با موتورهای القایی و PMDC می‌باشد. در موتور سوئیچ رلوکتانس، به علت سنکرون بودن تحریک فازها با موقعیت زاویه‌ای روتور، سنجش موقعیت زاویه‌ای روتور الزامی است، و لذا در اکثر موارد از سنسور موقعیت برای این امر استفاده می‌شود. لیکن بکارگیری سنسور موقعیت مشکلاتی مانند افزایش تعداد اتصالات، محدودیت نصب، افزایش قیمت درایو و خطای گسسته‌سازی را در بر دارد. وجود این قبیل مشکلات محققان را به سمت بکارگیری روشهای بدون سنسور در کنترل رهنمون ساخته است [۱-۱۴]. از جمله روشهای ممکن در این راه، استفاده از روشهای مبتنی بر رویتگرها می‌باشد. لیکن بکارگیری رویتگرهای خطی در موتور سوئیچ رلوکتانس به دلیل خصوصیات غیر خطی بالایی که دارد نامناسب به نظر می‌رسد [۱۵]. به همین علت در چندین مقاله استفاده از رویتگر مد لغزشی [۱۱]، [۲]، [۱۲] و رویتگر باینری [۳] به دلیل ساختار غیر خطی و عملکرد مقاومی که در برابر تغییرات پارامترها دارند، پیشنهاد گردیده است. لیکن بکارگیری رویتگر مد لغزشی سبب بروز پدیده chattering می‌گردد، ولی رویتگر باینری با وجود غیر خطی بودن ساختار آن، هم مقاوم بوده و هم در جهت کاهش پدیده chattering مطلوب‌تر می‌باشد [۳]. به همین دلیل در این مقاله از رویتگر باینری استفاده شده است. علاوه بر این، در اکثر موارد در بکارگیری روشهای بدون سنسور مبتنی بر رویتگرهای حالت، از جداول مدل موتور استفاده می‌شود، که این امر سبب وابستگی سیستم به پارامترهای مدل موتور شده و از قوام کلی سیستم می‌کاهد. در این مقاله جهت اجتناب از این مشکل، از یک الگوریتم شناسایی تطبیقی برای تخمین پارامترهای مدل غیر خطی موتور استفاده شده است، که هم زمان با راه‌اندازی موتور، کار تخمین پارامترهای مدل غیر خطی موتور را انجام می‌دهد. بکارگیری این روش سبب افزایش قوام سیستم و عدم وابستگی آن به پارامترهای مدل موتور می‌گردد. نتایج مربوط به شبیه‌سازی کنترل‌کننده بدون سنسور به همراه مدل درایو یک موتور سوئیچ رلوکتانس ۶/۴ سه فاز، تحت شرایط کاری مختلف نشان داده شده است.

۱- مدل‌سازی موتور سوئیچ رلوکتانس

معادلات فضای حالت موتور سوئیچ رلوکتانس بصورت زیر قابل بیان است [۱۶].

$$\begin{aligned} \frac{di_j}{dt} &= \frac{1}{L_{inc}(i_j, \theta)} (V_j - R \cdot i_j - C_w(i_j, \theta) \cdot \omega) \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} (T_m - T_l - B \cdot \omega) \end{aligned} \quad (1)$$

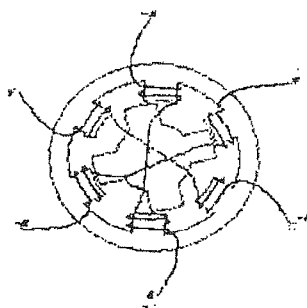
که در آن جریان فازها، موقعیت و سرعت زاویه‌ای روتور به عنوان متغیرهای حالت در نظر گرفته شده‌اند. معادله گشتاور خروجی تولیدی بصورت زیر می‌باشد،

$$T_m = \sum_{j=1}^N T_j(i_j, \theta) = \sum_{j=1}^N \frac{\partial}{\partial \theta} \int \lambda(i'_j, \theta) di' \quad (2)$$

که در آن،

T_j : گشتاور بار	C_w : ضریب ولتاژ ضد محرکه	J : ممان اینرسی	θ : موقعیت زاویه‌ای روتور
T_m : گشتاور خروجی	L_{inc} : اندوکتانس افزایشی	i : جریان فاز	ω : سرعت زاویه‌ای روتور
N : تعداد فازها	B : ضریب اصطکاک ویسکوزیته	V : ولتاژ فاز	R : مقاومت الکتریکی استاتور

در این مدل‌سازی L_{inc} ، C_w ، λ و T_m توابع غیرخطی از موقعیت زاویه‌ای روتور و جریان فازها می‌باشند و مقادیر عددی آنها از طریق محاسبات المان محدود یا از طریق تقریب منحنی‌های مغناطیسی بدست می‌آیند.



شکل (۱) موتور سوئیچ رلوکتانس سه فاز ۶/۴.

۲- مروری بر نظریه کنترل بدون حسگر

از جمله روشهای معمول برای سنجش موقعیت و سرعت زاویه‌ای روتور استفاده از انکدرها، تحلیلگرها و سنسورهای اثر هال می‌باشد. لیکن به دلیل مشکلاتی که در بکارگیری این سنسورها وجود دارد و پیشتر به آنها اشاره شد، روشهای متعددی برای کنترل بدون سنسور پیشنهاد شده است که می‌توان هر کدام را به تنهایی و یا بصورت ترکیبی مورد استفاده قرار داد. بطور عمده می‌توان این روشها را به شرح زیر خلاصه کرد [۱]، [۱۰]:

- ۱- روشهای مبتنی بر سخت افزار، که نیازمند وجود مدار خارجی به منظور تزریق سیگنال می‌باشد.
- ۲- روشهای مبتنی بر داده، مانند تکنیک انتگرالگیری شار، که نیازمند بکارگیری جداول مراجعه بزرگی بمنظور نگهداری اطلاعات مربوط به مشخصه‌های مغناطیسی موتور سوئیچ رلوکتانس می‌باشد [۹].
- ۳- روشهای مبتنی بر مدل، مانند استفاده از رویکرد حالت [۴]، [۳]، [۲]، [۱۲]، [۱۱]، [۱۵] و روشهای فازی [۸]، [۱۴]، [۵].
- ۴- بکارگیری ریزپردازنده‌های بسیار سریع، مانند DSPها [۱۳].

