

تشخیص عیب الکتریکی رتور ژنراتور القایی با در نظرگیری نوسانات فرکانس پایین ناشی از اثر سایه برج در توربین بادی

ژاله هاشمی^۱، دانشجوی دکترا؛ اکبر رهیده^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - zh.hashemi@zariau.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - rahide@sutech.ac.ir

چکیده: در این مقاله به ارائه روشی جهت تشخیص عیب ژنراتور در یک سیستم توربین بادی پرداخته خواهد شد. ژنراتور مدنظر یک ژنراتور القایی رتور سیم‌پیچی شده هست و عیب مدنظر عیب الکتریکی رتور فرض شده است. به دلیل اثر سایه برج، فرکانس مشخصه‌ای در سیگنال جریان به وجود می‌آید که این فرکانس مشخصه می‌تواند با فرکانس مشخصه ناشی از عیب تداخل داشته باشد و عیب‌یابی را دچار اختلال نماید. در این مقاله از یک روش در حوزه فرکانس-زمان و سپس تغییر متغیر فرکانس استفاده شده است که برای سادگی از انرژی سیگنال در زمان‌های مختلف میانگین‌گیری می‌شود. روش مذکور روش پی‌گردی (ردیابی) مرتبه هارمونیک می‌باشد. برای کاهش خطای عیب‌یابی در مرحله پردازش نهایی، از اندیس‌های آماری استفاده خواهد شد تا بتوان بین اثر سایه برج و اثر خرابی الکتریکی رتور تمایز قائل شد. نتایج شبیه‌سازی مؤید این نکته هستند که با روش پیشنهادی تا حد بسیار مطلوبی می‌توان این اثرات را تفکیک نمود. در انتها برای بررسی روش ردیابی مرتبه هارمونیک از نتایج تست‌های آزمایشگاهی استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: عیب‌یابی، ژنراتور القایی، توربین بادی، اثر سایه برج.

Electrical Rotor Fault Detection in Induction Generator under the Influence of Low Frequency Oscillations Caused by Wind Turbine Tower Shadow Effect

Zhale Hashemi¹, PhD Student; Akbar Rahideh², Associate Professor

1- Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: zh.hashemi@sutech.ac.ir

2- Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: rahide@sutech.ac.ir

Abstract: In this paper, a method is presented for the electrical rotor fault detection in wound rotor induction generators. The fault is a rotor electrical fault in induction generators employed for wind turbine applications. Due to the tower shadow effect, a stray fault signature is introduced in the generator current which may result in false fault detection. The method is based on the time-frequency analysis in which the frequency is transformed and the time averaging of the signal energy is obtained. The method is known as harmonics order tracking analysis. For reliable fault detection, statistic indices are used in post-processing that increase the ability to distinguish between the fault effect and tower shadow effect. The simulation results illustrate that the proposed method is effectively successful in discriminating these two effects. Finally, the harmonics order tracking analysis is evaluated using the experimental results.

Keywords: Fault detection, induction generator, wind turbine, tower shadow effect.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۲

نام نویسنده مسئول: اکبر رهیده

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - بلوار مدرس - دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده مهندسی برق و الکترونیک.

۱- مقدمه

در روش‌های بر مبنای سیگنال، تأثیر عیب بر یک سیگنال اندازه‌گیری شده از ماشین تعیین و روابط آن ارائه می‌گردد. تأثیر عیب بر سیگنال را با عنوان «مشخصه عیب^۱» و یا «امضاء عیب^۲» بیان می‌کنند. سپس با کمک روش‌های پردازش سیگنال، در سیگنال اندازه‌گیری شده به دنبال مشخصه عیب می‌گردند و بزرگی مشخصه عیب را تعیین می‌کنند. در نهایت، در مرحله تصمیم‌سازی، تعیین می‌شود که آیا این مشخصه یافته شده، نشان‌دهنده حالت معیوب است یا خیر. معمولاً در بخش تصمیم‌سازی، از بزرگی مشخصه عیب و یا روش‌های دسته‌بندی استفاده می‌شود [۱۱-۱۳].

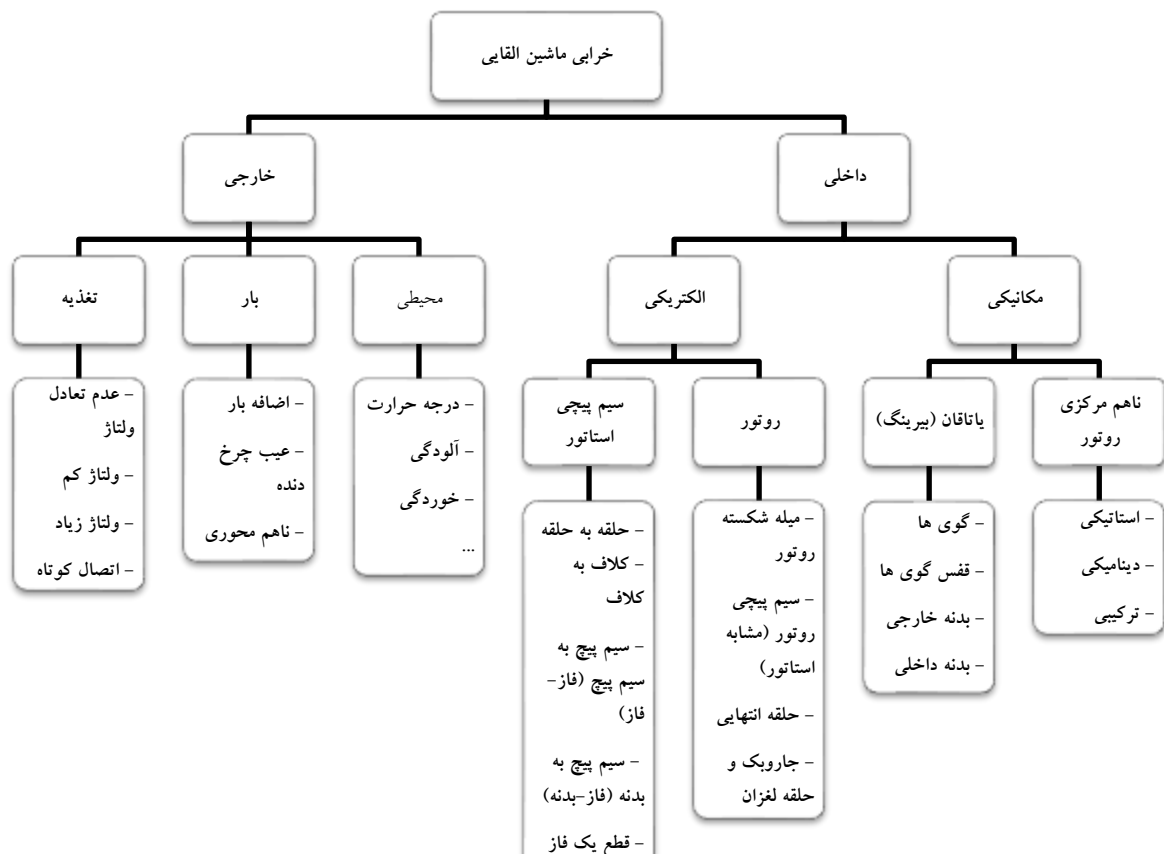
برخی از سیگنال‌های مورد استفاده در روش‌های مبتنی بر سیگنال عبارت‌اند از [۷]:

