مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۵، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صفحه ۸۲-۶۹

ارائه مدل دینامیکی موتور القایی سه فاز با دو عیب ناهم‌محوری و اتصال کوتاه شدن سیم پیچ استاتور

حامد حقیقی[۱]، حسن زرآبادی پور[۲]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، دانشکده فنی و مهندسی، hd.haghighi@edu.ikiu.ac.ir

[۲] دانشیار، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، دانشکده فنی و مهندسی، hzarabadi@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۹ ویرایش اول: ۱۳۹۹/۰۴/۱۶ ویرایش دوم: ۱۳۹۹/۰۷/۰۶ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۶

چکیده: در این مقاله برای پوشش وسیع‌تر عیوب موتور القایی سه فاز، یک مدل دینامیکی در دستگاه مختصات d-q معرفی شده است. در این دستگاه مختصات، به دلیل ارزیابی جریان‌های استاتور به جای روتور، امکان پیاده سازی و تحلیل دقیق‌تر میسر می‌شود. در مدل پیشنهادی، دو عیب ناهم‌محوری و اتصال کوتاه شدن سیم پیچ استاتور بررسی گردیده است، که نتایج بررسی چنانچه در متن مقاله ارائه خواهد شد توانسته است بیش از ۷۰٪ عیوب موتور القایی سه فاز را تحت پوشش قرار دهد.

کلمات کلیدی: موتور القایی، ناهم‌محوری، سیم پیچ استاتور، عیب.

Proposing a Dynamic Model of Induction Motors Including Eccentricity and Stator Windings' Faults

Hamed Haghighi, Hasan Zarabadipour

Abstract: A dynamic model in the d-q frame is introduced for wider coverage of the faults of three-phase induction motor. In this frame, it is possible to implement and analyze more accurately due to the evaluation of stator currents instead of rotor. In the proposed model, eccentricity and stator winding faults have been investigated. The results could cover more than 70% of the faults of the three-phase induction motor.

Keywords: Induction motor, eccentricity, stator winding, fault.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]

۱- مقدمه

امروزه استفاده از موتورهای القایی به دلیل داشتن مزایایی چون سادگی، جان سختی، هزینه ساخت پایین، نگهداری آسان، راندمان بالا و قابلیت اطمینان بالا در صنایع مختلفی چون کشتی سازی، زیر دریایی، صنایع هوایی و کارخانجات تولیدی صنعتی جایگاه ویژه‌ای دارد[۱]. این موتورها در بسیاری از ماشین‌آلات کشتی‌ها از جمله موتور مربوط به جرثقیل، پیشران، دمنده و پمپ آب مورد استفاده قرار می‌گیرند[۲, ۳]. با تقاضای روزافزون برای عملکرد بهتر سیستم و بالاتر بردن کیفیت تولید از یک سو و بهره‌وری بالاتر از لحاظ هزینه از سوی دیگر، پیچیدگی اتوماسیون فرآیندهای صنعتی به صورت پیوسته در حال افزایش است. این پیشرفت‌ها به ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم نیاز دارند. با لحاظ کردن وسعت استفاده موتورهای القایی، وقوع عیب‌های الکتریکی و مکانیکی می‌تواند تهدیدی برای فرآیندهای صنعتی باشد. یک شیوه متداول برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم، بالا بردن کیفیت و مقاومت اجزای سیستم مانند سنسورها، محرک‌ها، کنترل کننده‌ها و کامپیوترها است. البته باید توجه کرد حتی بدین‌وسیله نیز نمی‌توان عملکرد بدون عیب سیستم را تضمین نمود. همین امر باعث شده است امروزه نظارت بر فرآیند و تشخیص عیب و همچنین طراحی سیستم کنترل تحمل پذیر عیب، جزئی از سیستم‌های کنترل مدرن باشد[۴, ۵]. در خصوص سیستم‌های تشخیص و جبران‌سازی عیب دو رویکرد کلی وجود دارد. روش مبتنی بر سیگنال یا داده و روش مبتنی بر مدل دینامیکی سیستم. در مقام مقایسه، روش‌های مبتنی بر مدل، به دلیل هزینه پیاده‌سازی پایین‌تر و سرعت پاسخ‌دهی بالاتر و مقاوم بودن در مواجهه با اغتشاش نسبت به روش‌های مبتنی بر سیگنال ارجحیت دارند[۶].

عیوب معمول در موتورهای القایی به طور کلی به دو دسته عیوب مکانیکی و الکتریکی دسته‌بندی می‌شوند[۷]. عیوب ایجاد شده باعث بروز یکسری نشانه‌هایی مانند موارد ذیل می‌گردد:

افزایش ارتعاشات گشتاور بار، کاهش مقدار متوسط گشتاور، افزایش تلفات و کاهش بازده[۸]. همچنین باید توجه شود که عیوب مکانیکی معمولا موجب ناپایداری در سیستم حلقه‌بسته نمی‌شوند و در نتیجه در صورتی که موتور برای مدت محدودی در این شرایط کار کند آسیب جدی به ساختار کلی موتور وارد نمی‌شود. در مقابل، عیوبی وجود دارند که در صورت تشخیص ندادن در کمترین زمان، ساختار کلی موتور دچار آسیب جدی شده و در نتیجه اثرات نامطلوبی بر فرایندهای صنعتی خواهد داشت. بنابراین، طراحی سیستم جبران‌ساز عیب در شرایط عیب بسیار پر اهمیت خواهد بود. این سیستم باعث می‌شود هم عیب شناسایی شده و هم راندمان موتور توسط سیستم جبران‌ساز بهبود داده شود[۹]. در جدول ۱ حاصل بررسی انجام گرفته در خصوص فراوانی عیوب مربوط به موتورهای القایی آورده شده است. با توجه به جدول ۱ رتبه اول وقوع عیوب مربوط به بلبرینگ بوده و عیوب مربوط به استاتور رتبه دوم از حیث احتمال وقوع را به خود اختصاص داده‌اند.

در خصوص عیوب مربوط به بلبرینگ که موجب ناهم‌محوری روتور و استاتور می‌شود کارهای مختلفی انجام شده است. در [۱۰] مدلی برای شناسایی عیوب مربوط به ناهم‌محوری دینامیکی ارائه شده است. در مدل ارائه شده فقط ناهم‌محوری دینامیکی مدنظر قرار گرفته شده است. در مرجع [۱۱] علاوه بر ناهم‌محوری دینامیکی، عیوب مربوط به ناهم‌محوری استاتیکی و ترکیبی نیز مورد توجه قرار گرفته شده است. در [۱۲] یک سیستم تحمل پذیر عیب برای یک موتور القایی سه فاز با عیوب ناهم-محوری طراحی شده است.

جدول ۱- درصد احتمال وقوع انواع عیب در موتوهای القایی[۱۳, ۱۴]

بررسی کننده	درصد عیوب بلبرینگ	درصد عیوب استاتور	درصد عیوب روتور	درصد عیوب دیگر
IEEE	۴۲	۲۸	۸	۲۲
EPRI	۴۱	۳۶	۹	۱۴

بخش عمده عیوب مربوط به استاتور مربوط به اتصال کوتاه شدن سیم پیچ‌های آن است. مقالات مختلفی در زمینه شناسایی و جبران‌سازی عیب سیم‌پیچ موتورهای القایی وجود دارد. مرجع [۱۵] عیب اتصال کوتاه شدن سیم پیچ‌های استاتور را مورد توجه قرار داده و با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته میزان عیب ایجاد شده را تخمین زده است. در مرجع [۱۶] نیز از همان مدل قبل برای عیوب اتصال کوتاه شدن سیم‌پیچ استفاده شده و با تخمین پارامتر عیب را شناسایی کرده است.

برای ارائه گویاتر کارهای انجام گرفته و مقایسه آنها با روش پیشنهاد شده در این مقاله جدول ۲ آورده شده است. چنانچه در جدول ۲ مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی در مقایسه با کارهای صورت گرفته تاکنون از این برتری برخوردار است که شامل پوشش بیش از ۷۰٪ عیوب موتور القایی می‌شود و در نتیجه، در صورت بهره‌گیری از مدل پیشنهادی، عملکرد کلی سیستم را چه در شناسایی و چه در جبران‌سازی عیب میتواند بهبود بخشد.

جدول ۲- مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های ارائه شده پیشین

مرجع	عیوب بلبرینگ	عیوب استاتور	مجموع عیوب تحت پوشش(٪)
[۱۰]	☑	☒	۴۲
[۱۱]	☑	☒	۴۲
[۱۲]	☑	☒	۴۲
[۱۵]	☒	☑	۲۸
[۱۶]	☒	☑	۲۸
روش ارائه شده	☑	☑	۷۰

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]

۲- مدل دینامیکی موتور القایی در شرایط بدون عیب

در این بخش، یک مدل دینامیکی موتور القایی در شرایط بدون عیب مورد توجه قرار می‌گیرد[۱۲]. این مدل در شرایط ایستای دو فاز در دستگاه مختصات با دو عضو a و b برای کنترل بر اساس میدان در نظر گرفته شده است. در این دستگاه مختصات، معادله مدل یک موتور القایی متقارن دو فاز می‌تواند به صورت رابطه (۱) توسط معادلات دیفرانسیل غیر خطی نمایش داده شود. در رابطه (۱)، ψ_a و ψ_b مولفه‌های شار روتور[۱]، i_a و i_b مولفه‌های جریان استاتور[۲]، ω_m سرعت روتور می‌باشد. و n_p تعداد جفت قطب‌های موتور القایی است. L_s, L_r, R_s, R_r مقاومتهای استاتور و روتور و همچنین اندوکتانس‌های استاتور و روتور هستند. L_m اندوکتانس مغناطیسی[۳]، τ_L گشتاور بار است که مقدار آن ثابت فرض می‌شود و J اینرسی روتور است. بعلاوه، $u = (u_a u_b)^T$ ورودی کنترل است که u_a و u_b مولفه‌های ولتاژ استاتور هستند[۱۲].

