مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۶۰-۵۱

کنترل مقاوم ماشین القایی شش فازه متقارن در شرایط خطای قطع فاز بر مبنای روش ADRC

علی حجاری[۱]، رضا کیانی نژاد[۲]، سید قدرت اله سیف السادات[۳]، علیرضا صفاریان[۴]، سید سعیداله مرتضوی[۵]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی برق،گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، a-hajary@phdstu.scu.ac.ir

[۲] دانشیار، موسسه آموزش عالی الکترونیکی برخط، اهواز، reza.kiani@scu.ac.ir

[۳] استاد، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، Seifossadat@yahoo.com

[۴] استادیار، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، a.saffarian@scu.ac.ir

[۵] دانشیار، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، mortazavi_s@scu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۵/۴/۲۲، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۶/۱/۲۹)

چکیده: روش های کنترل درایو ماشین‌های چند فازه در حالت خطای قطع فاز معمولا طوری طراحی می‌شوند که موتور حداقل نوسانات گشتاور را داشته باشد. این روشها معمولا بر اساس مدل حالت خطای ماشین طراحی می‌شوند و در نتیجه بسیار وابسته به مدل ماشین هستند. در این مقاله هدف ارائه روش کنترلی جدید جهت کنترل موتور القایی شش فازه در حالت قطع فاز است. از آنجایی که طراحی ADRC[۱] مستقل از مدل و پارامترهای ماشین انجام می‌شود در این مقاله برای اولین بار از این روش کنترلی جهت کنترل موتور چندفازه در شرایط قطع فاز استفاده شده است. دراین روش، برای کنترل موتور چندفازه در حالت خطا نیازی به تغییر در ساختار کنترلی نیست و کنترل ماشین در حالت خطای قطع فاز بدون نیاز به تشخیص وقوع خطا انجام می‌گیرد. عملکرد روش ذکر شده در شرایط سالم با کنترل کننده PI و در حالت قطع فاز با کنترل کننده رزونانسی (PI دوتایی) مقایسه شده و صحت تحلیل های انجام شده با نتایج شبیه سازی بر روی یک موتور القایی شش فازه نشان داده می‌شود و ملاحظه می‌شود که با ADRC درایو موتور القایی شش فازه، در هر دو وضعیت سالم و قطع فاز دارای عملکرد به مراتب بهتری نسبت به کنترل کننده های سنتی و متداول است.

کلمات کلیدی: کنترل مقاوم، موتور القایی شش فازه، خطای قطع فاز،کنترل کننده PI،کنترل کننده رزونانسی، ADRC .

Robust Control of Symmetrical Six-Phase Induction Machine under Open-phase Fault Condition based on ADRC

Ali Hajary, Reza Kianinezhad, Ghodratollah Seyfossadat, Alireza Saffarian, Saeidollah Mortazavi

Abstract: Control methods for multi-phase machine drives under open-phase fault condition are commonly designed to achieve minimum torque ripple. These methods are usually based on machine fault model. Therefore, it is highly model dependant. In this article, a new robust control method for six-phase induction motors (SPIM) under open-phase fault condition is proposed. Design of ADRC is independent of the controlled system model and machine parameters. This method has been proposed for the first time for multi-phase machines in the post-fault situation. There is no need to change control structure for post-fault operation and machine control in faulty condition is carried out without need to fault detection. Performace of ADRC in healthy and faulty situations are compared with PI and resonant (dual PI) controllers. Simulation results on a six-phase induction motor are presented for verification of the proposed control scheme. It can be seen the six-phase induction motor drive shows better performance when it works with ADRC in both healthy and faulty operation modes.

[1] Active Disturbance Rejection Control

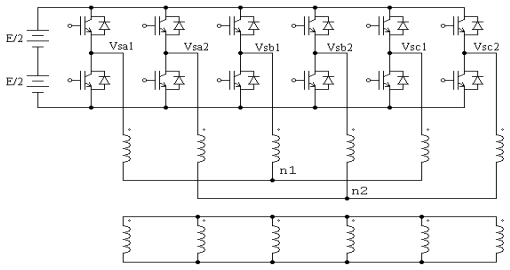
[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.5.2]

Keywords: Robust Control, Six-phase Induction Motor, Open Phase Fault, PI Controller, Resonant Controller, ADRC.

۱- مقدمه

ماشین‌های چند فازه به دلیل مزیت‌های مختلف در سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از مهمترین مزیت‌های ماشین‌های چند فازه نسبت به نوع سه فازه، قابلیت اطمینان بالاتر آنها در حالت خطای قطع فاز است که این خصوصیت موجب کاربرد روزافزون این موتورها در صنایع کشتی سازی، زیر دریایی و صنایع هوایی شده است[۱]. یکی از متداول‌ترین خطاهایی که در این موتورها رخ می‌دهد خطای قطع فاز است که در اثر سوختن کلیدهای اینورتر، سوختن سیم پیچی موتور و یا قطع اتصالات سیم پیچی ها، ممکن است رخ دهد. در میان ماشین‌های چند فازه، آنهایی که شامل چند دسته سیم پیچ سه فازه هستند مانند شش، نه و دوازده فازه، بیشتر مورد توجه هستند و در مقایسه با ماشین‌های با تعداد فاز فرد، این ماشین‌ها از مزایای ماشین‌های سه فاز بهره می‌برند. ساختار کلی موتور القایی شش فازه به همراه اینور تغذیه کننده آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.

ساده ترین روش کنترل ماشین‌های چند فازه با چندین مجموعه سیم پیچی سه فاز، غیر فعال کردن مجموعه سه فاز شامل فاز معیوب است[۱]. اما این کار باعث می‌شود توان موتور تا حد قابل ملاحظه ای کاهش یابد. برخی از کارهای گذشته برای کنترل موتور در حالت خطا از یک ماتریس تبدیل دکوپله جدید با مرتبه کاهش یافته برای ادامه کار در شرایط جدید استفاده کرده و معادلات جدید موتور را در این شرایط استفاده کرده اند[۲-۴]. در این حالت معادلات بدست آمده از ماتریس کاهش مرتبه یافته دارای پارامترهای متفاوت بوده و بنابراین تغییرات قابل ملاحظه ای در



شکل ۱: نمودار مداری موتور القایی شش فازه با دو نوترال مجزا به همراه اینورتر تغذیه کننده آن [۳].

ساختار کنترلی مورد نیاز است. روش دیگری که در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است استفاده از روش کنترل پیشگو است [۵،۶] که به عنوان یک جایگزین مناسب برای روش کنترل برداری (FOC[1]) استاندارد، تبدیل شده است. در این روش، مدل دقیقی از ماشین برای پیش بینی رفتار آینده آن مورد نیاز است همچنین ماتریس تبدیل نیازمند تغییر جهت کنترل حالت خطا است. اما روش متداولی که در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است استفاده از کنترل کننده های رزونانسی یا PI دوتایی است که یکی در جهت سنکرون و دیگری درجهت مخالف سنکرون، قادر به رهگیری سیگنال غیر سینوسی و مقابله با مولفه های توالی منفی جریان در حالت خطا هستند[۴،۷]. در این روش تعداد تغییرات در کنترل کننده های جریان به حداقل می‌رسد و در مقایسه با کنترل پیشگو، فرکانس کلیدزنی PWM ثابت باقی می‌ماند. با این حال، اغلب روش‌های ارائه شده، مبتنی بر مدل ماشین و معادلات آن در حالت خطا هستند که موجب پیچیدگی و تنوع در حالات مختلف قطع فاز و همچنین مستلزم وجود تجهیزات لازم برای تشخیص وقوع خطا هستند.

