



A new method with a simple and reliable structure for fault detection of broken rotor bar of three-phase squirrel cage induction motors

Mahdi Raja'ee ¹ , Jafar Ebadi ^{1*} , Mahmoud Yousefian²

1- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Department of Electrical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 05.05.2024

Revised: 19.01.2025

Accepted: 05.02.2025

Keyword:

Fault Detection, Current Periodic Root Mean Square (CPRMS), Three-Phase Squirrel Cage Induction Motors, Broken Rotor Bar

*Corresponding Author:

Jafar Ebadi

Email: ebadi@um.ac.ir

ABSTRACT

Current analysis of electric machines in the field of fault detection with features such as reliability, simplicity of structure, capability to implement online, non-invasiveness, usable in continuous operation of the motor with any torque and application for motors with different powers is important. In this research, extracting the current periodic root mean square (CPRMS), which is based on the effectiveness of instantaneous sampling of the current at certain intervals, was proposed. In squirrel cage induction motors, it is necessary to detect the broken rotor bar (BRB), and consider that in this fault, the frequency component $(1\pm 2s)f_s$ affects the main signal of the motor current. The amount of slip of high-power motors during operation is very small, which makes the fault detection process difficult. Compared to transient, offline, and invasive methods that require stopping, starting, or installing internal equipment, the CPRMS¹ - Current Periodic Root Mean Square method performs fracture fault detection in the continuous operating mode of the motor without using internal equipment. In the present research, the proposed method was simulated on four power spectra of three-phase squirrel cage induction motors with low, medium, high and very high power, taking into account the parameters of the equivalent circuit, using MATLAB programming.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Induction motors are widely used in industry because they are more durable and robust, and also have a smaller dimension and the ability to work in dusty and explosive environments. With the increasing use of these motors in industry, it is becoming especially important to investigate faults and unhealthy conditions. Therefore, it is necessary to detect the method of diagnosis by focusing on some specific faults that are serious and lead to the end of motor life. An example of such a fault that can cause the motor to be destroyed if left undetected is the broken rotor bar in cage induction motors, which usually occurs in high-power motors. As shown in Figure 1, the BRB fault that occurred in the squirrel cage rotor of a 5 MW motor of the thermal power plant includes cracks in the rotor bars from the connection to the end ring and in the surface of the end ring.

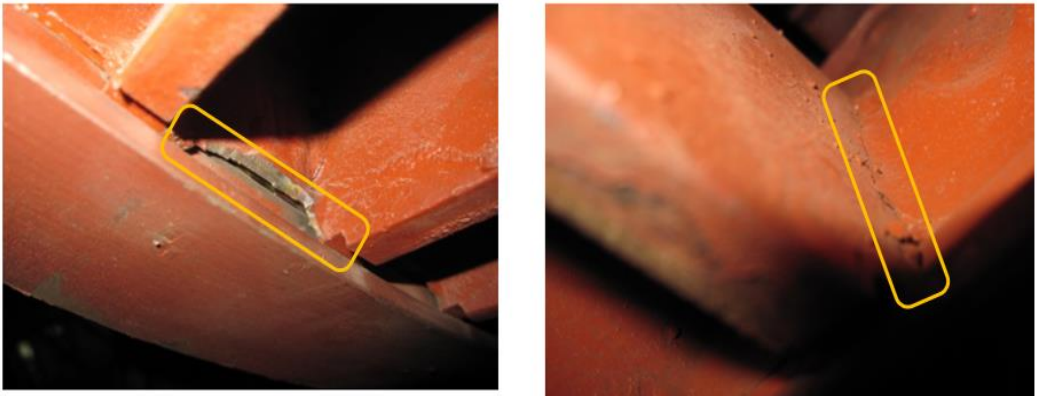


Figure 1. The squirrel cage rotor of a 5 MW motor of the thermal power plant, Cracks in the rotor bars from the connection to the end ring.

Methodology

Suppose, according to Figure 2, the current signal of a motor is sampled with time intervals Δt . If n cycles in a row are sampled separately with an integer multiple of m and the root mean square value of the samples of each cycle is calculated, the curve of the periodic effective value of the current can be obtained. m is the ratio of the period T to the time interval of measuring the instantaneous current Δt , which is calculated based on the following equation:

$$m = \frac{T}{\Delta t} \times \alpha \quad \alpha = \begin{cases} 1 & \text{for 50 Hz frequently} \\ 3 & \text{for 60 Hz frequently} \end{cases} \quad (1)$$

For signals with a frequency of 50 and 60 Hz, the appropriate value of Δt is equal to 0.001 or 0.0001, which can be lower depending on the sampling speed.

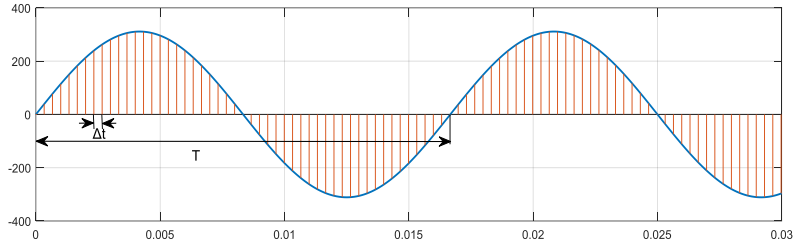


Figure 2. Sampling of the current signal with time intervals Δt .

In the healthy condition of the motor, the frequency of the curve of the periodic effective value of the current is zero, and its value is equal to the effective value of the current. However, in the unhealthy condition, the signal corresponding to the broken rotor bar fault appears with a frequency of $(1 \pm 2s)f_s$.

Results and discussion

The simulation results of 3 hp, 50 hp, 500 hp and 2250 hp motors of the pulse curve of the periodic effective value of the current for different states of power and different states of imbalance of the rotor corresponding to breakage were obtained. The reason for choosing these four motors was to check the fault condition and detect it for motors with low, medium, high and very high power. Therefore, the 3 hp motor represents low power motors, the 50 hp motor represents medium power motors, the 500 hp motor represents high power motors, and the 2250 hp motor represents very high power motors.

In this simulation, the rotor was modeled as a winding rotor, and the broken rotor bar conditions were modeled by increasing the resistance of the corresponding phase in the rotor. Therefore, to check the severity of the fault, the degree of broken rotor bar was included as a spectrum of unbalanced conditions of the rotor. Unbalance was considered for 5%, 10%, 20%, 30% and 40%.

Figure 3 shows the curve of the 50 hp motor current periodic effective value in four different unbalanced conditions for a torque of 25%.

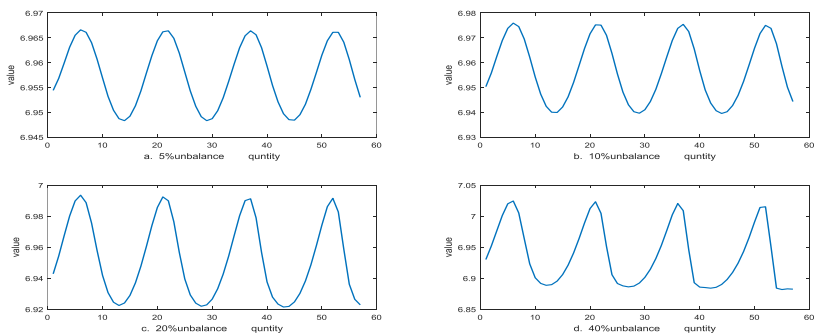


Figure 3. The curve of the 50 hp motor current periodic effective value in different unbalance status of the rotor with a nominal torque of 25%:

- a. Unbalance 5%
- b. Unbalance 10%
- c. Unbalance 20%
- d. Unbalance 40%

Conclusion

The monitoring of three-phase induction motors is particularly important to prevent their failure. One of the unwanted factors that leads to the breakdown and failure of cage rotor induction motors is the broken rotor bar fault, which is usually very important to detect in high-power motors. In this research, it was shown that using the periodic effective value of the current to extract the frequency and intensity of the fault signal related to BRB fault diagnosis of three-phase induction motors with any power range and with any load range is efficient.

Among the achievements and innovations of this research, the following can be mentioned:

- 1- Providing a simple, reliable and online method to perform the error detection process.
- 2- Presenting a precise method for fault detection for the entire power range of three-phase cage rotor induction motors under variable loading conditions.
- 3- Extracting the strength of the broken rotor bar based on the analysis of the effective components of the current for the first time.
- 4- The effect of fault severity in low, medium, high and very high-power motors at a certain torque.
- 5- The effect of the fault during the process of increasing the load torque in low, medium, high and very high-power motors.