$$\begin{cases} \dfrac{d\omega_m}{dt} = \mu(\psi_a i_b - \psi_b i_a) - \dfrac{\tau_L}{J}, \\ \dfrac{d\psi_a}{dt} = -\dfrac{1}{\tau_r}\psi_a - n_p\omega_m\psi_b + \dfrac{L_m}{\tau_r} i_a, \\ \dfrac{d\psi_b}{dt} = n_p\omega_m\psi_a - \dfrac{1}{\tau_r}\psi_b + \dfrac{L_m}{\tau_r} i_b, \\ \dfrac{di_a}{dt} = \dfrac{\beta}{\tau_r}\psi_a + n_p\beta\omega_m\psi_b - \dfrac{1}{\tau_l} i_a + \dfrac{1}{\zeta_l} u_a, \\ \dfrac{di_b}{dt} = -n_p\beta\omega_m\psi_a + \dfrac{\beta}{\tau_r}\psi_b - \dfrac{1}{\tau_l} i_b + \dfrac{1}{\zeta_l} u_b. \end{cases} \quad (۱)$$

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r}, \quad \zeta_l = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}, \quad \beta = \frac{L_m}{L_r \zeta_l}$$
$$R_l = R_s + R_r\left(\frac{L_m}{L_r}\right)^2, \quad \mu = \frac{n_p L_m}{J L_r}, \quad \tau_l = \frac{\zeta}{R_l} \quad (۲)$$

فرض می‌شود که جریان‌های i_a و i_b و سرعت روتور ω_m قابل اندازه‌گیری و برای طراحی کنترل‌کننده نامی در دسترس هستند. از آنجایی که تمامی جریان‌ها و ولتاژهای استاتور در فریم سه فاز $R\text{-}S\text{-}T$ اندازه‌گیری می‌شوند، میتوان از تبدیل مختصات رابطه (۳) بین این دستگاه و دستگاه مختصات ایستای دو فاز $a\text{-}b$ استفاده کرد:

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ 0 \end{pmatrix} = \left(\frac{2}{3}\right)\begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{pmatrix} \quad (۳)$$

بر اساس مدل ریاضی موتور القایی رابطه (۳-۱)، اهداف کنترلی می‌توانند بر اساس اصل کنترل بر پایه میدان تعریف شوند[۱۷].

۳- مدلسازی دینامیکی عیب‌های مکانیکی لنگی

در این بخش، اثرات عیب‌های مکانیکی بر روی جریان‌های استاتور و دینامیک آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین یک مدل دارای عیب مربوط به یک موتور القایی ارائه خواهد شد. معمولا این عیوب مکانیکی در یک رژیم ثابت از موتور القایی تحت شرایط بار مشخصی اتفاق می‌افتد، اما مدل دارای عیب ارائه شده در این بخش قابل اعمال در خصوص موارد کلی‌تر می‌باشد. در سالهای اخیر، کارهای مختلفی از اثرات عیوب مکانیکی بر روی جریان‌های استاتور گزارش شده است. همه گزارش‌ها یک نقطه نظر مشترک دارند، و آن اینکه پس از به وقوع پیوستن عیوب مکانیکی، هارمونیک‌های اضافی پدیدار می‌شوند. این هارمونیک‌های اضافی موجود در جریان‌های استاتور دارای فرکانس و دامنه خاصی بسته به عیب ایجاد شده و شدت آنها هستند[۷, ۱۸, ۱۹].

عیوب مکانیکی به صورت عمده دارای دو اثر نامطلوب بر روی موتورهای القایی هستند. این اثرات عبارتند از: ارتعاشات گشتاور بار اضافی و لنگی فاصله هوایی. ارتعاشات گشتاور بار در واقع به دلیل عدم تقارن بار، ناهم-محور بودن شفت، گیربکس و عیب‌های بلبرینگ اتفاق می‌افتد. لنگی فاصله هوایی میتواند معمولا حاصل معیوب شدن بلبرینگ و مونتاژ بد روتور همراه با عدم تعادل روتور باشد. لنگی فاصله هوایی میتواند به سه نوع دسته بندی شود[۱۹].

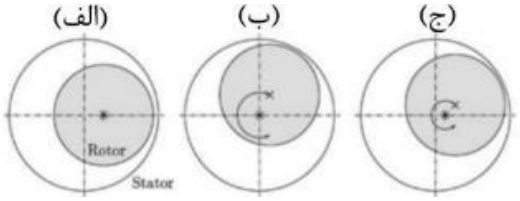
لنگی استاتیکی: مرکز دوران روتور و مرکز هندسی روتور یکسان هستند، ولی متفاوت از مرکز استاتور هستند.

لنگی دینامیکی: مرکز هندسی روتور متفاوت از مرکز دوران روتور بوده و همچنین مرکز دوران روتور و مرکز استاتور یکسان هستند.

لنگی آمیخته: مرکز هندسی روتور و مرکز دوران متفاوت با مرکز استاتور یکسان هستند.

دو نوع اول موجب عدم تقارن استاتور و روتور می‌شود. شکل ۱ شمای هر سه نوع لنگی فاصله هوایی را نشان می‌دهد.

فاصله هوایی متشکل از شیارهای دارای رسانایی مغناطیسی روتور و استاتور است. به دلیل عیب ایجاد شده، هنگامی که لنگی اتفاق می‌افتد، هارمونیک‌های میدان مغناطیسی روتور و استاتور و همچنین عناصر اصلی آن، دارای یک هارمونیک جدید می‌شوند. این امر می‌تواند سیستم را به سمت چگالش شار و انحراف یا اغتشاش در توزیع شار سوق دهد.



شکل ۱- شمای کلی انواع لنگی فاصله هوایی.
× نشان دهنده مرکز هندسی روتور، * نشانگر مرکز دوران روتور.
الف) لنگی استاتیکی – ب) لنگی دینامیکی – ج) لنگی آمیخته[۱۹]

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]

تاثیر این اغتشاش در جریان‌های استاتور دستگاه ایستای مرجع میتواند به فرم ذیل نوشته شود[۱۲]:

$$\begin{aligned} i_a(t) &\to i_a(t) + \Gamma \sin(\omega_c(t) + \phi), \\ i_b(t) &\to i_b(t) + \Gamma \cos(\omega_c(t) + \phi), \end{aligned} \quad (۴)$$

طوری‌که:

$$\omega_c(t) = 2\pi \int_0^t \mathcal{F}_c(\tau) d\tau \quad (۵)$$

باید توجه شود که فرکانس $\mathcal{F}_c$ مربوط به سیگنال عیب در حالت کلی نامشخص است، اما معمولا می‌توان آن را به صورت $\mathcal{F}_c = \mathcal{F}_s$ برای عیب‌های حاصل از عدم تقارن استاتور و به صورت $\mathcal{F}_c = (1 \pm \frac{2ks_\omega}{\omega_s})\mathcal{F}_s$ برای عیب حاصل از عدم تقارن روتور در نظر گرفت. $\mathcal{F}_s$ فرکانس تغذیه، $s_\omega = \omega_s - n_p\omega_m$ نیز به عنوان فرکانس زاویه‌ای لغزش تعریف می‌شود. k یک عدد صحیح مثبت است. دامنه Γ و فاز ϕ در رابطه (۴) نامشخص بوده و مقادیر آنها بستگی به شدت عیب دارد. بنابر این دینامیک جریان استاتور که در رابطه (۱) آمده است با لحاظ کردن رابطه (۴) به فرم ذیل نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= \frac{\beta}{\tau_r}\psi_a + n_p\beta\omega_m\psi_b - \frac{1}{\tau_l}i_a + \frac{1}{L_l}u_a \\ &\quad - \frac{\Gamma}{\tau_l}\sin(\omega_c(t) + \phi) \\ &\quad + \Gamma\dot{\omega}_c(t)\cos(\omega_c(t) \\ &\quad + \phi), \\ \frac{di_b}{dt} &= \frac{\beta}{\tau_r}\psi_b - n_p\beta\omega_m\psi_a - \frac{1}{\tau_l}i_b + \frac{1}{L_l}u_b \\ &\quad - \frac{\Gamma}{\tau_l}\cos(\omega_c(t) + \phi) \\ &\quad - \Gamma\dot{\omega}_c(t)\sin(\omega_c(t) \\ &\quad + \phi), \end{aligned} \quad (۶)$$

چنان‌که معادله کلی ذیل را برای سیستم در نظر بگیریم:

$$\dot{x} = A(\omega_m)x + Bu \quad (۷)$$

و رابطه (۶) را لحاظ کنیم، مدل عیب یک موتور القایی در حضور عیب‌های مکانیکی می‌تواند به فرم ذیل نمایش داده شود:

$$\dot{x} = A(\omega_m)x + Bu + Ef \quad (۸)$$

که در رابطه فوق $E = (E_a E_b)$ و $f = (f_a f_b)^T$ و همچنین خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} E_a = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)^T, \quad E_b \\ = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1)^T \end{aligned} \quad (۹)$$

در روابط فوق f_a و f_b عیوب تجمیعی هستند که ناشی از عیوب مکانیکی در موتور القایی بوده و درصورتی‌که هیچ عیبی رخ نداده باشد مساوی با صفر خواهند بود. مطابق روابط (۶) عیوب تجمعی f_a و f_b به فرم ذیل خواهند بود:

$$\begin{aligned} f_a &= +\Gamma\left[\dot{\omega}_c(t)\cos(\omega_c(t) + \phi) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\tau_l}\sin(\omega_c(t) + \phi)\right] \\ f_b &= -\Gamma\left[\dot{\omega}_c(t)\sin(\omega_c(t) + \phi) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\tau_l}\cos(\omega_c(t) + \phi)\right] \end{aligned} \quad (۱۰)$$

ملاحظه الف: به روشنی مشخص است در مورد عیب‌هایی که به دلیل عدم تقارن روتور ایجاد می‌شود، جریان‌های استاتور حاصل از روابط (۴) به صورت جمعی از ترم‌های سینوسی با دامنه و فازهای نامشخص گسترش می‌یابد. دامنه و فاز سینوسی‌ها رابطه مستقیمی با شدت عیب دارد.

$$\begin{aligned} i_a(t) &\to i_a(t) + \sum_{k=1}^{N_1} \Gamma_k \sin(\omega_{c,k}(t) + \phi) \\ &\quad + \Gamma_{-k}\sin(\omega_{c,-k}(t) \\ &\quad + \phi_{-k}), \\ i_b(t) &\to i_b(t) + \sum_{k=1}^{N_1} \Gamma_k \cos(\omega_{c,k}(t) + \phi) \\ &\quad + \Gamma_{-k}\cos(\omega_{c,-k}(t) \\ &\quad + \phi_{-k}), \end{aligned} \quad (۱۱)$$