روش ADRC برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ توسط هان [۹،۸] پیشنهاد شد. ADRC یک کنترل کننده غیر خطی برای سیستم با مدل نامشخص است. این روش، اغتشاشات خارجی نظیر گشتاور بار و اغتشاشات داخلی سیستم، نظیر تغییر در پارامترها را تخمین زده و با اعمال ورودی مناسب جبران می‌کند، به همین دلیل این روش نیاز به مدل دقیقی از سیستم ندارد و این به این معناست که طراحی ADRC به طور ذاتی مستقل از مدل سیستم و پارامترهای آن است. ADRC به عنوان یکی از ساده ترین روشهای کنترلی مقاوم (Robust) در بسیاری از زمینه های فنی و همچنین در کنترل موتورها به کار رفته است [۱۰-۱۳]. در این مقاله هدف ارائه و طراحی این کنترل کننده به عنوان روشی جدید برای کنترل ماشین القایی چند فازه در حالت قطع فاز است، به طوری که بدون نیاز به معادلات و مدل‌سازی ماشین در حالت خطای قطع فاز و تغییر در ساختار کنترلی، بتوان کار کنترل ماشین را در شرایط جدید نیز انجام داد.

روش کنترل دور موتور استفاده شده، روش FOC است که به دلیل قابلیت جداسازی شار و گشتاور، پاسخ دینامیکی بالا و دقت درکنترل سرعت را

موجب می‌شود و کنترل موتور القایی را همچون ماشین DC ساده می-کند.

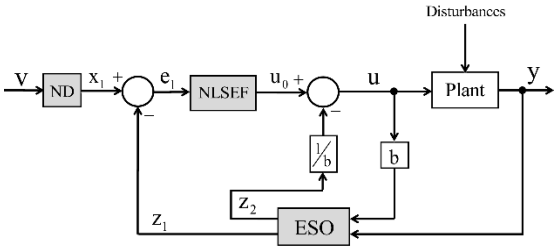
همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است هر ADRC از سه بخش تشکیل شده است. ۱-مشتقگیر غیر خطی (ND[2]). ۲- مشاهده گر حالت توسعه یافته (ESO[3]) و ۳-کنترل کننده غیر خطی خطای فیدبک (NLSEF[4]). مشاهده گر حالت توسعه یافته را می‌توان به عنوان یک فیدبک دینامیکی برای سیستم تعبیر نمود. ساختار و عملکرد این مشاهده-گر اغتشاش، تنها با نرخ تغییرات مدل سیستم مشخص می‌شود. بنابراین نسبت به عدم قطعیت مدل سیستم حساسیتی ندارد. نقش ND تعیین پاسخ

[1] Field Oriented Control

[2] Nonlinear Differentiator
[3] Extended State Observer
[4] Nonlinear State Error Feedback Control

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.5.2]

گذرای مطلوب به ورودی پله است. ND تغییرات ناگهانی در سیگنال ورودی را به منظور کاهش فراجهش در پاسخ خروجی، ملایم می‌کند و NLSEF ورودی مناسب را با استفاده از کنترل کننده غیر خطی به منظور رهگیری متغیر حالت، فراهم می‌کند. در این مقاله روش ADRC برای کنترل موتور القایی شش فازه در حالت سالم و قطع فاز مورد تحلیل قرار گرفته است و نتایج آن با کنترل کننده PI و رزونانسی مقایسه و ارزیابی خواهد شد.



شکل ۲: نمودار روش ADRC

ساختار مقاله به این شرح است که در بخش دوم، مدل و معادلات ماشین القایی شش فازه معرفی شده است. در قسمت سوم اصول روش پیشنهادی ADRC بیان می‌شود. در قسمت بعدی، نتایج شبیه سازی موتور القایی شش فازه در حالت سالم و قطع فاز تحت شرایط مختلف و کنترل کننده های معرفی شده، در نرم افزار متلب/سیمولینک مورد بررسی و ارزیابی قرار داده شده است و در بخش پایانی نتایج حاصل از مقاله به طور خلاصه تشریح شده است.

۲- معادلات ماشین القایی شش فازه

بر طبق روش تبدیل بردار فضایی(VSD[1])، ماتریس تبدیل زیر متغیرهای فازی ماشین را به سه زیر فضای متعامد (z_1-z_2) ، (z_3-z_4) و $(\alpha-\beta)$ تبدیل می‌کند[۴].

$$[T_6]=\frac{1}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & cos(\gamma) & cos(2\pi/3+\gamma) & cos(4\pi/3+\gamma) \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & sin(\gamma) & sin(2\pi/3+\gamma) & sin(4\pi/3+\gamma) \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & cos(\pi-\gamma) & cos(\pi/3-\gamma) & cos(5\pi/3-\gamma) \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & sin(\pi-\gamma) & sin(\pi/3-\gamma) & sin(5\pi/3-\gamma) \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (۱)$$

که γ، زاویه الکتریکی بین دو مجموعه سیم‌پیچی است که در این مقاله برای ماشین متقارن، ۶۰ درجه درنظرگرفته شده است. با اعمال تبدیل بالا به متغیرهای فازی استاتور ماشین، مدل دکوپله ماشین شش فازه به صورت زیر برای متغیرهای فازی استاتور بدست می‌آید [۴].

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{\beta s} \\ V_{xs} \\ V_{ys} \\ V_{0+s} \\ V_{0-s} \end{bmatrix}=[T_6]\begin{bmatrix} V_{a1s} \\ V_{b1s} \\ V_{c1s} \\ V_{a2s} \\ V_{b2s} \\ V_{c2s} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{\beta s} \\ i_{xs} \\ i_{ys} \\ i_{0+s} \\ i_{0-s} \end{bmatrix}=[T_6]\begin{bmatrix} i_{a1s} \\ i_{b1s} \\ i_{c1s} \\ i_{a2s} \\ i_{b2s} \\ i_{c2s} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

۲-۱- مدل ماشین در زیرفضای $\alpha-\beta$

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r_s+L_s p & 0 & Mp & 0 \\ 0 & r_s+L_s p & 0 & Mp \\ Mp & \omega_r M & r_r+L_r p & \omega_r L_r \\ -\omega_r M & Mp & -\omega_r L_r & r_r+L_r p \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$M=3L_{ms}, L_r=L_{lr}+M, L_s=L_{ls}+M$$

این مدل، مشابه با مدل ماشین سه فازه در مختصات مرجع ساکن است.