اساس عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس بر پایه تغییرات شار پیوندی، توسط تغییرات موقعیت روتور استوار است. منحنی تغییرات شار بر حسب جریان برای موقعیت‌های مختلف روتور، برای موتور سوئیچ رلوکتانس ۶/۴ مورد نظر در این مقاله، در شکل (۲) آورده شده است.

شکل (۲) منحنی تغییرات شار بر حسب تغییرات جریان و زاویه.

معادله ولتاژ و شار برای هر فاز بصورت زیر قابل بیان می‌باشد،

$$\Rightarrow V_j = Ri_j + \frac{d\lambda_j}{dt} \quad \lambda_j(i_j, \theta) = \int (V_j - Ri_j) dt \quad (3)$$

در ادامه ساختار رویتنگر باینری و کنترل کننده PID فازی شرح داده شده است.

۳- رویتنگر باینری

معادلات رویتنگر باینری مرتبه دو بشکل زیر قابل بیان است،

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega + k_{\theta} e_f \\ \dot{\omega} &= k_{\omega} e_f \end{aligned} \quad (4)$$

در اینجا θ و ω موقعیت و سرعت زاویه‌ای تخمینی روتور، k_{θ} و k_{ω} نیز بهره‌های رویتنگر می‌باشند. e_f تابعی از خطای باشد که بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی بدست می‌آید،

$$e_f = \sum_{j=1}^N \mu_j |\lambda_j - \lambda_j^*| \quad (5)$$

λ مقدار شار تخمین زده شده و μ پارامتری است که از طریق حل معادله دیفرانسیلی زیر محاسبه می‌گردد [۱۷]، [۱۸].

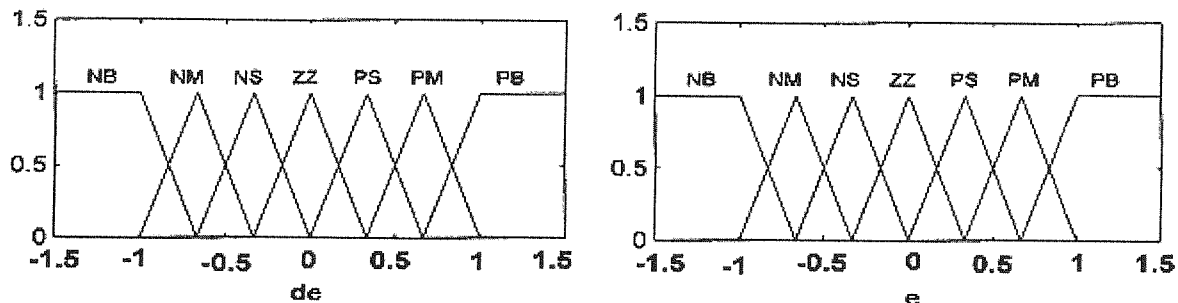
$$\dot{\mu}_j = -k_j (\mu_j - \text{sgn}(\lambda_j - \lambda_j^*)) \quad (6)$$

۴- کنترل کننده PID فازی

قانون کنترلی برای کنترل کننده بصورت زیر تعریف می‌شود،

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \dot{e}(t) \quad (7)$$

که در آن K_D و K_I ، K_P به ترتیب بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی می‌باشند. عملکرد مطلوب کنترل‌کننده بستگی به تعیین مناسب بهره‌های کنترل‌کننده دارد، این کار به روش فازی صورت می‌گیرد. در اینجا مطابق شکل (۳) هفت مجموعه فازی مختلف برای معرفی متغیرهای زبانی (linguistic variable) خطا و مشتق خطا در نظر گرفته شده است، که در آن $e_{\max} = +1$ ، $e_{\min} = -1$ ، $de_{\max} = +1$ و $de_{\min} = -1$ می‌باشند.



NB: منفی بزرگ

PB: مثبت بزرگ ZZ: صفر

NM: منفی متوسط

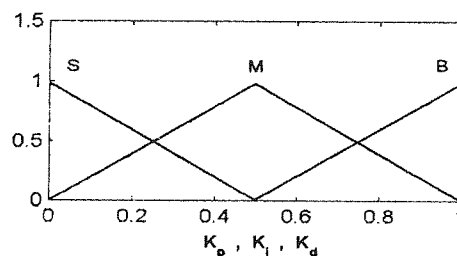
PM: مثبت متوسط

NS: منفی کوچک

PS: مثبت کوچک

شکل (۳) - توابع عضویت برای خطا $e(t)$ و مشتق خطا $de(t)$.

برای هر یک از متغیرهای K_D ، K_I ، K_P سه مجموعه فازی در نظر گرفته شده است، که تحت عنوان متغیرهای زبانی "بزرگ (B)"، "متوسط (M)" و "کوچک (S)" معرفی می‌گردند. مجموعه‌های فازی مربوط به K_D و K_I ، K_P در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴) توابع عضویت برای پارامترهای K_D ، K_I ، K_P .