بنابر این، عیب‌های تجمعی f_a و f_b به صورت ذیل خواهند بود:

$$\begin{aligned} f_a &= \sum_{k=1}^{N_1} +\Gamma_k\left[\dot{\omega}_{c,k}(t)\cos(\omega_{c,k}(t) + \phi_k)\right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\tau_l}\sin(\omega_{c,k}(t) + \phi_k)\right] \\ &\quad + \Gamma_{-k}\left[\dot{\omega}_{c,-k}(t)\cos(\omega_{c,-k}(t) + \phi_{-k})\right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\tau_l}\sin(\omega_{c,-k}(t) + \phi_{-k})\right], \\ f_b &= \sum_{k=1}^{N_1} -\Gamma_k\left[\dot{\omega}_{c,k}(t)\sin(\omega_{c,k}(t) + \phi_k)\right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\tau_l}\cos(\omega_{c,k}(t) + \phi_k)\right] \\ &\quad - \Gamma_{-k}\left[\dot{\omega}_{c,-k}(t)\sin(\omega_{c,-k}(t) + \phi_{-k})\right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\tau_l}\cos(\omega_{c,-k}(t) + \phi_{-k})\right] \end{aligned} \quad (۱۲)$$

طوریکه N_1 یک عدد صحیح مثبت و

$$\omega_{c,\pm k} = 2\pi \int_0^t \mathcal{F}_{c,\pm k}(\tau) d\tau,$$

همچنین در رابطه فوق

$$\mathcal{F}_{c,\pm k} = \left(1 \pm \frac{2ks_\omega}{\omega_s}\right)\mathcal{F}_s$$

ملاحظه ب: این امر ارزش توجه دارد که روتور با میله‌های شکسته و همچنین عیوب مربوط به رینگ که به دلیل گرما، تنش مغناطیسی و نشتی، تلفات ماکزیمم و نویزهای الکترومغناطیسی بوجود می‌آید، هارمونیک‌های اضافی مشابه با حالتی که ناشی از عدم تقارن روتور است تولید می‌کند[۹].

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]

ملاحظه پ: در عمل، فرکانس ω_c در عیب f نامشخص است. این امر انگیزه طراحی یک مشاهده‌گر عیب در این مدل را قوت می‌بخشد.

٤- بررسی عیب ناهم‌محوری در دستگاه مختصات d-q

کنترل بر پایه میدان یک سرعت زاویه خاص ω_s را برای تبدیل به معادلات حالت از دستگاه مرجع ایستای دو فاز به دستگاه مرجع ایستای دو فاز سنکرون با استفاده از مولفه‌های d-q معرفی می‌کند. این امر موجب شده است دستگاه مختصات d-q در طراحی کنترل‌کننده نامی و سیستم تحمل پذیر عیب بیشتر مورد استفاده قرار گیرد. لذا هم در این بخش و هم در بخش بعدی مدلسازی عیب در دستگاه مختصات d-q آورده می‌شود. این تبدیلات به صورت ذیل خواهد بود:

$$\theta = arctan\left(\frac{\psi_b}{\psi_a}\right), \qquad (۱۳)$$

$$\omega_s = \dot{\theta}$$

تبدیل عبارتست از:

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = M_T \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{pmatrix} = M_T \begin{pmatrix} \psi_a \\ \psi_b \end{pmatrix} \qquad (۱۴)$$

$$M_T = \begin{pmatrix} cos\ (\theta) & sin\ (\theta) \\ -sin\ (\theta) & cos\ (\theta) \end{pmatrix}.$$

با استفاده از (۱۳) و رابطه (۱۴) میتوان نوشت:

$$\psi_q = 0, \qquad (۱۵)$$
$$\psi_d = \sqrt{\psi_a^2 + \psi_b^2}.$$

قبل از پرداختن به مدل‌سازی عیب ناهم‌محوری، دینامیک موتور القایی در دستگاه مختصات d-q آورده می‌شود:

$$\begin{cases} \dfrac{d\psi_d}{dt} = -\dfrac{1}{\tau_r}\psi_d + \dfrac{L_m}{\tau_r} i_d, \\ \dfrac{di_d}{dt} = -\gamma i_d + \dfrac{\beta}{\tau_r}\psi_d + n_p \omega i_q \\ \qquad + \dfrac{L_m i_q^2}{\tau_r \psi_d} + \dfrac{1}{\sigma L_s} u_d\ , \\ \dfrac{di_q}{dt} = -\gamma i_q - \beta n_p \omega \psi_d - n_p \omega i_d \\ \qquad - \dfrac{L_m i_q i_d}{\tau_r \psi_d} + \dfrac{1}{\sigma L_s} u_q\ , \\ \dfrac{d\omega_m}{dt} = \mu \psi_d i_q - \dfrac{\tau_L}{J}, \\ \dfrac{d\theta}{dt} = n_p \omega + \dfrac{L_m i_q}{\tau_r \psi_d}, \end{cases} \qquad (۱۶)$$

در رابطه فوق علاوه بر پارامترهای دینامیک اصلی، موارد ذیل نیز اضافه می‌شود:

$$\gamma = \frac{L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma L_s}\ ,\ \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \qquad (۱۷)$$

در حقیقت، هدف از کنترل بر پایه میدان قرار دادن شار روتور در امتداد محور d می‌باشد. بنابراین، دامنه شار روتور $\psi_r = \psi_d$ و سرعت روتور ω_m به عنوان متغیرهای کنترلی تعریف می‌گردد، بنابر این اهداف کنترلی عبارتند از:

$$\begin{aligned} &\lim_{t\to\infty} \left|\psi_r(t) - \psi_{ref}(t)\right| = 0, \\ &\lim_{t\to\infty} \left|\omega_m(t) - \omega_{ref}(t)\right| = 0, \end{aligned} \qquad (۱۸)$$

که ψ_{ref} و ω_{ref} سیگنال‌های مرجع مطلوب هستند. در سال‌های اخیر، تحت شرایط نامی، کنترل بر پایه میدان به طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته است و روش‌های کنترلی متنوعی برای طراحی قانون کنترل نامی ارائه شده است.

$$u_0 = K_{FOC}(x, \omega_m, \omega_{ref}, \psi_{ref}) \qquad (۱۹)$$

که $x = (\psi_a\ \ \psi_b\ i_a\ \ i_b)^T$ بردار حالت است.

حال عیوب بررسی شده در قسمت قبل به دستگاه مختصات d-q منتقل می‌شود. طبق آنچه آمده است، جریان‌ها به این صورت به هم مرتبط هستند:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\ \theta & sin\ \theta \\ -sin\ \theta & cos\ \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \qquad (۲۰)$$
$$\Rightarrow \begin{cases} i_d = cos\ \theta i_a + sin\ \theta i_b \\ i_q = -sin\ \theta i_a + cos\ \theta i_b \end{cases}$$

از باز کردن رابطه بالا، عبارت ذیل حاصل شده است:

$$\begin{aligned} i_d = cos\ \theta (i_a + \Gamma\ sin(\omega_c(t) + \phi)) \\ + sin\ \theta (i_b \\ + \Gamma\ cos(\omega_c(t) + \phi)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_d = (cos\ \theta i_a + sin\ \theta i_b\ ) \\ + (cos\ \theta\ \Gamma\ sin(\omega_c(t) \\ + \phi) \\ + sin\ \theta \Gamma\ cos(\omega_c(t) \\ + \phi)) \end{aligned} \qquad (۲۱)$$

$$i_{d(health)} = (cos\ \theta i_a + sin\ \theta i_b\ )$$

$$\begin{aligned} i_{d(fault)} = (cos\ \theta\ \Gamma\ sin(\omega_c(t) + \phi) \\ + sin\ \theta \Gamma\ cos(\omega_c(t) \\ + \phi)) \end{aligned}$$

همچنین:

$$\begin{aligned} i_q = -sin\ \theta (i_a + \Gamma\ sin(\omega_c(t) + \phi)) \\ + cos\ \theta (i_b \\ + \Gamma\ cos(\omega_c(t) + \phi)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_d = (-sin\ \theta i_a + cos\ \theta i_b\ ) \\ - (sin\ \theta\ \Gamma\ sin(\omega_c(t) \\ + \phi) \\ + cos\ \theta \Gamma\ cos(\omega_c(t) \\ + \phi)) \end{aligned} \qquad (۲۲)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]

$$i_{q_{(health)}} = -\sin\theta i_a + \cos\theta i_b$$

$$i_{q_{(fault)}} = -(\sin\theta\,\Gamma\sin(\omega_c(t)+\phi) + \cos\theta\Gamma\cos(\omega_c(t)+\phi))$$

با توجه به اینکه در مدل‌سازی مدل دینامیکی i_d و i_q نیاز است، لذا با مشتق‌گیری از روابط بالا معادلات دینامیکی نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}i_{d_{total}} = \frac{d}{dt}i_{d_{healt}} &- \dot\theta\sin\theta\,\Gamma\sin(\omega_c(t)+\phi)\\ &+ \dot\omega_c\cos\theta\Gamma\cos(\omega_c(t)+\phi)\\ &+ \dot\theta\cos\theta\Gamma\cos(\omega_c(t)+\phi)\\ &- \dot\omega_c\sin\theta\Gamma\sin(\omega_c(t)+\phi)\end{aligned} \quad (۲۳)$$

همچنین:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}i_{q_{total}} = \frac{d}{dt}i_{q_{healt}} &- \dot\theta\cos\theta\,\Gamma\sin(\omega_c(t)+\phi)\\ &- \dot\omega_c\sin\theta\Gamma\cos(\omega_c(t)+\phi)\\ &- \dot\theta\sin\theta\Gamma\cos(\omega_c(t)+\phi)\\ &- \dot\omega_c\cos\theta\Gamma\sin(\omega_c(t)+\phi)\end{aligned} \quad (۲۴)$$

در واقع جریان‌های d و q از دو بخش تشکیل شده اند. قسمت مربوط به عملکرد بدون عیب و قسمتی که حاصل عیب لنگی می‌باشد. به صورت کلی میتوان برای عیب لنگی نوشت:

$$\frac{d}{dt}i_{d_{total}} = \frac{d}{dt}i_{d_{healt}} + \frac{d}{dt}i_{d_{eccentricity\ fault}} \quad (۲۵)$$

$$\frac{d}{dt}i_{q_{total}} = \frac{d}{dt}i_{q_{healt}} + \frac{d}{dt}i_{q_{eccentricity\ fault}} \quad (۲۶)$$

جزئیات به صورت ذیل می‌باشد.

