Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Research Article

Calculation of The Rotor Bars Current in The Squirrel Cage Induction Motor in The Rotor Eccentricity Condition Using The Multiple Coupled Circuit Model

Hamed Shadfar [a], **Hamid Reza Izadfar** [a,*]

[a] *Faculty of Electrical and Computer Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran*

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-07-09
Revised: 2025-09-01
Accepted: 2025-09-15

Keywords:

Multiple coupled circuit model (MCC);
Rotor bar;
Rotor eccentricity (RE);
Squirrel cage induction motor (SCIM);
Winding function theory (WFT).

ABSTRACT

Rotor eccentricity (RE) is one of the common faults in induction motors (IMs). We will calculate the rotor bar current (RBC) in this condition. This helps to the precision modeling of motors under fault conditions. Besides, the dynamic behavior of the IM under dynamic eccentricity (DE) and static eccentricity (SE) will be analyzed. To monitor the condition of electric machines to prevent unexpected failure, we need accurate modeling of motor behavior and performance in different operating conditions. The multiple coupled circuit (MCC) model is one of the powerful methods for modeling and analyzing electric machines in healthy and faulty conditions, including RE faults, which have been widely used in recent years. This paper calculates the RBC under RE conditions on a 2-pole squirrel cage induction motor (SCIM) with a nominal specification of 1.1 kW, 220/380 V, and 50 Hz, using an MCC model based on the winding function theory (WFT) and the stator data. Also, the behavior of other motor characteristics is evaluated. This paper presents a new method for calculating the RBC of an IM. This method is analytical and can be used to model the IM precisely. The results enable us to calculate and compare the primary parameters of IMs for both healthy and faulty conditions, including losses, efficiency, and torque ripple.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.38273.2873

© 2026 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author.**
E-mail address: hrizadfar@semnan.ac.ir

How to cite this article:
Shadfar, H. & Izadfar, H. R., "Calculation of The Rotor Bars Current in The Squirrel Cage Induction Motor in The Rotor Eccentricity Condition Using The Multiple Coupled Circuit Model." Journal of Modeling in Engineering, 24 86 (2026): 1–15, doi: 10.22075/jme.2025.38273.2873

مقاله پژوهشی

محاسبه جریان میله‌های روتور در موتور القایی قفس سنجابی در شرایط خروج از مرکز روتور با استفاده از مدل مدار کوپل شده

حامد شادفر[۱]، حمیدرضا ایزدفر[۱،*]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴

واژگان کلیدی:
تئوری تابع سیم‌پیچی،
خروج از مرکز رتور،
موتور القایی قفس‌سنجابی،
میله‌های رتور،
مدل مدار کوپل شده.

چکیده

خروج از مرکز رتور[۲] (RE) یکی از خطاهای رایج در موتورهای القایی[۳] (IM) محسوب می‌شود. نظارت و پایش موتورهای القایی به منظور جلوگیری از خرابی‌های غیرمنتظره، نیازمند مدل‌سازی دقیق رفتار و عملکرد آن‌ها در شرایط کاری مختلف است. مدل مدار کوپل شده[۴] (MCC) یکی از روش‌های قدرتمند برای مدل‌سازی و تحلیل موتورهای الکتریکی در شرایط سالم و معیوب از جمله RE است و در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته شده است. این مقاله، به محاسبه جریان میله‌های رتور[۵] (RBC) تحت شرایط خروج از مرکز دینامیکی[۶] (DE) و خروج از مرکز استاتیکی[۷] (SE) بر روی یک موتور القایی قفس سنجابی[۸] (SCIM) ۲ قطب با مشخصات نامی ۱/۱ کیلووات، ۲۲۰/۳۸۰ ولت و ۵۰ هرتز، با استفاده از MCC مبتنی بر تئوری تابع سیم‌پیچی[۹] (WFT) و داده‌های استاتور به صورت تحلیلی می‌پردازد. همچنین، رفتار سایر مشخصه‌های موتور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این مقاله یک روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه RBC یک موتور القایی قفس سنجابی ارائه می‌دهد که می‌تواند برای مدل‌سازی دقیق SCIM مورد استفاده قرار گیرد. نتایج به ما کمک می‌کند تا پارامترهای اصلی SCIM را برای شرایط سالم و معیوب، مانند تلفات، راندمان، ریپل گشتاور و غیره، محاسبه و مقایسه کنیم. نتایج عملی روش پیشنهادی را نرم افزار مبتنی بر روش المان محدود[۱۰] (FEM)، انسیس مکسول تایید می‌کند.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.38273.2873

© 2026 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

موتورهای القایی قفس سنجابی (SCIM) به علت سادگی، پایین بودن هزینه نگهداری، راه‌اندازی آسان و سایر ویژگی‌ها، پرکاربردترین ماشین‌های الکتریکی در مصارف صنعتی و خانگی محسوب می‌شوند [۱]. یکی از خطاهای رایج مکانیکی در موتورهای القایی (IM)، خروج از مرکز رتور (RE) است که به دلیل غیریکنواختی فاصله‌هوایی بین استاتور و روتور رخ می‌دهد. این غیریکنواختی می‌تواند ناشی از قرارگیری نادرست یاتاقان‌ها در مرحله نصب و راه‌اندازی، سایش قطعات مکانیکی تحت تنش، ناهماهنگی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hrizadfar@semnan.ac.ir
۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

[2] Rotor eccentricity
[3] Induction motor
[4] Multiple coupled circuit
[5] Rotor bar current
[6] Dynamic eccentricity
[7] Static eccentricity
[8] Squirrel cage induction motor
[9] Winding function theory
[10] Finite element method

استناد به این مقاله:
شادفر، حامد و ایزدفر، حمیدرضا، "محاسبه جریان میله‌های روتور در موتور القایی قفس سنجابی در شرایط خروج از مرکز روتور با استفاده از مدل مدار کوپل شده." مدل سازی در مهندسی، ۲۴ ۸۶ (۱۴۰۵): ۱-۱۵، doi: 10.22075/jme.2025.38273.2873

بین محور بار و محور روتور، ناهماهنگی نسبی بین استاتور و روتور در مرحله نصب و راه‌اندازی، رزونانس مکانیکی در سرعت بحرانی، بار نامتعادل و انحراف محور رتور باشد [۳-۲]. با توجه به اهمیت IMها در فرآیندهای مختلف صنعتی، پیاده‌سازی استراتژی‌های تشخیص خطا به همراه یک برنامه تعمیر و نگهداری می‌تواند در به حداقل رساندن زمان از کارافتادگی برنامه‌ریزی نشده و هزینه‌های ناشی از آن کمک کند [۴-۵]. برای پایش و ارزیابی عملکرد موتور، باید آن‌ها را با استفاده از مدل‌های ریاضی دقیق مدل‌سازی کرد تا بتوان رفتار آن‌ها را در شرایط عملکردی مختلف شبیه‌سازی کرد [۶-۷]. روش‌های مدل‌سازی IMها را می‌توان به چهار دسته کلی طبقه‌بندی کرد:

۱) مدل‌های مدار کوپل شده (MCC) [۸-۹]،

۲) مدل‌های d-q [۱۰-۱۱]،

۳) مدل‌های مدار معادل مغناطیسی[11] (MEC) [۱۲-۱۳]

۴) مدل‌های روش المان محدود (FEM) [۱۴-۱۵].

در جدول ۱ به مقایسه و بیان مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها پرداخته شده است. با بررسی ویژگی‌های هر یک از این روش‌ها، می‌توان گفت که MCC قوی‌ترین مدل از نوع مداری برای مدل‌سازی تعداد زیادی از خطاهای استاتور و روتور، از جمله SE و DE است [۱۶].

مدل MCC برای اولین بار برای تحلیل IM با سیم‌پیچی متمرکز پیشنهاد شد [۱۷]. جزئیات و شرح نتایج شبیه‌سازی مدل تکمیل‌شده آن در [۱۸] ارائه شده است. این روش برای تحلیل IMهایی با فاصله‌هوایی کوچک و غیریکنواخت بسیار مؤثر بوده و تمام هارمونیک‌های فضایی را بدون هیچ محدودیتی در مورد تقارن سیم‌پیچی‌های استاتور یا روتور در نظر می‌گیرد[۱۹]. [۲۰-۲۱] از MCC برای تحلیل خطای RE با در نظر گرفتن اثر شیار و اشباع هسته به منظور بهبود دقت مدل استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که این مدل در مقایسه با FEM برای ماشین‌های معیوب، سریع‌تر و دقیق‌تر است. [۲۲] به مدل‌سازی و شبیه‌سازی خطای RE با درجات متغیر در IM با استفاده از MCC مبتنی بر WFT اصلاح‌شده دوبعدی پرداخته است. دقت مدل پیشنهادی با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مربوطه تأیید شده است.