۵- شناسایی پارامترهای مدل موتور

در این مقاله از یک روش خود تنظیم برای تخمین شار استفاده شده است. در این روش از تقریب تکه خطی منحنی مغناطیسی با فرض اشباع مغناطیسی استفاده می‌شود. با توجه به منحنی مغناطیسی موتور در شکل (۲) منحنی شار پیوندی بر حسب زاویه و جریان را می‌توان به دو قسمت قبل و بعد از جریان اشباع (I_s) تقسیم نمود و برای هر قسمت یک تقریب در نظر گرفت. بنابراین رابطه شار پیوندی هر فاز بر حسب جریان و زاویه روتور بصورت زیر قابل بیان است،

$$\lambda_j(i_j, \theta) = \begin{cases} k_1(\theta) & i_j < I_s \\ k_2(\theta)I_s + k_3(\theta)i_j & i_j \geq I_s \end{cases} \quad (8)$$

در اینجا $k_1(\theta)$ ، $k_2(\theta)$ و $k_3(\theta)$ منحنی‌های مرتبه دو می‌باشند و بر اساس مدل موتور برازش داده می‌شوند،

$$k_i(\theta) = a_i + b_i\theta + c_i\theta^2 \quad (9)$$

برای بدست آوردن این منحنی‌ها مقادیر a ، b و c برای هر منحنی بطور جداگانه با بکارگیری روش تطبیقی حداقل مربعات بازگشتی (RLS) تخمین زده می‌شود. الگوریتم RLS زمان گسسته به شکل زیر می‌باشد،

$$X_{k+1} = X_k + P_{k+1} \Phi_{k+1} [Y_{k+1} - \Phi_{k+1}^T X_k] \quad (10)$$

$$P_{k+1} = \frac{1}{\gamma} \left[1 - \frac{P_k \Phi_{k+1} \Phi_{k+1}^T P_k}{\gamma + \Phi_{k+1}^T P_k \Phi_{k+1}} \right]$$

که در آن P ماتریس کوواریانس و γ نرخ یادگیری می‌باشند، که در بازه $[1/95, 1]$ قرار دارد. مقدار $P(0)$ را بطور استاندارد می‌توان به شکل $P(0) = rI_m$ در نظر گرفت، که برای مقادیر بزرگ $P(0)$ مقدار r را بین 100 تا 1000 و برای مقادیر کوچک $P(0)$ مقدار r را بین 1 تا 10 در نظر می‌گیریم [7]. مدل ارائه شده در رابطه (8) بر روی چندین سیستم مختلف و تحت شرایط کاری متفاوت آزمایش شده و صحت عملکردی آن تثبیت گردیده است [21].

در این مقاله، جهت تخمین شار که در رویتر باینری مورد نیاز است (معادلات (5) و (6))، به جای استفاده از جداول مدل موتور، از این روش مدل‌سازی استفاده شده است. با بکارگیری این روش در هر لحظه با توجه به موقعیت زاویه‌ای روتور مقدار پارامترها بطور مستقیم توسط الگوریتم تطبیقی RLS تخمین زده می‌شوند و مقدار شار پیوندی تخمینی بدست می‌آید. از این رو هر تغییری که در سیستم، درایو یا موتور، صورت گیرد که منجر به تغییراتی در مشخصه مغناطیسی سیستم (شکل (2)) گردد، کارکرد سیستم را مختل نخواهد کرد، زیرا تخمینگر شار این قابلیت را دارد که با شناسایی مستقیم پارامترها، با شرایط جدید تطبیق یابد.

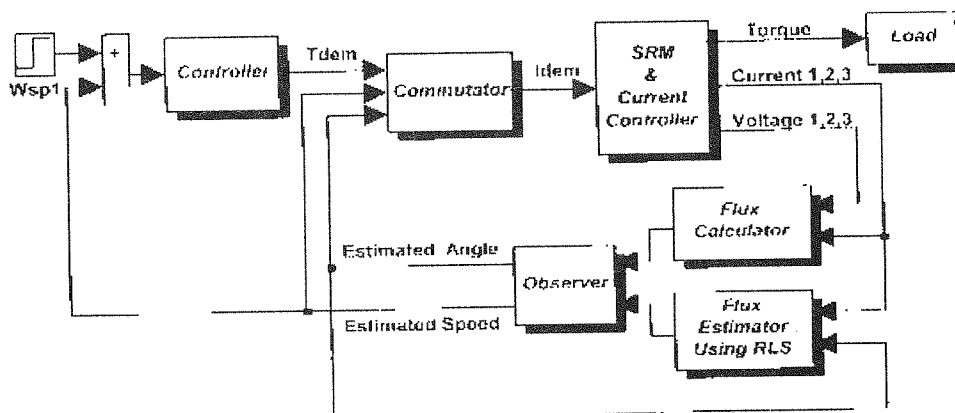
۶- مدل کامل سیستم

با توجه به مباحث قبلی، سیستم کلی از سه قسمت عمده تشکیل شده است (شکل (5)).

۱- موتور سوئیچ رلوکتانس، درایو موتور و بخش کنترلی، که در شکل مزبور شامل موتور، کموتاتور و کنترل‌کننده می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده موتور سوئیچ رلوکتانس بر اساس مدل میلر [16] مدل‌سازی شده است (معادله (1)). کموتاتور از نوع فازی تطبیقی می‌باشد [20] و کنترل‌کننده نیز یک کنترل‌کننده PID فازی است که ساختار آن پیشتر شرح داده شده است.

۲- رویتر، که همان رویتر باینری معرفی شده می‌باشد (معادلات (4)، (5) و (6)).

۳- بخش شناسایی کننده، که شامل دو بخش محاسبه گر شار و تخمینگر شار می‌باشد. در بخش محاسبه گر شار، مطابق رابطه (3)، شار حقیقی برای هر فاز با استفاده از ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در هر فاز محاسبه می‌گردد و در بخش تخمینگر شار، که همان شناسایی کننده مستقیم پارامترها می‌باشد، مطابق روابط (8)، (9) و (10) مقدار شار تخمینی بدست می‌آید.