$$\frac{d}{dt}i_{d_{healt}} = -\gamma i_d + \frac{\beta}{\tau_r}\psi_d + n_p\omega i_q + \frac{L_m i_q^2}{\tau_r\psi_d} + \frac{1}{\sigma L_s}u_d \quad (۲۷)$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}i_{d_{eccentricity\ fault}} &= -\dot\theta\sin\theta\,\Gamma\sin(\omega_c(t)+\phi)\\ &+ \dot\omega_c\cos\theta\Gamma\cos(\omega_c(t)+\phi)\\ &+ \dot\theta\cos\theta\Gamma\cos(\omega_c(t)+\phi)\\ &- \dot\omega_c\sin\theta\Gamma\sin(\omega_c(t)+\phi)\end{aligned} \quad (۲۸)$$

$$\frac{d}{dt}i_{q_{healt}} = -\gamma i_q - \beta n_p\omega\psi_d - n_p\omega i_d - \frac{L_m i_q i_d}{\tau_r\psi_d} + \frac{1}{\sigma L_s}u_q \quad (۲۹)$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}i_{q_{eccentricity\ fault}} &= -\dot\theta\cos\theta\,\Gamma\sin(\omega_c(t)+\phi)\\ &- \dot\omega_c\sin\theta\Gamma\cos(\omega_c(t)+\phi)\\ &- \dot\theta\sin\theta\Gamma\cos(\omega_c(t)+\phi)\\ &- \dot\omega_c\cos\theta\Gamma\sin(\omega_c(t)+\phi)\end{aligned} \quad (۳۰)$$

۵- مدل‌سازی عیب مربوط به سیم‌پیچ استاتور

عیوب مربوط به اتصال کوتاه شدن سیم‌پیچ به صورت روابط ذیل در مدل موتور القایی قابل اعمال است[۱۵].

$$[I_s]_{dq} = [I'_s]_{dq} + [Z_{sc}]_{dq}^{-1}.[V_s]_{dq} \quad (۳۱)$$

$$[Z_{sc}]_{dq}^{-1} = \sum_{k=1}^{3}\frac{2.n_{sc\,k}}{3.R_s}.P(\theta)^T.Q(\theta_{sc\,k}).P(\theta) \quad (۳۲)$$

طوریکه $[I_s]_{dq}$ جریان استاتور پس از افزوده شدن جریان عیب در دستگاه مختصات d-q می‌باشد.

$$P(\theta) = \begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta\\ \sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix} \quad (۳۳)$$

و رابطه (۳۳) ماتریس تبدیل دستگاه d-q می‌باشد. در مرجع [۱۵] برای افزودن مدل عیب، مدل دینامیکی موتور القایی به صورت خطی در نظر گرفته شده است. در این مقاله، با توجه به اینکه مدل به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده است، عیب اتصال کوتاه شدن نیز به سیستم غیرخطی اضافه می‌شود. روابط (۳۴) و (۳۵) نشان دهنده سیستم خطی مرجع [۱۵] می‌باشد.

$$\frac{d}{dt}I'_{sd} = \frac{1}{L_f}V_{sd} - \frac{R_s+R_r}{L_f}I'_{sd} + \omega_e I'_{sq} + \frac{R_r}{L_m.L_f}\phi_{dr} + \frac{\omega_e}{L_f}\phi_{qr} \quad (۳۴)$$

$$\frac{d}{dt}I'_{sq} = \frac{1}{L_f}V_{sq} - \frac{(R_s+R_r)}{L_f}\acute{I}_{sq} - \omega_e\acute{I}_{sd} - \frac{\omega_e}{L_f}\phi_{dr} + \frac{R_r}{L_m.L_f}\phi_{qr} \quad (۳۵)$$

طوریکه $[V_s]_{dq}$ ولتاژ استاتور در دستگاه مختصات d-q بر حسب ولت، $[I'_s]_{dq}$ جریان‌های استاتور در دستگاه d-q بر حسب آمپر است. ω_e سرعت زاویه‌ای الکتریکی در واحد rad/sec است. ϕ_{dr} و ϕ_{qr} شار نشتی در واحد wb و R_r, R_s, L_m مطابق رابطه (۱) و نهایتا L_f نیز اندوکتانس نشتی کلی می‌باشد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]

هنگامی که عیب اتصال کوتاه در سیم‌پیچ رخ می‌دهد، رابطه جریان به صورت رابطه (۳۱) تغییر پیدا می‌کند. در رابطه (۳۲)، تمامی پارامترها در یک فاز به جز پارامترهای شامل θ ثابت هستند. علاوه بر این باید توجه شود که θ متناسب با متغیرهای حالت سیستم تغییر می‌کند. همچنین معادلات (۳۴) و (۳۵) معادلات سیستم در دستگاه مختصات d-q می‌باشد. برای اینکه مقایسه درستی با نتایج مدل‌سازی اولیه انجام شود، به جای معادلات خطی فوق از همان معادلات غیرخطی که در بخش قبل آمده است استفاده خواهد شد. باید توجه شود که عیب سیم پیچ استاتور از نوع عیوب ضرب شونده بوده و در نتیجه دینامیک سیستم را دستخوش تغییرات می‌کند. این امر سبب می‌شود که کنترل‌کننده نامی در هر شریطی نتواند سیستم را پایدار کند. در نتیجه طراحی جبران‌ساز عیب برای این سیستم حتی برای تضمین پایداری اجتناب ناپذیر خواهد بود.

٦- بررسی عیب اتصال کوتاه شدن سیم‌پیچ‌های استاتور در دستگاه مختصات d-q

چنانکه اشاره شد این عیب نیز در مقاله دوم آمده است. در اینجا روابط مجددا بازنویسی شده و روابط به طور کامل بسط داده خواهد شد.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{total} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{health} + [Z_{sc}]^{-1} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (۳۶)$$

$[Z_{sc}]^{-1}$ به صورت ذیل بسط داده شده است:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{total} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{health} + \left(\sum_{k=1}^{3} \frac{2.n_{sc_k}}{3.R_s} P(\theta)^T Q(\theta_{sc_k}) P(\theta) \right) \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (۳۷)$$

از طرفی رابطه $P(\theta)$ و $Q(\theta_{sc_k})$ به صورت رابطه (۳۸) جایگذاری می‌شود:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{total} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{health} + \left(\sum_{k=1}^{3} \frac{2.n_{sc_k}}{3.R_s} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos^2\theta_{sc_k} & \sin\theta_{sc_k}.\cos\theta_{sc_k} \\ \sin\theta_{sc_k}.\cos\theta_{sc_k} & \cos^2\theta_{sc_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (۳۸)$$

نهایتا با گرفتن مشتق از رابطه فوق، عبارت ذیل حاصل شده است:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{total} = \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{health} + \frac{d}{dt}[Z_{sc}]^{-1}\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + [Z_{sc}]^{-1}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (۳۹)$$

از طرفی برای مشتق $[Z_{sc}]^{-1}$ میتوان نوشت:

$$\frac{d}{dt}[Z_{sc}]^{-1} = \sum_{k=1}^{3} \frac{2.n_{sc_k}}{3.R_s} [\dot{P}(\theta)^T Q(\theta_{sc_k}) P(\theta) + P(\theta)^T Q(\theta_{sc_k}) \dot{P}(\theta)] \quad (۴۰)$$

و برای $\dot{P}(\theta)$ نیز میتوان نوشت:

$$\dot{P}(\theta) = \begin{bmatrix} -\dot{\theta}\sin\theta & -\dot{\theta}\cos\theta \\ \dot{\theta}\cos\theta & -\dot{\theta}\sin\theta \end{bmatrix} = \dot{\theta}\begin{bmatrix} -\sin\theta & -\cos\theta \\ \cos\theta & -\sin\theta \end{bmatrix} \quad (۴۱)$$

و برای $\dot{\theta}$ نیز باید از معادلات حالت سیستم جایگذاری را انجام داد.

بنابراین به صورت کلی برای عیب اتصال کوتاه شدن سیم‌پیچ‌های استاتور میتوان مشابه آنچه که در مورد عیب لنگی نوشته شده است روابط را به صورت کلی آورد.

$$\frac{d}{dt} i_{d_{total}} = \frac{d}{dt} i_{d_{healt}} + \frac{d}{dt} i_{d_{short\ circuit\ fault}} \quad (۴۲)$$

$$\frac{d}{dt} i_{q_{total}} = \frac{d}{dt} i_{q_{healt}} + \frac{d}{dt} i_{q_{short\ circuit\ fault}} \quad (۴۳)$$

برای جزئیات رابطه فوق نیز با توجه به نوع روابط، بهتر است از روابط ماتریسی استفاده شود. بنابر این میتوان نوشت:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{health} = \begin{cases} -\gamma i_d + \frac{\beta}{\tau_r}\psi_d + n_p\omega i_q + \frac{L_m i_q^2}{\tau_r \psi_d} + \frac{1}{\sigma L_s}u_d \\ -\gamma i_q - \beta n_p \omega \psi_d - n_p \omega i_d - \frac{L_m i_q i_d}{\tau_r \psi_d} + \frac{1}{\sigma L_s}u_q \end{cases} \quad (۴۴)$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}_{short\ circuit\ fault} = \frac{d}{dt}[Z_{sc}]^{-1}\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + [Z_{sc}]^{-1}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (۴۵)$$

۷- جایگزینی توام مدل دینامیکی دو عیب لنگی و اتصال کوتاه شدن سیم‌پیچ‌های استاتور

به صورت کلی برای مدل دینامیکی توام، با توجه به روابط نوشته شده در دو بخش ۵ و ۶ میتوان نوشت:

$$\frac{d}{dt} i_{d_{total}} = \frac{d}{dt} i_{d_{healt}} + \frac{d}{dt} i_{d_{eccentricity\ fault}} + \frac{d}{dt} i_{d_{short\ circuit\ fault}} \quad (۴۶)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]

$$\frac{d}{dt}i_{q_{total}} = \frac{d}{dt}i_{q_{healt}} + \frac{d}{dt}i_{q_{eccentricity\ fault}} + \frac{d}{dt}i_{q_{short\ circuit\ fault}}$$

۸- نتایج شبیه‌سازی

برای ارائه نتایج شبیه‌سازی، سیستم با یک کنترل‌کننده نامی پایدار شده است. کنترل‌کننده طراحی شده از نوع خطی سازی فیدبک با افزودن یک متغیر انتگرالی برای خطای سرعت می‌باشد. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۳ آمده است. موتور القایی در نظر گرفته شده، یک موتور سه فاز ۱.۵ کیلووات با روتور سیم‌پیچی شده است.