۲-۲- مدل ماشین در زیرفضای z_1-z_2

$$\begin{bmatrix} v_{sz1} \\ v_{sz2} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r_s+L_{ls}p & 0 \\ 0 & r_s+L_{ls}p \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} i_{sz1} \\ i_{sz2} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r_r+L_{lr}p & 0 \\ 0 & r_r+L_{lr}p \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} i_{rz1} \\ i_{rz2} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

۲-۳- مدل ماشین در زیرفضای z_3-z_4

$$\begin{bmatrix} v_{sz3} \\ v_{sz4} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r_s+L_{ls}p & 0 \\ 0 & r_s+L_{ls}p \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} i_{sz3} \\ i_{sz4} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r_r+L_{lr}p & 0 \\ 0 & r_r+L_{lr}p \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} i_{rz3} \\ i_{rz4} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

همانطور که از این سه مدل دیده می‌شود، تبدیل انرژی الکترومکانیکی فقط در زیر فضای $\alpha-\beta$ انجام می‌شود و دیگر زیر فضاها سهمی در تبدیل انرژی الکترومغناطیسی ندارند. زیرفضاهای z_1-z_2 و z_3-z_4 فقط تولید تلفات می‌کنند در نتیجه باید به گونه ای کنترل شوند تا حداقل شوند در نتیجه مقدار مرجع آنها برابر با صفر درنظرگرفته می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که ساختار کنترل کننده گشتاور و سرعت برای تحلیل موتور شش فازه تقریبا مشابه با موتور سه فازه است که در آن کنترل در مدار معادل $\alpha-\beta$ انجام می‌شود [۳].

۳- معرفی روش کنترلی ADRC برای ماشین القایی شش فازه

روش کنترلی ارائه شده از سه ADRC برای تنظیم سرعت و گشتاور موتور در حالت خطا استفاده می‌کند و به دلیل کاهش پیچیدگی الگوریتم کنترلی، شار موتور به صورت حلقه باز کنترل می‌شود. در این روش نیاز به اندازه گیری جریان i_{ds} و جریان i_{qs} می باشد.

[1] Vector Space Decomposition

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.5.2]

۳-۱- مشتقگیر غیرخطی

در کنترل کننده های سنتی PI، هر گونه تغییر لحظه ای می‌تواند موجب فراجهش در پاسخ خروجی شود. ND در مسیر مستقیم سیگنال ایجاد می-شود و برای کنترل فرآیند حالت گذرا هنگام رهگیری سیگنال مرجع و همچنین کاهش اثر نویزهای ورودی به سیستم است و باعث تعادل مناسب بین پاسخ سریع حالت گذرا و فراجهش اندک خواهد شد.

ND به صورت زیر بیان می‌شود [۱۲]:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h.\,fst(x_1(k) - v(k), x_2(k), r, h_0) \end{cases} \quad (۸)$$

که f_{st} تابع غیر خطی است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$fst(\lambda_1(k), \lambda_2(k), r, h_0) = -\begin{cases} r.\xi(k)/d, |\xi(k)| \le d \\ r.\mathrm{sgn}(\xi(k)), |\xi(k)| > d \end{cases} \quad (۹)$$

$$y_{td}(k) = \lambda_1(k) + h_0\lambda_2(k), \xi_0(k) = (d^2 + 8r|y_{td}(k)|)^{\frac{1}{2}}$$

$$\xi(k) = \begin{cases} \lambda_2(k) + (\xi_0(k) - d)/2, |y_{td}(k)| > d_0 \\ \lambda_2(k) + y_{td}(k)/h_0, |y_{td}(k)| \le d_0 \end{cases} \quad (۱۰)$$

$$d = rh_0 \ , \ d_0 = dh_0$$

$v(k)$ سیگنال مرجع ورودی ADRC است که در حلقه کنترل سرعت موتورهای الکتریکی ، ω_r^* است. $x_1(k)$ سیگنال رهگیری $v(k)$ و $x_2(k)$ مشتق $x_1(k)$ و همچنین به طور تقریبی مشتق $v(k)$ است.h مقدار تغییر بین دو تکرار است . r و h_0 دو پارامتر قابل تنظیم هستند که r ضریب نرخ همگرایی است. مقدار بزرگتر r باعث سرعت سریعتر همگرایی $x_1(k)$ به ω_r^* است و h_0 فاکتور فیلترینگ جهت فیلتر کردن نویز است.

۳-۲- مشاهده‌گر حالت توسعه یافته

در صورتی که یک سیستم غیرخطی نامشخص با اغتشاش نامشخص همانند زیر داشته باشیم:

$$y^{(n)} = f(y, y^{\square}, ..., y^{(n-1)}, k) + d(k) + bu(k) \quad (۱۱)$$

به طوری که f یک تابع نامشخص و d یک اغتشاش نامشخص است، u ورودی سیستم، y خروجی سیستم و b پارامتر سیستم است. با نمو متغیر $\mathbf{y}$ به متغیر حالت سیستم و نمو متغیر حالت سیستم که مشتق های متوالی متغیر حالت اندازه گیری شده است، مشاهده‌گر حالت توسعه یافته ESO برای این سیستم تنها بر اساس خروجی اندازه گیری شده بدست می آید.

مهمترین بخش ADRC است‌که اغتشاشات متنوع شامل تغییر در پارامترها، عدم قطعیت مدل و اغتشاشات به وجود آمده ناشی از قطع فاز را تخمین و جبران می‌کند و با فراهم آوردن مقاومت بالاتر نسبت به تغییر در مدل و پارامترهای موتور، کنترل کننده های ARDC را می‌توان به عنوان یک گزینه مناسب برای کنترل حالت خطا درنظر گرفت. همچنین مشاهده گر حالت توسعه یافته ایجاد شده، دارای حساسیت پایین نسبت به تغییر پارامترهای طراحی آن نیز هست در نتیجه تنظیم پارامترهای آن چندان مشکل نخواهد بود. ساختار مشاهده‌گر اغتشاش به صورت زیر است [۱۲]:

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_1.\,fal(e(k), \alpha_1, \delta_1) + bu(k)) \\ z_2(k+1) = z_2(k) - h\beta_2\,fal(e(k), \alpha_1, \delta_1) \end{cases} \quad (۱۲)$$

که تابع fal یک تابع غیر خطی به صورت زیر است:

$$fal(e(k), \alpha, \delta) = \begin{cases} |e(k)|^{\alpha}\,\mathrm{sgn}(e(k)), |e(k)| > \delta \\ e(k)/\delta^{1-\alpha}, |e(k)| \le \delta \end{cases} \quad (۱۳)$$

$y(k)$ سیگنال خروجی سیستم است که می‌بایست کنترل شود. برای حلقه کنترل سرعت، $y(k)$ سرعت (ω_r) است. $z_1(k)$ ، تخمین متغیر حالت (سرعت) و $z_2(k)$ تخمین اغتشاشات سیستم است. ESO دارای چهار پارامتر قابل تنظیم $\beta_1, \delta_1, \alpha_1$ و β_2 است. دامنه تغییرات α_1 از صفر تا یک است. هرچه مقدار α_1 کوچکتر باشد توانایی ESO در برابر عدم قطعیت مدل موتور و اغتشاشات بیشتر است. δ_1 تعیین کننده محدوده خطی تابع غیر خطی است. عملکرد دینامیکی سیستم با تغییرات β_1 و β_2 به طور قابل ملاحظه ای تغییر می‌کند. β_1 عمدتا روی تخمین متغیر حالت و β_2 عمدتا روی تخمین اغتشاشات تاثیر می‌گذارد. هرچقدر مقادیر β_1 و β_2 بزرگتر باشد، همگرایی تخمین سریعتر خواهد بود و از طرف دیگر اگر β_1 و β_2 خیلی بزرگ باشند، ممکن است تخمین همگرا نشود.