محاسبه پارامترهای MCC برای IMها نیازمند دانش دقیق از ساختار داخلی و مواد ماشین یا رویه‌های پیچیده اندازه‌گیری و آزمایش است. [۲۳] رویکردی را ارائه می‌دهند که در آن پارامترهای مدل به طور خودکار با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری و بکارگیری یک الگوریتم تکاملی تفاضلی، تعیین و بهینه می‌شوند. این روش در درجه اول برای استفاده عملی در کاربردهای صنعتی طراحی شده است. رویکرد چندسطحی امکان شبیه‌سازی رفتار دینامیکی یک IM با شرایط نامشخص را فراهم می‌کند. سپس می‌توان از این مدل برای تشخیص و شناسایی خطاها استفاده کرد. بسته به نوع خطا، پارامترهای مدل را می‌توان طوری تنظیم کرد که با رفتار ماشین معیوب همسو باشند. این تنظیم امکان تخمین شدت خطا را بر اساس پارامترهای مدل فراهم می‌کند. مدل‌های سنتی مبتنی بر تبدیل کلارک برای تکرار دقیق حالت‌های خطای نامتقارن تلاش می‌کنند. برهمین اساس در [۲۴] یک مدلMCC مبتنی بر WFT اصلاح‌شده به کار گرفته شده است. این مدل انعطاف‌پذیری لازم برای شبیه‌سازی حالت‌های مختلف خطا را فراهم می‌کند و رفتار ماشین را در شرایط عملکردی مختلف، حتی در شرایط خطا، به طور دقیق منعکس می‌کند. [۲۵] از یک رویکرد مدل‌سازی MCC برای شبیه‌سازی SCIMها تحت خطای RE بهره می‌گیرد، در حالی که تغییرات گشتاور بار نادیده گرفته شده است. برای این منظور یک تابع فاصله‌هوایی مناسب ارائه شده است. از تبدیل فوریه برای تجزیه و تحلیل دقیق محتوای هارمونیکی فاصله‌هوایی استفاده شده است. این تحلیل همچنین اثر اشباع و خروج از مرکز ذاتی IM را در نظر می‌گیرد. در نتیجه، فهرست جامعی از هارمونیک‌های قابل تشخیص در طیف جریان استاتور در شرایط خطاهای RE ایجاد می‌شود. نتایج تجربی، یافته‌های شبیه‌سازی را تأیید کرده و از نتیجه‌گیری‌های به‌دست‌آمده پشتیبانی می‌کند. در [۲۶] برای مقایسه شاخص‌های خطاهای RE و DE، یک WFT اصلاح‌شده دوبعدی ارائه شده است و برای محاسبه مقادیر اندوکتانس‌های خودی/متقابل مختلف سیم‌پیچی‌های استاتور و میله‌های روتور و مشتقات آن‌ها نسبت به موقعیت روتور استفاده می‌شود. در این راستا، از MCC برای توسعه

[11] Magnetic equivalent circuit

یک مدل تحلیلی جامع برای SCIMها تحت شرایط عملکردی مختلف استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی حاصل از این مدل با یافته‌های تجربی مطابقت خوبی دارد و اثربخشی تکنیک مدل‌سازی و شبیه‌سازی مورد استفاده را تأیید می‌کند.

تکنیک‌های هوش مصنوعی مبتنی بر یادگیری ماشین[۱۲] (ML) به دلیل پاسخ قوی، کارآمد و سازگاری‌شان، به طور فزاینده‌ای برای شناسایی پارامترها و تشخیص خطای ماشین‌های الکتریکی جذاب هستند. هم‌چنین، این تکنیک‌ها نیازی به داده‌های قبلی کامل ندارند، که به دست آوردن آن ها در عمل می‌تواند چالش برانگیز باشد[۲۷-۲۸].

در [۲۹] از یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر MCC و ML استفاده شده است. در این روش، یک الگوریتم تکاملی تفاضلی به طور مستقل پارامترهای موتور را برای MCC بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شناسایی می‌کند. همچنین، این پارامترها برای انجام شبیه‌سازی دینامیکی خطاهای مختلف IM استفاده می‌شوند. مجموعه داده‌های شبیه‌سازی برای آموزش شبکه عصبی جهت طبقه‌بندی خطاهای مختلف به کار می‌رود. در نهایت، این روش با موفقیت با داده‌های اندازه‌گیری شده از خطاها اعتبارسنجی شده و قابلیت انتقال شبکه عصبی آموزش‌دیده شبیه‌سازی شده به یک محیط واقعی را اثبات می‌کند.

جدول۱- مقایسه روش‌های متداول مدل‌سازی موتورهای القایی

روش	مزایا	معایب
MCC	• فاصله هوایی غیر یکنواخت • توابع سیم پیچی عملی • اشباع را می توان به صورت تحلیلی تعریف کرد. • انواع مختلفی از خطاها را می توان شبیه سازی کرد. • زمان محاسبه در مقایسه با FEM به طور قابل توجهی کمتر است. • تعادل زیادی بین پیچیدگی و دقت برقرار می کند.	• مدیریت برخی از محدودیت های هندسی، مانند آن هایی که برای مجاری خنک کننده در استاتور یا روتور وجود دارد، دشوار است.
d-q	• ساده • جامع • معادلات خوبی برای تخمین پارامتر ارائه می دهد. • برای کنترل و درایوها خوب است.	• اشباع ناچیز • فاصله‌هوایی یکنواخت • سیم پیچی استاتور سینوسی • بدون جریان بین میله‌ای • بدون هارمونیک فضایی • بدون خطای خروج از مرکز • بدون اثرات پوستی • مقابله با عدم تقارن‌ها، که در هنگام بروز خطا اجتناب ناپذیر هستند، می‌تواند بسیار چالش برانگیز باشد.
MEC	• وابستگی های فضایی را می توان گنجاند. • از نظر محاسباتی شدت کمتری نسبت به FEM اما بیشتر از MCC دارد. • می تواند شامل هندسه، پارامترهای مواد و توزیع سیم‌پیچی باشد.	از آنجایی که همه شیارها باید مدل شوند و ماشین معیوب دیگر متقارن نیست، مدل بسیار پیچیده می‌شود.
FEM	• هندسه‌های پیچیده را می‌توان در نظر گرفت. • غیرخطی بودن، مانند اشباع، اثر پوستی، و غیر ایده آل بودن را می‌توان در نظر گرفت. • همه انواع خطاها را می‌توان شبیه سازی کرد. ترکیب FEM با مدل‌سازی تحلیلی یک رویکرد خوب است.	• پیچیدگی محاسباتی، مسئله اصلی است، به ویژه در تشخیص خطا که در آن تقارن وجود ندارد. این مشکل با تجزیه و تحلیل سه بعدی بدتر می‌شود و آن را برای محیط‌های سخت‌افزاری در حلقه و نظریه مشکل معکوس نامناسب می‌کند.

[12] Machine learning

هدف این مقاله محاسبه RBC یک SCIM تحت شرایط RE با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر MCC و داده‌های استاتور است. برای این منظور، خطاهای SE و DE بر روی یک SCIM دو قطبی با مشخصات اسمی ۱/۱ کیلووات، ۳۸۰/۲۲۰ ولت و ۵۰ هرتز اعمال شده و سپس با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، پارامترهای مختلف موتور، از جمله RBC، محاسبه و ارزیابی می‌شوند.

ادامه مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: بخش دوم نحوه مدل‌سازی IM بر اساس MCC را به تفصیل بیان می‌کند. بخش سوم، به مدل‌سازی شرایط RE و روابط حاکم بر آن می‌پردازد. الگوریتم پیشنهادی و فرآیند محاسبه RBC در بخش چهارم تشریح شده است. در بخش پنجم، نتایج شبیه‌سازی و عملی ارائه شده است و در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ششم بیان می‌شود.