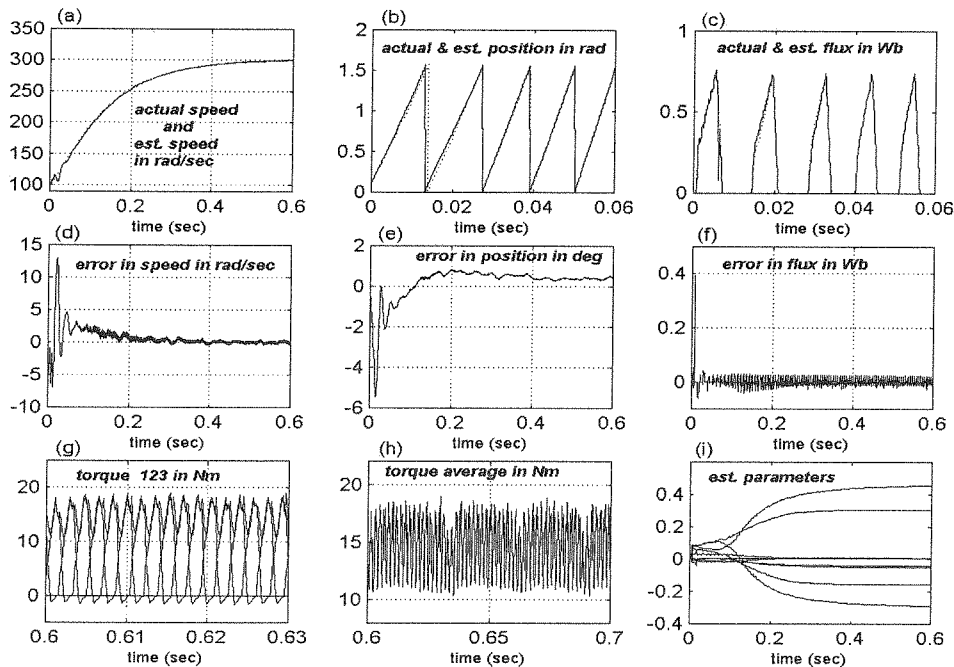
شکل (5) نمودار بلوکی سیستم کلی.

۷- نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج شبیه سازی‌های انجام شده بر روی موتور سوئیچ رلوکتانس مورد نظر (مشخصات موتور در ضمیمه آورده شده است) نشان داده شده است. در الگوریتم تطبیقی RLS بکار گرفته شده مقادیر اولیه پارامترهای تخمینی 0.0001 و مقدار اولیه برای ماتریس کوواریانس $P(0) = 5I_m$ در نظر گرفته شده است.

۸- عملکرد سیستم تحت شرایط نامی

در شکل (۶) نحوه عملکرد سیستم برای پاسخ به ورودی پله سرعت 300 رادیان بر ثانیه با سرعت اولیه 100 رادیان بر ثانیه تحت شرایط نامی (بار کامل) آورده شده است.



شکل (۶) نتایج شبیه سازی سیستم کلی تحت شرایط کاری نامی.

همانطور که در شکل (a) دیده می شود، سیستم پس از 0.58 ثانیه توانسته است که ورودی مرجع را دنبال کند و خطای ناشی از تخمین سرعت مطابق شکل (d) در لحظات اولیه نسبتاً زیاد بوده ولی پس از تقریباً 0.3 ثانیه به صفر رسیده است. میزان نوسانات سرعت حول حالت ماندگار در این شبیه سازی 0.2 درصد می باشد. مطابق شکل (e) خطای موقعیت به سرعت کاهش یافته و در حالت ماندگار به 0.4 درجه می رسد. در شکل (c) مقدار شار تخمینی (روابط (۸)، (۹) و (۱۰)) و شار حقیقی یا همان شار محاسبه شده (رابطه (۳)) برای یکی از فازهای موتور آورده شده است، که بیانگر عملکرد مطلوب روش شناسایی مستقیم پارامترها می باشد. در شکل (f) میزان خطای شار، یعنی اختلاف بین شار حقیقی و شار تخمینی یکی از فازها، که در شکل (c) بیان گردید، نشان داده شده است. در شکل (i) نحوه همگرایی پارامترهای تخمین زده شده (a, b و c) که ۹ پارامتر می باشد، توسط روش RLS در معادله (۹)، که جهت بدست آوردن شار تخمینی (معادله (۸)) بکار گرفته می شود، نشان داده شده است. در شکل (g) نیز گشتاورهای مربوط به سه فاز آورده شده است، که حاکی از وجود ریبیل گشتاور می باشد. مطابق شکل (h) که نشان دهنده گشتاور متوسط است، میزان ریبیل گشتاور $41/6$ درصد می باشد.