روشی جدید با ساختاری ساده و مطمئن جهت تشخیص خطای شکستگی میله روتور موتورهای القایی روتور قفسی سه فاز

مهدی رجائی^۱ ID، جعفر عبادی^{۱*} ID، محمود یوسفیان^۳ ID

۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- گروه مهندسی برق، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

کلید واژگان:

تشخیص خطا

مقدار مؤثر تناوبی جریان

موتورهای القایی روتور قفسی سه فاز

شکستگی میله روتور

*نویسنده مسئول: جعفر عبادی

پست الکترونیکی:

ebadi@um.ac.ir

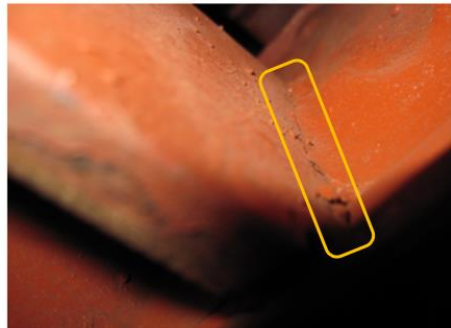
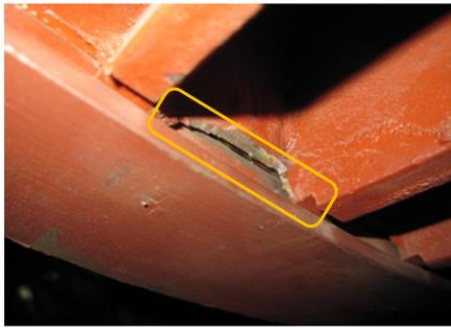
دستیابی به ایده مبتنی بر تحلیل جریان ماشین‌های الکتریکی در امر تشخیص خطا با ویژگی‌هایی مانند قابلیت اطمینان، ساختار ساده، امکان پیاده‌سازی برخط، غیرتهاجمی بودن، امکان استفاده در عملکرد دایمی موتور با هر میزان گشتاور، و استفاده در موتورهای با توان مختلف، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مقاله، روش مقدار مؤثر تناوبی جریان (CPRMS) که مبتنی بر مؤثرگیری از نمونه‌برداری‌های لحظه‌ای جریان در تناوب‌های معین بوده، به عنوان روشی جدید، ساده و قابل اطمینان پیشنهاد شده است. در موتورهای القایی روتور قفسی، تشخیص خطای شکستگی میله‌های روتور که عمدتاً در موتورهای توان بالا رایج است امری ضروری است. این خطا، مؤلفه فرکانسی $(I \pm 2s)f_s$ سیگنال اصلی جریان ورودی به موتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به دلیل اینکه مقدار لغزش موتورهای توان بالا در حین کار خیلی کم است تشخیص این خطا مشکل است. در این پژوهش، روش مقدار مؤثر تناوبی جریان (CPRMS)، مؤلفه $2sf_s$ مربوط به خطا را در لغزش خیلی کم ظاهر نموده و ضرورت تشخیص خطا را برای موتورهای با توان مختلف امکان‌پذیر می‌کند. در مقایسه با روش‌های گذرای، برون‌خط و تهاجمی که نیاز به توقف، راه‌اندازی یا نصب تجهیزات داخلی می‌باشد، این روش تشخیص، خطا را در حالت کار دائمی موتور بدون استفاده از تجهیزات داخلی انجام می‌دهد. روش پیشنهادی که روشی نو مبتنی بر مقدار مؤثر جریان موتور بصورت برخط بوده بر روی چهار طیف توانی از موتورهای القایی روتور قفسی سه فاز با توان کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد با در نظر گرفتن پارامترهای مدار معادل، به کمک برنامه‌نویسی متلب ارائه و شبیه‌سازی شده است.

¹ - Current Periodic Root Mean Square



مقدمه

موتورهای القایی سه فاز به دلیل دوام و استحکام بهتر، ساختمان ساده و قیمت کمتر نسبت به موتورهای سنکرون و DC، کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارند. بسیاری از خطاهای این موتورها حین کار از اهمیت خاصی برخوردار بوده و عدم رفع آنها باعث کاهش عمر مفید موتور و یا حتی سوختن آن می‌گردد. لذا تشخیص عیوب و شرایط ناسالم این موتورها به منظور رفع خطاها و افزایش قابلیت اطمینان آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شکستگی میله روتور در موتورهای القایی سه فاز یکی از عیوبی است که باید شناسایی شود، در غیر اینصورت، موتور با شرایط بحرانی به کار ادامه داده که می‌تواند منجر به سوختن آن شود. در شکل ۱ خطای BRB^۲ در روتور قفسی یک موتور القایی سه فاز ۵ مگاواتی مورد استفاده در یک نیروگاه حرارتی، نشان داده شده است. این خطا شامل شکستگی میله‌های روتور در محل اتصال به حلقه انتهایی است.



شکل ۱. روتور قفسی یک موتور القایی سه فاز ۵ مگاواتی (شکستگی میله‌های روتور در محل اتصال به حلقه انتهایی)

جهت شناسایی خطای شکستگی میله‌های روتور پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. دسته‌بندی روش‌های مختلف ارائه شده و ویژگی‌های هر یک در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. انواع روش‌های تشخیص خطای شکستگی میله‌های روتور و ویژگی‌های هر یک

ویژگی‌ها	نوع روش
روش‌های تشخیص تهاجمی مانند نصب حسگرها در داخل موتور بوده که تشخیص دقیق دارند اما در هنگام ساخت موتور نیاز به نصب تجهیزات شناسایی در داخل آنها است.	روش‌های تهاجمی

2- Broken Rotor Bar

روش‌های تشخیص برخط	روش‌های تشخیص برخط در حالت پایدار موتور انجام می‌شوند. کارایی این روش‌ها به بار موتور بستگی دارد. به عبارت دیگر، دقت فرآیند تشخیص، به میزان بار بستگی دارد.
روش‌های تشخیص برون‌خط	روش‌های تشخیص برون‌خط در شرایط متوقف شدن موتور انجام می‌شوند. در این روش‌ها فرآیند تشخیص خطا زمان‌بر است.
روش‌های تشخیص گذرا	روش‌های تشخیص گذرا در شرایط راه‌اندازی، توقف لحظه‌ای، ترمز یا سرعت معکوس موتور انجام می‌شوند. در این روش‌ها به علت تغییرات زیاد مقادیر پارامترها در شرایط گذرای، دقت تشخیص خطا پایین است.

مرجع [۱] به یک مدل دینامیکی ساده شده ماشین القایی که از انتقال معادلات ولتاژ روتور به قاب مرجع روتور بدست آمده پرداخته است. ابتدا معادلات ولتاژ روتور که در قاب مرجع میدان استاتور بیان شده در قاب مرجع روتور تعریف می‌شود و در ادامه پارامترهای نامتعادل از هر دو محور q و d بعنوان نتیجه خطا بصورت برون خط استخراج می‌شود.

در مرجع [۲] تشخیص شکستگی میله روتور ماشین القایی با استفاده از حسگر فیبر نوری صورت گرفته است. در این مقاله با استفاده از حسگر فیبر نوری تعبیه شده در محیط استاتور به اندازه‌گیری دامنه طیف هارمونیک جریان و مؤلفه $(I \pm 2s)f_s$ پرداخته شده است و نتیجه‌گیری شده که این روش اندازه‌گیری در مقایسه با اندازه‌گیری دامنه طیف هارمونیک از طریق جریان استاتور دقیق‌تر و کارآمدتر می‌باشد. استفاده از این روش با نصب حسگرها در محیط شیارهای استاتور موتور امکان‌پذیر می‌شود.

مرجع [۳] روتور قفسی موتور القایی سه فاز را بصورت سه سیم‌پیچ متعادل همانند استاتور در نظر گرفته است که در وضعیت سالم بودن روتور تعداد دور سیم‌پیچ‌ها برابر هستند و در وضعیت شکستگی میله‌های روتور، می‌توان اثر این شکستگی را بصورت کاهش تعداد دور یک فاز روتور معادل نمود. از روش پیشنهادی این مرجع در فرآیند شبیه‌سازی خطای شکستگی میله روتور می‌توان استفاده نمود.

در مرجع [۴] تاثیر شیار میله‌های روتور بر عملکرد موتورهای القایی سه‌فاز با میله‌های روتور شکسته بررسی شده است. در این مقاله اشاره شده که یک تغییر کوچک در شیفت زمانی فاز جریان‌های مربوط به قسمت‌های رینگ انتهایی روتور، تاثیرات مستقیمی بر مشخصه‌های گشتاور فاصله هوایی یک ماشین القایی روتور قفسی می‌گذارد. به عبارتی هندسه شیارهای روتور تاثیر بسزایی بر اندوکتانس نشی میله‌های روتور دارد. در این مقاله یک حالت بهینه برای هندسه شیارهای روتور در نظر گرفته شده است. یک ماشین القایی سه فاز روتور قفسی با استفاده از آنالیز FEM^۳ دو بعدی طراحی و مدل شده است. تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی بر روی گشتاور لحظه‌ای، گشتاور دایمی، ضربان گشتاور، چگالی شار هوایی، ضریب توان و راندمان صورت گرفته است. روش پیشنهادی این مرجع جهت انتخاب حالت بهینه هندسه شیار روتور به کار می‌رود.