۲- مدل‌سازی موتور القایی براساس MCC

براساس WFT، معادلات دینامیکی IM به صورت روابط (۱) الی (۷) بیان می‌شود.

$$\boldsymbol{V_S} = \boldsymbol{R_S I_S} + \boldsymbol{L_{ss}}\frac{d\boldsymbol{I_s}}{dt} + \boldsymbol{L_{sr}}\frac{d\boldsymbol{I_r}}{dt} + \omega_r \frac{d\boldsymbol{L_{sr}}}{d\theta_r}\boldsymbol{I_r} \quad (۱)$$

$$\boldsymbol{V_r} = \boldsymbol{R_r I_r} + \boldsymbol{L_{rr}}\frac{d\boldsymbol{I_r}}{dt} + \boldsymbol{L_{rs}}\frac{d\boldsymbol{I_s}}{dt} + \omega_r \frac{d\boldsymbol{L_{rs}}}{d\theta_r}\boldsymbol{I_s} \quad (۲)$$

$$\boldsymbol{\Lambda_s} = \boldsymbol{L_{ss}I_s} + \boldsymbol{L_{sr}I_r} \quad (۳)$$

$$\boldsymbol{\Lambda_r} = \boldsymbol{L_{sr}^T I_s} + \boldsymbol{L_{rr}I_r} \quad (۴)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (۵)$$

$$\mathrm{T}_e - \mathrm{T}_L = j\frac{d\omega_r}{dt} \quad (۶)$$

$$\mathrm{T}_e = \frac{1}{2}I_s^T\frac{\partial \mathrm{L}_{ss}}{\partial\theta_r}\mathrm{I}_s + \frac{1}{2}I_s^T\frac{\partial \mathrm{L}_{sr}}{\partial\theta_r}\mathrm{I}_r + \frac{1}{2}I_r^T\frac{\partial \mathrm{L}_{rs}}{\partial\theta_r}\mathrm{I}_s + \frac{1}{2}I_r^T\frac{\partial \mathrm{L}_{rr}}{\partial\theta_r}\mathrm{I}_r \quad (۷)$$

در روابط (۱) الی (۷)، V، I، R، L و Λ به ترتیب بردارهای ولتاژ، جریان، مقاومت، ماتریس‌های اندوکتانس و شار مغناطیسی هستند. θ_r موقعیت رتور، ω_r سرعت زاویه‌ای، J ممان اینرسی روتور و T_eو T_L به ترتیب گشتاورهای الکترومغناطیسی و بار هستند [۱۸].

در مورد روتور قفس سنجابی، $V_r = [\mathrm{O}]$. توجه داشته باشید که با این فرمول، جریان در m مدار استاتور و n میله روتور مستقل فرض می‌شود. طبق تئوری تابع سیم‌پیچی، اندوکتانس متقابل بین هر دو سیم‌پیچی i و j در هر ماشین الکتریکی، با چشم‌پوشی از اثر اشباع، می‌تواند با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شود.

$$\mathrm{L}_{ij}(\varphi) = \mu_0 rl\int_0^{2\pi} g^{-1}(\varphi.\theta)N_i(\varphi.\theta)N_j(\varphi.\theta)d\theta \quad (۸)$$

در رابطه (۶)، φ موقعیت زاویه‌ای روتور نسبت به مرجع استاتور، θ موقعیت زاویه‌ای خاص در امتداد سطح داخلی استاتور است. $g^{-1}(\varphi.\theta)$ تابع معکوس فاصله‌هوایی نامیده می‌شود. l طول هسته و r شعاع متوسط فاصله‌هوایی است. $N_i(\varphi.\theta)$ تابع سیم‌پیچی نامیده می‌شود و در واقع نشان‌دهنده توزیع MMF در امتداد فاصله‌هوایی برای جریان واحدی است که در سیم‌پیچی i جریان دارد. اندوکتانس خودی را می‌توان صرفاً با تنظیم $i = j$ محاسبه کرد [۳۰-۳۱].

۳- مدل‌سازی RE

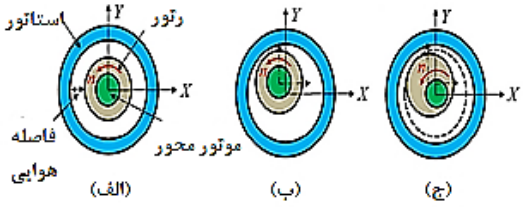
انواع RE در شکل ۱ نشان داده شده است. در SE، موقعیت حداقل فاصله‌هوایی شعاعی ثابت است و ناشی از بیضی بودن هسته استاتور یا قرارگیری نادرست هسته یا یاتاقان استاتور در زمان راه‌اندازی یا در حین تعمیر است و سطح آن در طول زمان تغییر نمی‌کند. DE وضعیتی است که در آن مرکز روتور در مرکز چرخش قرار ندارد و موقعیت حداقل فاصله‌هوایی شعاعی با روتور می‌چرخد. این شرایط می‌تواند ناشی از خمیدگی محور، فرسودگی یاتاقان‌ها، انبساط حرارتی نامتقارن روتور و غیره باشد [۳۰].

در شرایط عملکرد سالم، محور متقارن روتور، محور متقارن استاتور و محور چرخش روتور بر هم منطبق هستند و فاصله‌هوایی یکنواخت است. در شرایط RE، محورهای فوق نسبت به یکدیگر جابجا می‌شوند و طول فاصله‌هوایی با چرخش روتور تغییر می‌کند و تابعی از زمان است. در SE، محور متقارن روتور با محور چرخش خود منطبق است، اما از محور متقارن استاتور جابجا شده است. طبق شکل (۱-ب) موقعیت حداقل فاصله‌هوایی شعاعی ثابت است. در DE، محور متقارن استاتور با محور چرخش روتور منطبق است، اما هر دو نسبت به محور متقارن روتور جابجا می‌شوند. بنابراین، طبق شکل (۱-ج) حداقل طول فاصله‌هوایی بسته به موقعیت روتور متفاوت است.

به طور کلی تابع فاصله‌هوایی در شرایط RE به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود.

$$g(\varphi.\theta_r) = g_0(1 - \varepsilon_s \cos(\varphi) - \varepsilon_d \cos(\varphi - \theta_r)) \quad (۹)$$

در رابطه (۹)، φ زاویه محیطی استاتور، θ_r زاویه روتور برحسب درجه مکانیکی، g_0 طول فاصله‌هوایی در شرایط متقارن، و ε_s و ε_d ضرایب SE و DE هستند [۳۱].



شکل۱- (الف) موتور سالم، (ب) SE، (ج) DE

۴- فرآیند محاسبه جریان میله‌های رتور

شبیه‌سازی دینامیکی IM شامل حل معادلات دیفرانسیل (۱)، (۲)، (۵) و (۶) به طور همزمان است. روش‌های مختلفی برای این منظور قابل استفاده است. در مدل پیشنهادی، یک روش نسبتاً ساده ارائه می‌شود. با فرض اینکه گام زمانی شبیه‌سازی (Δt) به اندازه کافی کوچک انتخاب شود، این معادلات را می‌توان به خوبی در قالب معادلات دیفرانسیل به شرح زیر تقریب زد:

$$[\Lambda_s]_i = \{[V_S]_i - [R_S][I_S]_{i-1}\}\Delta t + [\Lambda_s]_{i-1} \quad (۱۰)$$

$$[\Lambda_r]_i = -[R_S][I_S]_{i-1}\Delta t + [\Lambda_r]_{i-1} \quad (۱۱)$$

$$\omega_i = \frac{1}{J}(\mathrm{T}_{e.i-1} - \mathrm{T}_{L.i})\Delta t + \omega_{i-1} \quad (۱۲)$$

$$\theta_{r.i} = \omega_i \Delta t + \theta_{r.i-1} \quad (۱۳)$$

همچنین، روابط (۳) و (۴) را می‌توان بر حسب بردارهای جریان به صورت زیر بیان کرد:

$$[\mathrm{I}_r]_i = ([\mathrm{L}_{rr}]_i - [\mathrm{L}_{sr}]_i^T [\mathrm{L}_{ss}]_i^{-1}[\mathrm{L}_{sr}]_i)^{-1} \times ([\Lambda_r]_i - [\mathrm{L}_{sr}]_i^T [\mathrm{L}_{ss}]_i^{-1}[\Lambda_s]_i) \quad (۱۴)$$

$$[\mathrm{I}_s]_i = [\mathrm{L}_{ss}]_i^{-1}[\Lambda_s]_i - [\mathrm{L}_{ss}]_i^{-1}[\mathrm{L}_{sr}]_i[\mathrm{I}_r]_i \quad (۱۵)$$

همچنین، به منظور در نظر گرفتن اثر تورب[13] میله‌های روتور در مدل پیشنهادی، از رویکرد ضریب تورب[14] استفاده شده است. در این روش، یک ضریب تورب بر اندوکتانس متقابل اعمال می‌شود. این ضریب در رابطه (۱۶) [۳۲] ارائه شده است.

$$K_{skew} = \frac{\sin(\alpha_{skew}/2)}{\alpha_{skew}/2} \quad (۱۶)$$

$$L_{sr.eff} = K_{skew} L_{sr0} \quad (۱۷)$$

در روابط (۱۶) و (۱۷)، K_{skew} ضریب تورب، α_{skew} زاویه تورب، L_{sr0} اندوکتانس متقابل اولیه است.

در روش‌های قبلی برای محاسبه جریان روتور با استفاده از این معادلات، فقط ولتاژهای استاتور ماشین به عنوان مقادیر معلوم در نظر گرفته می‌شدند. این امر معمولاً منجر به پیچیدگی محاسبات و افزایش بار محاسباتی می‌شود. علاوه بر این، غیرمنفرد بودن ماتریس اندوکتانس، زمانی که مسئله شامل تعداد زیادی معادله دیفرانسیل است، در بسیاری از موارد، منجر به واگرایی محاسبات می‌شود. برای حل این مشکل، در مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های استاتور و همچنین مشخصات نامی موتور و به کارگیری یک روش عددی مبتنی بر تکرار در محیط برنامه‌نویسی Matlab، جریان میله‌های رتور در شرایط عملکردی مختلف قابل محاسبه است. مدل پیشنهادی دارای سرعت و دقت همگرایی بالاتری نسبت به روش MCC مرسوم است.