- سیگنال‌های مکانیکی: ارتعاش، درجه حرارت، صدا، گشتاور
- سیگنال‌های الکتریکی: جریان استاتور و یا روتور، جریان راه‌اندازی، ولتاژ استاتور و یا روتور، توان لحظه‌ای، توان‌های اکتیو و راکتیو، سیگنال‌های کنترلی (در موتورهای مجهز به اینورتر)
- برخی مواقع استفاده از سیگنال‌های مکانیکی در صنعت مشکل می‌باشد. موارد زیر تنها نمونه‌هایی از مشکلات اصلی استفاده از سیگنال‌های مکانیکی می‌باشند:
- اندازه‌گیری این سیگنال‌ها باید دقیقاً در محل نصب ماشین انجام شوند
- تجهیزات و سنسورهای اندازه‌گیری این سیگنال‌ها ممکن است گران‌قیمت باشند، همانند دوربین ترمو ویژن و یا سنسور ارتعاش

امروزه به دلیل مشکلات ناشی از سوخت‌های فسیلی، استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی روزبه‌روز در حال افزایش می‌باشد که از این میان استفاده از انرژی باد جایگاه ویژه‌ای دارد. توربین‌های بادی اصلی‌ترین روش جذب انرژی بادی می‌باشند که ژنراتور الکتریکی مورد استفاده در توربین‌های بادی عمدتاً از نوع ژنراتورهای القایی می‌باشد. بسته به توان توربین بادی ژنراتور مورد استفاده می‌تواند ژنراتور القایی قفس سنجابی، ژنراتور القایی با رتور سیم‌پیچی شده و یا ژنراتور القایی دو سو تغذیه باشد [۱].

یکی از مسائل اصلی در خصوص سیستم‌های صنعتی قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد که بهبود آن ارتباط زیادی به پایش وضعیت و تشخیص عیب دارد [۲، ۳]. ژنراتور القایی سیم‌پیچی شده به‌عنوان یکی از اجزاء توربین‌های بادی می‌تواند دچار خطاهای متعددی شود. علی‌رغم این‌که احتمال بروز عیب برای همه اجزاء ماشین وجود دارد، اما برخی از اجزاء در عمل بیشتر دچار عیب می‌شوند و تشخیص عیب آن‌ها اهمیت بیشتری دارد. منشأ این عیب‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند [۱۰-۴]. به‌طور کلی روش‌های تشخیص عیب در سه دسته قرار دارند [۷]:

- روش‌های بر مبنای مدل تحلیلی
- روش‌های بر مبنای مدل عددی (همانند تحلیل اجزاء محدود)
- روش‌های بر مبنای سیگنال



شکل ۱: منشأ انواع خرابی در یک موتور القایی

تشخیص عیب در ماشین القایی می‌باشد که توانایی تشخیص عیب در شرایط نایبستا را دارد [۲۱-۱۹]. در این روش با فرض دانستن سرعت، درجه‌بندی محور فرکانس عوض می‌شود و برحسب مرتبه‌ای از فرکانس مشخصه عیب مدرج می‌گردد. با این کار از پیچیدگی توزیع محتوای سیگنال در صفحه کاری فرکانس-زمان کاسته می‌شود و وجود مؤلفه فرکانس عیب به‌طور واضح‌تری نمایان می‌شود. در مرجع [۲۱] برای تغییرات سرعت، یک الگوی مشخص و ثابتی فرض شده‌است و به کمک روش HOTA تشخیص عیب الکتریکی رتور در یک ژنراتور القایی رتور سیم‌پیچی شده انجام شده‌است؛ اما در این مرجع موارد زیر لحاظ نشده‌اند:

۱- ممکن است تغییرات سرعت الگوی ثابتی نداشته‌باشد. در واقع در توربین بادی آنچه تغییر می‌کند سرعت باد است نه سرعت چرخش رتور، و سرعت چرخش رتور علاوه بر تغییرات سرعت باد، متأثر از توان الکتریکی ژنراتور نیز می‌باشد.

۲- شرایطی که فرکانس نوسانات نزدیک به فرکانس مشخصه عیب باشد بررسی نشده‌است.

لذا در مقاله حاضر به بررسی کارآمدی روش HOTA برای تشخیص عیب الکتریکی رتور در شرایطی که ژنراتور در مواجهه با تغییرات سرعت باد باشد پرداخته می‌شود.

۲- روش پیشنهادی

سیستم شبیه‌سازی شده یک توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی رتور سیم‌پیچی شده است که در حالت متصل به شبکه کار می‌کند (شکل ۳). مشخصات سیستم شبیه‌سازی شده در جدول ۱ آمده‌است. برای انجام شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده و مشخصات ژنراتور مورد مطالعه از موتورهای پیش‌فرض در کتاب‌خانه SIMULINK انتخاب شده‌است. مشخصات توربین از مرجع [۲۳] استخراج شده که برای تناسب سرعت نامی توربین با سرعت نامی ژنراتور چهار قطبی، نسبت تبدیل چرخ‌دنده ۱:۱۲/۵ می‌باشد. جریان شبیه‌سازی شده ذخیره شده و به‌عنوان سیگنال اندازه‌گیری شده به بخش کدنویسی داده می‌شود تا توسط برنامه‌های نوشته شده پردازش سیگنال بر روی آن انجام شود.

۲-۱- اصول تئوری و تعیین تأثیر عیب

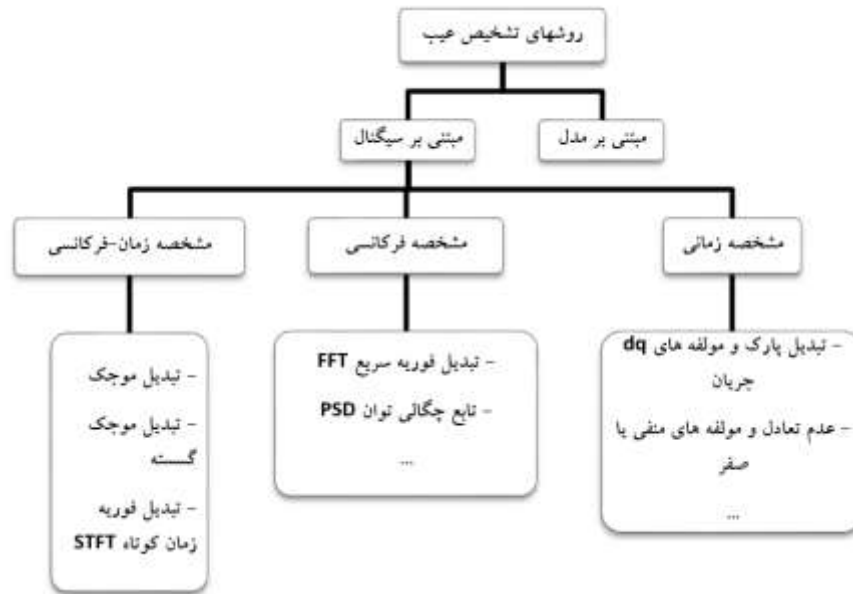
یکی از عیوب ژنراتور القایی، عیب الکتریکی در رتور می‌باشد که این عیب بسته به ساختمان رتور می‌تواند ناشی از شکستگی میله رتور و یا حلقه اتصال کوتاه در رتور قفس سنجابی، و اتصالی کلاف‌ها و یا خرابی جاروبک و حلقه لغزان در رتور سیم‌پیچی شده باشد. برای نمونه اتصال نامناسب جاروبک و حلقه لغزان سبب ایجاد اتصال با مقاومت الکتریکی بالا و در نتیجه افزایش مقاومت در فاز معیوب می‌گردد. مقدار افزایش مقاومت در ژنراتور مورد مطالعه در شرایط بروز خطا $R_{asym} = 0.09 \Omega$ در نظر گرفته شده‌است [۲۱].