۹- بررسی مقاومت سیستم در برابر تغییر پارامترها

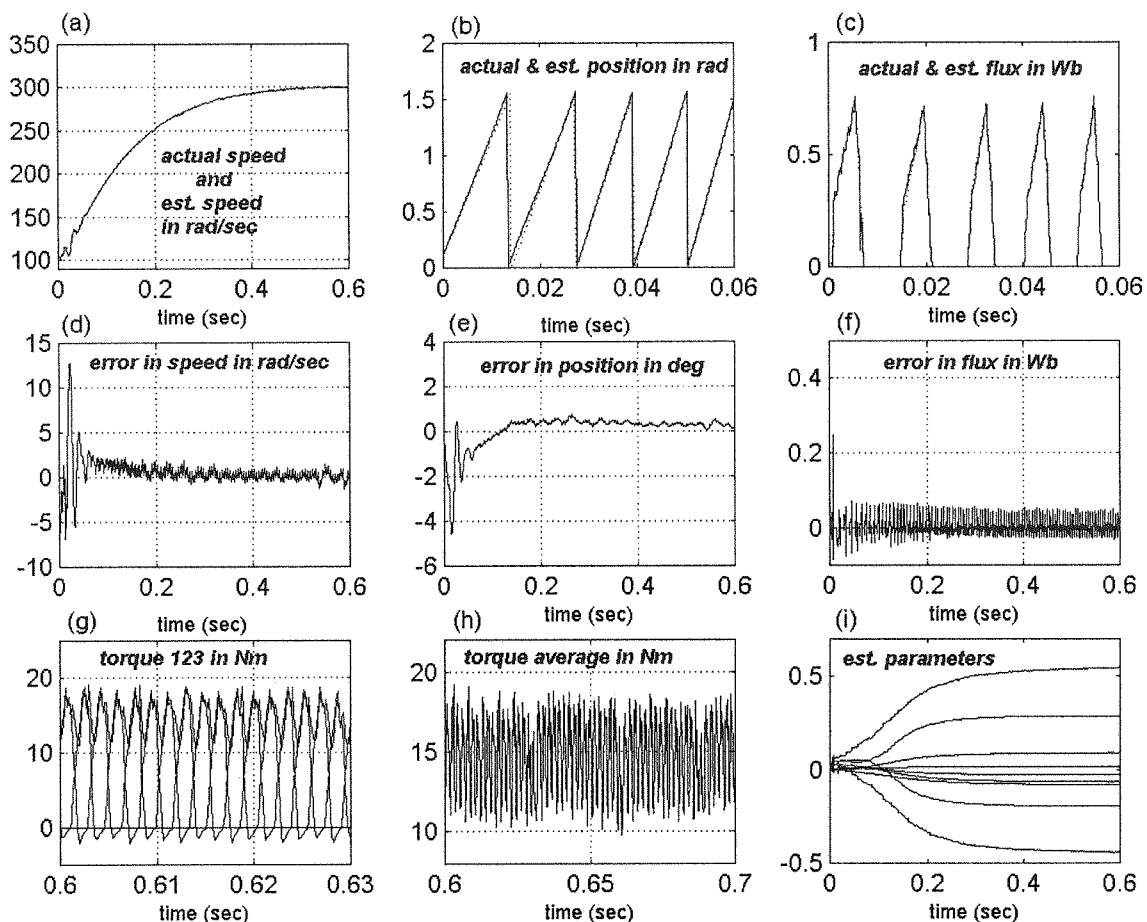
همانطور که در مباحث قبلی نیز عنوان گردید، هدف اصلی در این مقاله ارائه یک روش کنترل بدون سنسور با قوام بالا،

برای موتور سوئیچ رلوکتانس می‌باشد، که وابسته به پارامترهای مدل موتور نباشد. به همین منظور یک روش شناسایی تطبیقی جهت تخمین پارامترهای مدل موتور معرفی گردید. از طرفی، استفاده از رویکرد باینری به دلیل دارا بودن ساختار غیر خطی و مقاوم و کنترل‌کننده PID فازی هم با توجه به ساختار فازی آن، در جهت نیل به این هدف مناسب می‌باشند. در ادامه به منظور بررسی مقاومت سیستم در برابر تغییر پارامترهای مختلف سیستم و بررسی میزان قابلیت بخش شناسایی گر تطبیقی در حفظ قوام سیستم کلی شبیه‌سازی‌هایی انجام شده است.

در این مقاله، پارامترهایی که اثر تغییرات آنها بر روی عملکرد سیستم بررسی شده است، به دو دسته تقسیم شده‌اند: یکی "پارامترهای مربوط به مدل موتور" که تغییرات آنها سبب تغییر در مشخصه مغناطیسی موتور می‌گردد و دیگری "پارامترهای مربوط به مدل بار" که تغییرات بار خارجی را شامل می‌شود.

الف) تغییر پارامترهای مربوط به مدل موتور: تغییرات در پارامترهای مدل موتور، سبب تغییر مشخصه مغناطیسی موتور شده و عملکرد عادی سیستم را دچار اختلال می‌نماید. از جمله عواملی که سبب بروز اینگونه تغییرات در ساختار سیستم شده و باعث ایجاد تغییر در مشخصه مغناطیسی موتور می‌گردند، نقایص تولیدی و اثرات طول عمر می‌باشند.

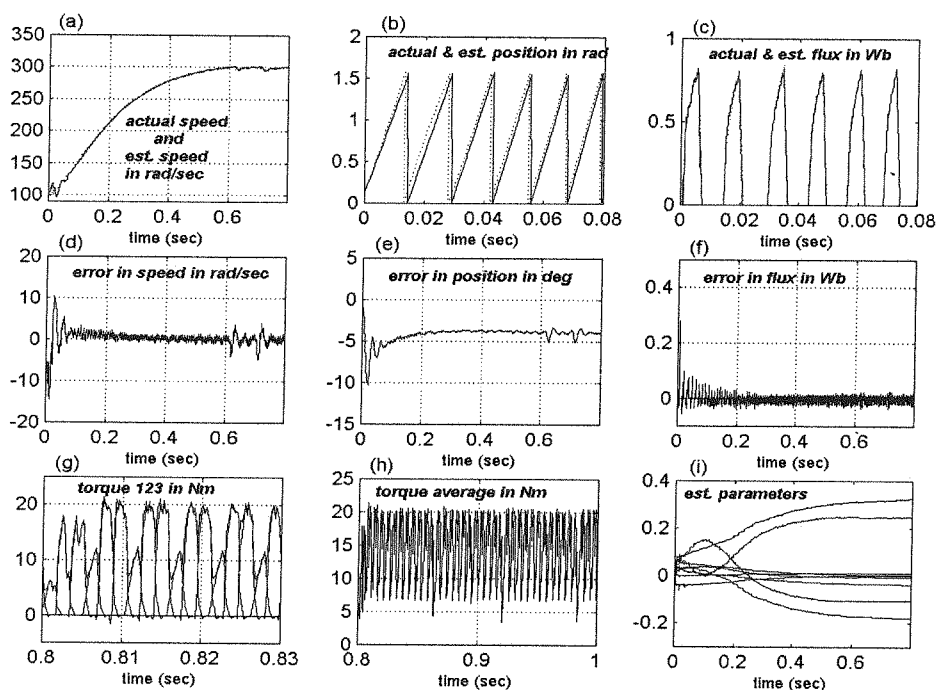
پدیده انحراف از محور موتور، به عنوان یکی از عوامل ناشی از اثرات طول عمر، از جمله مواردی است که سبب عدم تقارن در اندازه فاصله هوایی می‌شود. این تغییر، اندوکتانس‌های موتور و مشخصات تولید گشتاور را تغییر می‌دهد. تغییرات L_{α} (اندوکتانس ناهمراستایی) به علت بزرگ بودن فاصله هوایی در آن ناحیه چندان محسوس نمی‌باشد، لیکن مقدار L_{α} (اندوکتانس همراستایی) به شدت تغییر می‌کند [۱۹]. در این مقاله به منظور بررسی نحوه تأثیر این پدیده در عملکرد موتور یک تغییر ۴۰ درصدی در اندوکتانس L_{α} ایجاد شده است و نتایج شبیه‌سازی تحت این شرایط در شکل (۷) آورده شده است.