³ - Finite Element Model

در مرجع [۵] به تشخیص خطای شکستگی میله روتور موتور القایی تغذیه شده با اینورتر^۴ PWM مبتنی بر تحلیل مشخصه گشتاور-سرعت موتور و تغییرات آن بخاطر تغییرات مقاومت روتور در اثر شکستگی میله‌های روتور پرداخته شده است. تغییرات مقاومت روتور باعث جابجایی گشتاور ماکزیمم موتور شده در نتیجه لغزش ماکزیمم نیز تغییر می‌کند. یکی از عواملی که منجر به تغییر مقاومت روتور می‌شود شکستگی میله‌های روتور می‌باشد. در موتورهای توان بالا که دارای لغزش خیلی کم هستند شکستگی میله‌های روتور تغییرات کمی در جابجایی گشتاور ماکزیمم ایجاد می‌کند. لذا روش پیشنهادی در این مرجع در موتورهای توان بالا دقت کمی دارد.

در مرجع [۶] روشی مبتنی بر تحلیل طیف سیگنال گذرایی جریان استاتور در طول فرآیند عمل ترمز با جریان مخالف (تغییر جای دو فاز جهت معکوس کردن دور موتور) ارائه گردیده است. در مقایسه با سایر روش‌های ترمزی متداول، نتایج بدست آمده از این روش پیشنهادی، جریان کم ناشی از ترمز بوده که این جریان نسبت کوچکی از مقدار نامی می‌باشد و بعنوان سیگنال آزمایش تشخیص خطای شکستگی میله روتور کفایت می‌کند. از مزیت‌های این نوع تشخیص شکستگی مستقل بودن این روش از شرایط بارگیری موتور بوده و حتی می‌تواند در حالتی که محور موتور کاملاً آزاد است نیز استفاده شود. عیب این روش برون خط بودن آن است.

تقویت کردن هارمونیک خطا روش دیگری است که در مرجع [۷] برای تشخیص شکستگی میله‌های روتور ماشین‌های القایی بکار رفته است. در این مقاله مؤلفه اصلی هارمونیک سیگنال‌ها یعنی فرکانس ۵۰ هرتز توسط سه فیلتر ناچ^۵ از هر سه سیگنال جریان استاتور تخمین زده می‌شود و سایر مؤلفه‌های سیگنال‌ها استخراج می‌شود. مؤلفه توالی صفر (ZSC) مربوط به مجموع هارمونیک (THS) سیگنال‌های باقی مانده به عنوان سیگنال تشخیص خطا استفاده می‌شود. روش پیشنهادی در این مرجع در موتورهای توان بالا به دلیل لغزش کم، دقت کمی دارد.

در مرجع [۸] با استفاده از روش نوینی که مبتنی بر دیدگاه برداری پارک^۶ بوده و مستقل از تعداد شیارهای روتور عمل می‌کند جهت تشخیص خطای شکستگی استفاده شده است. دیدگاه برداری پارک یکی از روش‌های پرکاربرد جهت تشخیص خطای ماشین‌های القایی می‌باشد. در این مقاله نشان داده می‌شود که دیدگاه برداری پارک شدیداً وابسته به تعداد قطب‌ها و تعداد شیارهای روتور است. جهت برطرف کردن این محدودیت روش جدید مبتنی بر دیدگاه برداری فیلتر پارک یا فیلتر توسعه یافته پارک^۷ (FPVA/FEPVA) ارائه و تشریح شده است. در ابتدا جریان هر سه فاز موتور اندازه‌گیری می‌شوند. در ادامه مؤلفه‌های برداری

4 - Pulse Width Modulation

4 - notch filter

5- Zero Sequence Current

6- Total Harmonic Signal

7- park's vector approach

8- novel Filtered Park's/Extended Park's Vector Approach

پارک (I_d, I_q) محاسبه می‌شوند. فیلتر حذف‌کننده جهت حذف فرکانس‌های بیشتر از هارمونیک هفتم مؤلفه‌های جریان I_d و I_q اعمال شده تا دامنه هارمونیک‌های پنجم و هفتم نیروی محرکه مغناطیسی استاتور برجسته شود. سپس توسط فیلتر ناچ مؤلفه هارمونیک اصلی جریان‌های پارک فیلتر شده و جریان‌های I_d و I_q نمایش داده می‌شوند. در نهایت با مطالعه و تحلیل طیف هارمونیک این جریان‌ها میزان خطا تشخیص داده می‌شود. روش پیشنهادی در این مرجع نیز در موتوهای توان بالا به دلیل لغزش کم دقت کمی دارد.

تشخیص مکان شکستگی میله روتور موتور القایی توسط تحلیل‌های پوش جریان راه‌اندازی با استفاده از تبدیل هیلبرت موضوعی است که در مرجع [۹] به آن پرداخته شده است. در این مقاله یک روش جدید جهت تشخیص مکان شکستگی میله روتور موتور القایی ارائه شده که متکی بر اندازه‌گیری پارامترهای آماری خاص تخمین زده شده از تحلیل پوش جریان راه‌اندازی استاتور می‌باشد. با استفاده از تبدیل هیلبرت، پوش سیگنال جریان استاتور بدست می‌آید. سپس انحراف معیار پوش جریان نرمالیزه شده برای شکستگی هر یک از میله‌های روتور در وضعیت‌های مختلف شامل شدت خطا، بارداری، بی‌باری، راه‌اندازی مستقیم و راه‌اندازی با درایو استخراج می‌شود. روش پیشنهادی این مرجع به تشخیص مکان خطایی پرداخته که اتفاق افتاده است. در مرجع [۱۰] از شبکه عصبی جهت تعیین فرکانس $2sf$ به منظور تشخیص شکستگی میله روتور استفاده شده است. در این مقاله نیز همچون مقاله قبل از تبدیل هیلبرت جهت تعیین پوش جریان استفاده شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد دامنه فرکانس‌های باند طرفین جهت تشخیص خطای شکستگی کاربرد دارد. اما در لغزش‌های کم که در بار کم موتور اتفاق می‌افتد این فرکانس باند خیلی نزدیک به مؤلفه اصلی هارمونیک جریان می‌باشد و لذا تشخیص را خیلی مشکل می‌سازد لذا در این مقاله از دامنه $2sf$ جهت تشخیص استفاده شده است. دامنه و فرکانس هارمونیک $2sf$ با توجه به شدت خطا و میزان بار تغییر می‌کند. به عبارت دیگر دامنه $2sf$ بطور یکسان به شدت خطا (تعداد میله شکسته) و تغییر بار حساس بوده و از طرفی مکان هارمونیک $2sf$ خیلی حساس به بار می‌باشد. بنابراین با توجه به دامنه و مکان این هارمونیک می‌توان حالت روتور را مشخص نمود. در این مقاله با استفاده از اصل یادگیری غیرخطی الگوریتم انتشار و آموزش شبکه عصبی سعی در استخراج مؤلفه‌های خطا شده است. روش پیشنهادی این مرجع به آموزش صحیح شبکه عصبی وابسته است.

مرجع [۱۱] تشخیص خطای شکستگی میله روتور در درایوهای موتور القایی را به روش تزریق سیگنال توالی صفر بصورت برخط با یک بردار فضایی استاندارد PWM مطرح نموده است. ابتدا سیگنالی با توالی صفر توسط اینورتر به موتور تزریق می‌شود. سپس پاسخ سیگنال تزریقی از حسگرهای مشتقی جریان، زمانی که سیگنال‌های تشخیص خطا دریافت شده‌اند استخراج می‌شود. اجرای ساده و عدم ایجاد اختلال در کنترل جریان از ویژگی این روش است.

در مرجع [۱۲] به استفاده از رویکرد مدار تزویج چندگانه یک ماشین القایی دارای یک میله شکسته روتور با استفاده از توابع سیم‌پیچ استاتور در قاب مرجع روتور $d-q$ پرداخته شده است. در این روش استفاده از تابع سیم‌پیچی، قادر به تحلیل تمام هارمونیک‌های نیروی محرکه مغناطیسی شکاف هوایی و توصیف رفتار گذرای ماشین است. مدارهای معادل محور q و محور d برای دو روتور قفسی سالم و معیوب توسعه یافته و نشان داده شده که خطای شکستگی میله بر روی توزیع جریان محور q روتور تأثیر نمی‌گذارد اما توزیع جریان محور d متاثر شده که ناشی از شکستگی میله است.

روش استخراج پوش جریان موتورهای القایی جهت تشخیص خطای شکستگی میله روتور در بارهای متغیر با زمان در مرجع [۱۳] مطرح شده است. این مقاله اشاره به این موضوع دارد که در هنگام شکستگی میله روتور دامنه جریان مؤلفه اصلی استاتور توسط مؤلفه‌های خطا تعدیل می‌شود (حالت پوش جریان را با یک فرکانس خاص تشکیل می‌دهد) که می‌تواند به عنوان یک معیار قدرتمند برای تشخیص خطای شکستگی در نظر گرفته شود. با این حال، استخراج آن خصوصاً در بارهای متغیر با زمان به دلیل ویژگی‌های غیر ایستا نسبتاً دشوار است. مرجع [۱۴] برخی روش‌های تشخیص خطا را بازنگری کرده است. تشخیص خطای چندگانه و زود هنگام خطا در مراجع [۱۵] و [۱۶] مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۱۷] از روش اجزای محدود و SVM استفاده نموده است. همچنین جهت طراحی بهینه و تشخیص خطا می‌توان از روش‌های مانند الگوریتم ژنتیک استفاده نمود [۱۸].