- محل پردازش سیگنال و تصمیم‌گیری و محل کنترل ممکن است از خود ماشین دور باشد، لذا این سیگنال‌ها باید به محل جدید ارسال شوند
- سروصدا و لرزش‌های اضافی و نویز در برخی صنایع آن‌قدر زیاد است که استفاده از سنسورهای مکانیکی را ناممکن می‌سازد
- در صورت تعدد سنسورها، قابلیت اطمینان شبکه سنسوری و کالیبراسیون آن‌ها خود مشکل دیگری را بر مسائل موجود می‌افزاید به همین دلایل، گرایش به استفاده از سیگنال‌های الکتریکی زیاد شده‌است که مزایای زیر را به‌دنبال خواهد داشت:
- کاهش هزینه‌ها و امکان اندازه‌گیری از راه دور و در اتاق کنترل
- سنسور این سیگنال‌ها معمولاً در سیستم‌های حفاظت و کنترل ماشین‌ها وجود دارد
- تأثیرپذیری کمتر از نویزهای صنعت
- امکان تشخیص چند عیب به صورت یکجا و برخط

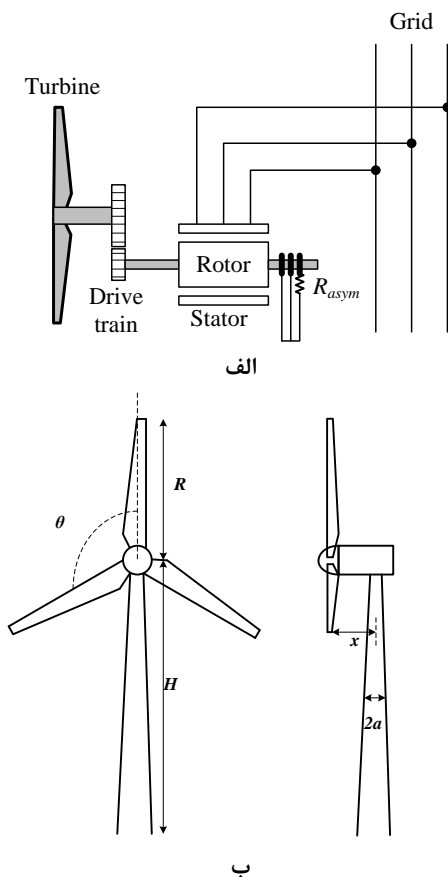
مشکل اصلی در استفاده از سیگنال‌های الکتریکی، دقت حاصل از به کارگیری آن‌ها در تشخیص عیب می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت که پردازش سیگنال‌های مکانیکی ساده‌تر و تشخیص عیب دقیق‌تر است. لذا در روش‌هایی که از سیگنال‌های الکتریکی استفاده می‌کنند، دقت روش پردازش سیگنال و تصمیم‌سازی بسیار مهم می‌باشد که تشخیص عیب نادرست اتفاق نیافتد.

یکی از مراحل اصلی در روش‌های مبتنی بر سیگنال، پردازش سیگنال است. با توجه به این که سیگنال مورد بررسی ایستا^۲ و نایبستا^۳ باشد می‌توان از روش‌های مختلفی برای پردازش سیگنال استفاده نمود. یک دسته‌بندی کلی بر روی روش‌های پردازش سیگنال به‌صورت زیر است: تعیین مشخصه‌های زمانی سیگنال، تعیین مشخصه‌های فرکانسی سیگنال، تعیین مشخصه‌های زمانی-فرکانسی سیگنال. هدف از این مرحله استخراج مشخصه عیب از درون سیگنال است. در هر کدام از دسته‌های بالا، تعداد زیادی روش پردازش سیگنال وجود دارد که یک دسته‌بندی کلی از این روش‌ها در شکل ۲ آمده‌است [۱۱، ۲۱-۱۴].

تحلیل مشخصه جریان موتور^۵ (MCSA) یکی از روش‌های تشخیص عیب بر پایه سیگنال است که تحقیقات گسترده‌ای را به خود اختصاص داده‌است [۲۲]. توربین‌های بادی در عمل در مواجهه با تغییرات باد می‌باشند که این مسئله سبب می‌گردد تا سرعت چرخش آن‌ها برحسب زمان ثابت نباشد، لذا لغزش ژنراتور عدد ثابتی نخواهد بود و روش‌هایی که بر مبنای جریان دائمی کار می‌کنند برای توربین‌های بادی مناسب نمی‌باشند. همچنین تغییرات در توربین‌های بادی، بزرگ و شدید نیست لذا روش‌هایی که بر مبنای جریان راه‌اندازی و گذرا می‌باشند هم ممکن است جواب‌گو نباشند. بنابراین، به‌دلیل وجود نوسانات سرعت باد باید از روش‌های حوزه فرکانس-زمان استفاده نمود و همچنین روش انتخابی باید به‌گونه‌ای باشد که وجود نوسانات، سبب تشخیص نادرست خطا نشوند. روش پی‌گردی مرتبه هارمونیک^۶ (HOTA) روشی کارآمد جهت



شکل ۲: روش‌های پردازش سیگنال

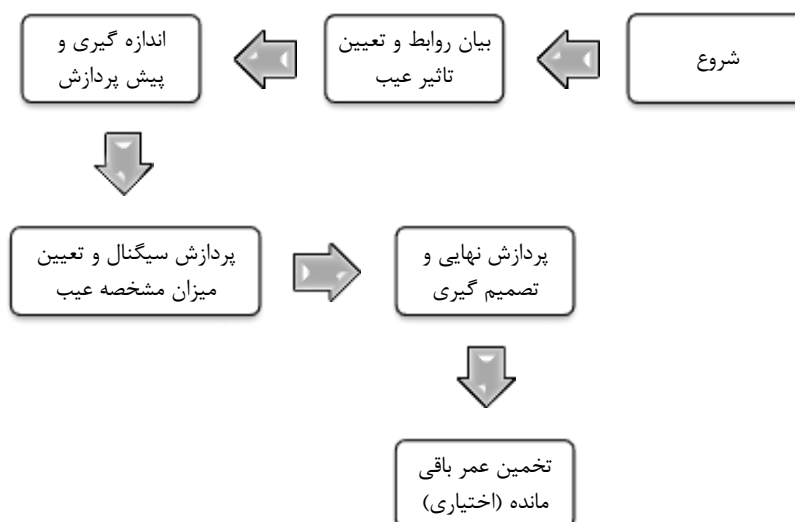


شکل ۳: سیستم شبیه‌سازی شده، الف) دیاگرام سیستم، ب) مشخصات توربین.

جدول ۱: مشخصات سیستم شبیه‌سازی شده.