شکل (۷) نتایج شبیه‌سازی سیستم کلی همراه با تغییر ۴۰ درصدی در L_{α} .

در بررسی شکل (۷)، مطابق شکل (a)، سیستم بعد از ۰/۵ ثانیه توانسته ورودی مرجع را دنبال کند و خطای ناشی از تخمین سرعت مطابق شکل (d) پس از تقریباً ۰/۲۲ ثانیه به صفر رسیده است، مطابق شکل (a) نوسانات سرعت حول حالت ماندگار ۰/۴۷ درصد است. مقدار موقعیت زاویه‌ای تخمینی و موقعیت واقعی روتور بر حسب رادیان در شکل (b) نشان داده شده است و مطابق شکل (e) میزان خطای موقعیت در حالت ماندگار ۰/۲ درجه می‌باشد. در شکل (c) نیز مقدار شار تخمینی (روابط (۸)، (۹) و (۱۰)) و شار حقیقی یعنی همان شار محاسبه شده (رابطه (۳)) برای یکی از فازهای موتور آورده شده است. مطابق این شکل، با وجود تغییراتی که در مشخصه مغناطیسی موتور منظور شده است، تخمین شار بدرستی صورت گرفته است و این بیانگر عملکرد مطلوب بخش شناسایی گر مستقیم پارامترها می‌باشد. در شکل (f) میزان خطای شار، که اختلاف بین شار حقیقی و شار تخمینی نشان داده شده در شکل (c) می‌باشد آورده شده است و در شکل (i) نحوه همگرایی پارامترهای تخمین زده شده (a, b و c)، که ۹ پارامتر می‌باشد، توسط روش RLS در معادله (۹)، که جهت بدست آوردن شار تخمینی (معادله (۸)) بکار گرفته می‌شود، نشان داده شده است. با مقایسه این شکل و شکل (i) می‌بینیم که به دلیل تغییر مشخصه مغناطیسی موتور مقادیر همگرایی پارامترها متفاوت هستند و نشان می‌دهد که الگوریتم شناسایی تطبیقی قادر به تخمین پارامترهای مدل جدید می‌باشد. در شکل (g) نیز گشتاورهای مربوط به سه فاز آورده شده است. مطابق شکل (h) مقدار ریبیل گشتاور در این حالت ۳۷/۸ درصد است.

عامل دیگری که در اینجا مورد بررسی فرار گرفته است، یکسان نبودن طول کمان روتور (β_r) در تمام فازها می‌باشد، که به عنوان یکی از موارد ناشی از نقایص تولیدی مطرح می‌گردد. جهت بررسی نحوه تأثیر این پدیده در عملکرد موتور یک تغییر ۴۰ درصدی در طول کمان روتور (β_r) یکی از فازها منظور شده است و نتایج شبیه‌سازی تحت این شرایط در شکل (۸) آورده شده است.

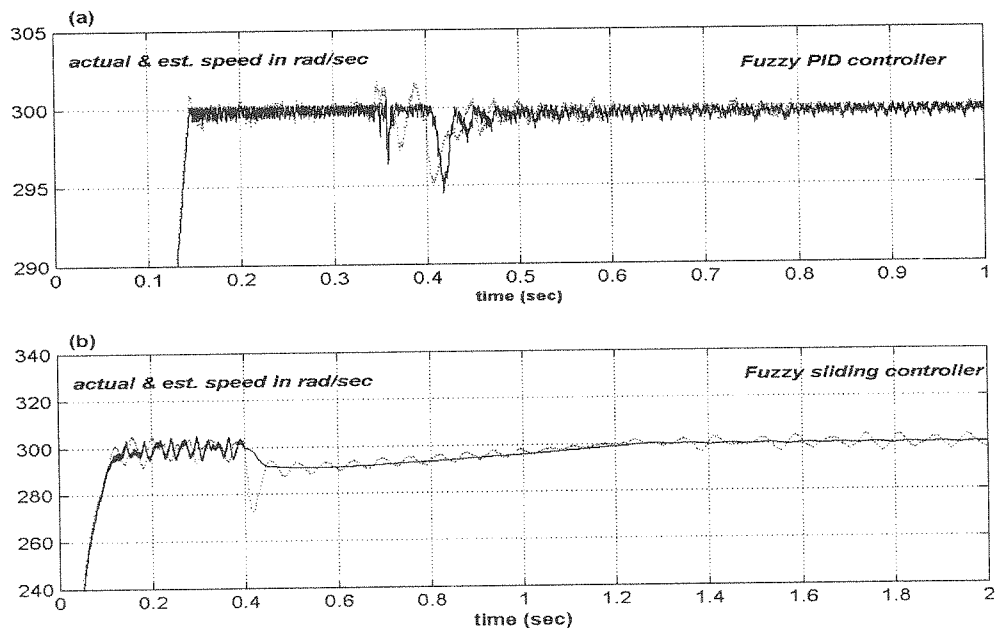


شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی سیستم کلی همراه با تغییر ۴۰ درصدی در β_r .