در این مقاله، روش مقدار مؤثر تناوبی جریان پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، استخراج مؤلفه $2sf_s$ مربوط به خطا در لغزش خیلی کم ظاهر شده و تشخیص خطا را برای موتورهای با توان مختلف امکان‌پذیر می‌کند. روش CPRMS در مقایسه با روش‌های گذرای، برون خط و تهاجمی که نیاز به توقف، راه‌اندازی یا نصب تجهیزات داخلی می‌باشد، تشخیص خطای شکستگی میله روتور را در حالت کار دائمی موتور بدون استفاده از تجهیزات داخلی فراهم می‌کند. از دستاوردها و نوآوری‌های این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. ارائه روشی برخط، مبتنی بر مقدار مؤثر سیگنال جریان جهت تشخیص مطمئن خطای شکستگی میله روتور موتورهای القایی روتور قفسی سه فاز.
۲. شناسایی خطای شکستگی میله روتور برای تمام طیف‌های توانی موتور القایی روتور قفسی سه فاز تحت شرایط بار متغیر.
۳. تشخیص شکستگی جزئی میله روتور.
۴. عدم نیاز به اندازه‌گیری سرعت و لغزش موتور.

۱. مبانی تئوری مقدار مؤثر تناوبی جریان (CPRMS)

اگر تابع $f(t)$ از مجموع دو تابع سینوسی متناوب $f_a(t)$ با دوره تناوب T ، و $f_s(t)$ با دوره تناوب T' تشکیل شده باشد به قسمی که $(T' \geq 5T)$ باشد، با فرضیات زیر و اعمال RMS گیری تناوبی می توان T' را استخراج نمود. (منظور از RMS گیری بدست آوردن جذر میانگین مربعات می باشد).

فرضیات:

۱- فرکانس تابع $f_a(t)$ با تغییرات $\pm 2\%$ در نظر گرفته می شود.

۲- فرض می شود که دو تابع $f_s(t)$ و $f_a(t)$ در دوره های متناوب متوالی بدون تغییر است.

اثبات: مطابق قضیه فوق تابع $f(t)$ را بصورت زیر تعریف می کنیم:

$$f(t) = f_s(t) + f_a(t) \quad (1)$$

که در آن داریم:

$$\begin{cases} f_s(t) = A_s \sin \omega' t \\ f_a(t) = A_a \sin \omega t \end{cases} \quad (2)$$

در روابط فوق ω و ω' سرعت زاویه ای بر حسب رادیان بر ثانیه است.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (3)$$

$$\omega' = \frac{2\pi}{T'} = 2\pi f'$$

فرض کنید برای N دوره تناوب متوالی با دوره تناوب T از تابع $f(t)$ ، تعداد M نمونه با فاصله زمانی Δt ثانیه طبق رابطه (۴) نمونه برداری شود (شکل ۲).

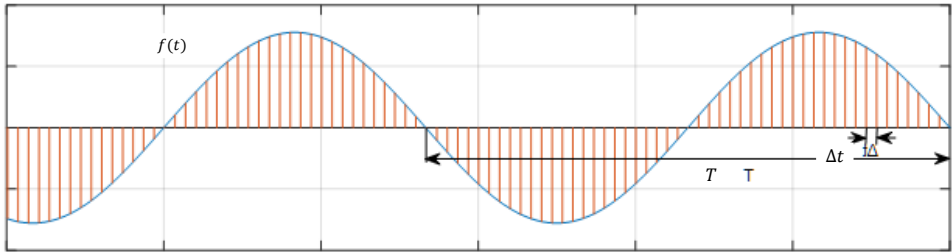
$$M = \frac{T}{\Delta t} = \frac{1}{f \times \Delta t} \quad (4)$$

$$\Delta t = 0.001, 0.0001, \dots$$

Δt فاصله زمانی بر حسب ثانیه بوده که مقدار آن تعداد نمونه گیری هر دوره تناوبی را تعیین می کند. به عنوان

مثال برای فرکانس ۵۰ هرتز در هر دوره تناوب ۲۰ میلی ثانیه با $\Delta t = 0.001$ ، تعداد ۲۰ نمونه و با $\Delta t =$

0.0001 تعداد ۲۰۰ نمونه در نظر گرفته می شود.



شکل ۲. نمونه برداری

در ادامه طبق رابطه (۵) مقدار RMS برای M نمونه متوالی بدست آمده برای N دوره تناوبی متوالی برابر است با:

$$F_{rms_j} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_1^M f^2(t)} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_1^M [f_s^2(t) + 2f_s(t)f_a(t) + f_a^2(t)]} \quad (5)$$

$j = 1, 2, 3, \dots, N$

$$F_{rms_1} =$$

$$\sqrt{\frac{f_s^2(t_1) + f_s^2(t_2) + \dots + f_s^2(t_M)}{M} + \frac{2[f_s(t_1)f_a(t_1) + f_s(t_2)f_a(t_2) + \dots + f_s(t_M)f_a(t_M)]}{M} + \frac{f_a^2(t_1) + f_a^2(t_2) + \dots + f_a^2(t_M)}{M}}$$

$$= \sqrt{F_{s1}^2 + F_{sa1} + F_{a_rms}^2}$$

$$F_{rms_2} =$$

$$\sqrt{\frac{f_s^2(t_{M+1}) + f_s^2(t_{M+2}) + \dots + f_s^2(t_{2 \times M})}{M} + \frac{2[f_s(t_{M+1})f_a(t_{M+1}) + f_s(t_{M+2})f_a(t_{M+2}) + \dots + f_s(t_{2 \times M})f_a(t_{2 \times M})]}{M} + \frac{f_a^2(t_{M+1}) + f_a^2(t_{M+2}) + \dots + f_a^2(t_{2 \times M})}{M}}$$

$$= \sqrt{F_{s2}^2 + F_{sa2} + F_{a_rms}^2}$$

$$F_{rms_3} =$$

$$\sqrt{\frac{f_s^2(t_{2 \times M+1}) + f_s^2(t_{2 \times M+2}) + \dots + f_s^2(t_{3 \times M})}{M} + \frac{2[f_s(t_{2 \times M+1})f_a(t_{2 \times M+1}) + f_s(t_{2 \times M+2})f_a(t_{2 \times M+2}) + \dots + f_s(t_{3 \times M})f_a(t_{3 \times M})]}{M} + \frac{f_a^2(t_{2 \times M+1}) + f_a^2(t_{2 \times M+2}) + \dots + f_a^2(t_{3 \times M})}{M}}$$

$$= \sqrt{F_{s3}^2 + F_{sa3} + F_{a_rms}^2}$$

-
-
-

$$F_{rms_N} =$$

$$\sqrt{\frac{f^2(t_{(N-1) \times M+1}) + f^2(t_{(N-1) \times M+2}) + \dots + f^2(t_{N \times M})}{M} + \frac{2[f(t_{(N-1) \times M+1})f(t_{(N-1) \times M+2}) + f(t_{(N-1) \times M+2})f(t_{(N-1) \times M+3}) + \dots + f(t_{N \times M})f(t_{N \times M+1})]}{M} + \frac{f^2(t_{(N-1) \times M+1}) + f^2(t_{(N-1) \times M+2}) + \dots + f^2(t_{N \times M})}{M}}$$

$$= \sqrt{F_{s_N}^2 + F_{sa_N} + F_{arms}^2}$$

با توجه به اینکه دوره تناوب تابع $f_a(t)$ برابر با T است و RMS گیری در بازه‌های زمانی T صورت می‌گیرد لذا مقدار مؤثر تابع $f_a(t)$ در هر N دوره متوالی ثابت است بنابراین داریم:

$$F_{arms}^2 = \frac{f_a^2(t_1) + f_a^2(t_2) + \dots + f_a^2(t_M)}{M} = \frac{f_a^2(t_{M+1}) + f_a^2(t_{M+2}) + \dots + f_a^2(t_{2 \times M})}{M}$$

$$= \frac{f_a^2(t_{2 \times M+1}) + f_a^2(t_{2 \times M+2}) + \dots + f_a^2(t_{3 \times M})}{M} = \dots$$

$$= \frac{f_a^2(t_{(N-1) \times M+1}) + f_a^2(t_{(N-1) \times M+2}) + \dots + f_a^2(t_{N \times M})}{M}$$