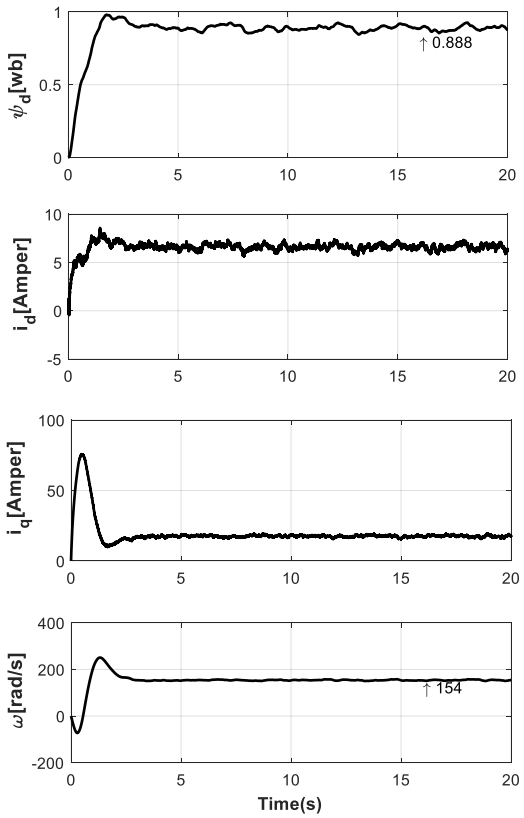
جدول ۳- پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار	واحد
L_s	0.13995	H
R_s	1.165	Ω
L_r	0.13995	H
R_r	0.39923	Ω
M	0.13421	H
J	0.0812	kgm^2
n_p	2	Nm
$\psi_{d_{ref}}$	0.888	Wb
ω_{ref}	154	rad/s
Γ	6	–

شکل ۲ متغیرهای حالت سیستم در شرایط بدون عیب در حضور کنترل‌کننده نامی را نمایش می‌دهد. مقادیر مرجع سرعت و شار مطابق جدول ۳ می‌باشد. موتور القایی در لحظه اول دارای گشتاور بار $\tau_L = 30\ Nm$ می‌باشد. همچنین نویز اندازه‌گیری برای جریان‌های استاتور و سرعت روتور به صورت نویز سفید گوسی با کواریانس‌های $\pm 0.1A$ و $\pm 0.5 rad/s$ به ترتیب در نظر گرفته شده است.

چنانکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده نامی سیستم را پایدار کرده است. همچنین سیستم حلقه بسته بدون خطا به مقادیر مرجع خود رسیده است. سیگنال‌های کنترلی اعمال شده در شکل ۳ آورده شده‌اند. در شکل ۴ جریانهای سه فاز تغذیه در شرایط بدون عیب نمایش داده شده‌اند. مطابق شکل ۴، پس از رسیدن سیستم به حالت پایدار، فرکانس و دامنه جریانهای تغذیه در مقدار ثابتی مانده است.

سه سناریو برای نشان دادن اثرات عیوب مذکور در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، عیب ناهم‌محوری استاتور در ثانیه پنجم به سیستم اعمال می‌شود. سپس در ثانیه یازدهم عیب اتصال کوتاه شدن سیم‌پیچ فاز



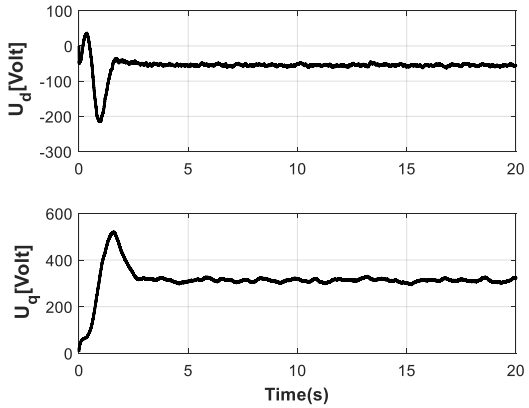
شکل ۲ - متغیرهای حالت سیستم در شرایط بدون عیب در حضور کنترل‌کننده نامی

A اتفاق می‌افتد. دامنه عیب ناهم‌محوری استاتور که شدت آنرا مشخص می‌کند، در رابطه ۴ آمده است. مطابق جدول ۳ دامنه عیب مذکور ۶ در نظر گرفته شده است. نسبت دورهای دارای عیب به کل دورهای سیم‌پیچ A ٪۳ فرض شده است.

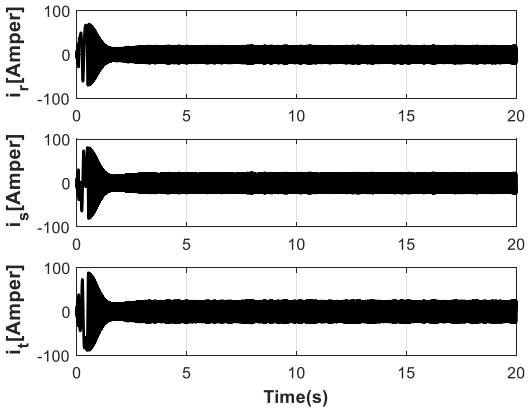
متغیرهای حالت سیستم در شکل ۵ مشاهده می‌شود، عیب ناهم-محوری استاتور که در ثانیه پنجم اعمال شده است، باعث شده که جریانهای i_d و i_q دارای ارتعاشات به فرم شبه سینوسی شوند، از طرفی تغییرات جزئی در ψ_d و ω نیز مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه اینکه، با اعمال عیب ناهم‌محوری استاتور در ثانیه پنجم، تا قبل از وقوع عیب اتصال کوتاه شدن، فرکانس نوسانات شبیه سینوسی جریان‌های مذکور که بر روی شکل موج اصلی مشاهده می‌شود تقریبا برابر با فرکانس ۵۰ هرتز تغذیه و دامنه جریان‌ها برابر با دامنه عیب ناهم‌محوری استاتور است. همچنین باید توجه شود که دامنه ارتعاشات تقریبا در یک حد باقی مانده است. شکل ۶ تصویر بزرگنمایی شده جریان‌ها را پس از اعمال عیب ناهم‌محوری و قبل از وقوع عیب اتصال کوتاه شدن سیم‌پیچ، نشان می‌دهد. چنانکه بر روی شکل نیز مشخص شده است دامنه نوسانات متناسب با شدت عیب ناهم-محوری استاتور است. باید توجه کرد در شکل مذکور عدد دامنه به صورت پیک تا پیک آورده شده است و باید برای سنجیدن شدت عیب این عدد نصف شود. در شکل ۷ جریانهای تغذیه موتور آورده شده است. پس از اعمال عیب ناهم‌محوری در ثانیه پنجم هر سه فاز تغذیه دارای

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]

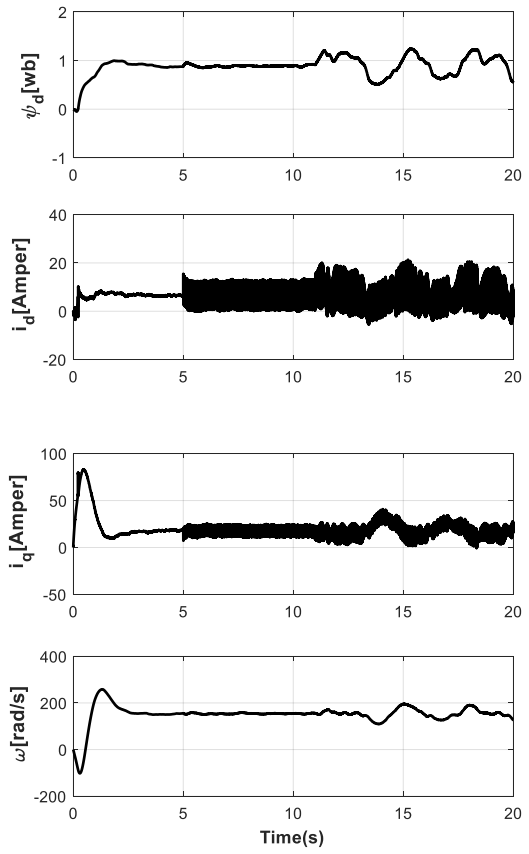
نوساناتی در دامنه شده اند. مقدار تغییرات بین هر دره و قله در پوش دامنه فازها نهایتا در حدود دوبرابر شدت عیب ناهم‌محوری اعمال شده است. شکل ۸ تصویر بزرگنمایی شده جریانهای فازهای تغذیه پس از ثانیه پنجم و قبل از وقوع عیب اتصال کوتاه را نشان می‌دهد. باید توجه شود با توجه به اینکه عیب اعمال شده در سناریوی اول از نوع عیب ناهم‌محوری استاتور می‌باشد، فرکانس نوسانات ایجاد شده در پوش دامنه، با توجه به پارامترهای اعمال شده کمتر از فرکانس تغذیه و در حدود ۲ تا ۴ هرتز است. در ادامه سناریوی اول، عیب اتصال کوتاه شدن سیم پیچ فاز A در ثانیه یازدهم به وقوع می‌پیوندد. مطابق آنچه که در شکل ۵ نیز مشاهده میگردد دامنه نوسانات جریانهای موتور افزایش یافته است. شکل ۹ برای مشاهده میزان افزایش دامنه با جزئیات بیشتری آورده شده است. چنانکه در شکل ۹ مشاهده می گردد میزان تغییرات ماکزیمم دامنه نوسانات شبیه سینوسی، متناسب با درصد اتصال کوتاه شدن سیم پیچ فاز A افزایش یافته است. به بیان دیگر، تغییرات پیک تا پیک ماکزیمم دامنه نوسانات باید در حدود ۱۸ واحد باشد، از مقدار دامنه ۹ که نصف مقدار پیک تا پیک است، ۶ واحد آن مربوط به شدت عیب ناهم‌محوری و ۳ واحد آن مربوط به درصد اتصال کوتاه شدن فاز A می‌باشد. علاوه بر این فرکانس نوسانات دامنه نیز تا فرکانس حدود ۱۰ هرتز افزایش پیدا کرده است. در شکل ۱۰ نیز جریان های تغذیه موتور پس از اعمال عیب اتصال کوتاه شدن سیم‌پیچ آورده شده است. چنانکه مشاهده میگردد، پس از اعمال شدن عیب اتصال کوتاه شدن سیمپیچ فاز A یک تغییر دامنه ناگهانی صرفا در جریان فاز R به میزان حدود ۴ واحد به وجود آمده است و فرکانس نوسانات دامنه در تمامی فازها مطابق با فرکانس نوسانات دامنه جریانهای موتور تا حدود ۱۰ هرتز افزایش یافته است.