فلوچارت روش پیشنهادی برای محاسبه RBC در شکل (۲) نشان داده شده است. برای محاسبه RBC تحت شرایط موردنظر، در ابتدا بایستی داده‌های استاتور به همراه سایر مشخصات نامی موتور از جمله تعداد قطب‌ها، گشتاور بار، زاویه تورب میله‌های رتور و ضرایب SE و DE تعیین شود. سپس ماتریس‌های اندوکتانس(L_r) و مقاومت رتور (R_r) محاسبه می‌شود. سپس بر اساس یک فرآیند مبتنی بر تکرار جریان‌های استاتور (I_S)، ماتریس‌های اندوکتانس متقابل بین میله‌های رتور و سیم‌پیچی استاتور (L_{sr}) و در نهایت جریان میله‌های رتور (I_r) محاسبه می‌شود. این فرآیند تکراری تا به پایان رسیدن زمان شبیه‌سازی ادامه دارد. مزایا و معایب مدل پیشنهادی در جدول۲ ارائه شده است.

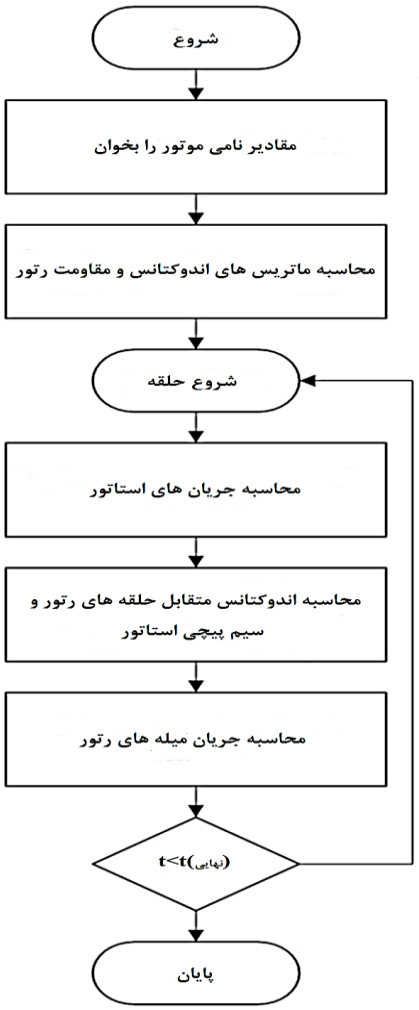
۵- نتایج آزمایشگاهی

یک موتور القایی قفس سنجابی سه فاز با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ مورد تست و ارزیابی قرار می‌گیرد. اتصال سیم‌پیچی استاتور به صورت Y (ستاره) است. نتایج تست عملی و شبیه‌سازی در شرایط سالم و RE با استفاده از یک منبع تغذیه سه فاز متعادل، ۳۸۰ ولت و ۵۰ هرتز و تحت بارگذاری ۳ نیوتن‌متر به دست آمده است. شکل (۳)، تصویری از مجموعه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. به منظور تایید نتایج تجربی، از نتایج حاصل از شبیه‌سازی این موتور

[13] Skew effect

[14] Skew factor approach

در نرم‌افزار مبتنی بر FEM ، انسیس مکسول استفاده شده است. نتایج حاصل از مقایسه مدل پیشنهادی با FEM تحت شرایط سالم و معیوب در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل۲- فلوچارت مدل پیشنهادی



شکل۳- مجموعه تست آزمایشگاهی

جدول۲- مزایا و معایب مدل پیشنهادی

مزایا	معایب
قابلیت محاسبه RBC در زمان واقعی	اثر نویز یا عدم دقت سنسور بر محاسبه RBC
به راحتی روی DSPها پیاده‌سازی می‌شود زیرا مبتنی بر معادلات دیفرانسیل هستند.	چشم‌پوشی از اثرات پوستی، تلفات هیسترزیس و جریان گردابی در فرکانس‌های بالا
روشی ساده با دقت و سرعت همگرایی بالا	حساسیت بالا به تغییرات پارامترهای موتور، از جمله تغییرات مقاومت‌ها به دلیل تغییرات دما، تغییرات اندوکتانس‌ها به دلیل اشباع
استفاده از تعداد سنسور کمتر (فقط برای متغیرهای استاندارد ولتاژ، جریان و سرعت استفاده می‌کند.)	
قابلیت اجرا در شرایط بارگذاری مختلف	
قابل استفاده در موتورهای صنعتی با توان نامی یا تعداد قطب‌های مختلف	
قابل اجرا برای هر نوع ساختار سیم‌پیچی استاتور و روتور	

جدول۳- مشخصات موتور القایی مورد مطالعه

پارامتر	مقادیر
توان نامی(کیلووات)	۱/۱
ولتاژ نامی(ولت)	۲۲۰/۳۸۰
سرعت نامی(دور بر دقیقه)	۲۸۵۰
فرکانس نامی(هرتز)	۵۰
تعداد قطب‌ها	۲
تعداد شیارهای استاتور	۱۸
تعداد میله‌های رتور	۱۶
قطر داخلی هسته استاتور (میلی‌متر)	۶۷
قطر خارجی هسته استاتور (میلی‌متر)	۱۲۱
فاصله‌هوایی (میلی‌متر)	۱
تعداد حلقه‌ها در هر کلاف	۸۵
طول هسته استاتور (میلی‌متر)	۷۶
زاویه تورب میله‌های رتور (درجه)	۵

جدول۴- مقایسه مدل پیشنهادی با روش FEM

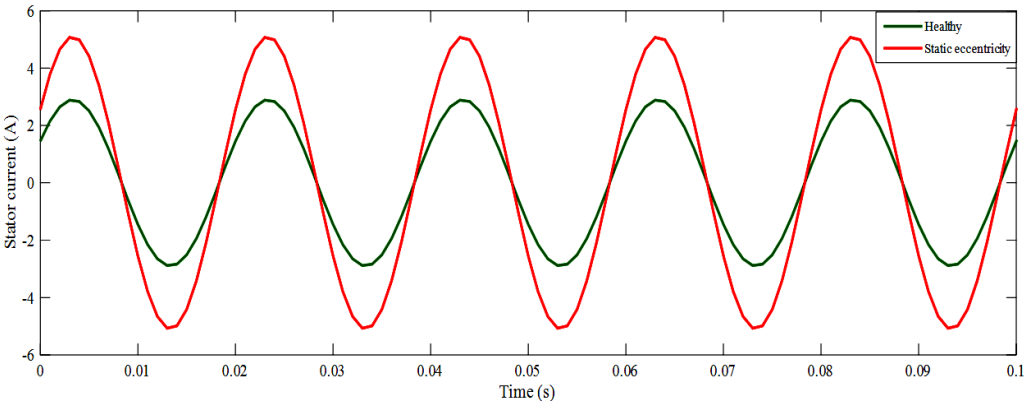
	دامنه جریان میله رتور (آمپر)	
شرایط کاری	مدل پیشنهادی	FEM
سالم	۲۳۳/۲	۲۳۳/۸
SE	۲۶۰	۲۶۵
DE	۲۹۵	۳۰۲

۵-۱- خطای SE

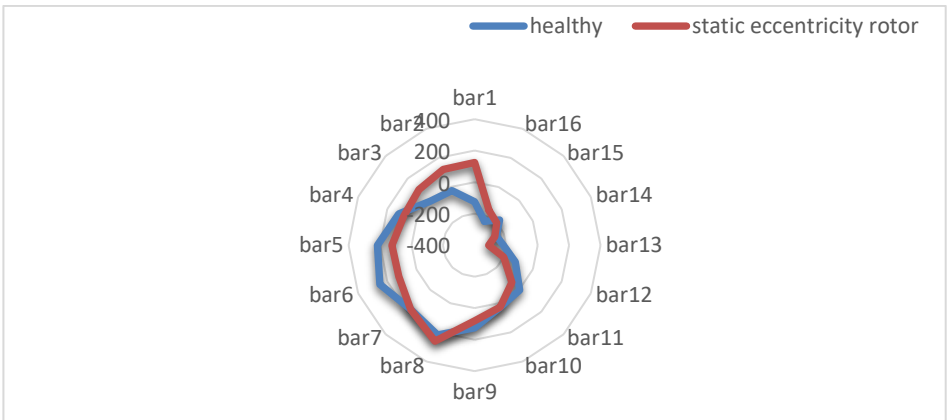
در شرایط SE طبق شکل (۱-ب)، مرکز رتور بر مرکز دوران رتور منطبق بوده و نسبت به مرکز استاتور متمایل است. به منظور انجام تست عملی و ایجاد SE، مرکز رتور و دوران آن به میزان ۵۰ درصد طول فاصله‌هوایی از موقعیت اصلی خود منحرف شده است. جریان فاز A استاتور در حالت‌های سالم و SE تحت ولتاژ نامی و گشتاور بار (۳ نیوتن‌متر) توسط پراب جریان اندازه‌گیری شده و نتایج آن در شکل (۴) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که موتور مورد مطالعه در شرایط معیوب تحت گشتاور بار نامی (۳/۵ نیوتن‌متر) متوقف شده و اصطلاحا زیر بار می‌خوابد و توانایی تحمل گشتاور نامی را ندارد. شکل (۵)، مقادیر RBC را در شرایط سالم و SE در مدت زمان $t = 190\ ms$ را نمایش می‌دهد. هم‌چنین به عنوان نمونه شکل موج جریان یکی از میله‌های رتور در شکل (۶) نشان داده شده است.