در بررسی شکل (۸)، مطابق شکل (a)، سیستم بعد از ۰/۵۸ ثانیه توانسته ورودی مرجع را دنبال کند و خطای ناشی از تخمین سرعت مطابق شکل (d) پس از تقریباً ۰/۵ ثانیه به صفر رسیده است. مطابق شکل (a) نوسانات سرعت حول حالت ماندگار ۲/۱۳ درصد است. مطابق شکل (e) میزان خطای موقعیت در حالت ماندگار ۴ درجه می‌باشد. در شکل (c) نیز مقدار شار

تخمینی (روابط (۸)، (۹) و (۱۰)) و شار حقیقی یا همان شار محاسبه شده توسط رابطه (۳)، برای یکی از فازهای موتور آورده شده است، که با وجود تغییر در مشخصه مغناطیسی موتور تخمین شار بدرستی انجام گرفته است و این بیانگر عملکرد مطلوب روش شناسایی مستقیم پارامترها می‌باشد. در شکل (f) خطای شار یعنی اختلاف بین شار حقیقی و شار تخمینی را نشان می‌دهد و در شکل (i) نحوه همگرایی پارامترهای تخمین زده شده (a, b و c)، که ۹ پارامتر می‌باشد، توسط روش RLS در معادله (۹)، که جهت بدست آوردن شار تخمینی (معادله (۸)) بکار گرفته می‌شود، نشان داده شده است. شکل (g) نیز گشتاور سه فاز را نشان می‌دهد. مطابق این شکل گشتاور مربوط به فازی که کمان روتور آن از حالت عادی تغییر داده شده است، شدیداً افت کرده است و در نتیجه ریپل گشتاور هم افزایش می‌یابد. مطابق شکل (h) ریپل گشتاور در این حالت ۷۲/۲ درصد می‌باشد.

ب) تغییر پارامترهای مربوط به مدل بار: از جمله عوامل دیگری که سبب بروز تغییرات در عملکرد سیستم می‌گردد، تغییرات مربوط به پارامترهای بار، مانند گشتاور بار، می‌باشد. در این بخش به منظور بررسی میزان مقاومت سیستم در برابر تغییرات گشتاور بار، سیستم را در وضعیتی که گشتاور بار $T_L = 9 \text{ Nm}$ می‌باشد راه اندازی کرده و در لحظه ۰/۴ ثانیه به حالت گشتاور بار کامل یعنی $T_L = 13/5 \text{ Nm}$ می‌بریم. عملکرد سیستم در شکل (۹) آورده شده است.



شکل (۹) پاسخ سرعت سیستم نسبت به تغییر گشتاور بار.

(a) - کنترل کننده PID فازی و رویتنگر باینری، (b) - کنترل کننده فازی لغزشی و رویتنگر باینری

همانطور که در شکل (a) دیده می‌شود، سیستم قادر به دفع این اغتشاش می‌باشد. لیکن اگر میزان تغییرات بار بیشتر باشد سیستم قادر به دفع اغتشاش نخواهد بود و این به دلیل ضعف کنترل کننده PID فازی می‌باشد نه رویتنگر باینری، زیرا این کنترل کننده تا حدودی خطی است و اگر به جای این کنترل کننده از یک کنترلر غیر خطی مانند کنترل کننده فازی لغزشی استفاده گردد، سیستم قادر به تحمل میزان تغییرات بار بیشتری خواهد بود. به این منظور شبیه‌سازی سیستم برای کنترل کننده فازی لغزشی همراه با رویتنگر باینری نیز آورده شده است، که در شکل (b) نشان داده شده است. در این حالت سیستم در لحظه ۰/۴ ثانیه از وضعیت بی باری $T_L = 0 \text{ Nm}$ به وضعیت گشتاور بار کامل $T_L = 13/5 \text{ Nm}$ برده شده است و مطابق شکل (b) سیستم به خوبی قادر به دفع اغتشاش می‌باشد.

۱- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل بدون سنسور موتور سوئیچ رلوکتانس مطرح گردید که در آن از کنترل کننده PID فازی و رویتر باینری استفاده شده بود و برای افزایش قوام کلی سیستم در برابر تغییرات پارامترهای مختلف یک بخش شناسایی گر تطبیقی نیز به رویتر اضافه شد، که همزمان با راه اندازی موتور کار تخمین پارامترهای مدل موتور را انجام می دهد و از طرفی جایگزین خوبی برای جداول مدل موتور می باشد. در شبیه سازی های انجام شده عملکرد سیستم تحت شرایط عادی و همچنین در شرایطی که به علل مختلف ناهنجاری هایی در سیستم ایجاد شده بود، بررسی گردید. در تمام این شبیه سازی ها عملکرد بخش شناسایی گر تطبیقی مناسب بوده و نتایج حاصله بیانگر عملکرد مطلوب و قابل اطمینان برای روش بدون سنسور است. لیکن میزان دستیابی به پاسخ مطلوب و یک سیستم مقاوم به انتخاب کنترل کننده و رویتر مناسب بستگی دارد. جهت مقایسه عملکردها، ترکیبهای مختلف سه رویتر (مد لغزشی، باینری و تناسبی-انتگرالی) و دو کنترل کننده (فازی لغزشی و فازی PID) مورد شبیه سازی قرار گرفته است، که در این مقاله نتایج مربوط به سیستم مرکب از رویتر باینری و کنترل کننده فازی PID که از نظر ما دارای عملکرد مطاب بود ارائه شده است. رویتر باینری عملکرد مطلوب و قابل قبولی از نظر مقاوم بودن و سرعت پاسخ دهی دارد، لیکن کنترل کننده PID فازی به دلیل خطی تر بودن ساختار آن نسبت به کنترل کننده فازی لغزشی قوام کمتر ولی در عوض ساختار ساده تری دارد و در مواردی که عملکرد قابل قبول داشته باشد، با توجه به پیاده سازی آسانتر ارجح می باشد.