تابع $f_s(t)$ دارای دوره تناوب T' بوده بنابراین مقادیر مؤثر بدست آمده برای $f_s(t)$ در هر بازه زمانی T' می‌تواند ثابت باشد اما با دوره تناوب T مقادیر مؤثر $f_s(t)$ و $f_a(t)$ با فرکانس $\frac{1}{T} - \frac{1}{T'}$ $f - f'$ تکرار می‌شود. یعنی چنانچه N دوره متوالی برابر با f در نظر گرفته شود مقادیر مؤثر بدست آمده برای ترم $F_{s_i}^2 + F_{sa_i}$ به تعداد f'' تکرار می‌شود. فرض کنید $f=p$ باشد بنابراین برای $N=p$ داریم:

$$F_{rms1} = \sqrt{F_{s_1}^2 + F_{sa_1} + F_{arms}^2} \quad 0 < t \leq T$$

$$F_{rms2} = \sqrt{F_{s_2}^2 + F_{sa_2} + F_{arms}^2} \quad T < t \leq 2T$$

$$F_{rms3} = \sqrt{F_{s_3}^2 + F_{sa_3} + F_{arms}^2} \quad 2T < t \leq 3T$$

⋮
⋮
⋮

$$F_{rmsp} = \sqrt{F_{s_p}^2 + F_{sa_p} + F_{arms}^2} \quad (p-1)T < t \leq pT$$

برابر است با: $q = \frac{f}{f''}$ دوره متوالی و $N=p$ برای $F_{s_i}^2 + F_{sa_i}$ در نتیجه مقادیر مؤثر

$$F_{s_1}^2 + F_{sa_1} = F_{s_{1+q}}^2 + F_{sa_{1+q}} = F_{s_{1+2 \times q}}^2 + F_{sa_{1+2 \times q}} = F_{s_{1+3 \times q}}^2 + F_{sa_{1+3 \times q}} = \dots$$

$$= F_{s_{1+(f''-1) \times q}}^2 + F_{sa_{1+(f''-1) \times q}}$$

$$F_{s_2}^2 + F_{sa_2} = F_{s_{2+q}}^2 + F_{sa_{2+q}} = F_{s_{2+2 \times q}}^2 + F_{sa_{2+2 \times q}} = F_{s_{2+3 \times q}}^2 + F_{sa_{2+3 \times q}} = \dots$$

$$= F_{s_{2+(f''-1) \times q}}^2 + F_{sa_{2+(f''-1) \times q}}$$

$$F_{s_p}^2 + F_{sa_p} = F_{s_{2 \times p}}^2 + F_{sa_{2 \times p}} = F_{s_{3 \times p}}^2 + F_{sa_{3 \times p}} = F_{s_{4 \times p}}^2 + F_{sa_{4 \times p}} = \dots$$

$$= F_{s_{f'' \times q}}^2 + F_{sa_{f'' \times q}}$$

بنابراین مقادیر موثر $f_S(t)$ به اندازه f'' تکرار می‌شوند که این امر باعث می‌شود تا مقادیر موثر بدست آمده برای $f(t)$ نیز به اندازه f'' مرحله تکرار گردد یعنی:

$$F_{rms_1} = F_{rms_{1+q}} = F_{rms_{1+2 \times q}} = F_{rms_{1+3 \times q}} = \dots = F_{rms_{1+(f''-1) \times q}}$$

$$F_{rms_2} = F_{rms_{2+q}} = F_{rms_{2+2 \times q}} = F_{rms_{2+3 \times q}} = \dots = F_{rms_{2+(f''-1) \times q}}$$

$$F_{rms_q} = F_{rms_{2 \times q}} = F_{rms_{3 \times q}} = F_{rms_{4 \times q}} = \dots = F_{rms_{s_{f'' \times q}}}$$

در پایان چنانچه منحنی نقاط $F_{rms_1}, F_{rms_2}, F_{rms_3}, \dots, F_{rms_{f'' \times q}}$ ترسیم شود منحنی متناوب با f'' دوره تناوب به دست می‌آید به این ترتیب می‌توان T' را استخراج نمود:

$$T' = \frac{1}{f - f''} \quad (6)$$

به عنوان مثال فرض کنید $f = 50 \text{ Hz}$ ، $N = f = 50$ و $f' = 45 \text{ Hz}$ باشد لذا داریم:

$$F_{rms_1} = \sqrt{F_{s_1}^2 + F_{sa_1} + F_{a_{rms}}^2} \quad 0 < t \leq T$$

$$F_{rms_2} = \sqrt{F_{s_2}^2 + F_{sa_2} + F_{a_{rms}}^2} \quad T < t \leq 2T$$

$$F_{rms_3} = \sqrt{F_{s_2}^2 + F_{sa_2} + F_{a_{rms}}^2} \quad 2T < t \leq 3T$$

$$F_{rms_{50}} = \sqrt{F_{s_{50}}^2 + F_{sa_{50}} + F_{a_{rms}}^2} \quad 49T < t \leq 50T$$

در نتیجه مقادیر مؤثر $F_{Si}^2 + F_{Sa_i}$ برای $N=50$ دوره متوالی و $q = \frac{f}{f''} = 10$ برابر است با:

$$F_{s_1}^2 + F_{sa_1} = F_{s_{11}}^2 + F_{sa_{11}} = F_{s_{21}}^2 + F_{sa_{21}} = F_{s_{31}}^2 + F_{sa_{31}} = F_{s_{41}}^2 + F_{sa_{41}}$$

$$F_{s_2}^2 + F_{sa_2} = F_{s_{12}}^2 + F_{sa_{12}} = F_{s_{22}}^2 + F_{sa_{22}} = F_{s_{32}}^2 + F_{sa_{32}} = F_{s_{42}}^2 + F_{sa_{42}}$$

$$F_{s_{10}}^2 + F_{sa_{10}} = F_{s_{20}}^2 + F_{sa_{20}} = F_{s_{30}}^2 + F_{sa_{30}} = F_{s_{40}}^2 + F_{sa_{40}} = F_{s_{50}}^2 + F_{sa_{50}}$$

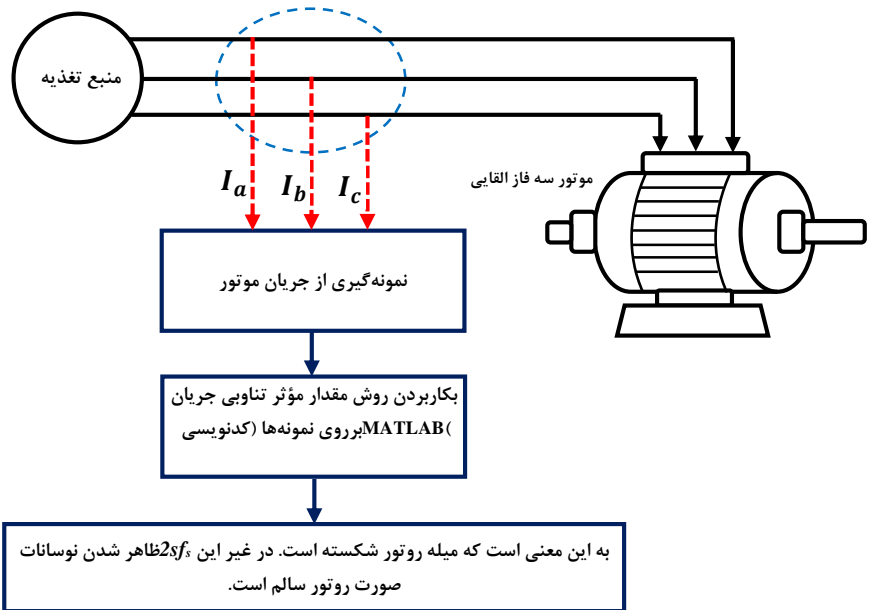
بنابراین مقادیر مؤثر $F_{Si}^2 + F_{Sa_i}$ به اندازه $f'' = 5$ تکرار می‌شوند و این امر باعث می‌شود تا مقادیر مؤثر بدست آمده برای $f(t)$ نیز در ۵ مرحله تکرار گردد یعنی:

$$F_{rms_1} = F_{rms_{11}} = F_{rms_{21}} = F_{rms_{31}} = F_{rms_{41}}$$

$$F_{rms_2} = F_{rms_{12}} = F_{rms_{22}} = F_{rms_{32}} = F_{rms_{42}}$$

$$F_{rms_{10}} = F_{rms_{20}} = F_{rms_{30}} = F_{rms_{40}} = F_{rms_{50}}$$

در پایان چنانچه منحنی نقاط $F_{rms_1}, F_{rms_2}, \dots, F_{rms_{50}}$ ترسیم شود منحنی متناوبی با دوره تناوب f'' به دست می‌آید. روندنمای روش پیشنهادی مقدار مؤثر جریان برای تشخیص شکستگی میله‌های روتور موتور سه فاز القایی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. روندنمای روش مقدار مؤثر تناوبی جریان (CPRMS) برای تشخیص شکستگی میله روتور

۲. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی موتورهای 3 hp، 50 hp، 500 hp و 2250 hp با استخراج منحنی مقدار مؤثر تناوبی جریان، مولفه $2.s.f_s$ برای حالت‌های مختلف بار داری و وضعیت‌های مختلف نامتعادلی روتور متناظر با شکستگی به دست آمده است. پارامترهای ۴ موتور الکتریکی مذکور مطابق جدول ۲ داده شده است. با استفاده از روش مقدار مؤثر تناوبی جریان پیشنهادی، از جریان موتورها به تعداد $N=60$ مرحله متوالی فرآیند مؤثرگیری انجام شده که در هر مرحله تعداد $M=500$ نمونه از هر سه سیکل متوالی استفاده شده است.