منحنی‌های سرعت و گشتاور به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. در تست عملی، سرعت حالت پایدار موتور در شرایط سالم و SE ۵۰ درصدی به ترتیب ۲۸۱۷ و ۲۲۴۰ دور در دقیقه اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل، کاهش سرعت تحت شرایط RE را نشان می‌دهد. یه طور کلی یک ماشین الکتریکی تحت شرایط RE، گشتاور مشابه یک ماشین سالم را از خود نشان نمی‌دهد. نتایج نشان‌دهنده افزایش گشتاور با افزایش شدت RE است. به طوری که نتایج حاصل از گشتاور در RE نسبی ۰٪ به یک ماشین سالم اشاره دارد. هم‌چنین میزان ریپل گشتاور در شرایط سالم و معیوب به ترتیب ۰/۴ $\pm$ و ۰/۷۵ $\pm$ اندازه‌گیری شده است.

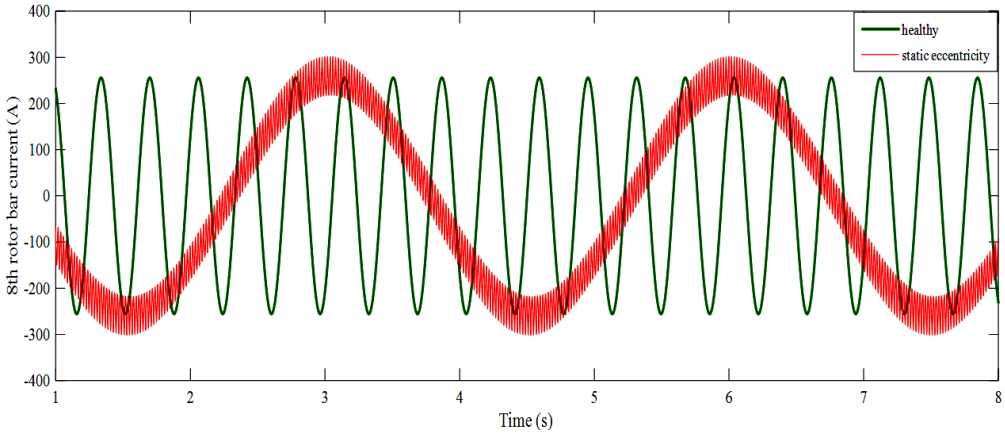
همچنین، اثر SE ۵۰ درصدی بر نیروی ضد محرکه الکتریکی استاتور در شکل۹ نشان داده شده است. طبق این شکل، دامنه ولتاژ فازهای A، B و C به ترتیب برابر با ۲۹۵/۳۳، ۲۹۲/۵۳ و ۲۹۴/۵۳ ولت و درصد نامتعادلی سه فاز براساس استاندارد IEEE برابر با ۰/۵۴ درصد است.



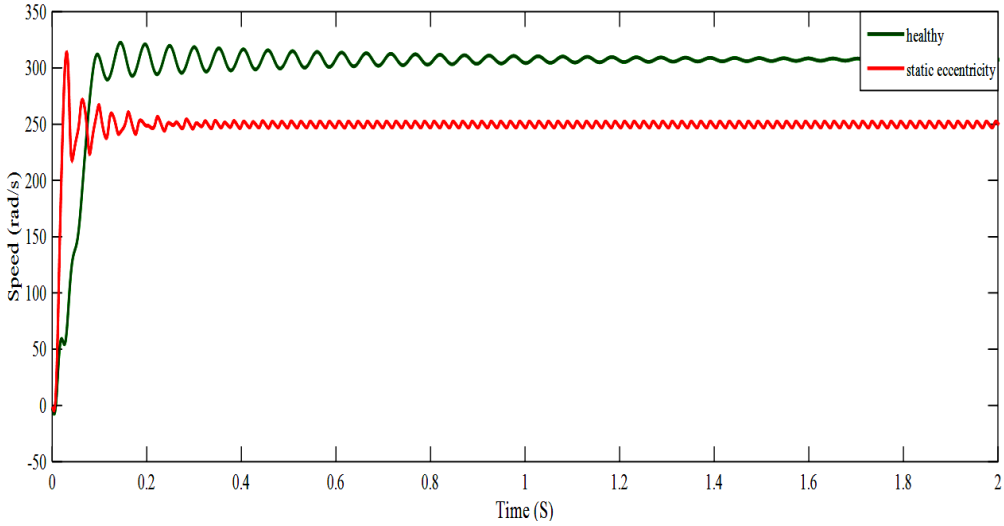
شکل۴- شکل موج جریان فاز A استاتور



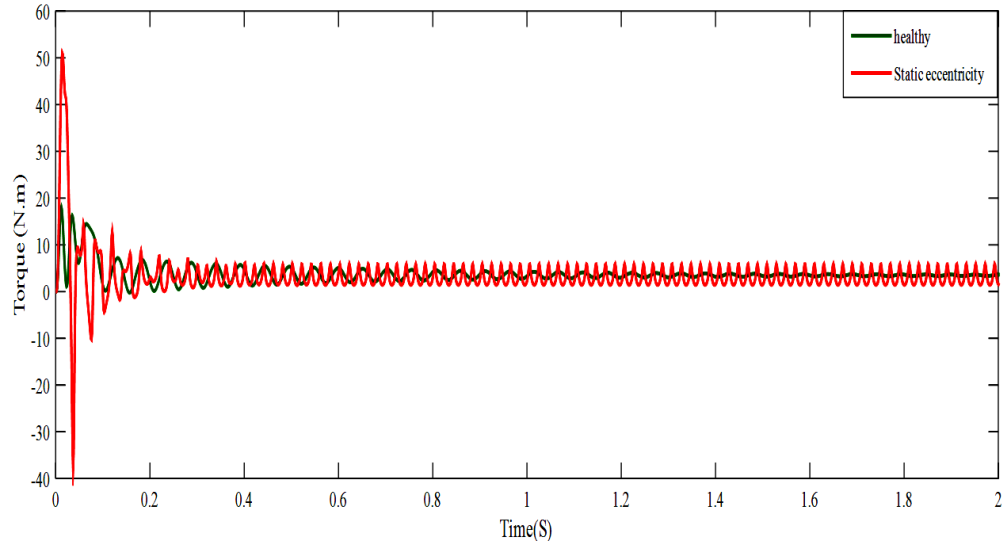
شکل۵- مقادیر RBC در شرایط سالم و SE



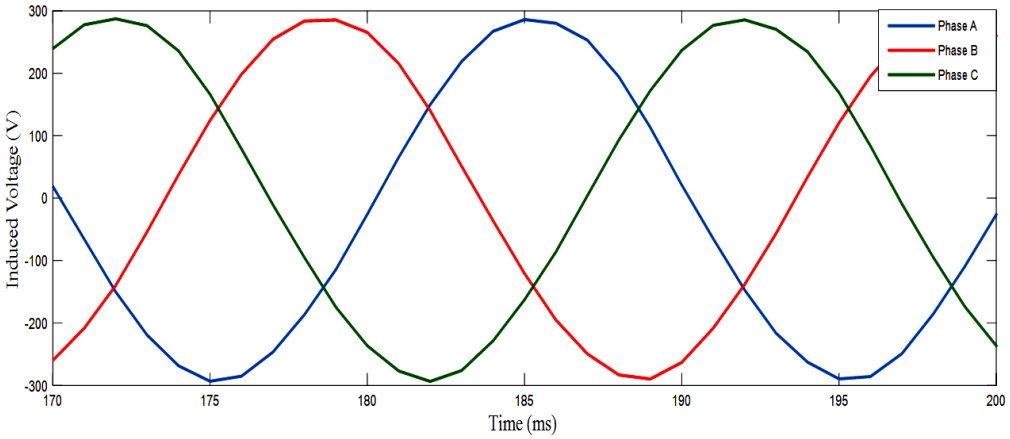
شکل۶- شکل موج جریان میله شماره۸ در شرایط سالم و SE