به هر حال انتخاب کنترل کننده و رویتر مناسب تا اندازه ای بستگی به این امر دارد که طراحی درایو برای یک موتور مشخصی مورد نظر باشد یا برای یک خط تولید درایو، که در مورد اول انتخاب کنترل کننده و رویتر با ساختار ساده تر مناسب به نظر می رسد، و در مورد دوم انتخاب مناسب بستگی به تحلیلهای جزئی تر در مورد میزان قوام سیستم کلی، درباره تغییرات مورد انتظار در خط تولید خواهد داشت.

۱۱- ضمیمه

مشخصات موتور سوئیچ رلوکتانس در شرایط نامی به شرح زیر می باشد،

N_r	4	n	3000 rpm	V_n	510 volt	R	0.5 ohm
N_s	6	L_u	6.5 mH	J	0.005 kgm ²	T_l	13.5 Nm
P	4 kw	L_a	126.3 mH	B	0.004 $\frac{Nm}{rad/sec}$		

این موتور و درایو آن در پروژه "طراحی، ساخت و کنترل هوشمند موتور سوئیچ رلوکتانس" در مرکز پژوهشکده سیستمهای هوشمند طراحی و ساخته شده است

تقدیر و تشکر

نویسندگان بدین وسیله از کمک و همکاریهای علمی کلیه محققین و پژوهشگران گروه، به ویژه جناب آقای دکتر مغانی به دلیل دقت نظر و همکاری علمی ایشان تشکر به عمل می آورند.

مراجع

- [1] B. Fahimi, G. Suresh, M. Ehsani, "Review of Sensorless Control Methods in SRM" IEEE Trans.on Ind. App. 2000
- [2] R.A. McCann, I. Husain, "Application of a Sliding Mode Observer for SRM" IEEE Trans. On Ind. App., pp. 525-532, 1997

- [3] I.W. Yang, Y.S. Kim, Y.G. Lee "The Rotor Speed and Position Sensorless Control of SRM using the Binary Observer" TENCON'99 Proc. of the IEEE 1999
- [4] I.W. Yang, Y.S. Kim, J.W. Shin, "The Rotor Speed and Position Sensorless Control of SRM using the Adaptive Observer" IEEE TENCON 1999
- [5] A.D. Cheok, N. Ertugrul, "Use of Fuzzy Logic for Modeling, Estimation, and Prediction in SRM Drives" IEEE Trans. On Ind. Elec. , Vol. 46, No. 6, 1999
- [6] S. Mir, I. Husain, M.E. Elbuluk , "Self-tuning of Sensorless SRM Drives with Online Parameter Identification" IEEE Trans. On Ind. App. 2000
- [7] S. Mir, I. Husain, M.E. Elbuluk, "SRM Modeling with Online Parameter Identification" IEEE Trans.on Ind. App. 1998
- [8] A. Cheok, N. Ertugrul, "A Model Free Fuzzy Logic Based Rotor Position Sensorless SRM Drives" IEEE - IAS Annual Meeting 1991
- [9] J.P. Lyons, S.R. MacMinn, M.A. Preston, "Flux/Current Methods for SRM Rotor Position Estimation" IEEE Trans. on Ind. App., vol. 1, pp. 482-487, 1991
- [10] A. Kawamura "Survey of Position Sensorless SRM Control" IEEE Ind. Elec. Cont. and Inst. IECON'94, vol. 3, pp. 1595-1598, 1994
- [11] I. Husain, S. Sodhi, M. Ehsani, "Sliding Mode Observer Based Control for SRM Drives" IEEE-IAS Conf. Rec. 1994
- [12] R. McCann, M.S. Islam, I. Husain "Application of a Sliding-Mode Observer for Position and Speed Estimation in SRM Drives" IEEE Trans. on Ind. App., vol. 37, No. 1, pp. 51-58, 2001
- [13] I. H. Al-Bahadly, "DSP-Based Sensorless Position Estimation in Switched Reluctance Drives" IEEE 1999
- [14] C. Eyguesier, K.J. Tseng, F. Yan, S. Cao, "A Basic Algorithm of Sensorless Position Detection using Fuzzy Logic for the SRM Drives" IEEE, ISIE'99-Bled, Slovenia 1999
- [15] A. Lumsdaine, J.H. Lang, "State Observers for Variable Reluctance Motors" IEEE Trans. On Ind. Elec., vol. IE-37, No. 2, pp. 133-142, 1990
- [16] Miller, T.J.E. et al. " Switched Reluctance Motors and Their Control", Oxford Press, NewYork, 1993
- [17] S. U. Kim, J. S. Kim, H. J. Kim, Y. S. Kim, "Binary Observer for Speed Sensorless Vector Control of Induction Motors" IEEE, Pow. Elec. Speci. Conf. 1997
- [18] Y. S. Kim, J. Y. Ahn, W. S. You, K. M. Cho, "A speed Sensorless Vector Control for BDCM using Binary Observer" IEEE, Ind. Elec. Cont. and Inst. 1996
- [19] B. Fahimi, J.P. Johnson, M. Ehsani, "Artificial Intelligence Approach to Controlling SRM Drives with Manufacturing Imperfections" IEEE Conference 1996

[۲۰] پیمان اسدی، کارو لوکس، محمد حسن مدیر شانه چی، حسن غفوری فرد، " کنترل دور موتور سوئیچ رلوکتانس با اهداف چندگانه " هفتمین کنفرانس مهندسی برق، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، اردیبهشت ۱۳۷۸

[۲۱] صبا صدقی زاده " طراحی و پیاده سازی کنترل کننده مقاوم بدون حسگر برای موتور SR " ، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش کنترل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران، اسفند ۱۳۸۰