جدول ۲. پارامترهای ماشین القایی [۱۹]

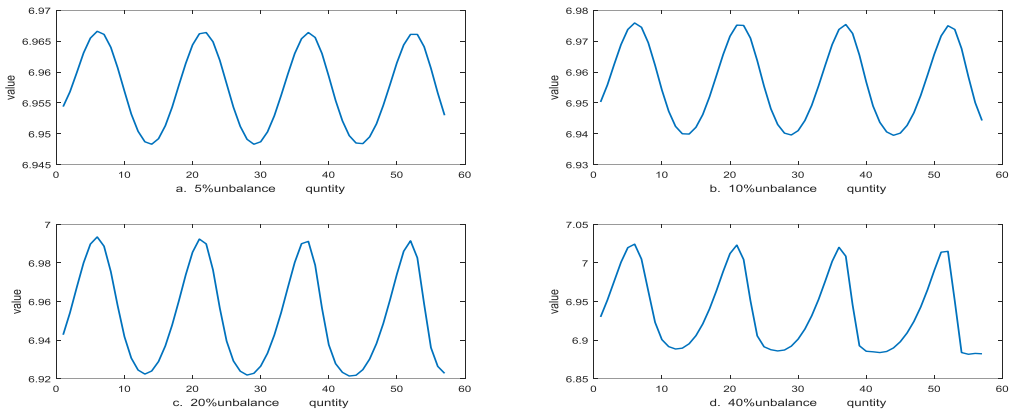
J (Kg/m ²)	R' _r (Ω)	X' _{lr} (Ω)	X _M (Ω)	X _{ls} (Ω)	R _s (Ω)	IB(abc) (A)	T _B (N.m)	n _r (rpm)	V _L (V)	P _{out} (Hp)
0.089	0.816	0.754	26.13	0.754	0.435	5.8	11.9	1710	220	3
1.662	0.228	0.302	13.08	0.302	0.087	46.8	198	1725	460	50
11.06	0.187	1.206	54.02	1.206	0.262	93.6	1.98×10^3	1773	2300	500
63.87	0.022	0.226	13.04	0.226	0.029	421	8.9×10^3	1786	2300	2250

ابتدا از بین چهار موتور بصورت نمونه تنها منحنی مقدار مؤثر تناوبی جریان موتور 50 hp در وضعیت مختلف نامتعادلی روتور و تغییرات گشتاور بار در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. سایر موتورها نتایج آنها در جداول ۲ الی ۶ ارائه شده است. در شکل‌های ۶ و ۷ منحنی تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان موتورها بصورت مقایسه‌ای و جدا از هم ارائه شده است.

دلیل انتخاب چهار موتور بررسی شرایط خطا و تشخیص آن برای موتورهای با قدرت کم، متوسط، بالا و خیلی بالا بوده است. لذا موتور 3 hp نماینده موتورهای قدرت کم، موتور 50 hp نماینده موتورهای قدرت متوسط، موتور 500 hp نماینده موتورهای قدرت بالا و موتور 2250 hp نماینده موتورهای قدرت خیلی بالا است. برای شبیه‌سازی موتورها از روش مدار معادل مغناطیسی^۱ (MEC) استفاده شده است که به عنوان یک روش المان محدود^۲ (FE) مرتبه کاهش یافته در نظر گرفته می‌شود. این روش به علت در نظر گرفتن هندسه تقریباً دقیق موتور، اثرات شیارهای استاتور و روتور، انحراف نوع اتصالات سیم‌پیچی، نشت استاتور و روتور و ویژگی‌های غیرخطی مغناطیسی هسته موتور، دقت بالاتری نسبت به روش تابع سیم‌پیچی^۴ (WFA) دارد. در فرآیند شبیه‌سازی، روتور بصورت سیم‌پیچی مدل شده و شرایط شکستگی میله روتور با افزایش مقاومت متناظر در روتور مدل گردیده است. جهت بررسی شدت خطا، میزان شکستگی بصورت نامتعادلی ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۴۰٪ در مدار معادل استخراج شده روتور در نظر گرفته شده است. فرآیند کار بصورت کدهای برنامه‌نویسی در فضای m-file نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. شکل ۴ منحنی مقدار مؤثر تناوبی جریان موتور 50 hp را در چهار وضعیت مختلف نامتعادلی برای گشتاور ۲۵ درصد نشان می‌دهد. ملاحظه

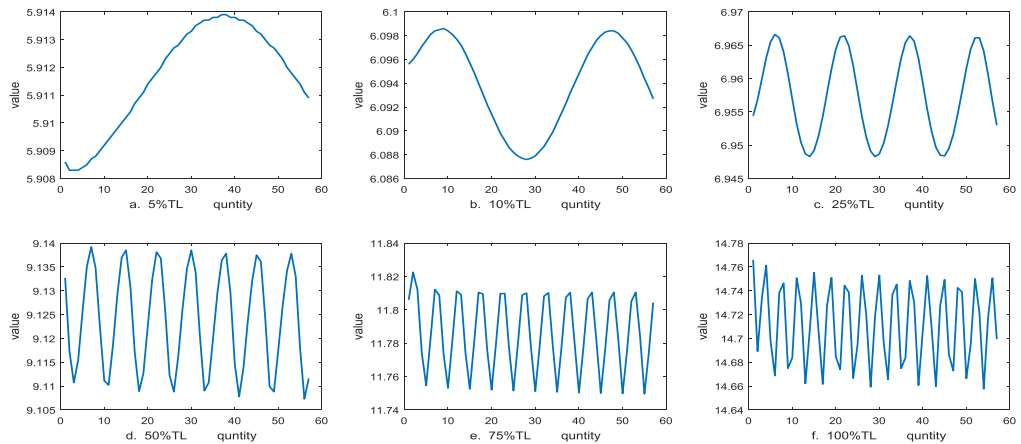
1 - Magnetic Equivalent Circuit 2
 1 - Finite Element 3
 1 - Winding Function Approach 4

می‌شود نوسانات $2sf_s$ و دامنه آن با افزایش شدت خطا بیشتر می‌شود. شکل ۵ منحنی مقدار مؤثر تناوبی جریان موتور 50 hp را در شدت خطای کم (نامتعادلی ۵ درصد) اما در چهار وضعیت مختلف گشتاور بار نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تعداد نوسانات و دامنه مؤلفه $2sf_s$ با افزایش میزان گشتاور بار افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش بار در منحنی مقدار مؤثر تناوبی جریان تاثیر قابل توجهی دارد. در شکل‌های ۴ و ۵ جریان مؤثرگیری شده برای تعداد $n=60$ بدست آمده است.



شکل ۴. منحنی مقدار مؤثر تناوبی جریان (مؤلفه $2sf_s$) موتور 50 hp در وضعیت مختلف نامتعادلی روتور با

گشتاور نامی ۲۵٪. a. نامتعادلی ۵٪. b. نامتعادلی ۱۰٪. c. نامتعادلی ۲۰٪. d. نامتعادلی ۴۰٪.



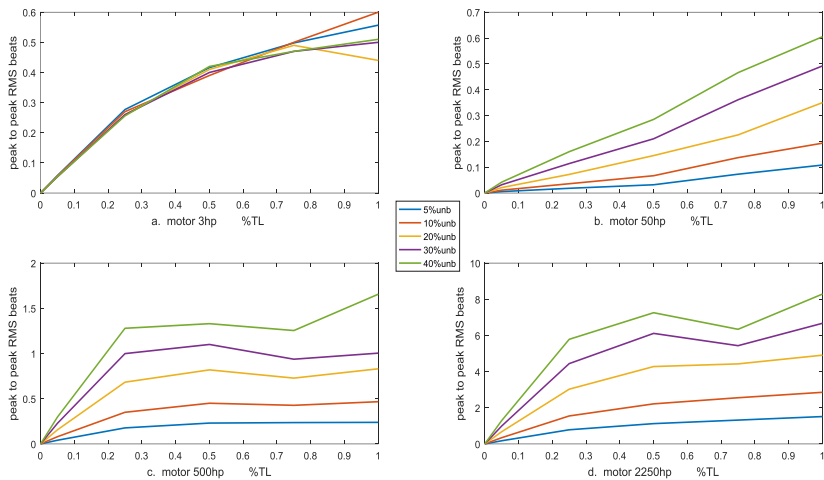
شکل ۵. منحنی مقدار مؤثر تناوبی جریان (مؤلفه $2sf_s$) موتور 50 hp در وضعیت نامتعادلی 5% روتور

(گشتاور ۵٪. a. گشتاور ۱۰٪. b. گشتاور ۲۵٪. c. گشتاور ۵۰٪. d. گشتاور ۷۵٪. e. گشتاور ۱۰۰٪. f.)