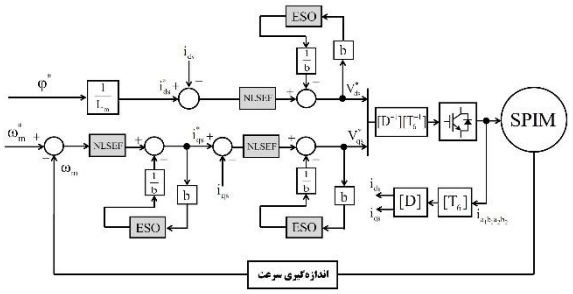
۳-۳- کنترل کننده غیرخطی خطای فیدبک

کنترل کننده خطی، ترکیبی از کنترل کننده های تناسبی- انتگرالی و مشتقگیر است. ترکیب غیر خطی این کنترل کننده ها درجه آزادی بالاتری را برای بهبود عملکرد سیستم ارائه می‌دهد به طوری که در حالت قطع فاز که گشتاور و سرعت ماشین دارای خطای سینوسی خواهند بود، در این حالت کنترل کننده غیر خطی دارای توانایی بالاتری در رویارویی با این نوع خطا نسبت به کنترل کننده خطی PI است. بر حسب خروجی ND و ESO، این کنترل کننده مطابق زیر خواهد بود [۱۲]:

$$\begin{cases} e(k) = x_1(k) - z_1(k) \\ u_0(k) = \beta_3\,fal(e_1(k), \alpha_2, \delta_2) \\ u(k) = u_0(k) - z_2(k)/b \end{cases} \quad (۱۴)$$

که $u(k)$ خروجی کنترلی ADRC است. برای حلقه کنترلی سرعت، $u(k)$ مولفه عمودی جریان مرجع استاتور (i_{qs}^*) و α_2 و δ_2 دارای معانی مشابه با α_1 و δ_1 است. β_3 سرعت پاسخ سیستم را کنترل می-کند اما با وجود مقادیر بزرگ β_3 ، فراجهش بالایی ظاهر خواهد شد. نمودار کنترل برداری موتور القایی شش فازه و کنترل کننده های ADRC که برای سه حلقه کنترل سرعت، کنترل i_{sd} و i_{sq} که در حالت سالم و قطع فاز مورد استفاده قرار خواهد گرفت به صورت شکل ۳ می‌باشد:

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.5.2]



شکل ۳: نمودارکنترل برداری موتور القایی شش فازه در حالت استفاده از ADRC

به طور کلی دقت، سرعت و عدم حساسیت به پارامترهای موتور، موارد لازم جهت کنترل سرعت موتور می‌باشند. همانطور که می‌دانیم عملکرد کنترل کننده های PI در اثر تغییر پارامترهای ماشین و یا عدم دقت در تعیین آنها، تحت تاثیر قرار می‌گیرد، همچنین هنگامی که اغتشاشات گشتاور بار وجود دارد، کنترل کننده های PI نیازمند زمان بازیابی نسبتا زیادی جهت برگشت به سرعت مرجع در زمان اعمال گشتاور بار، هستند و در نتیجه سرعت پاسخ سیستم به این اغتشاش خارجی، کند است [۱۲]. در سالهای اخیر روشهای زیادی جهت تخمین پارامترهای ماشین برای روش FOC پیشنهاد شده است. با این وجود پارامترهای موتور ذاتا مستقل از یکدیگر نبوده و بنابراین پارامترهای زیادی نیاز است که تخمین زده شوند که این مساله، باعث پیچیدگی الگوریتم خواهد شد. در حالت وقوع خطای قطع فاز نیز، مدل و پارامترهای ماشین تغییر کرده و دیگر روابط و مدل ماشین سالم برای تحلیل حالت قطع فاز معتبر نمی‌باشد. در این مقاله، هدف بررسی توانایی این کنترل کننده در شرایط مختلف شامل مواجهه با گشتاور بار به عنوان اغشاش خارجی، مقاوم بودن در برابر تغییر پارامترها و همچنین توانایی حذف اغتشاشات ناشی از خطای قطع فاز می‌باشد. اما در روش ADRC به دلیل وجود ND در مسیر مستقیم جهت مواجهه با تغییرات ناگهانی و همچنین مشاهده گر حالت توسعه یافته جهت تخمین و جبران اغتشاشات داخلی و خارجی و در نهایت وجود کنترل کننده غیر خطی NLSEF ، سرعت موتور دارای فراجهش و زمان نشست کمتری است و اغتشاش خارجی روی موتور به خوبی برطرف خواهد شد.

هنگامی که ماشین‌های چندفازه تحت روش کنترل برداری و کنترل کننده PI مورد استفاده قرار می‌گیرند، در اثر قطع فاز، گشتاور خروجی و بالطبع سرعت موتور دارای نوسان خواهد شد که به دلیل محدودیت پهنای باند فرکانسی کنترل کننده PI، این کنترل کننده در شرایط قطع فاز و حذف خطاهای متناوب کارایی لازم را نخواهد داشت. از طرفی با جایگزاری $i_{as}=0$ در معادلات ماشین درمی‌یابیم که در حالت قطع فاز دیگر شرایط دکوپله برقرار نبوده و داریم $i_{xs}=-i_{\alpha s}$. در این شرایط، روش متداولی که برای کنترل حالت قطع فاز و حذف نوسانات گشتاور و سرعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، تغییر جریان مرجع مولفه x به صورت $i_{xs}^{*}=-i_{\alpha s}^{*}$ و استفاده از کنترل کننده های PI دوتایی جهت مقابله با مولفه های توالی منفی جریان ناشی از اغتشاشات قطع فاز می‌باشد. اما در روش ADRC نیازی به تغییر مقدار مرجع مولفه x برای حالت بعد از خطا نخواهد بود، زیرا به دلیل خاصیت ذاتی ADRC در جهت مقابله با اغتشاشات مختلف، عدم تنظیم مناسب جریان مولفه x برای کنترل حالت بعد از خطا ($i_{xs}^{*}=0$) ، به صورت یک اغتشاش داخلی در ساختار ADRC جبران خواهد شد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

جهت نشان دادن عملکرد روش ADRC ، الگوریتم کنترل برداری موتور القایی شش فازه در حالت سالم و خطای قطع فاز در نرم افزار Matlab-Simulink شبیه سازی شده است. مشخصات موتور القایی شش فازه و بهره های تنظیم شده کنترل کننده ها نیز در جداول ۱ و ۲ پیوست مقاله آمده است.