ژنراتور		
مقدار	نماد	کمیت
۷۱۵ kW	P_n	توان نامی
۴۰۰ V	V	ولتاژ نامی
۴	P	تعداد قطب
۰/۷۳۸ Ω	R_s	مقاومت سیم‌پیچی استاتور
۰/۰۰۳۰۵ H	L_{ls}	اندوکتانس سیم‌پیچی استاتور
۱/۲۵۸ Ω	R_r	مقاومت سیم‌پیچی رتور
۰/۰۰۳۰۵ H	L_{lr}	اندوکتانس سیم‌پیچی رتور
۰/۰۹ Ω	R_{asym}	مقاومت مدل کننده عیب

توربین		
مقدار	نماد	کمیت
۰/۱۴ m	a	شعاع برج
۴/۲ m	R	شعاع پره‌های توربین
۱۵ m	H	ارتفاع هاب
۰/۵۴ m	x	فاصله پره‌ها تا وسط برج
-	θ_b	موقعیت پره نام
-	V_h	سرعت میانگین باد
رابطه (۱۴)	v_{TS}	تغییر سرعت بر اثر سایه برج
۱:۱۲/۵	r	نسبت چرخ‌دنده



شکل ۴: مراحل تشخیص عیب

$$\Delta f = \frac{F_s}{N} = \frac{F_s}{T_s \times F_s} = \frac{1}{T_s} \quad (۴)$$

فرض کنید که لغزش برابر با یک درصد باشد، براساس رابطه (۲) تفکیک فرکانس باید حداقل $1 \times 50 = 50 \text{ Hz}$ باشد که براساس رابطه (۴) حداقل یک ثانیه باید نمونه برداری از سیگنال انجام شود که البته با افزایش بازه نمونه برداری می توان کیفیت پردازش سیگنال را بهبود بخشید. به همین ترتیب اگر فرکانس اصلی 50 Hz باشد و بخواهیم در هر سیکل ۲۰ نمونه داشته باشیم آنگاه فرکانس نمونه برداری باید $20 \times 50 = 1000 \text{ Hz}$ باشد.

به دلیل وجود نوسانات، سیگنال های اندازه گیری شده در حالت دائمی نمی باشند و ناپیوسته می باشند و محتوای فرکانسی آن ها در زمان های مختلف متفاوت می باشد. لذا محتوای فرکانسی آن ها در صفحه کاری $f - t$ بیان خواهد شد. با نمونه برداری مذکور، می توان محورهای فرکانس و زمان را با تفکیک 1 Hz و 0.01 S داشت. در این مرحله، جریان های نمونه برداری شده (رتور و یا استاتور) به بردار فضایی جریان تبدیل می شود:

$$i_a(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_b(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_c(t) \quad (۵)$$

$$i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} i_b(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_c(t) \quad (۶)$$

$$\vec{i}(t) = i_a(t) + j \cdot i_q(t) \quad (۷)$$

۲-۳- تحلیل حوزه فرکانس-زمان

از آنجایی که محتوای فرکانسی سیگنال های ناپیوسته ثابت نمی باشد لذا لازم است تا محتوای آن ها در هر فرکانس به ازاء زمان های مختلف بیان

عدم تقارن الکتریکی رتور باعث القاء فرکانس هایی در جریان استاتور می گردد که فرکانس مشخصه این عیب طبق رابطه (۱) به دست می آید [۲۱]، [۱۴]:

$$f_{s,ra} = (1 + 2k) \cdot sf_s, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (۱)$$

که f_s و s به ترتیب فرکانس اصلی استاتور و لغزش می باشند. فرکانس مشخصه ناشی از عیب عدم تقارن الکتریکی رتور در جریان استاتور می باشد. فرکانس مشخصه این عیب در جریان رتور نیز طبق رابطه (۲) تعیین می شود [۲۱]:

$$f_{r,ra} = 2k \cdot sf_s, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (۲)$$

که $f_{r,ra}$ فرکانس مشخصه عیب مذکور در جریان رتور است. مراحل تشخیص عیب مطابق با شکل ۴ می باشد. در ادامه مراحل مختلف مورد استفاده ارائه خواهند شد.

۲-۲- اندازه گیری و پیش پردازش

در این مرحله داده های مورد نیاز از سیستم گردآوری می شوند. سیگنال های مدنظر جریان سه فاز رتور و استاتور می باشند. هرچه نرخ نمونه برداری بالاتر باشد کیفیت نتایج در مرحله پردازش سیگنال بهتر خواهد شد؛ اما تعداد زیاد داده ها، علاوه بر حافظه مورد نیاز بیشتر، سرعت پردازش را نیز کاهش می دهد و در مواردی، چندان هم باعث بهبود تحلیل ها نخواهد شد. چنانچه بازه زمانی نمونه برداری T_s ثانیه و فرکانس نمونه برداری F_s باشند، آنگاه تعداد $N = T_s \times F_s$ نمونه به دست می آید. به کمک این تعداد نمونه، وضوح تفکیک در محور زمان Δt و در محور فرکانس Δf به صورت زیر خواهند شد:

$$\Delta t = \frac{T_s}{N} = \frac{T_s}{T_s \times F_s} = \frac{1}{F_s} \quad (۳)$$

$$f_{m,j}^T = \frac{f_m - f_j^T}{2f_j^T} \quad (12)$$

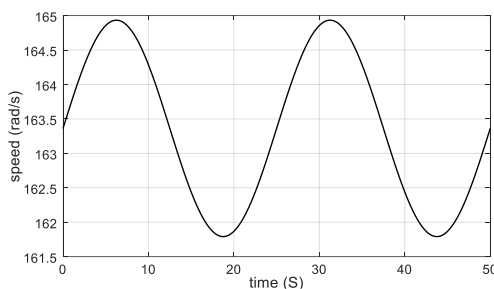
که $f_{m,j}^T$ مقدار جدید فرکانس m ام در زمان $t = t_j$ (درجه‌بندی جدید محور فرکانس) و f_j^T فرکانس مؤلفه اصلی جریان رتور در لحظه $t = t_j$ است. برای رتور، فرکانس مؤلفه اصلی جریان برابر با s برابر فرکانس اصلی استاتور است پس $f_j^T = s_j f$ که s_j لغزش در زمان t_j می‌باشد. فرض کنید فرکانس m ام مورد مطالعه همان فرکانس مشخصه عیب الکتریکی رتور در جریان رتور باشد که در واقع در زمان t_j برابر با $f_{r,r,a,j} = (1+2k)s_j f$ خواهد بود. با جای‌گذاری این مقادیر در رابطه (۱۲)، رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_{r,r,a,j}^T = \frac{(1+2k)s_j f - s_j f}{2s_j f} = k \quad (13)$$

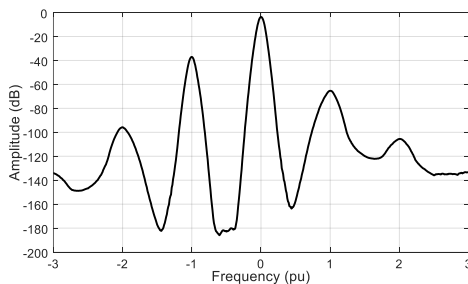
$k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