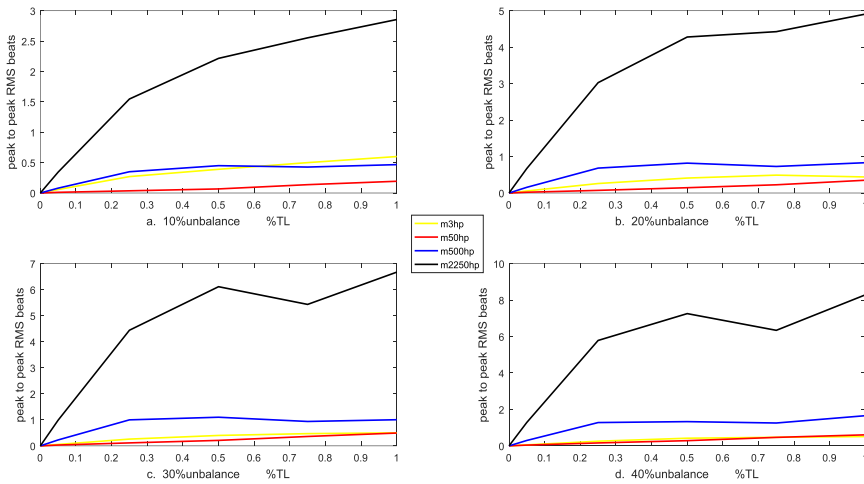
در شکل ۶ منحنی تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان با در نظر گرفتن افزایش شدت خطا (شرایط نامتعادلی ۵ الی ۴۰ درصد) و افزایش گشتاور برای هر موتور بصورت جداگانه ترسیم شده است. همانطور که

مشاهده می‌گردد در موتور 3 hp با افزایش شدت خطا، مقدار مؤثر تناوبی جریان در یک گشتاور معین، تغییرات کمی دارد اما در سایر موتورها این تغییرات متناسب با توان موتور بصورت افزایشی است. آنچه مسلم است در همه موتورها با افزایش گشتاور بار، تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان در حال افزایش است.

شکل ۷ تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان موتورها را نسبت به هم با افزایش گشتاور موتور از صفر تا ۱۰۰ درصد گشتاور نامی در یک خطای معین نشان می‌دهد. بعنوان مثال برای موتور 2250 hp هنگامی که نامتعادلی روتور را ۱۰ درصد در نظر می‌گیریم، تغییرات از 0.344 تا 2.855 آمپر برای محدوده ۵ تا ۱۰۰ درصد گشتاور نامی است. همچنین اگر نامتعادلی روتور را ۴۰ درصد در نظر بگیریم، این تغییرات از 1.288 تا 8.288 آمپر است.



شکل ۶. تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان از صفر تا گشتاور نامی
 (موتور 3 hp a. موتور 50 hp b. موتور 500 hp c. موتور 2250 hp d.)



شکل ۷. تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان چهار موتور
(نامتعادلی ۱۰٪ a. نامتعادلی ۲۰٪ b. نامتعادلی ۳۰٪ c. نامتعادلی ۴۰٪ d.)

در جداول ۳ تا ۷ نتایج مربوط به تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان موتور که با افزایش گشتاور بار در یک خطای معین بدست آمده، نشان داده شده است. اطلاعات این جداول نشان‌دهنده بیشترین تغییر مقدار مؤثر جریان در یک نامتعادلی و گشتاور معین بوده که برای آن موتور اتفاق می‌افتد. هنگامی که با روش پیشنهادی، نوسانات منحنی شاخص $2sf$ در یک نامتعادلی و در گشتاور خاص استخراج می‌شود، بیشترین تغییرات این منحنی، در جداول به عنوان یک شاخص عددی تشخیص خطا، ارائه شده است. این شاخص عددی برای موتورها در شرایط نامتعادلی‌های متفاوت و در یک گشتاور معین استخراج شده است. به عنوان مثال برای موتور 3 hp شاخص عددی در نامتعادلی ۵ الی ۴۰ درصد و در گشتاور مختلف بار تقریباً ثابت است (به عنوان مثال در گشتاور ۷۵ درصد، حدود 0.49 است). اما در سایر موتورها با افزایش توان، این شاخص عددی افزایش می‌یابد به عنوان مثال برای موتور 2250 hp در گشتاور ۷۵ درصد، عددی بین 1.3181 تا 6.339 است.

جدول ۳. حداکثر تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان برای نامتعادلی ۵ درصد

نامی	۱۰۰٪ گشتاور	۷۵٪ گشتاور	۵۰٪ گشتاور	۲۵٪ گشتاور	۵٪ گشتاور
موتور 3 hp	0.557	0.498	0.416	0.277	0.058
موتور 50 hp	0.1083	0.0729	0.032	0.0183	0.0056
موتور 500 hp	0.2385	0.2360	0.2306	0.1774	0.0408

0.1744	0.7825	1.1229	1.3181	1.5135	موتور 2250 hp
--------	--------	--------	--------	--------	---------------

جدول ۴. حداکثر تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان برای نامتعادلی ۱۰ درصد

نامی	نامی	نامی	نامی	نامی	
۵٪ گشتاور	۲۵٪ گشتاور	۵۰٪ گشتاور	۷۵٪ گشتاور	۱۰۰٪ گشتاور	
0.057	0.27	0.39	0.50	0.60	موتور 3 hp
0.011	0.036	0.067	0.137	0.193	موتور 50 hp
0.08	0.35	0.45	0.427	0.467	موتور 500 hp
0.344	1.547	2.216	2.554	2.855	موتور 2250 hp

جدول ۵. حداکثر تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان برای نامتعادلی ۲۰ درصد

نامی	نامی	نامی	نامی	نامی	
۵٪ گشتاور	۲۵٪ گشتاور	۵۰٪ گشتاور	۷۵٪ گشتاور	۱۰۰٪ گشتاور	
0.055	0.26	0.41	0.49	0.44	موتور 3 hp
0.021	0.072	0.145	0.225	0.35	موتور 50 hp
0.156	0.683	0.819	0.728	0.831	موتور 500 hp
0.673	3.027	4.279	4.426	4.908	موتور 2250 hp

جدول ۶. حداکثر تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان برای نامتعادلی ۳۰ درصد

نامی	نامی	نامی	نامی	نامی	
۵٪ گشتاور	۲۵٪ گشتاور	۵۰٪ گشتاور	۷۵٪ گشتاور	۱۰۰٪ گشتاور	
0.054	0.26	0.40	0.47	0.50	موتور 3 hp
0.032	0.114	0.21	0.361	0.492	موتور 50 hp
0.228	0.999	1.10	0.937	1.004	موتور 500 hp
0.988	4.441	6.113	5.433	6.672	موتور 2250 hp

جدول ۷. حداکثر تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان برای نامتعادلی ۴۰ درصد

نامی	نامی	نامی	نامی	نامی	
۵٪ گشتاور	۲۵٪ گشتاور	۵۰٪ گشتاور	۷۵٪ گشتاور	۱۰۰٪ گشتاور	
0.054	0.256	0.42	0.47	0.51	موتور 3 hp
0.042	0.16	0.285	0.466	0.605	موتور 50 hp
0.297	1.279	1.330	1.254	1.656	موتور 500 hp
1.288	5.784	7.256	6.339	8.288	موتور 2250 hp

در مقایسه با سایر روش‌های تشخیص که بصورت دسته‌بندی در جدول ۱ ارائه شده است. روش تشخیص پیشنهادی CPRMS در دسته روش‌های تشخیص برخط قرار می‌گیرد که در آن تشخیص خطا در شرایط پایدار موتور انجام شده و کارایی آن برخلاف روش‌های برخط، به میزان بار بستگی ندارد. همچنین روش پیشنهادی مانند روش‌های تهاجمی نیاز به نصب تجهیزات داخلی جهت اندازه‌گیری سرعت و لغزش ندارد. همچنین روش تشخیص پیشنهادی با نمونه‌برداری از جریان در شرایط کار عادی ماشین، فرآیند تشخیص خطای شکستگی میله روتور را انجام می‌دهد و از این بابت می‌تواند یک روش مؤثر و اقتصادی باشد.