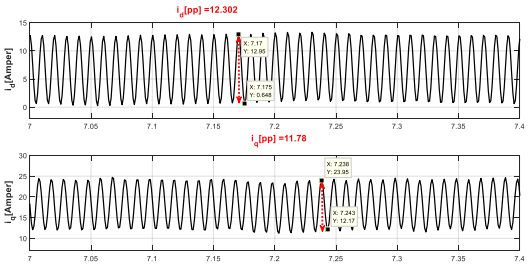
شکل ۳ – سیگنال‌های کنترلی اعمال شده به سیستم نامی



شکل ۴ – جریان‌های تغذیه موتور القایی در شرایط بدون عیب

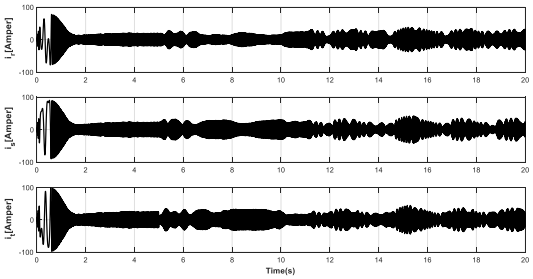


شکل ۵ – متغیرهای حالت سیستم در شرایط عیب سناریوی اول

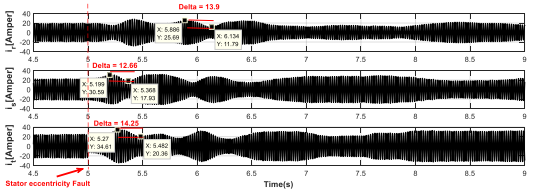


شکل ۶ – بزرگنمایی شده جریانهای i_d و i_q

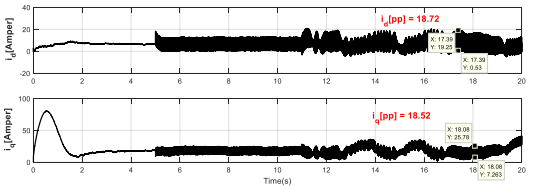
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]



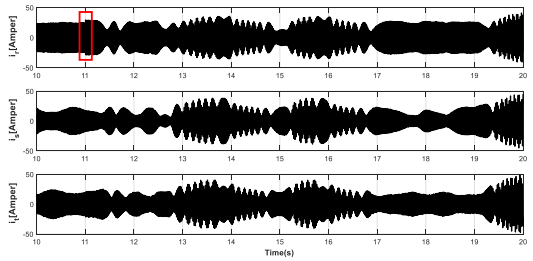
شکل ۷ – جریان‌های تغذیه موتور القایی در شرایط عیب سناریوی اول



شکل ۸ – بزرگنمایی شده جریان‌های تغذیه موتور القایی در شرایط عیب سناریوی اول

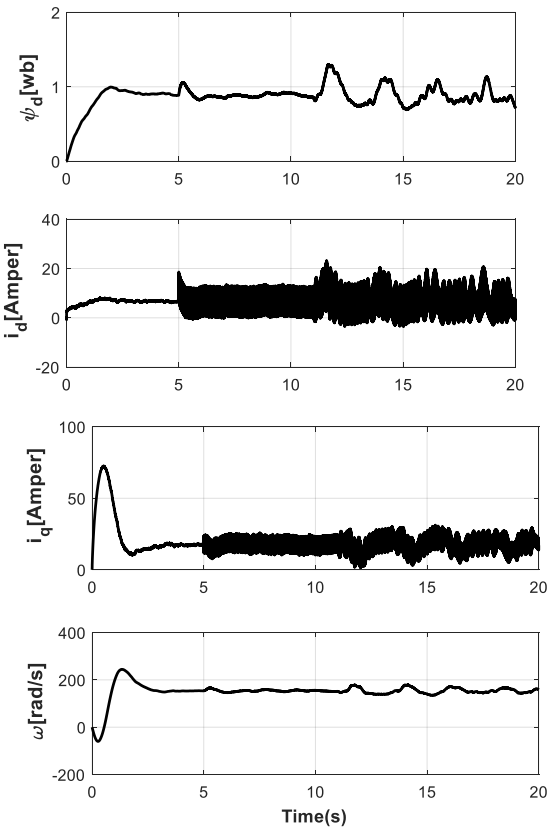


شکل ۹ –جریان‌های موتور القایی در شرایط عیب سناریوی اول

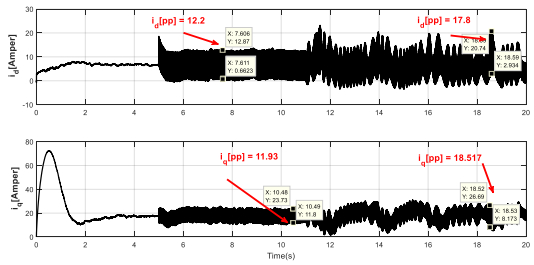


شکل ۱۰ –جریان‌های تغذیه موتور القایی در شرایط عیب سناریوی اول پس از اعمال عیب اتصال کوتاه شدن سیم‌پیچ فاز A

سناریوی دوم مشابه سناریوی اول است با این تفاوت که در ثانیه پنجم عیب ناهم‌محوری اعمال شده از نوع عیب ناهم‌محوری روتور است. در شکل ۱۱ متغیرهای حالت سیستم مشاهده می‌شود. با وقوع عیب ناهم‌محوری روتور، شار سیستم، بیشتر از عیب ناهم‌محوری استاتور دچار تغییر شده است. در این حالت نیز با اعمال عیب ناهم‌محوری روتور در ثانیه پنجم دامنه نوسانات شبیه سینوسی افزایش یافته و مجددا در ثانیه یازدهم با افزوده شدن عیب اتصال کوتاه شدن سیم پیچ فاز A دامنه بار دیگر افزوده شده است. شکل ۱۲ جزئیات دامنه ها پس از اعمال عیب سناریوی دوم را نشان می‌دهد. در این سناریو نیز پس از ثانیه پنجم دامنه نوسانات شبیه سینوسی جریانها شدت عیب ناهم‌محوری روتور را نشان میدهد و همچنین پس از ثانیه یازدهم درصد اتصال کوتاه شدن سیم‌پیچ های فاز A نیز به نوسانات دامنه افزوده می‌شود. در این حالت نیز پیک تا پیک نوسانات متناسب با دو برابر مقدار دامنه شدت عیب ناهم‌محوری روتور بعلاوه درصد اتصال کوتاه شدن سیم پیچ می‌باشد. شکل ۱۳ جریانهای سه فاز تغذیه موتور را نشان می‌دهد. چنانکه در تصویر نیز دیده می‌شود، مشابه سناریوی قبل، تغییرات هر دره تا قله پس از اعمال شدن عیب ناهم‌محوری روتور نشان دهنده میزان دامنه عیب است. که البته متناسب با دو برابر دامنه آن خواهد بود. نکته دوم اینکه تفاوت این سناریو با سناریوی قبل در فرکانس نوسانات جریانهای موتور و همچنین فرکانس نوسانات پوش دامنه جریانهای تغذیه می‌باشد. فرکانس نوسانات پوش تغذیه در حدود ۶ الی ۸ هرتز بوده که تقریبا دو برابر فرکانس نوسانات سناریوی اول است. پس از اعمال عیب اتصال کوتاه شدن سیم پیچ‌ها در سناریوی دوم، دامنه نوسانات جریانهای تغذیه تغییر چندانی ندارد ولی فرکانس آنها افزایش یافته است. این فرکانس‌ها برابر با فرکانسهای نوسانات جریانهای موتور می‌باشد. مشابه سناریوی قبل فرکانس این نوسانات در حدود ۱۰ هرتز می‌باشد.

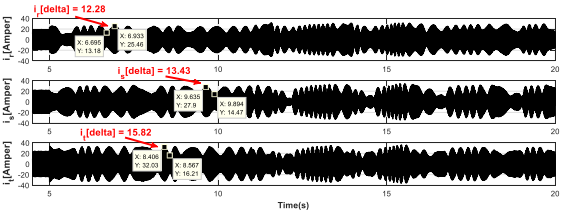


شکل ۱۱ – متغیرهای حالت سیستم در شرایط عیب سناریوی دوم



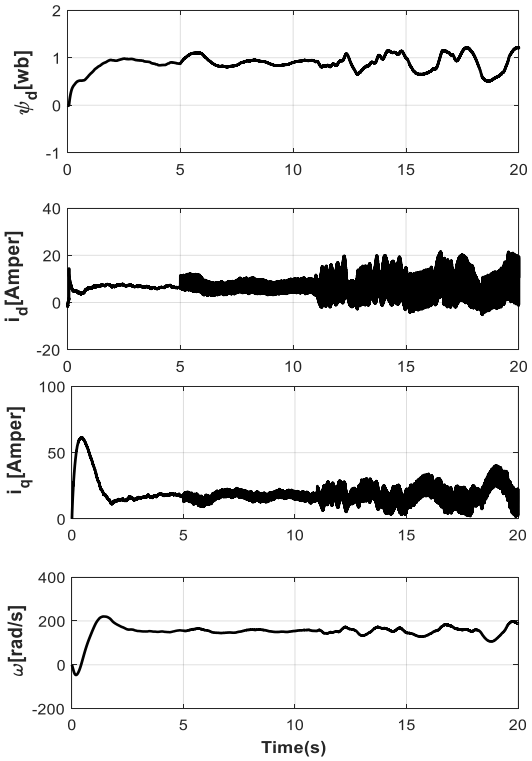
شکل ۱۲ – جریانهای موتور در شرایط عیب سناریوی دوم

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]