پس تشخیص عیب به‌سادگی امکان‌پذیر خواهد شد. در واقع اگر انرژی سیگنال در $f_j^T = k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ م زیاد باشد آنگاه عیب متناظر در ژنراتور وجود دارد. در شکل ۶ دیاگرام‌های مربوط به عیب الکتریکی رتور و تشخیص عیب از طریق جریان رتور نشان داده شده‌اند. در این شبیه‌سازی فرض شده‌است که پروفیل تغییرات سرعت ژنراتور مطابق با شکل ۷ باشد (این تغییرات فرضی هستند و می‌تواند به هر صورت دیگری نیز باشد). مشخصات سیستم شبیه‌سازی شده در جدول ۱ ارائه شده‌است. برای سادگی بیشتر می‌توان از انرژی سیگنال در هر کدام از مراتب رابطه (۱۳) برحسب متغیر زمان (مطابق با رابطه (۱۴)) میانگین‌گیری کرد و محور زمان را نیز از تحلیل‌ها خارج نمود. نتیجه این میانگین‌گیری در شکل ۸ آمده‌است.

$$\bar{E}(f^T) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n E(f_j^T) \quad (14)$$

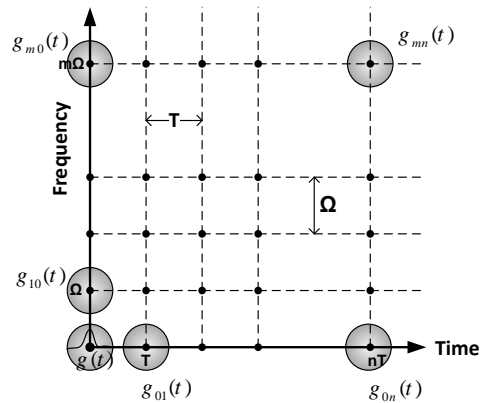


شکل ۷: تغییرات سرعت فرض شده در شبیه‌سازی شکل ۶.



شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی بعد از اعمال میانگین‌گیری زمانی، وجود پیک در فرکانس‌های پر یونیت شده نشان‌دهنده بروز عیب الکتریکی رتور می‌باشد.

شود. پس، صفحه $f - t$ به $m \times n$ گره تقسیم می‌شود و در هر گره از این صفحه، انرژی تابعی از محتوای سیگنال متمرکز می‌شود (شکل ۵).



شکل ۵: نمایش محتوای سیگنال در فرکانس‌های مختلف و زمان‌های مختلف، در هر گره انرژی تابعی از سیگنال به‌صورت متمرکز شده نمایش داده می‌شود.

در هر گره (t_n, f_m) ، که $t_n = n \times T$ و $f_m = m \times \Omega$ ، انرژی سیگنال E_{mn} برابر است با مدول دوم حاصل ضرب داخلی بردار سیگنال (مثلاً بردار $\vec{i}(t)$) و تابع مختلط $g_{mn}(t)$ ، که انرژی این تابع در بازه زمانی بسیار کوتاهی در اطراف t_n و در باند فرکانسی باریکی در اطراف f_m متمرکز شده‌است. تابع $g_{mn}(t)$ از تابع پنجره $g(t)$ تولید می‌شود که:

$$g_{mn}(t) = g(t - nT) \times e^{j \cdot 2\pi m \Omega t} \quad m, n \in \mathbb{N} \quad (8)$$

تابع پنجره $g(t)$ می‌تواند توابع مختلفی باشد که در تبدیل گابور^۷ این تابع یک تابع گوسی با پارامتر α به‌صورت زیر است:

$$g(t) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} \times e^{-\frac{\alpha t^2}{2}} \quad (9)$$

برهمن اساس، مقدار انرژی سیگنال در هر گره از صفحه کاری $f - t$ از رابطه (۱۰) به‌دست خواهد آمد:

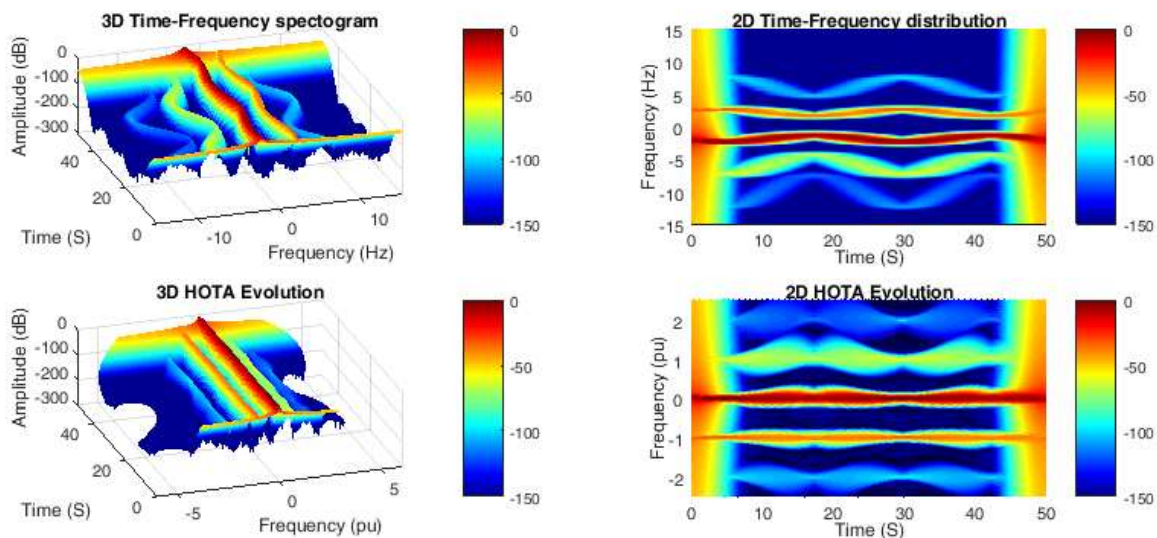
$$E_{mn} = |c_{mn}|^2 \quad (10)$$

$$c_{mn} = \langle i, g_{mn} \rangle = \sum_k i(t_k) \cdot g_{mn}^*(t_k) \quad (11)$$

۴-۲ روش HOTA

تقریباً مشخصه تمام عیب‌ها به مقدار لغزش بستگی دارد و در شرایطی که ژنراتور با سرعت ثابت کار نمی‌کند، تغییرات سرعت منجر به تغییر لغزش برحسب زمان خواهد شد. پس محتوای فرکانسی سیگنال نمونه‌برداری شده برحسب زمان تغییر خواهد کرد و این تغییر سبب می‌گردد که توزیع انرژی در صفحه $f - t$ تغییراتی پیدا کند که به‌نوبه خود سبب می‌گردد تا تشخیص عیب کمی مشکل شود.

با درجه‌بندی جدید محور فرکانس می‌توان مشخصه عیب را به‌جای فرکانس وابسته به لغزش، برحسب اندیس k یعنی مرتبه‌ای از ضریب لغزش بیان نمود. با این تغییر متغیر، وابستگی مشخصه عیب به لغزش از بین می‌رود و در دیاگرام توزیع انرژی، وجود عیب به‌طور مشخص‌تری دیده خواهد شد. مثلاً برای جریان رتور تغییر متغیر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل ۶: نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال تبدیل گابور بر روی جریان رتور جهت تشخیص عیب الکتریکی رتور، شکل‌های بالا ارایه در صفحه $f - t$ (بالا چپ سه بعدی و بالا راست دوبعدی) و شکل‌های پایین تغییر متغیر فرکانس و ارایه به روش HOTA.

$$v_{TS} = \frac{V_h}{3R^2} \times \sum_{b=1}^3 \left[\left(\frac{a}{\sin\theta_b} \right)^2 \cdot \ln \left(\left(\frac{R \cdot \sin\theta_b}{x} \right)^2 + 1 \right) - \frac{2R^2 a^2}{(R \cdot \sin\theta_b)^2 + x^2} \right] \quad (15)$$