شکل۷- منحنی سرعت-زمان



شکل۸- منحنی گشتاور-زمان



شکل۹- منحنی نیروی ضدمحرکه سه فاز استاتور در شرایط SE

۵-۱-۱- تلفات موتور در شرایط SE

بدیهی است که در صورت بروز RE میزان تلفات و راندمان موتور تحت تاثیر قرار می‌گیرد. همان‌طور که مشاهده شد، در صورت بروز خطای SE، جریان‌های استاتور و رتور تحت تاثیر قرار گرفته و نسبت به شرایط سالم موتور افزایش می‌یابند. بنابراین انتظار می‌رود که تلفات اهمی استاتور و رتور افزایش یابد. همچنین با توجه به تغییراتی که در چگالی شار ایجاد می‌گردد، تلفات هسته موتور تغییر خواهد کرد. راندمان موتور تحت شرایط گشتاور با ۳ نیوتن‌متر و وجود خطای SE ۵۰ درصدی محاسبه شده و در جدول ۵ نشان داده شده است. بدیهی است که بسته به میزان و شدت خطا مقدار راندمان تحت تاثیر قرار می‌گیرد و این مقدار کاهش می‌یابد. هم‌چنین در جدول۶ مقادیر تلفات آهنی و مسی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

۵-۲- خطای DE

در شرایط DE طبق شکل (۱-ج)، محور دوران رتور بر مرکز استاتور منطبق بوده و محور رتور نسبت به مرکز استاتور متمایل است. برای این منظور محور رتور به میزان ۵۰ درصد طول فاصله‌هوایی از موقعیت اصلی خود منحرف شده است. جریان فاز A استاتور در حالت‌های سالم و DE تحت ولتاژ نامی و گشتاور بار (۳ نیوتن‌متر) اندازه‌گیری شده و نتایج آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

برای محاسبه RBC در شرایط خطای DE با استفاده از MCC، طبق شکل (۱-ج)، بایستی همانند SE پروفیل فاصله‌هوایی تغییر کند. در این شرایط، فاصله‌هوایی نه تنها به میزان خروج از مرکز (δ_d)، بلکه به θ_r نیز بستگی دارد. برای این منظور از رابطه (۷) استفاده می‌شود. حال می‌توان با حل معادلات دینامیکی، RBC را محاسبه کرد. شکل(۱۱)، مقادیر RBC را در شرایط سالم و DE در مدت زمان $t = 190\ ms$ نمایش می‌دهد. هم‌چنین در شکل (۱۲) به عنوان نمونه شکل‌موج جریان یکی از میله‌های رتور نشان داده شده است.

منحنی‌های سرعت و گشتاور را برای حالت‌های مختلف موتور به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. میزان ریپل گشتاور در شرایط سالم و معیوب به ترتیب ۰/۴ $\pm$ و ۰/۸ $\pm$ اندازه‌گیری شده است.

اثر DE ۵۰ درصدی بر نیروی ضد محرکه الکتریکی استاتور در شکل (۱۵) نشان داده شده است. طبق این شکل، دامنه ولتاژ فازهای A، B و C به ترتیب برابر با ۲۹۴/۷۶، ۲۹۱/۵۷ و ۲۹۲/۴۹ ولت و درصد نامتعادلی سه فاز براساس استاندارد IEEE برابر با ۰/۶۲ درصد است.

۵-۲-۱- تلفات موتور در شرایط DE

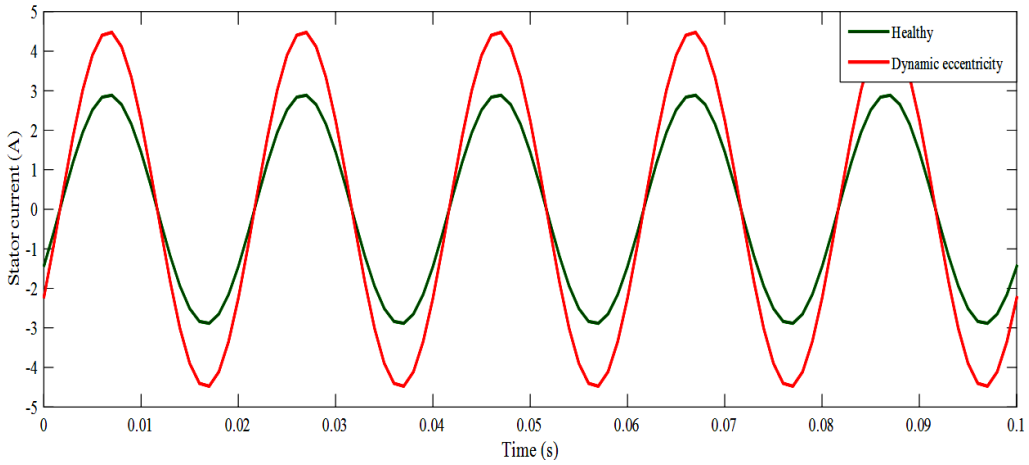
همانند شرایط SE، تلفات در شرایط DE مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج حاصل در جداول ۷ و ۸ ارائه شده است.

جدول۵- مشخصه‌های الکترومکانیکی موتور در شرایط عملکردی مختلف تحت شرایط گشتاور بار ۳ نیوتن‌متر

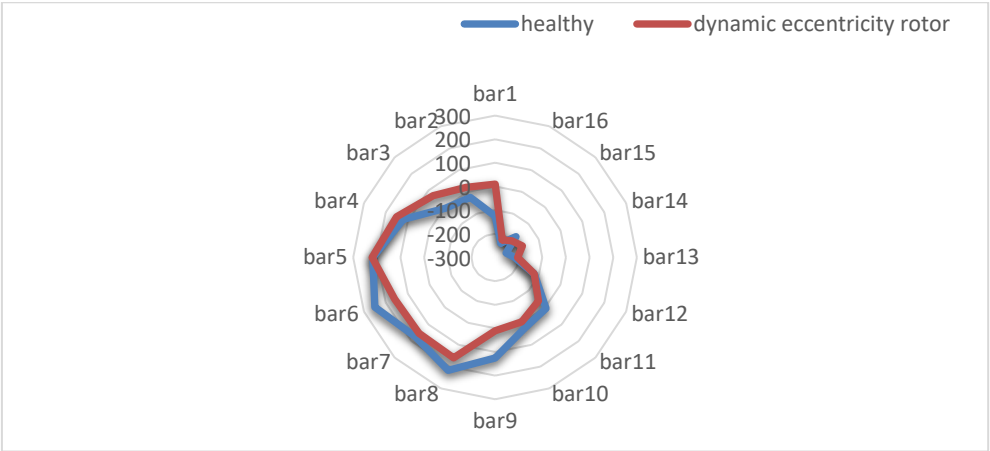
شرایط عملکردی	ولتاژ فاز (V)	جریان فاز (A)	ضریب قدرت	گشتاور (Nm)	سرعت (rpm)	توان مکانیکی (kW)	توان الکتریکی (kW)	راندمان (٪)
سالم	۲۲۰	۲/۵	۰/۹۰	۳	۲۸۱۷	۰/۸۸۵	۱/۱	۸۰/۰۴
SE	۲۲۰	۳/۵	۰/۸۹	۳	۲۲۴۰	۰/۷۰۴	۲/۰۵	۳۴/۳۴

جدول۶- تلفات موتور در شرایط عملکردی مختلف تحت شرایط گشتاور بار ۳ نیوتن‌متر

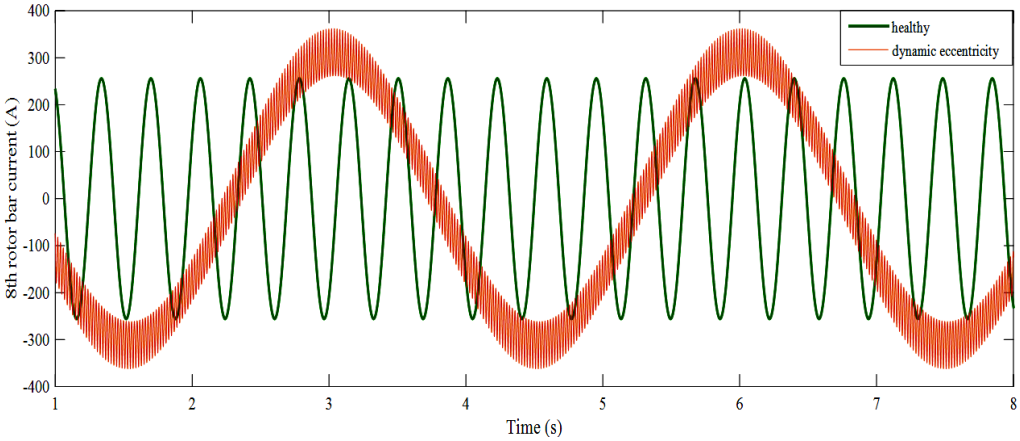
شرایط عملکردی	تلفات اهمی استاتور (W)	تلفات اهمی رتور (W)	تلفات آهنی+ تلفات اصطکاک و بادخوری (W)
سالم	۸۲	۶۵	۶۸
SE	۲۷۵	۹۶	۹۲۰