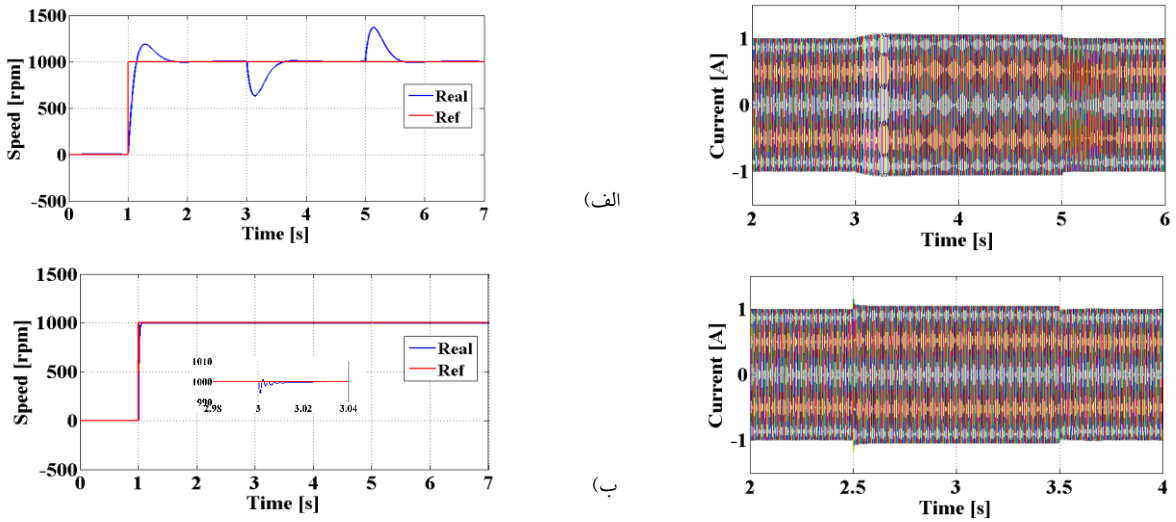
از آنجایی که عملکرد کنترل کننده PI و رزونانسی در حالت سالم تفاوتی با یکدیگر ندارند، ADRC در حالت سالم با کنترل کننده PI و در حالت قطع فاز با کنترل کننده PI و رزونانسی (PI دوتایی) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ابتدا در حالت سالم، عملکرد و حساسیت دو روش کنترلی PI و ADRC، تحت اعمال گشتاور بار به عنوان اغتشاش خارجی و سپس تغییر پارامترهای ماشین مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس عملکرد هر سه کنترل کننده در شرایط قطع فاز مورد ارزیابی و مقایسه قرار خواهد گرفت. تمامی پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده های PI و ADRC در مطلوبترین حالت تنظیم شده است و مقدار آنها در شرایط سالم و قطع فاز یکسان و بدون تغییر است.

۴-۱- بررسی توانایی حذف اغتشاش خارجی

شکل ۴ نتایج شبیه سازی و مقایسه ای این دو روش را در حالتی که گشتاور بار به عنوان اغتشاش خارجی به موتور اعمال می‌شود نشان می‌دهد. موتور القایی شش فازه ابتدا به صورت بدون بار کار می‌کند، سپس گشتاور بار ۰/۱ N.m در ثانیه سوم به موتور اعمال شده و در ثانیه پنجم بار از روی موتور برداشته می‌شود. سرعت مرجع موتور روی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه تنظیم شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود هنگامی که کنترل کننده PI مورد استفاده قرار می‌گیرد، عملکرد درایو موتور القایی شش فازه در هنگام اعمال گشتاور بار تحت تاثیر قرار گرفته و سرعت ماشین با تاخیر به مقدار مرجع خود برمی‌گردد. در حالی که در روش ADRC و در مقایسه با کنترل کننده PI ، سرعت موتور دارای فراجهش و زمان نشست کمتری است و اغتشاش خارجی روی موتور به خوبی برطرف شده است.

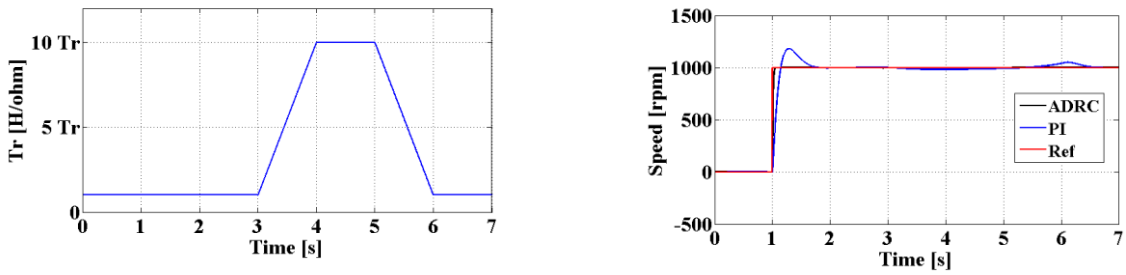
[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.5.2]



شکل ۴: مقایسه نتایج سرعت و جریان برای دو کنترل کننده الف) PI و ب) ADRC ، هنگامی که گشتاور بار به عنوان اغتشاش خارجی به موتور اعمال می‌شود

۴-۲- بررسی اثر تغییر پارامترها

جهت بررسی این مساله، شبیه سازی موتور با مقاومت روتور تغییر یافته و یا با تغییر ثابت زمانی روتور (τ_r) جهت مقایسه نتایج در بدترین شرایط با یکدیگر انتخاب شده است. شکل ۵ نتایج شبیه سازی را نشان می‌دهد. در این قسمت ثابت زمانی روتور (τ_r) به عنوان یکی از پارامترهای ماشین به صورت زیر تغییر خواهد کرد. هرچند که در عمل تغییر لحظه‌ای و زیاد این پارامترها اتفاق نمی افتد و همچنین اثر تغییر این پارامترها روی موتورهای با توان مختلف و در سرعت های مختلف، متفاوت است لذا در اینجا هدف مقایسه این دو روش کنترلی بوده بطوریکه بتوان حساسیت آنها را نسبت به این تغییرات مشاهده و ارزیابی نمود. همانطور که از شکل ۵ ملاحظه می‌شود کنترل کننده PI در مواجهه با این تغییرات دچار مشکل خواهد شد و کنترل سرعت ممکن است به خوبی انجام نشود ولی همانطور که در قبل اشاره شد در روش ADRC که دارای حساسیت پایین به پارامترهای موتور بوده و طراحی آن اساسا مستقل از مدل موتور انجام می‌شود، ملاحظه می‌شود که واکنش خاصی به این تغییرات از خود نشان نمی‌دهد.