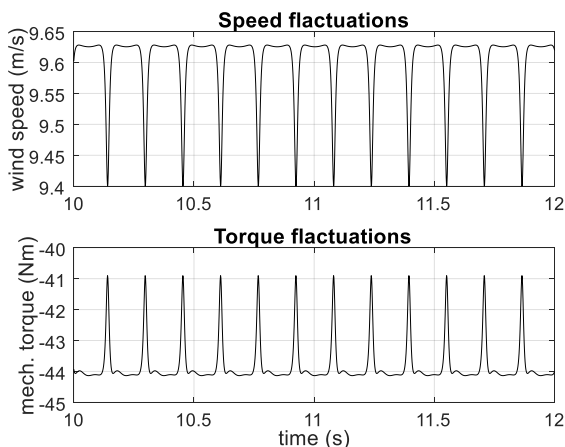
۲-۵- پردازش نهایی

در سرعت ثابت و در صورت وجود عیب الکتریکی در رتور، مؤلفه‌های فرکانسی مطابق با روابط (۱) و (۲) در جریان‌های استاتور و رتور القاء می‌شود که بعد از اعمال روش HOTA این مؤلفه‌ها در اطراف مرتبه‌های صحیح k تقریباً به صورت متقارن متمرکز می‌شوند. تمرکز محتوای سیگنال در مرتبه k به معنای تیزبودن منحنی و تقارن آن به معنای کوچک‌بودن کجی منحنی در اطراف k می‌باشد که این دو توصیف را می‌توان با کمیات کشیدگی و چولگی بیان نمود. در صورت وجود پیک در مراتب k ، هرچه قدر کشیدگی^۸ و چولگی^۹ منحنی HOTA در اطراف مراتب k کمتر باشد به معنای حضور عیب در این مراتب می‌باشد. اما، اگر این دو کمیت مقدار زیادی داشته باشند به معنای این است که محتوای دیده در این k مربوط به عوامل دیگری است. برای نمونه، تمرکز انرژی سیگنال در اطراف مراتب مربوط به عیب الکتریکی رتور در شکل ۸ دیده می‌شود.

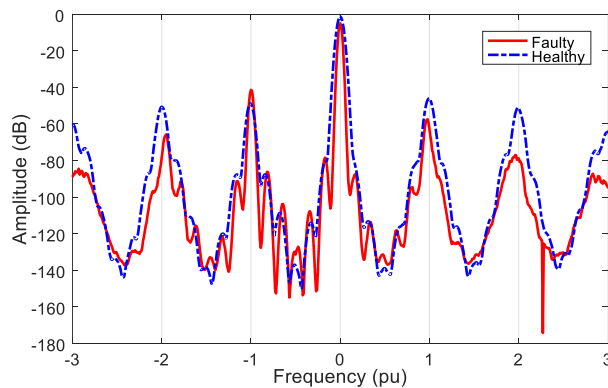
۳- نوسانات فرکانس پایین گشتاور

در یک سیستم توربین بادی دلایل زیادی وجود دارند که سبب کارکردن سیستم در شرایط غیردائمی و نوسانی می‌شود. تغییرات در شبکه برق (تغییر ولتاژ، بار و ...) عوامل الکتریکی این نوسانات می‌باشند. بخشی از این عوامل، منشأ آئروپدینامیکی و برخی دیگر منشأ مکانیکی دارند. تغییرات سرعت باد، تفاوت سرعت باد برای پره‌های بالایی و پایینی (شکستن سرعت باد^{۱۰} در ارتفاع پایین) و اثر سایه برج^{۱۱} از جمله عوامل آئروپدینامیکی هستند [۲۴]. اثر سایه برج در نهایت سبب ایجاد تغییرات در گشتاور مکانیکی می‌شود و تحقیقات متعددی مدل‌سازی این پدیده را مطالعه کرده‌اند [۲۳-۲۶]. این پدیده به صورت زیر مدل می‌شود:

که پارامترهای این رابطه در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در این رابطه V_h سرعت میانگین باد است که برای محاسبه گشتاور خروجی توربین باید این سرعت با v_{TS} جمع زده شود و فرض شده است که شعاع برج عدد ثابتی باشد. اثر شکست باد به مراتب از اثر سایه برج کمتر می‌باشد [۲۴، ۲۵] لذا در این جا اثر شکست باد منظور نشده است. در شکل ۹ تأثیر سایه برج بر سرعت باد و گشتاور توربین نشان داده است. شایان ذکر است که در این شکل نسبت چرخ‌دنده‌ها ۱:۱۲/۵ می‌باشد.



شکل ۹: شبیه‌سازی اثر سایه برج بر سرعت و گشتاور - سرعت پایه باد ۹/۶ m/s می‌باشد.



شکل ۱۱: مقایسه روش HOTA در دو حالت سالم و معیوب، در هر دو حالت اثر سایه برج دیده شده است و سرعت میانگین باد $9/6 m/s$ است.

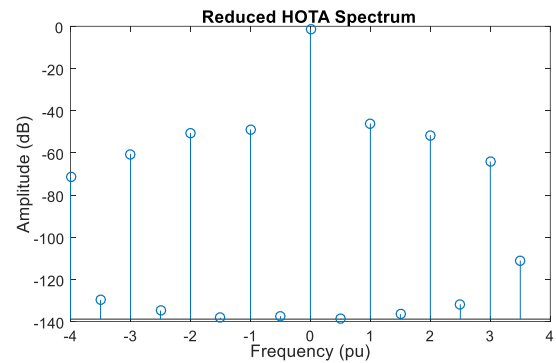
جدول ۲: مقایسه اندیس‌های مختلف برای دو حالت سالم و معیوب، سرعت میانگین باد $9/6 m/s$.

معیوب		سالم		حالت
اندیس	چولگی	اندازه (دسی‌بل)	کشی‌دگی	اندازه (دسی‌بل)
$k = -1$	$-3/95$	$17/19$	$-51/50$	$-41/36$
$k = -2$	$-3/94$	$17/18$	$-50/56$	$-65/72$
$k = 2$	$-3/92$	$17/01$	$-51/03$	$-78/85$
$k = 1$	$-3/98$	$17/63$	$-46/04$	$-59/23$

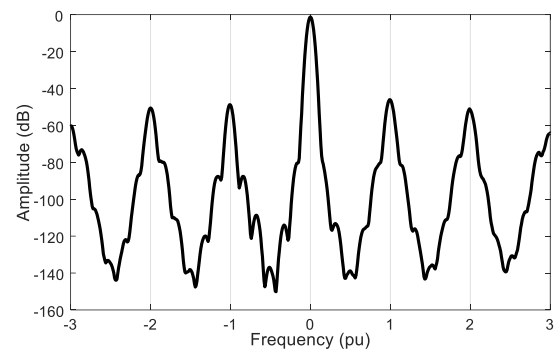
در دو شبیه‌سازی دیگر سرعت میانگین باد به ترتیب $8 m/s$ و $10 m/s$ فرض شده‌اند. در این دو حالت به دلیل این که فرکانس مشخصه اثر سایه برج با فرکانس مشخصه عیب رتور یکی نیست، تداخل زیادی به وجود نمی‌آید و تنها با بررسی کردن میزان رشد اندازه در $k = \pm 1$ می‌توان به شروع بروز عیب پی برد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۱۲ آمده است.