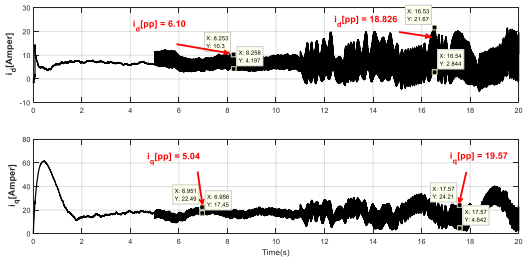


شکل ۱۳ – جریانهای تغذیه در شرایط عیب سناریوی دوم

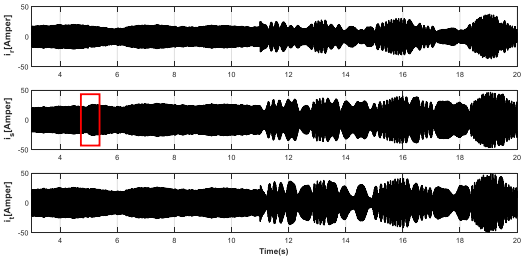
در سناریوی سوم در ثانیه پنجم عیب اتصال کوتاه شدن سیم پیچ فاز B به میزان ۳٪ به سیستم اعمال می‌شود و در ثانیه یازدهم عیب ناهم‌محوری روتور اعمال می‌گردد. شکل ۱۴ متغیرهای حالت سیستم را نشان می‌دهد. در شکل ۱۵ جریانهای موتور که دوتا از متغیرهای حالت سیستم هستند نمایش داده شده‌اند. مانند سناریوهای قبلی با اعمال عیب سیم پیچ در ثانیه پنجم به میزان ۳٪ به سیم پیچ B نوسانات دامنه در جریانها آغاز شده است. دامنه نوسانات شبیه سینوسی متناسب با دوبرابر درصد اتصال کوتاه شدن میباشد. پس از اعمال شدن عیب ناهم‌محوری روتور در ثانیه یازدهم، نوسانات دامنه متناسب با دامنه عیب اعمالی، افزایش پیدا کرده است. به عبارت بهتر ۶ واحد مربوط به شدت عیب ناهم‌محوری پس از ثانیه یازدهم و ۳ واحد نیز مربوط به درصد اتصال کوتاه شدن از ثانیه پنجم است و باید انتظار داشت که مقدار پیک تا پیک جریانهای موتور حدود ۱۸ واحد باشد که نمودارها این امر را تایید می‌کنند. در شکل ۱۶ جریان های سه فاز تغذیه رسم شده‌اند. با اعمال عیب اتصال کوتاه شدن در سیم‌پیچ فاز B تغییر آنی بسیار کوچکی در ثانیه پنجم به وقوع پیوسته است. با اعمال شدن عیب ناهم‌محوری روتور در ثانیه یازدهم، نوسانات دامنه در تمامی فازها آغاز شده و فرکانس نوسانات همانند سناریوهای قبل است.



شکل ۱۴ – متغیرهای حالت سیستم در شرایط عیب سناریوی سوم



شکل ۱۵ – جریان‌های موتور در شرایط عیب سناریوی سوم



شکل ۱۶ – جریانهای تغذیه در شرایط عیب سناریوی سوم

با توجه به آنچه که در نمودارهای سه سناریوی عیب ارائه شده مشاهده شد، میتوان شاخصی را به صورت ذیل برای تشخیص عیب و همچنین تخمین شدت آن در نظر گرفت. دامنه نوسانات جریانهای موتور در فریم d-q نشان دهنده شدت عیب ایجاد شده است. حال برای تشخیص نوع عیب با استفاده از نوسانات جریانهای تغذیه میتوان این امر را تشخیص داد. در صورتی که تغییرات آنی دامنه صرفا در یک فاز اتفاق افتاده باشد، نشان دهنده عیب اتصال کوتاه در سیم پیچ متناظر است. در صورتی که نوسانات دامنه در تمامی فازها مشاهده شود نشان دهنده عیب ناهم‌محوری است. برای تفکیک عیب ناهم‌محوری روتور از استاتور نیز کافیست به فرکانس نوسانات دامنه توجه شود.

بررسی اجمالی اثر اشباع در موتور القایی: تغییراتی که در دمای موتور، فرکانس لغزش و یا اشباع موتور ایجاد می‌شود، می‌تواند تغییرات زیادی را در مقاومت روتور، R_r ایجاد کند. طبیعتا پارامترهای مرتبط با مقاومت روتور در مدل ارائه شده دچار تغییر خواهند شد در حالیکه بقیه پارامترهای مدل تقریبا ثابت باقی می‌مانند[۱۲]. با توجه به گزارش‌هایی که در موضوع موتورهای القایی وجود دارد، R_r ممکن است به دلیل گرم شدن روتور تا ±50% مقدار نامی تغییر کند[۲۰, ۲۱]. برای شبیه سازی اثرات مذکور، یک عدم قطعیتی برای مقاومت روتور به فرم ذیل تعریف می‌گردد.

$$R_r = (1 + \delta_R) R_{rN} \qquad (۴۷)$$

که R_{rN} مقدار نامی مقاومت روتور و δ_R یک آشفتگی به دلیل افزایش دما در یک ناحیه کاری خاص است طوریکه:

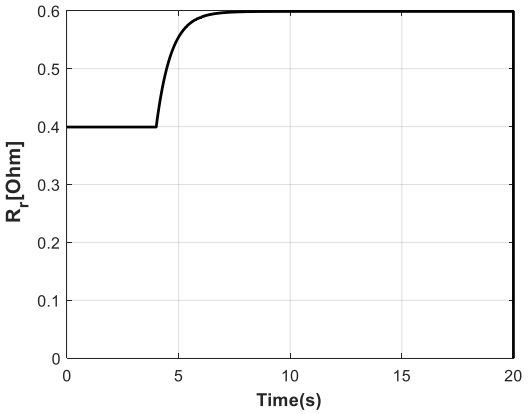
$$|\delta_R| \le 0.5 \qquad (۴۸)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]

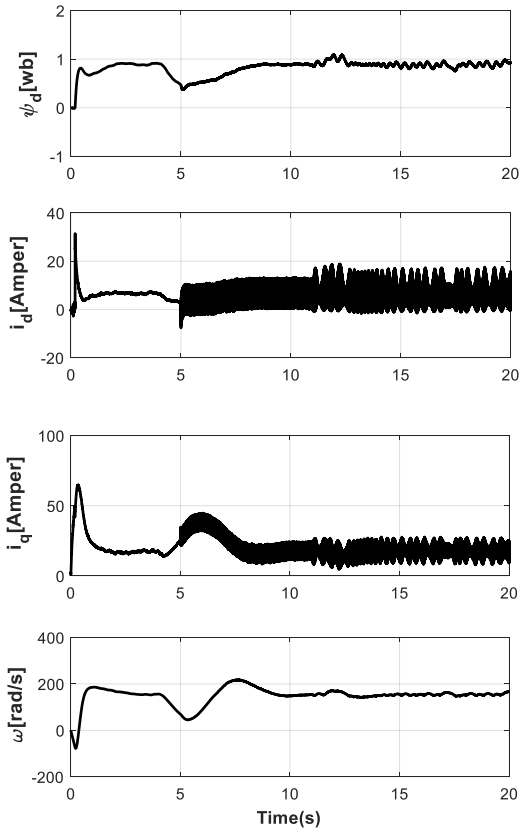
برای شبیه سازی اثر مربوطه فرض می‌شود پارامتر R_r یک پارامتر متغیر با زمان کند است. برای این منظور رابطه ذیل برای آن در نظر گرفته می‌شود:

$$R_r = R_{rN} + 0.25R_{rN}(1 - e^{-1.5t}) \quad (۴۹)$$

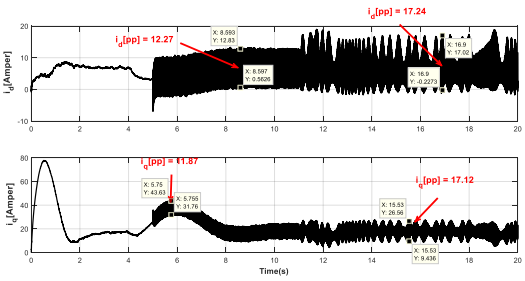
که در رابطه فوق مقدار $\delta_R = 0.25$ فرض شده است. برای بررسی اثر اشباع دو حالت در نظر گرفته می‌شود. در حالت اول فرض می‌شود عیب سناریوی دوم اتفاق بیفتد و یک ثانیه قبل از وقوع عیب، مقاومت روتور طبق رابطه ۴۹ تغییر کند. شکل ۱۷ نمودار تغییر مقاومت روتور به دلیل اشباع را نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود، از ثانیه چهارم مقدار مقاومت روتور با توجه به رابطه ۴۹ شروع به افزایش کرده و نهایتا در ثانیه هشتم به مقدار نهایی خود رسیده است. شکل ۱۸ معادلات حالت سیستم با وجود اشباع حالت اول را نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می گردد، با شروع تغییر مقاومت روتور و رفتن به حالت اشباع، شار سیستم و همچنین سرعت زاویه تغییرات حدود ۵۰ درصدی را تجربه کرده‌اند اما در نهایت کنترل کننده نامی سیستم را پایدار کرده است. در شکل ۱۹ جریان‌های موتور نمایش داده شده‌اند. اشباع سبب شده است که شکل کلی جریانها تغییر کند اما با توجه به نمودارها، معیارهای برآورد مقدار دامنه عیوب ایجاد شده همچنان برقرار است و دامنه نوسانات متناظر با دامنه عیوب است. در شکل ۲۰ جریانهای تغذیه نمایش داده شده‌اند. با توجه به اینکه در هنگام وقوع عیب در ثانیه پنجم مقاومت روتور در حال تغییر بوده است. رفتار جریانهای تغذیه متفاوت با حالت بدون اشباع است. طوریکه هم دامنه تغییرات و هم فرکانس آن‌ها دستخوش تغییر شده است. نکته مهم اینکه پس از رسیدن مقاومت به حالت دائمی رفتار جریان‌های تغذیه مشابه حالت بدون اشباع شده است.