شکل ۵: عملکرد دوکنترل کننده PI و ADRC و مقایسه حساسیت آنها به پارامترهای موتور (τ_r)

۴-۳- بررسی اثر قطع فاز

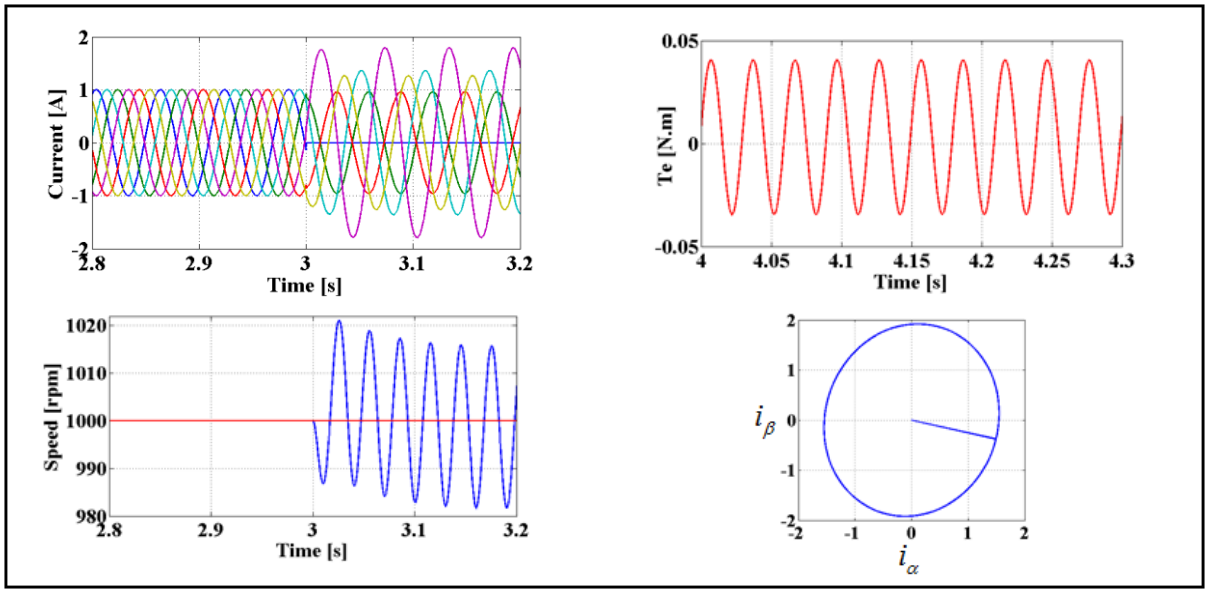
در این قسمت که در واقع هدف اصلی مقاله نیز هست قصد داریم عملکرد این دو کنترل کننده را در شرایط خطای قطع فاز بررسی کنیم موتور القایی شش فازه متقارن استفاده شده در شبیه سازی دارای دو نوترال مجزا می‌باشد که در واقع بدترین شرایط قطع فاز برای موتور شش فازه می‌باشد. جهت بررسی عملکرد این دو روش کنترلی در شرایط خطای قطع فاز همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، فرض می‌شود فاز اول از مجموعه سه فاز اول یا همان فاز a_1 در ثانیه سوم قطع شده است و در نتیجه جریان این فاز صفر و جریان فازهای باقیمانده به صورتی که دیده می‌شود و با فرض اینکه مقادیر آنها در مقدار نامی محدود شوند، نامتعادل خواهند شد. در نتیجه این نامتعادلی گشتاور خروجی و بالطبع سرعت موتور دارای نوسان خواهد بود که بسته به اینرسی و توان موتور، میزان این نوسانات متفاوت خواهد بود.

همانطور که در قبل گفته شد، کنترل کننده PI به دلیل محدودیت

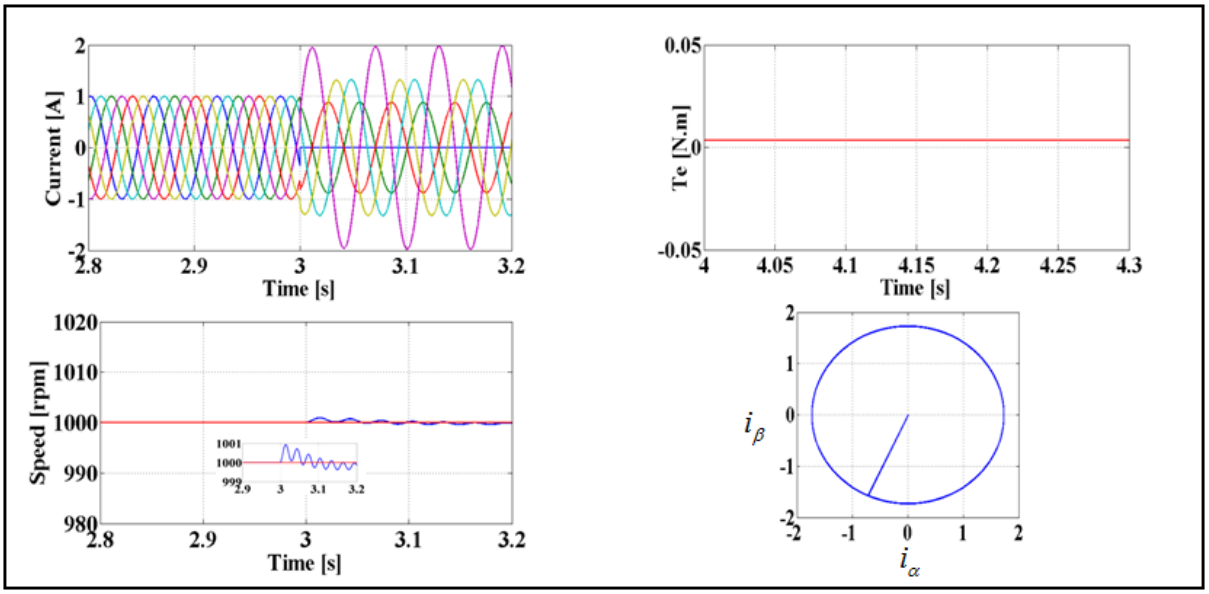
[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.5.2]

پهنای باند فرکانسی در مقابله با این خطای سینوسی ناتوان خواهد بود اما هنگامی که از کنترل کننده ADRC در حالت قطع فاز استفاده می‌شود، ماشین دارای حالت تعادل بهتری خواهد بود و نوسان گشتاور نسبت به حالتی که کنترل کننده PI مورد استفاده قرار می‌گیرد تا حد بسیار زیادی کاهش یافته است. همچنین جهت نمایش تعادل ماشین در حالت قطع فاز، نمودارهای گشتاور خروجی ماشین و جریان $(i_\alpha - i_\beta)$ ترسیم شده اند.

معیار ارزیابی عملکرد درایو در این مقاله جهت کنترل نوسانات خروجی گشتاور با شاخص ریپل گشتاور (TRF[1]) به صورت نسبت قله به قله ریپل گشتاور به مقدار گشتاور نامی (۰/۳ N.m) تعریف می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود گشتاور خروجی در حالتی که کنترل کننده PI مورد استفاده قرار می‌گیرد دارای ریپل قابل ملاحظه ای است که TRF متناظر با آن ۲۳٪ است و برای حالتی که از کنترل کننده رزونانسی استفاده می‌شود شاخص ریپل گشتاور حدود ۱٪ و در حالتی که از ARDC استفاده