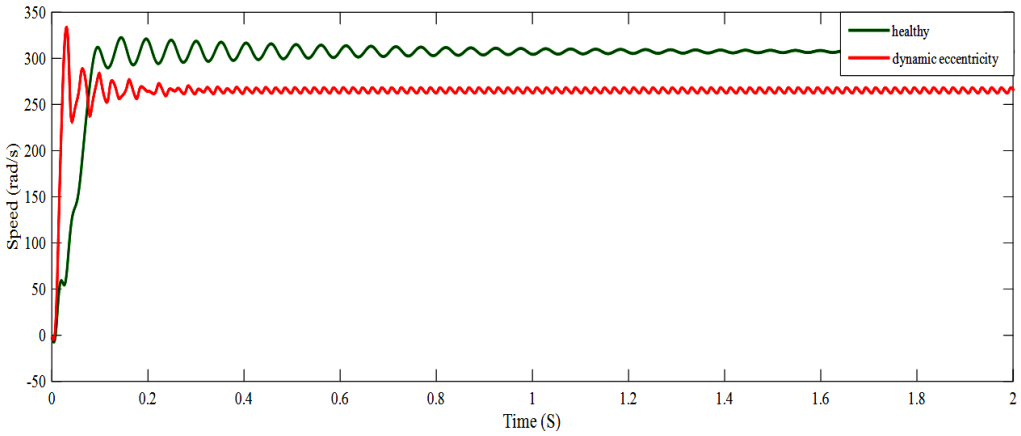
شکل۱۰- شکل موج جریان فاز A استاتور



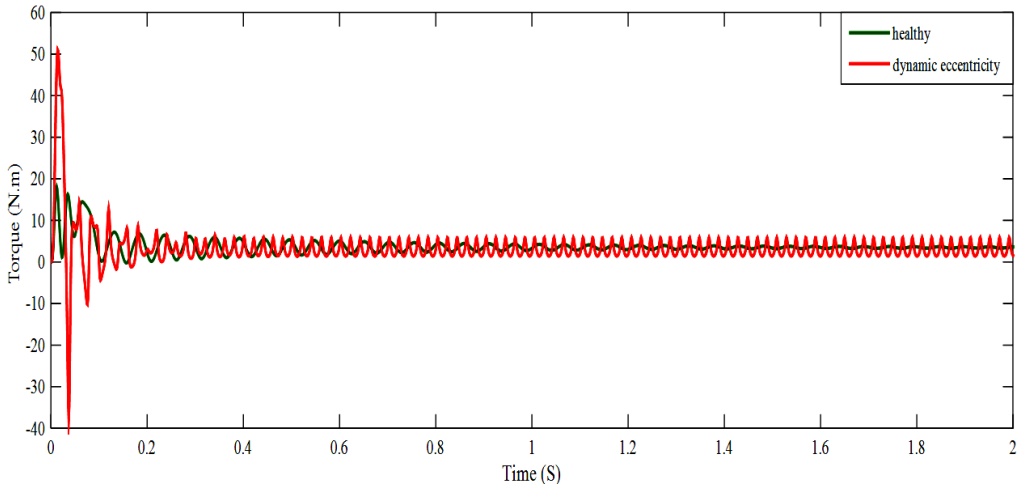
شکل۱۱- مقادیر RBC در شرایط سالم و DE



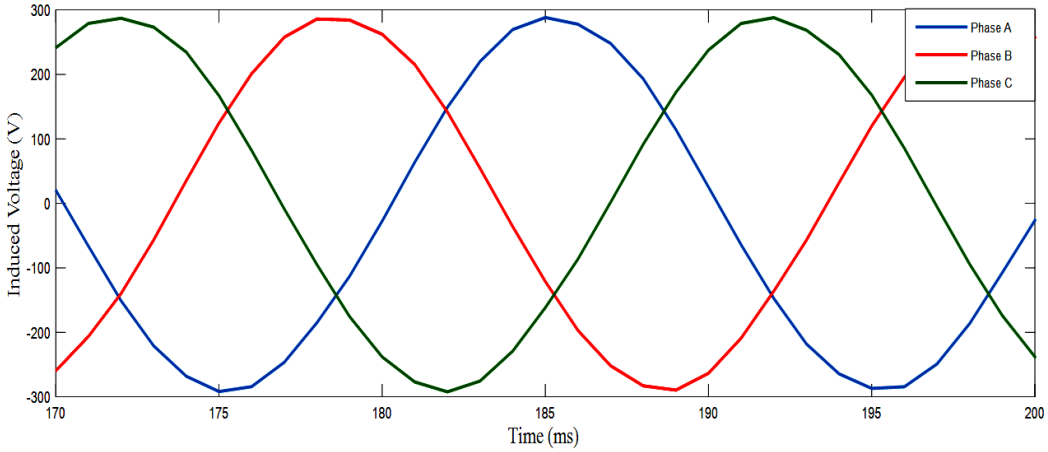
شکل۱۲- شکل موج جریان میله شماره۸ در شرایط سالم و DE



شکل۱۳- منحنی سرعت-زمان



شکل۱۴- منحنی گشتاور-زمان



شکل۱۵- منحنی نیروی ضدمحرکه سه فاز استاتور در شرایط DE

جدول۷- مشخصه‌های الکترومکانیکی موتور در شرایط عملکردی مختلف تحت شرایط گشتاور بار ۳ نیوتن‌متر

شرایط عملکردی	ولتاژ فاز (V)	جریان فاز (A)	ضریب قدرت	گشتاور (Nm)	سرعت (rpm)	توان مکانیکی (kW)	توان الکتریکی (kW)	راندمان (٪)
سالم	۲۲۰	۲/۵	۰/۹۰	۳	۲۸۱۷	۰/۸۸۵	۱/۱	۸۰/۰۴
DE	۲۲۰	۳/۲	۰/۸۹	۳	۲۴۸۲	۰/۷۷۹	۱/۸	۴۳/۲۷

جدول۸- تلفات موتور در شرایط عملکردی مختلف تحت شرایط گشتاور بار ۳ نیوتن‌متر

شرایط عملکردی	تلفات اهمی استاتور (W)	تلفات اهمی رتور (W)	تلفات آهنی+ تلفات اصطکاک و بادخوری (W)
سالم	۸۲	۶۵	۶۸
DE	۲۹۱	۱۱۰	۶۲۰

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، نویسندگان یک روش کارآمد برای محاسبه RBC تحت هر دو شرایط SE و DE ارائه می‌دهند. اساس روش پیشنهادی بر پایه WFT استوار است که تجزیه و تحلیل جامعی از تأثیر RE بر پارامترهای عملکردی موتور را تسهیل می‌کند. هم‌چنین، بینش‌های قابل توجهی را در مورد مشخصه‌های عملکردی موتورهایی که در معرض سطوح مختلفی از RE قرار دارند، آشکار می‌سازد. به طور خاص، در شرایط خروج از مرکز استاتیک ۵۰ درصدی، ما شاهد کاهش قابل توجهی در راندمان و سرعت موتور به ترتیب در حدود ۵۷٪ و ۲۱٪ بودیم. همزمان، جریان‌های استاتور افزایشی حدود ۴۰٪ را نشان دادند. این یافته‌ها بر اثرات مضر SE بر عملکرد موتور تأکید می‌کنند و نیاز به استراتژی‌های مؤثر نظارت و پایش را برجسته می‌سازند.

علاوه بر این، تحلیل نویسندگان به سناریوی خروج از مرکز دینامیک۵۰ درصدی نیز تعمیم داده می‌شود، که در آن راندمان و سرعت موتور به ترتیب ۴۶٪ و ۱۲٪ کاهش را تجربه می‌کنند.

در نتیجه، تحقیقات بر اهمیت حیاتی درک تأثیر RE بر عملکرد موتور تأکید دارد. با استفاده از WFT، ما یک چارچوب قوی برای محاسبه RBC ارائه می‌دهیم و در نتیجه ارزیابی‌های دقیق‌تری از راندمان و عملکرد موتور را در شرایط مختلف RE امکان‌پذیر می‌کنیم. این تجربه برای توسعه طراحی‌های پیشرفته موتور و شیوه‌های نگهداری با هدف کاهش اثرات نامطلوب RE ضروری است.

تقدیر و تشکر

از جناب آقای مهندس امامی کارشناس محترم آزمایشگاه ماشین‌های الکتریکی دانشگاه سمنان به خاطر همکاری در انجام تست‌های عملی بسیار سپاسگزاریم.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت های نویسندگان

حامد شادفر: تحقیق و گردآوری داده‌ها، نرم افزار و شبیه‌سازی، انجام تست‌های آزمایشگاهی، تجزیه و تحلیل نتایج، نگارش و تهیه پیش‌نویس مقاله.