در شبیه‌سازی آخر فرض شده است که سرعت باد ثابت نباشد. سرعت باد به صورت سینوسی با فرکانس $0.4 Hz$ و با اندازه $0.4 s$ حول مقدار $9/6 m/s$ در حال نوسان است. در شکل ۱۳ دیده می‌شود که اثر سایه برج سبب ایجاد پیک در نزدیکی $k = \pm 1$ شده است اما این قضیه در $k = \pm 2$ تکرار نشده است. از طرف دیگر با بروز عیب، اندازه در $2, \pm 1 \pm 1$ رشد قابل توجهی داشته و در نزدیکی این مقادیر k منحنی تیزتر و متقارن‌تر شده است. لذا حالت معیوب به خوبی از حالت سالم قابل تفکیک خواهد بود.

در عمل سرعت باد ثابت نمی‌باشد و این تغییرات سرعت باد در تشخیص عیب ژنراتورهای القایی معمولاً لحاظ می‌گردد [۲۷، ۲۸]. در این جا نیز تغییرات سرعت باد به عنوان یک فرصت برای تشخیص عیب و ایجاد تمایز بین اثرات سایه برج و اثرات عدم تقارن الکتریکی رتور می‌باشد. لذا حالتی که در عمل اتفاق می‌افتد تشابه بیشتری با نتایج شکل ۱۳ خواهد داشت که حالت‌های سالم و معیوب به خوبی قابل تفکیک می‌باشند.



الف



ب

شکل ۱۰: اثر سایه برج می‌تواند مشابه با عیب، باعث القاء محتوای فرکانسی در نزدیکی فرکانس مشخصه عیب گردد، (الف) نمایش میله‌ای، (ب) نمایش منحنی.

به کمک روش HOTA، میانگین محتوای سیگنال در فرکانس‌های پرونیوت شده به دست آمده که در شکل ۱۰ نتیجه آن دیده می‌شود. مشاهده می‌شود که اثر سایه برج در شرایطی می‌تواند در نزدیکی فرکانس‌های مشخصه عیب ماشین، اغتشاش ایجاد کند که این مسئله سبب می‌گردد تا تشخیص عیب ماشین دچار اختلال گردد. به عبارت دیگر این موضوع اهمیت دارد که آیا پیک‌های مشاهده شده در مراتب صحیح؛ ناشی از عیب است و یا ناشی از اثر سایه برج. در شکل ۱۰ دیده می‌شود که با افزایش فرکانس، پیک‌های ناشی از اثر سایه برج تغییرات کمتری نسبت به پیک‌های ناشی از عیب (شکل ۸) دارند و اطراف فرکانس‌ها کمتر متمرکز شده‌اند.

۴- تشخیص عیب در حضور اثر سایه برج

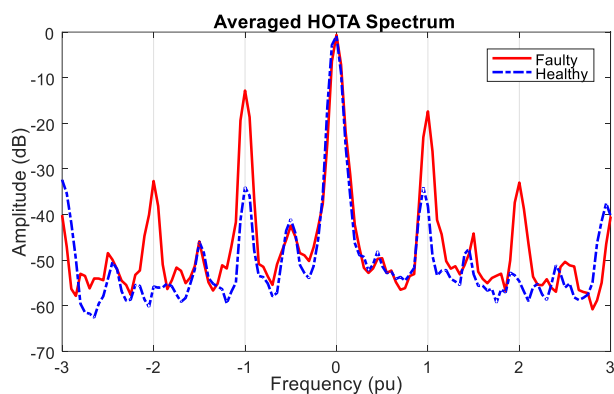
با اطلاعات داده شده در جدول ۱، دو شبیه‌سازی از سیستم با حضور اثر سایه برج، برای حالت‌های سالم و معیوب انجام شده‌اند که نتایج آن در شکل ۱۱ آمده است. رشد پیک در $k = -1$ و کاهش اندیس‌های چولگی و کشی‌دگی (جدول ۲) در $k = \pm 1, \pm 2$ نشان‌دهنده بروز عیب در فرکانس مشخصه مدنظر می‌باشد. در اینجا مقاومت سیم‌پیچی رتور، سرعت میانگین باد و نسبت چرخ‌دنده به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که فرکانس‌های ناشی از اثر سایه برج بیشترین تداخل را با فرکانس مشخصه عیب داشته باشند.



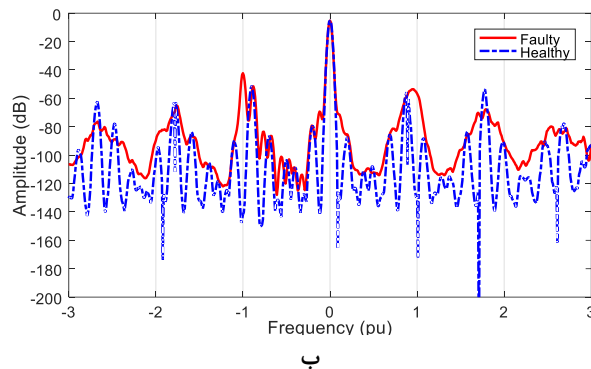
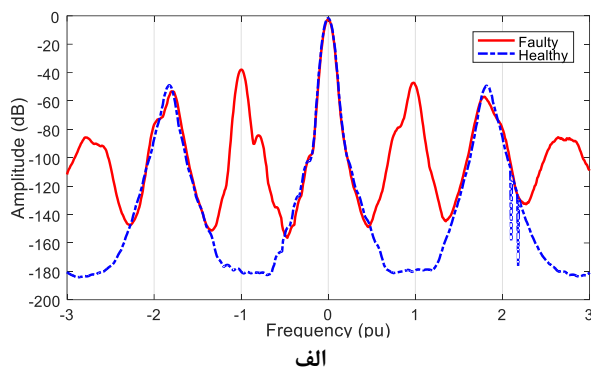
شکل ۱۴- تصویر سیستم تست شده.

جدول ۳: مشخصات ژنراتور تست شده.

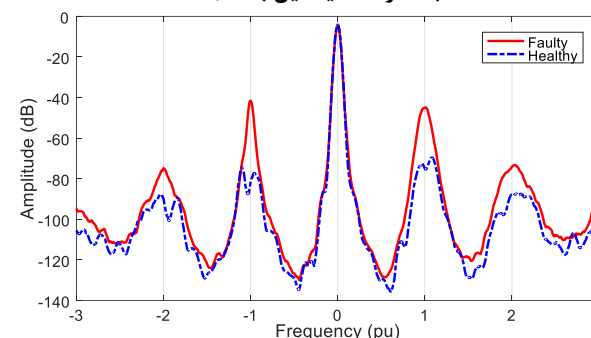
مقدار	نماد	کمیت
۱/۵ kW	P_n	توان نامی
۴۰۰ V	V	ولتاژ نامی
۴	P	تعداد قطب
۵۰ Hz	f_s	فرکانس نامی
۰/۲۱۸ H	L_m	اندوکتانس مغناطیس کنندگی
۱/۵ Ω	R_s	مقاومت سیم پیچی استاتور
۰/۰۰۱۱۵ H	L_{ls}	اندوکتانس سیم پیچی استاتور
۳/۲۵ Ω	R_r	مقاومت سیم پیچی رتور
۰/۰۰۱۱۵ H	L_{lr}	اندوکتانس سیم پیچی رتور



شکل ۱۵- نتایج اعمال روش HOTA به سیگنال‌های اندازه‌گیری شده از تست‌های آزمایشگاهی در دو حالت سالم و خطا دیده.