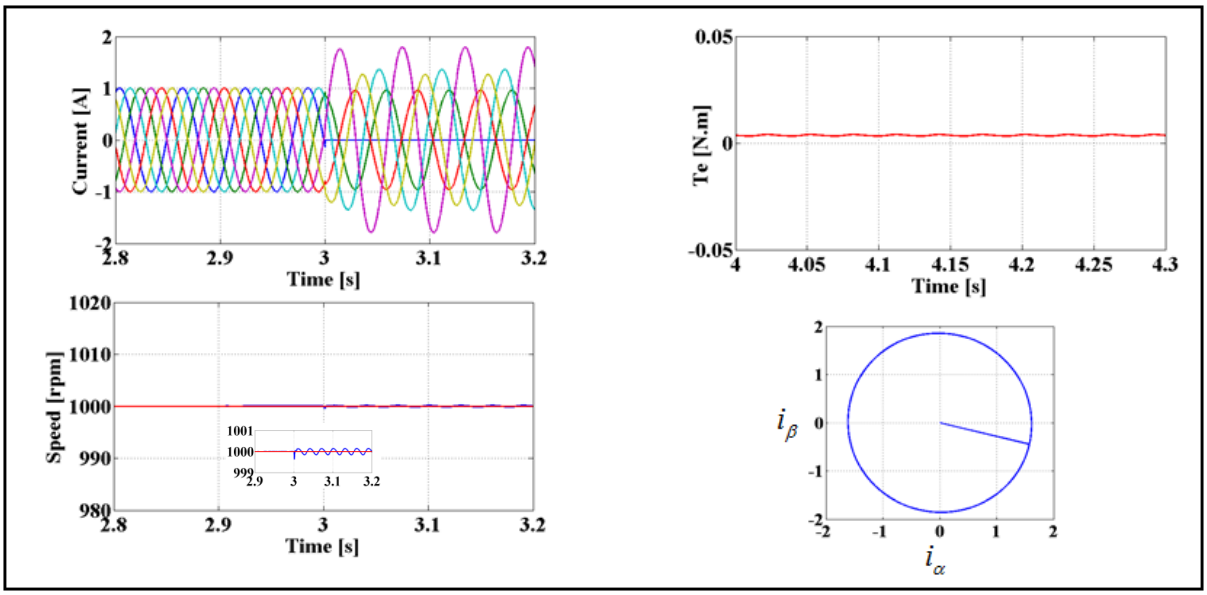
شکل ۶ الف: عملکرد کنترل کننده PI در شرایط قطع فاز



شکل ۶ ب: عملکرد کنترل کننده رزونانسی در شرایط قطع فاز

[1] Torque Ripple Factor

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.5.2]

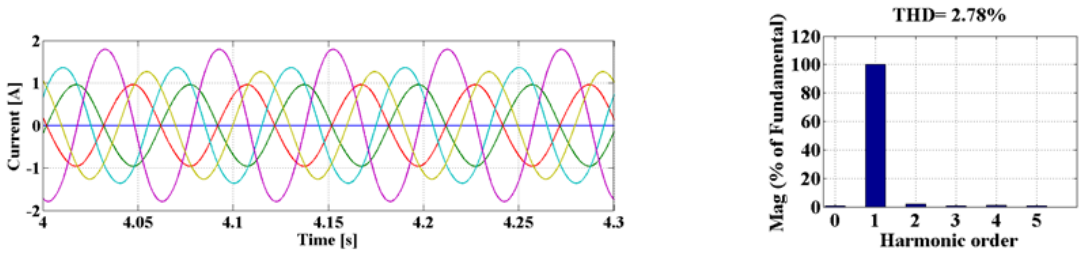


شکل ۶ ج: عملکرد کنترل کننده ADRC در شرایط قطع فاز

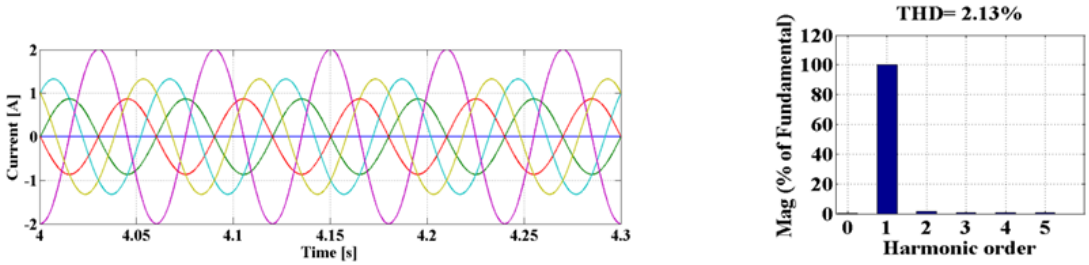
شکل ۶: مقایسه عملکرد سه کنترل کننده PI ، رزونانسی و ADRC در شرایط خطای قطع فاز

می‌شود برابر با ۳٪ است. همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج بدست آمده در دو حالت استفاده از کنترل کننده رزونانسی و ADRC برای کنترل قطع فاز تقریبا یکسان است . با این تفاوت که برای استفاده ازکنترل کننده رزونانسی در هنگام قطع فاز می‌بایست مقدار مرجع جریانها برای کنترل حالت خطا تغییر کند [۴،۷] در صورتی که در روش ADRC نیازی به هیچ گونه تغییر در ساختار کنترلی برای حالت بعد از خطا وجود ندارد.

به منظور تحلیل عملکرد این کنترل کننده ها در ایجاد اعوجاج هارمونیکی، در شکل ۷ شکل موج جریانهای موتور شش فازه با دو نوترال مجزا برای حالتی که فاز اول سیم‌پیچ اول یا همان a_1 قطع شده است به همراه نمایش هارمونیکی جریان فاز b_1 به عنوان نمونه، در شرایطی که از این سه کنترل کننده جهت کنترل حالت قطع فاز مورد استفاده قرار گرفته است، نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در حالتی که از کنترل کننده های PI و رزونانسی در حالت خطا استفاده می‌شود چون جریان فیدبک جهت حذف اغتشاش گشتاور خروجی وجود ندارد، بنابراین هارمونیک جریان در حالتی که این کنترل کننده ها مورد استفاده قرار می‌گیرند کمتر از حالتی است که از کنترل کننده ADRC استفاده خواهد شد.

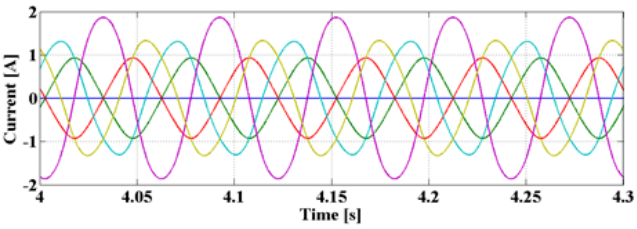


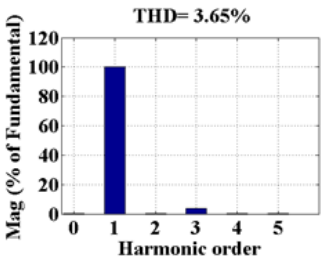
شکل ۷ الف: شکل موج جریانهای موتور در حالت قطع فاز a_1 و هارمونیک جریان فاز b_1 با کنترل کننده PI



شکل ۷ ب: شکل موج جریانهای موتور در حالت قطع فاز a_1 و هارمونیک جریان فاز b_1 با کنترل کننده رزونانسی

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.5.2]





شکل ۷ ج: شکل موج جریانهای موتور در حالت قطع فاز a_1 و هارمونیک جریان فاز b_1 با کنترل کننده ADRC