حمیدرضا ایزدفر: تجزیه و تحلیل نتایج، بازبینی و ویرایش پیش‌نویس مقاله

منابع مالی

در انجام این پژوهش هیچ منابع مالی مورد استفاده قرار نگرفته است.

References

[1] Maghsoodi, Saeed, Yusef Kazemi-Sanji, Mohammad Farhadi-Kangarlu, and Sadjad Galvani. "Comprehensive Modeling of Induction Motor Imbalance Condition to Precise Assessment of Steady State Performance Based on Complex Current Unbalance Factor." Journal of Modeling in Engineering 19, no. 66 (2021): 65-78. (in persian)

[2] Goroshko, Andrii, and Maryna Zembytska. "Study on the Eccentric Rotor Dynamics in A Three-Phase Induction Motor with Squirrel Cage Rotor under Unbalanced Magnetic Field." 2024.

[3] Zhou, ZiWei, ZaiGang Chen, and WanMing Zhai. "Dynamics modeling and electromechanical coupling characteristics analysis of cage induction motors." Science China Technological Sciences 67, no. 3 (2024): 709-724.

[4] Nasiri, Ahmad, Akbar Rahideh, Gholam Reza Agah, and Shahin Hedayati Kia. "Ball-bearing fault detection of squirrel-cage induction motors based on single-phase stator current using wavelet packet decomposition and statistical features." IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024.

[5] Goroshko, Andrii, and Maryna Zembytska. "Study on the Eccentric Rotor Dynamics in A Three-Phase Induction Motor with Squirrel Cage Rotor under Unbalanced Magnetic Field." 2024.

[6] Sarac, Vasilija. "Impact of core saturation on operating characteristics of three-phase squirrel cage motor." (2024): 84-92.

[7] Bahgat, Bahgat Hafez, Enas A. Elhay, Tole Sutikno, and Mahmoud M. Elkholy. "Revolutionizing motor maintenance: a comprehensive survey of state-of-the-art fault detection in three-phase induction motors." International Journal of Power Electronics and Drive Systems 15, no. 3 (2024): 1968-1989.

[8] Zhou, ZiWei, ZaiGang Chen, and WanMing Zhai. "Dynamics modeling and electromechanical coupling characteristics analysis of cage induction motors." Science China Technological Sciences 67, no. 3 (2024): 709-724.

[9] Huang, Liangyuan, Niaoqing Hu, Yi Yang, Ling Chen, Jihong Wen, and Guoji Shen. "Study on electromagnetic–dynamic coupled modeling method—detection by stator current of the induction motors with bearing faults." Machines 10, no. 8 (2022): 682.

[10] Rodriguez-Blanco, Marco Antonio, Victor Golikov, René Osorio-Sánchez, Oleg Samovarov, Gerardo Ortiz-Torres, Rafael Sanchez-Lara, and Jose Luis Vazquez-Avila. "Fault diagnosis of induction motor using DQ simplified model and parity equations." Energies 15, no. 22 (2022): 8372.

[11] El-Faouri, Fares S., Omar Mohamed, and Wejdan Abu Elhaija. "DQ model and control of a three-phase induction motor considering mutual flux saturation effect." In 2017 10th Jordanian International Electrical and Electronics Engineering Conference (JIEEEC), pp. 1-6. IEEE, 2017.

[12] Wang, Yewei, Zhike Xu, Long Jin, Hongbin Zhang, and Jun Hong. "Magnetic Equivalent Circuit Modeling of Permanent Magnet Synchronous Motor with External Rotor." In Frontier Academic Forum of Electrical Engineering, pp. 659-668. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024.

[13] Korman, Oğuz, Mauro Di Nardo, Jacopo Riccio, Mukhammed Murataliyev, Michele Degano, and Chris Gerada. "Distributed Magnetic Equivalent Circuit Modelling of Synchronous Machines." IEEE Transactions on Industry Applications, 2024.

[14] Fantin Irudaya Raj, E., and M. Appadurai. "Static 2D-finite element analysis of eccentricity fault in induction motor." In Smart Technologies for Energy, Environment and Sustainable Development, Vol 1: Select Proceedings of ICSTEESD 2020, pp. 409-422. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022.

[15] Prasad, Kapu V. Sri Ram, K. Dhananjay Rao, and Faisal Alsaif. "Induction motor structure design to reduce vibrations with numerical (FEA) and experimental (VA) techniques." IEEE Access 12 (2024): 40894-40904.

[16] Singh, Arvind, Bevon Grant, Ronald DeFour, Chandrabhan Sharma, and Sanjay Bahadoorsingh. "A review of induction motor fault modeling." Electric Power Systems Research 133 (2016): 191-197.

[17] Toliyat, Hamid A., Thomas A. Lipo, and J. Coleman White. "Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications. I. Motor analysis." IEEE Transactions on Energy Conversion 6, no. 4 (2002): 679-683.

[18] Toliyat, Hamid A., and Thomas A. Lipo. "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults." IEEE Transactions on Energy Conversion 10, no. 2 (2002): 241-247.

[19] Yassa, Nacera, M. Rachek, and H. Houassine. "Motor current signature analysis for the air gap eccentricity detection in the squirrel cage induction machines." Energy Procedia 162 (2019): 251-262.

[20] Wang, Bingnan, Mesaad W. Albader, Hiroshi Inoue, and Makoto Kanemaru. "Induction motor eccentricity fault analysis and quantification with modified winding function based model." In 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1-6. IEEE, 2022.

[21] Ojaghi, Mansour, and Samaneh Nasiri. "Modeling eccentric squirrel-cage induction motors with slotting effect and saturable teeth reluctances." IEEE Transactions on Energy Conversion 29, no. 3 (2014): 619-627.

[22] Ojaghi, Mansour, and Maryam Mohammadi. "Modeling eccentricity faults with axial asymmetry in three-phase induction motors." In IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1524-1529. IEEE, 2016.

[23] Benninger, M., M. Liebschner, and C. Kreischer. "Automated Parameter Identification for Multiple Coupled Circuit Modeling of Induction Machines." In 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 1307-1313. IEEE, 2022.

[24] Yu, Xinyi, Stefan Quabeck, Stephan Schüller, and Rik W. De Doncker. "Modelling of broken rotor bars and eccentricity faults in squirrel cage induction machines." In 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), vol. 1, pp. 133-139. IEEE, 2021.

[25] Ojaghi, Mansour, Mahdi Sabouri, and Jawad Faiz. "Analytic model for induction motors under localized bearing faults." IEEE Transactions on Energy Conversion 33, no. 2 (2017): 617-626.

[26] Ojaghi, Mansour, and Maryam Mohammadi. "Unified modeling technique for axially uniform and nonuniform eccentricity faults in three-phase squirrel cage induction motors." IEEE Transactions on Industrial Electronics 65, no. 7 (2017): 5292-5301.

[27] Attallah, Omneya, Rania A. Ibrahim, and Nahla E. Zakzouk. "Fault diagnosis for induction generator-based wind turbine using ensemble deep learning techniques." Energy Reports 8 (2022): 12787-12798.

[28] Gangsar, Purushottam, Aditya Raj Bajpei, and Rajkumar Porwal. "A review on deep learning based condition monitoring and fault diagnosis of rotating machinery." Noise & Vibration Worldwide 53, no. 11 (2022): 550-578.

[29] Benninger, Moritz, Marcus Liebschner, and Christian Kreischer. "Fault detection of induction motors with combined modeling-and machine-learning-based framework." Energies 16, no. 8 (2023): 3429.

[30] Khalaj Monfared, Kourosh, Hossein Iman-Eini, and Yousef Neyshabouri. "Control of Induction Motor Drive based on Nested Neutral Point Clamped Inverter using Finite Control-Set Model Predictive Method." Journal of Modeling in Engineering 21, no. 74 (2023): 275-290. (in Persian)

[31] Izadfar, Hamid Reza. "Calculation of Rotorâ s Current and MMF in a Squirrel Cage Induction Machine." Journal of Modeling in Engineering 16, no. 52 (2018): 163-170. (in Persian)

[32] Hegde, Vishwanath, and G. S. Maruthi. "Experimental investigation on detection of air gap eccentricity in induction motors by current and vibration signature analysis using non-invasive sensors." Energy Procedia 14 (2012): 1047-1052.

[33] Safa, Hossein Hooshmandi, Mohammad Ebrahimi, Ali Davoudi, and Alireza Pouramin. "Analytical derivation of induction motors inductances under eccentricity conditions." Progress In Electromagnetics Research B 60 (2014): 95-110.

[34] Gundogdu, Tayfun, Z. Q. Zhu, J. C. Mipo, and S. Personnaz. "Influence of rotor skew on rotor bar current waveform and performance in induction machines." In 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 525-530. IEEE, 2018.