جدول ۸. ویژگی روش CPRMS

روش پیشنهادی	ویژگی‌ها
Current Periodic Root Mean Square (CPRMS)	ساده، قابل اطمینان و اقتصادی
	تشخیص خطا بصورت برخط
	عدم نیاز به توقف یا راه‌اندازی موتور
	امکان تشخیص خطا در هر مقدار بار موتور
	نیازمند اطلاعات استخراج شده از جریان موتور و عدم نیاز به سایر اطلاعات دیگر (مانند لغزش)
	عدم وابستگی تشخیص خطا به بار موتور
	امکان تشخیص شکستگی جزئی میله روتور برای موتور با توان مختلف
	روش تشخیص غیر تهاجمی و عدم نیاز به نصب تجهیزات در داخل موتور

۳. نتیجه‌گیری

به دلیل نقش مهم موتورهای القایی در صنعت، خطای شکستگی میله روتور آنها توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این خطا به دلیل آسیب و عواقب بزرگی که به موتور تحمیل می‌کند نسبت به سایر خطاها اهمیت ویژه‌ای دارد. از روش‌های مختلفی جهت تشخیص صحیح این خطا با در نظر گرفتن موضوع زمان و هزینه استفاده شده است. در کاربردهای صنعتی به دلیل جلوگیری از توقف موتور، جلوگیری از تاثیر اغتشاشات خطا در جریان بار یا کاهش هزینه تحلیل خطا، تشخیص خطا در شرایط بی‌باری یا بار کم اهمیت دارد. معمولاً روش‌های تشخیص بر اساس تجزیه و تحلیل طیف فرکانسی جریان موتور صورت می‌گیرد. اما این روش‌ها در بی‌باری یا بار کم جوابگو نیستند و تحت تاثیر میزان بار قرار می‌گیرند. تحلیل جریان راه‌اندازی و ترمز موتور به دلیل بالا بودن دامنه جریان هر چند روند تشخیص خطا را بهبود می‌بخشد اما دقت میزان خطا را کاهش می‌دهد. اما شرایط راه‌اندازی و ترمزی مستقل از شرایط کاری موتور بوده و بهتر آن است که فرآیند تشخیص خطا در حالت کار دائمی موتور انجام شود. تشخیص خطای روتور در شرایط کم باری موتور بسیار سخت است زیرا فرکانس‌های خطای وضعیت شکستگی میله خیلی نزدیک به مولفه فرکانس اصلی می‌باشد و این بدلیل لغزش کم موتور در وضعیت کم باری یا بی‌باری است. این موضوع به خصوص برای موتورهای با توان بالا بسیار حائز اهمیت است. در پژوهش‌های انجام شده کمتر به تشخیص خطای شکستگی میله روتور برای موتورهای

بزرگ صنعتی پرداخته شده است. در این مقاله، نامتعادلی متناظر با شکستگی میله روتور برای موتورهای 3 hp، 500 hp و 2250 hp با استفاده از روش مقدار مؤثر تناوبی جریان (CPRMS)، مورد تحلیل قرار گرفت و منحنی مقدار مؤثر تناوبی جریان، برای حالت‌های مختلف بارداری استخراج شد. نتایج نشان داد که تغییرات نامتعادلی روتور در موتور 3 hp با گشتاور ثابت سبب تغییرات جزئی در مقدار مؤثر تناوبی جریان روتور می‌شود در حالی که هر چه توان موتور افزایش می‌یابد دامنه مؤلفه $2sfs$ خطا بیشتر می‌شود. برای مثال در موتور 2250 hp در گشتاور ثابت بار (۱۰۰ درصد بار نامی) تغییرات مقدار مؤثر تناوبی جریان از 1.5135 تا 8.288 آمپر در نامتعادلی ۵ تا ۴۰ درصد می‌باشد. همچنین در موتور 2250 hp که نماینده موتورهای بزرگ صنعتی است، برای نامتعادلی روتور به میزان ۴۰ درصد، مقدار مؤثر تناوبی جریان از 1.288 آمپر برای بار کم (۵ درصد بار کامل) تا 8.288 آمپر برای بار زیاد (۱۰۰ درصد بار کامل) تغییر نموده است. ملاحظه می‌شود در این حالت پیک تا پیک مقدار مؤثر تناوبی جریان به میزان ۶۴۳ درصد افزایش نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد روش پیشنهاد شده قادر به تشخیص خطای شکستگی میله روتور از کم باری تا بار نامی می‌باشد. در این مقاله نشان داده شد که مؤلفه $2sfs$ خطا، حتی در لغزش خیلی کم ظاهر شده و تشخیص خطا برای موتورهای با توان مختلف در حالت کار دائمی و بدون استفاده از تجهیزات داخلی به آسانی امکان‌پذیر می‌شود. لذا روش پیشنهادی به عنوان یک روش مناسب و اقتصادی با قابلیت اطمینان بالا می‌تواند در تشخیص خطای شکستگی میله روتور برای موتورهای القایی سه فاز مورد استفاده قرار گیرد.

References

- [1] Nemeč, M., Drobič, K., Fiser, R., & Ambrožič, V. (2016, September 25). *Simplified model of induction machine with broken rotor bars*. In 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). <https://doi.org/10.1109/PEMC.2016.7752145>
- [2] Sousa, K. M., Vieira da Costa, I. B., Maciel, E. S., Rocha, J. E., Martelli, C., & Cardozo da Silva, J. C. (2017). Broken bar fault detection in induction motor by using optical fiber strain sensors. *IEEE Sensors Journal*, 17(12), 3810–3817. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2705342>
- [3] Santos, P. M., Correa, M. B. R., Jacobina, C. B., da Silva, E. R. C., Lima, A. M. N., Didier, G., Raziky, H., & Lubiny, T. (2006, June 18). *A simplified induction machine model to study rotor broken bar effects and for detection*. In 2006 IEEE 37th Power Electronics Specialists Conference. <https://doi.org/10.1109/PESC.2006.1712154>
- [4] Maloma, E., Muteba, M., & Nicolae, D. V. (2017, May 25). *Effect of rotor bar shape on the performance of three-phase induction motors with broken rotor bars*. In 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2017.7974997>
- [5] Khater, F. M. H., Abu El-Sebah, M. I., Osama, M., & Sakkoury, K. S. (2016, December 3). Proposed fault diagnostics of a broken rotor bar induction motor fed from

- PWM inverter. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 3(3), 307–317. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.09.012>
- [6] Jerkan, D. G., Reljic, D. D., & Marcetic, D. P. (2017, December 4). Broken rotor bar fault detection of IM based on the counter-current braking method. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32(4), 1341–1349. <https://doi.org/10.1109/TEC.2017.2707466>
- [7] Malekpour, M., Phung, B. T., & Ambikairajah, E. (2017, June 6). Detection of broken rotor bars in squirrel cage induction motors by amplifying fault harmonics. In *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2017.7977434>
- [8] Gyftakis, K. N., Cardoso, A. J. M., & Antonino-Daviu, J. A. (2017). Introducing the filtered Park's and filtered extended Park's vector approach to detect broken rotor bars in induction motors independently from the rotor slots number. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 91, 326–339. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.01.007>
- [9] Abd-el-Malek, M., Abdelsalam, A. K., & Hassan, O. E. (2017). Induction motor broken rotor bar fault location detection through envelope analysis of start-up current using Hilbert transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 93, 332–350. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.02.016>
- [10] Bessam, B., Menacer, A., Boumehraz, M., & Cherif, H. (2016). Detection of broken rotor bar faults in induction motor at low load using neural network. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 77, 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.018>
- [11] De La Barrera, P. M., Otero, M., Schallschmidt, T., Bossio, G., & Leidhold, R. (2021). Active broken rotor bars diagnosis in induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(6), 5059–5068. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3009676>
- [12] Fu, Q., Yue, S., He, B., & Fu, N. (2019). Multiple coupled circuit modelling approach for squirrel cage induction machine under single-broken-bar fault with stator winding functions decomposed in d-q rotor reference frame. *IET Electric Power Applications*, 13(6), 755–764. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5397>
- [13] Wang, P., Lu, J., Shi, L., Zhang, Y., Tong, Z., & Wang, N. (2020). Method for extracting current envelope for broken rotor bar fault detection of induction motors at time-varying loads. *IET Electric Power Applications*, 14(3), 379–388. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0779>
- [14] Hassan, O. E., Amer, M., Abdelsalam, A. K., & Williams, B. W. (2018). Induction motor broken rotor bar fault detection techniques based on fault signature analysis: A review. *IET Electric Power Applications*, 12(2), 161–173. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.0054>
- [15] Martinez-Herrera, A. L., Ferrucho-Alvarez, E. R., Ledesma-Carrillo, L. M., Mata-Chavez, R. I., Lopez-Ramirez, M., & Cabal-Yepez, E. (2022). Multiple fault detection in induction motors through homogeneity and kurtosis computation. *Energies*, 15(4), 1541. <https://doi.org/10.3390/en15041541>

- [16] Garcia-Calva, T., Morinigo-Sotelo, D., Fernandez-Cavero, V., & Romero-Troncoso, R. (2022). Early detection of faults in induction motors—A review. *Energies*, 15(21), 7855. <https://doi.org/10.3390/en15217855>
- [17] Rafiei, S. H. T., Ojaghi, M., & Sabouri, M. (2023). The effective use of SVM to detect faults in electric machines by finite element analysis. *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, 20(3), 367–392. (in Persian). <https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en>
- [18] Yousefian, M., Mashhadi, H. R., & Zarchi, H. A. (2013). Optimal design in the stator rewinding of high voltage three-phase induction motor to reach the new permissible voltage using genetic algorithm. *Karafan Quarterly Research Journal*, 11(35), 46–53. (in Persian). <https://www.researchgate.net/publication/331563259>
- [19] Krause, P. C. (1986). *Analysis of electric machinery*. New York, NY: McGraw-Hill. ISBN 0070354367, 9780070354364