شکل ۷ : شکل موج جریانهای موتور شش فازه با دو نوترال مجزا و نمایش هارمونیکی جریان فاز b_1 برای سه روش کنترلی PI ، رزونانسی و ADRC

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روشی جدید و موثر درکنترل موتور القایی شش فازه برای هر دو حالت سالم و قطع فاز ارائه شده است به طوری که برخلاف روشهای قبلی، کنترل موتور هم در شرایط سالم و هم در شرایط خطای قطع فاز به درستی و با دقت بالا و بدون هیچ گونه تغییر در ساختار کنترلی انجام می‌گیرد. سه کنترل کننده PI ، رزونانسی و ADRC جهت کنترل موتور القایی شش فازه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. کنترل کننده ADRC به دلیل توانایی حذف اغتشاش خارجی نظیر گشتاور بار در حالت سالم و همچنین حذف اغتشاشات بوجود آمده و ایجاد شرایط تعادل مناسب در شرایط خطا و بخصوص عدم نیاز به تغییر در ساختار کنترل کننده در شرایط خطای قطع فاز، دارای توانایی بالاتری نسبت به کنترل کننده های PI و رزونانسی است. در مقایسه با کنترل کننده PI و رزونانسی، اگر چه پارامترهای بیشتری وجود دارند که باید تنظیم شوند، اما با این وجود هنگامی که این پارامترها به درستی تنظیم شوند مقدار آنها برای هر محدوده سرعت، گشتاور بار و همچنین هم برای حالت سالم و هم شرایط قطع فاز موثر خواهد بود در حالی که برای کنترل کننده PI و رزونانسی برای هر محدوده سرعت و حالت قطع فاز نیاز به تنظیم مجدد بهره ها برای یک ماشین یکسان می‌باشد.

پیوست

جدول۱: مشخصات موتور القایی شش فازه

تعداد زوج قطب (p)	۲
توان نامی	۹۰ W
ولتاژ نامی	۴۲ V
سرعت نامی	۲۸۰۰ Rpm
گشتاور نامی	۰/۳ N.m
جریان نامی	۲/۶ A
شار نامی (phir)	۰/۰۶ Wb
اندوکتانس متقابل (M)	۱۱/۵ mH
مقاومت استاتور (R_S)	۰/۲ Ω
مقاومت روتور (R_r)	۰/۲۱۱ Ω
ضریب اینرسی(J)	۱۰۰×۱۰$^{-۶}$ Kg.m^2
فرکانس	۵۰

روش کنترلی	ADRC	PI و رزونانسی
حلقه کنترل سرعت	ND: r = ۵۰, h_0 = ۰/۰۲ ESO: α_1 = ۱, δ_1 = ۰/۷۵, β_1 = ۵۰, β_2 = ۶۰ NLSEF: β_3 = ۱۰, δ_2 = ۰/۵, α_2 = ۰/۷۵ b = ۳×P×$phir$/۲=۹۰۰	K_p = ۰/۰۲ K_I = ۰/۰۵
حلقه کنترل مولفه q جریان	ND: r = ۱۰۰, h_0 = ۰/۰۲ ESO: α_1 = 1, δ_1 = ۱۰, β_1 = ۱۵۰, β_2 = ۲۰ NLSEF: β_3 = ۰/۲, δ_2 = ۱۰, α_2 = ۰/۷۵ b = ۳×P×$phir$/۲=۹۰۰	K_p = ۰/۰۲ K_I = ۱۰
حلقه کنترل مولفه d جریان	ND: r = ۱۰۰, h_0 = ۰/۰۲ ESO: α_1 = ۱, δ_1 = ۰/۷۵, β_1 = ۵۰, β_2 = ۶۵ NLSEF: β_3 = ۰/۱, δ_2 = ۱۰, α_2 = ۰/۷۵ b = ۳×P×$phir$/۲=۹۰۰	K_p = ۰/۰۲ K_I = ۱۰

جدول ۲: مقادیر بهره‌های کنترل کننده ها در حالت سالم و قطع فاز

مراجع

[1] E. Levi, “Multiphase electric machines for variable-speed applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 5, pp. 1893–1909, May 2008.

[2] H. Ryu, J. Kim, and S. Sul, “Synchronous-frame current control of mul-tiphase synchronous motor under asymmetric fault condition due to openphases,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 4, pp. 1062–1070, Jul./Aug.2006.

[3] R. Kianinezhad, B. Nahid-Mobarakeh, L. Baghli, F. Betin, and G.-A. Capolino, “Modeling and control of six-phase symmetrical induction machine under fault condition due to open phases,” *IEEE Trans. Ind.Electron.*, vol. 55, no. 5, pp. 1966–1977, May 2008.

[4] H.S Che, M.J Duran, E.Levi, M.Jones, W.Ping Hew And N.A.Rahim, “Postfault operation of an asymmetrical six-phase induction machine with single and two isolated neutral points, ” *IEEE Trans. Pow.Electron*, vol.29, no.10, pp.5406-5416, Oct. 2014.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.5.2]

[10] Su, Y.X.; Zheng, C.H.; Duan, B.Y., "Automatic disturbances rejection controller for precise motion control of permanent-magnet synchronous motors, " *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol.52, no.3, pp.814-823, June 2005.

[11] H. Sira-Ramírez, J. Linares-Flores, C. García-Rodríguez and M. A. Contreras-Ordaz, "On the Control of the Permanent Magnet Synchronous Motor: An Active Disturbance Rejection Control Approach," in *IEEE Trans.Control Systems Technology*, vol. 22, no. 5, pp. 2056-2063, Sept. 2014.

[12] J. Li, H.P Ren,Y.Ru Zhong "Robust speed control of induction motor drives using first-order Auto-Disturbance Rejection Controllers," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 1, Jan/Feb 2015.

[13] B. Du, S. Wu, S. Han and S. Cui, "Application of Linear Active Disturbance Rejection Controller for Sensorless Control of Internal Permanent-Magnet Synchronous Motor," in *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 63, no. 5, pp. 3019-3027, May 2016.

[14] Y. Zhao and T.A. Lipo, "Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 5, pp.1100-1108, Sept./Oct. 1995.

[5] H. Guzmán, M. J. Duran, F. Barrero, B. Bogado, and S. Toral, "Speed control of five-phase induction motors with integrated open-phase fault operation using model-based predictive current control techniques," *IEEETrans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 9, pp. 4474–4484, Sep. 2014.

[6] C. Lim, E. Levi M. Jones, N. Abd Rahim, and W. Hew, "FCS-MPC based current control of a five-phase induction motor and its comparison with PI-PWM control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 1, pp. 149–163, Jan. 2014.

[7] H. Guzmán, M. J. Duran, F. Barrero, L. Zarri, B. Bogado, I. G. Prietoand and M.R. Arahal, "Comparative study of predictive and resonant controllers in fault-tolerant five-phase induction motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, Jan 2016.

[8] J. Han, "Auto-disturbances-rejection controller and its applications," (in Chinese), *Control Decision*, vol. 13, no. 1, pp. 19–23, 1998.

[9] J. Han, "From PID to active disturbance rejection control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 900–906, Mar. 2009.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.5.2]