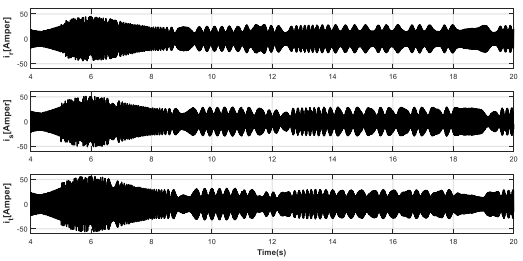
شکل ۱۷ – نمودار تغییرات مقاومت روتور برای بررسی اثر اشباع در حالت اول



شکل ۱۸ – معادلات حالت سیستم در حضور اشباع حالت اول با شرایط عیب سناریوی دوم



شکل ۱۹ – جریان‌های موتور در حضور اشباع حالت اول با شرایط عیب سناریوی دوم

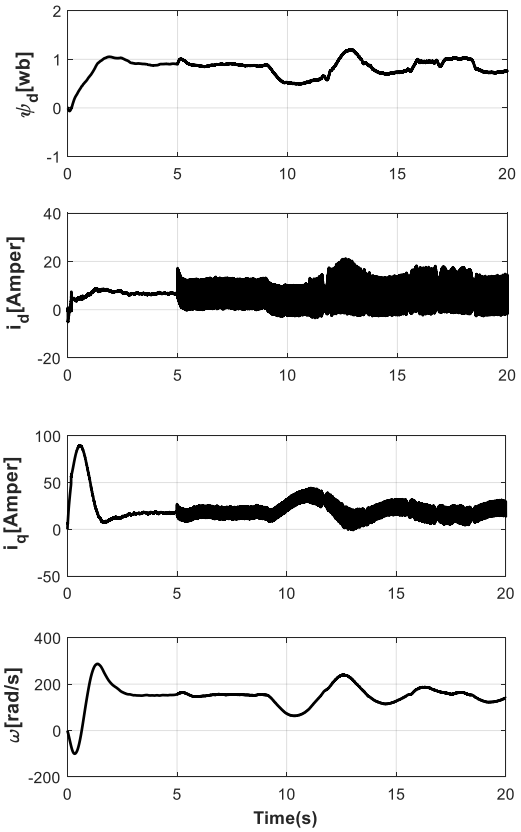


شکل ۲۰ – جریان‌های تغذیه موتور در حضور اشباع حالت اول با شرایط عیب سناریوی دوم

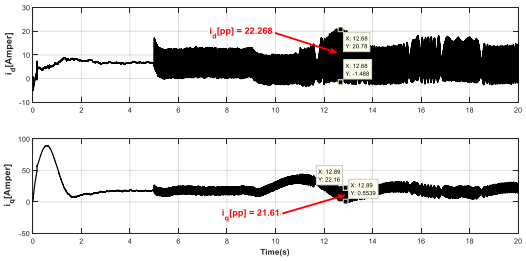
در حالت دوم فرض می‌شود فرایند تغییر مقاومت روتور از ثانیه نهم شروع شود. شکل ۲۱ متغیرهای حالت سیستم را در برای حالت دوم نشان

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]

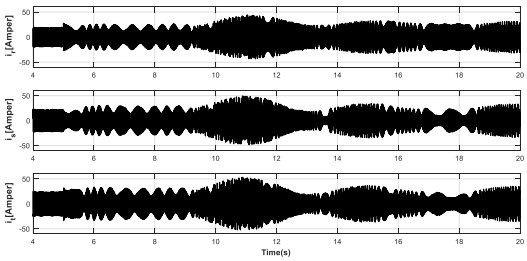
می‌دهد. در این حالت نیز با شروع تغییرات مقاومت روتور تغییرات چشمگیری در متغیرهای حالت شار و سرعت زاویه‌ای مشاهده می‌شود. شکل ۲۲ نشان دهنده رفتار جریانهای موتور است. مطابق شکل اشباع باعث افزایش دامنه نوسانات دامنه شده و معیار تشخیص را تا ۲۵٪ دستخوش تغییر کرده است. باید توجه شود که پس از رسیدن مقاومت روتور به حالت دایمی معیار تناسب دامنه نوسانات با دامنه عیوب برقرار شده است. در شکل ۲۳ جریانهای تغذیه سه فاز آورده شده‌اند. در این حالت نیز همانند حالت قبل، تا مقاومت روتور در حال تغییر است، رفتار جریانها کاملا متفاوت با حالت بدون اشباع است و با رسیدن مقاومت روتور به یک مقدار ثابت رفتار جریان‌ها مشابه حالتی می‌شود که اشباع رخ نداده باشد. به طور کلی در صورتی که برای سیستم اشباع نیز در نظر گرفته شود و در حضور اشباع عیوب تخمین زده شود، باید به طریق ذیل عمل شود. با توجه به اینکه اشباع، تغییرات بسیار بزرگی را در متغیرهای حالت شار و سرعت زاویه‌ای ایجاد می‌کند، به منظور جلوگیری از تشخیص اشتباه عیوب، باید پس از رسیدن به حالت دائمی متغیرهای حالت مذکور، معیارهای آورده شده در بخش قبل را اجرا نمود.



شکل ۲۱ – معادلات حالت سیستم در حضور اشباع حالت دوم با شرایط عیب سناریوی دوم



شکل ۲۲ – جریان‌های موتور در حضور اشباع حالت دوم با شرایط عیب سناریوی دوم



شکل ۲۳ – جریان‌های تغذیه در حضور اشباع حالت دوم با شرایط عیب سناریوی دوم

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل دینامیکی موتور القایی سه فاز معرفی شد. این مدل شامل دو عیب ناهم‌محوری و اتصال کوتاه شدن سیم‌پیچ استاتور است. با معرفی مدل جدید بیش از ۷۰٪ عیوب موتور القایی تحت پوشش قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی ثابت کرد که با استفاده از مدل پیشنهادی، علاوه بر به کارگیری تخمین حالتهای سیستم و جریان‌های تغذیه موتور در روشهای بر مبنای مدل، از روش‌های بر مبنای سیگنال هم میتوان استفاده کرد. همچنین از مدل پیشنهادی میتوان در شناسایی عیب و یا جبرانسازی آن استفاده کرد.

کلیدواژگان

1- rotor flux

2- Stator current

3- magnetizing inductance

مراجع

[1] A. Hajary, R. Kianinezhad, s. g. seyfossadat, A. Saffarian, and S. s. Mortazavi, "Robust Control of Symmetrical Six-Phase Induction Machine Under Open-phase Fault Condition Based on ADRC," (in eng), Journal of Control, Research paper vol. 11, no. 1, pp. 51-60, 2017. [Online]. Available: http://joc.kntu.ac.ir/article-1-387-fa.html.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]

[2] I. Boldea and S. A. Nasar, Vector control of AC drives (Vector Control of AC Drives). CRC Press (in English), 2017, pp. 1-237.

[3] A. Damaki, M. Amini, and M. Torabi, "Design, Analysis and Fabrication of a Counter Rotate Brushless Permanent Magnet Motor for Using in Under Water Systems," (in eng), Journal Of Marine Engineering, Research Paper vol. 13, no. 26, pp. 25-34, 2018.

[4] S. X. Ding, Model-based fault diagnosis techniques: Design schemes, algorithms and tools. London: Springer-Verlag, 2013.

[5] R. Isermann, Fault-diagnosis applications: model-based condition monitoring: Actuators, drives, machinery, plants, sensors, and fault-tolerant systems. Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.

[6] M. Ojaghi, R. Aghmasheh, and M. Sabouri, "Model-based exact technique to identify type and degree of eccentricity faults in induction motors," (in English), IET Electr Power Appl, Article vol. 10, no. 8, pp. 706-713, 2016, doi: 10.1049/iet-epa.2016.0026.

[7] M. Blodt, Granjon, P., Raison, B., & Regnier, J., Mechanical fault detection in induction motor drives through stator current monitoring – theory and application examples. France: INTECH, 2010.

[8] S. C. S. Karmakar, M. Mitra, S. Sengupta, Induction motor fault diagnosus approach through current signature analysis. Springer, 2016.

[9] E. Darie, "About modeling of induction motor faults," in International Conference on Electromechanical and Power Systems, Chisinau, Republic of Moldavia, 2007.

[10] A. Seghiour, T. Seghier, B. Zegnini, and G. Georgoulas, "Diagnosis of the combined rotor faults using air gap magnetic flux density spectrum for an induction machine," (in English), Intl. J. Syst. Assur. Eng. Manage., Article vol. 8, pp. 1503-1519, 2017, doi: 10.1007/s13198-017-0621-9.

[11] S. Abdellatif, S. Tahar, and Z. Boubakeur, "Dynamic analysis of the simultaneous mixed eccentricity and broken rotor bars in induction machine based on magnetic field diagnosis," (in English), Recent Adv. Electr. Electron. Eng., Article vol. 10, no. 2, pp. 101-109, 2017, doi: 10.2174/2352096510666170425105816.

[12] H. Rezaei and M. J. Khosrowjerdi, "A polytopic LPV approach to active fault tolerant control system design for three-phase induction motors," (in English), Int J Control, Article vol. 90, no. 10, pp. 2297-2315, 2017, doi: 10.1080/00207179.2016.1244730.

[13] A. K. S. Singh GK, "Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research—a survey," Electr Power Syst Res 64, vol. 2, pp. 145-158, 2003.

[14] A. J. Allbrecht PF, McCoy RM, Owen EL, "Assessment of the reliability of motors in utility applications—updated," IEEE Trans Energy Convers EC-1, vol. 1, pp. 39-46, 1986.

[15] W. W. Saad, M. A. El-Geliel, and A. Lotfy, "IM stator winding faults diagnosis using EKF," 2018, vol. 2018-February: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 34-39, doi: 10.1109/ACCS-PEIT.2017.8302997.

[16] H. Abdallah and K. Benatman, "Stator winding inter-turn short-circuit detection in induction motors by parameter identification," (in English), IET Electr Power Appl, Article vol. 11, no. 2, pp. 272-288, 2017, doi: 10.1049/iet-epa.2016.0432.

[17] R. Marino, Tomei, P., & Verrelli, C.M., Induction motor control design. London: Springer-Verlag, 2010.

[18] S. Gunal, Ece, D.G., & Gerec, O.N., "Induction machine condition monitoring using notch-fltered motor current," Mechanical Systems And Signal Processing, 23, vol. 8, pp. 2658-2670, 2009.

[19] A. Nikranjbar, Ebrahimi, M., & Wood, A.S., "Modelbased fault diagnosis of induction motor eccentricity using particle swarm optimization," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,, vol. 223, pp. 607-615, 2009.

[20] W. Leonhard, "Control of electrical derives," Springer, 1996.

[21] R. Marino, Peresada, S., & Valigi, P., "Adaptive input-output linearizing control of induction motor," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 38, 2, pp. 208-221, 1993.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.3.3.2]
[DOI: 10.52547/joc.15.3.69]