شکل ۱۲: مقایسه روش HOTA در دو حالت سالم و معیوب، در هر دو حالت اثر سایه برج دیده شده است (الف) سرعت میانگین باد $1m/s$ ، (ب) سرعت میانگین باد $10m/s$.



شکل ۱۳: مقایسه روش HOTA در دو حالت سالم و معیوب، در هر دو حالت اثر سایه برج دیده شده است و سرعت میانگین باد به صورت سینوسی با اندازه $0.4m/s$ حول مقدار $9/6 m/s$ و با فرکانس $0.4 Hz$ در حال تغییر است.

۵- نتایج آزمایشگاهی

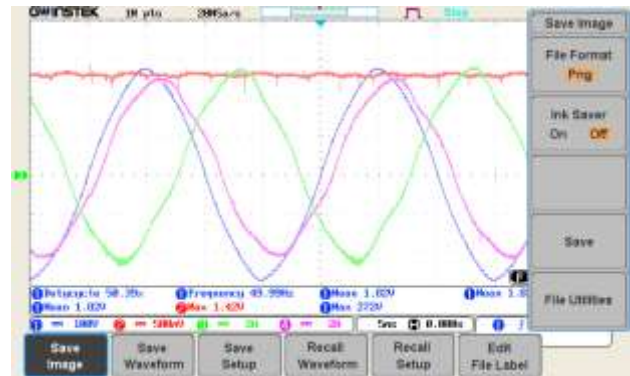
برای بررسی صحت روش پیشنهادی از نتایج تست‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. تست‌ها با استفاده از مجموعه آموزشی ماشین القایی رتور سیم‌بندی شده محصول شرکت TERKO انجام شده‌اند. در شکل ۱۴ عکس این مجموعه در حالت بی‌باری دیده می‌شود. مشخصات ژنراتور القایی در جدول ۳ آمده است. ژنراتور القایی از طریق یک اتوترانس به شبکه متصل است و محرک مکانیکی آن یک موتور DC با توان نامی $2/2 kW$ می‌باشد. گشتاور مکانیکی مقدار متوسط در حدود $5/5 Nm$ دارد که حول مقدار میانگین نوسان دارد.

۶- نتیجه‌گیری

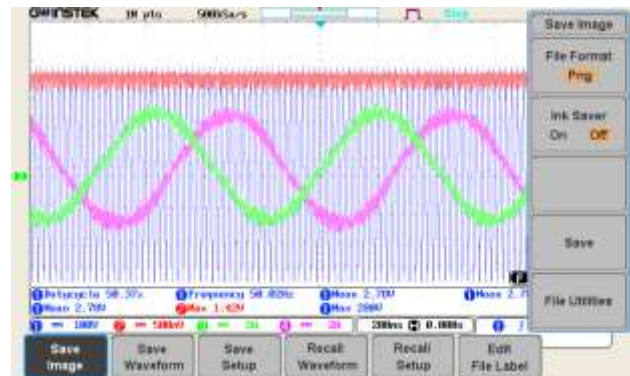
در این مقاله برای تشخیص عیب در ژنراتور القایی، روش HOTA که یک روش مبتنی بر سیگنال در حوزه $f-t$ است، معرفی گردید. در این روش با تغییر متغیر فرکانس مشخصه عیب نمایان تر می‌شود. برای سادگی، از مقدار محتوای سیگنال در فرکانس‌های مختلف برحسب زمان میانگین‌گیری شد که توصیف سیگنال را ساده‌تر نمود و محور زمان نیز حذف گردید. همچنین نشان داده شد که نوسانات فرکانس پایین در بخش مکانیکی توربین بادی همانند اثر سایه برج، فرکانس مشخصه‌های مخصوص به خود را در جریان دارند که می‌تواند تشخیص عیب را دچار اختلال کند. در این مقاله نشان داده‌شد که با اعمال روش HOTA و بررسی میزان رشد اندازه در $k = \pm 1$ و سپس بررسی اندیس‌های آماری در $k = \pm 1, \pm 2$ می‌توان بین حالت معیوب و اثرات سایه برج در حالت سالم تمایز قائل شد. در نهایت با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، روش HOTA مورد ارزیابی قرار گرفت و موفقیت آن در تشخیص عیب الکتریکی رتور نشان داده‌شد.

مراجع

- [1] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley & Sons, 2010.
- [۲] منصور اوجاقی، ناصر یزدان دوست، شهریار گل محمدزاده، «تشخیص عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی موتور القایی با استفاده از هارمونیک‌های توان لحظه‌ای» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۴، صفحه ۷-۱۷، زمستان ۱۳۹۵.
- [۳] مریم السادات اخوان حجازی، جواد ابراهیمی، مریم صباغ‌پور آرانی، گئورگ قره‌پتینان، «تشخیص برخط عیب‌های مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتور با استفاده از تخمین تابع تبدیل کانال انتشار موج UWB» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۴، صفحه ۱۳۰۷-۱۳۱۵، زمستان ۱۳۹۶.
- [4] V. Climente-Alarcon, J. A. Antonino-Daviu, A. Haavisto, and A. Arkkio, "Diagnosis of Induction Motors Under Varying Speed Operation by Principal Slot Harmonic Tracking," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 5, pp. 3591-3599, 2015.
- [5] H. Kim, S. Bin Lee, S. Park, S. H. Kia, and G. A. Capolino, "Reliable Detection of Rotor Faults under the Influence of Low-Frequency Load Torque Oscillations for Applications with Speed Reduction Couplings," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 2, pp. 1460-1468, 2016.
- [6] F. Dalvand, A. Kalantar, and M. S. Safizadeh, "A novel bearing condition monitoring method in induction motors based on instantaneous frequency of motor voltage," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 364-376, 2016.
- [7] S. C. Hamid A. Toliyat, Subhasis Nandi and H. Meshgin-kelk, *Electric Machines Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis*, 1st ed. CRC Press, 2017.
- [8] T. Wang, H. Liu, L. Zhao, J. Huang, and Z. Hou,



الف



ب

شکل ۱۶- شکل موج‌های اندازه‌گیری‌شده در حالت خطادیده، (الف) ولتاژ خط استاتور (با ضریب $\frac{1}{2}$)، سرعت، و جریان دو فاز از استاتور، (ب) ولتاژ خط استاتور (با ضریب $\frac{1}{2}$)، سرعت، و جریان دو فاز از رتور - (کانال یک ولتاژ استاتور، کانال دو خروجی تاکوژنراتور، کانال‌های سوم و چهارم جریان‌های استاتور و رتور).

در ابتدا، مقاومت خارجی متصل به مدار رتور صفر اهم می‌باشد (در واقع مدار رتور اتصال کوتاه می‌باشد). جریان ماشین اندازه‌گیری‌شده و داده‌های اندازه‌گیری‌شده به برنامه پردازش سیگنال که در نرم‌افزار MATLAB نوشته شده‌است، داده شد. با اعمال روش پیشنهادی، محتوای فرکانسی سیگنال استخراج شد که نتایج آن در شکل ۱۵ با خط‌چین نشان داده شده‌است. دیده می‌شود که پیک‌هایی در طیف سیگنال وجود دارد. دلایل وجود این پیک‌ها عبارت‌اند از: قدیمی بودن ژنراتور و وجود عدم تقارن اندک در سیم‌بندی رتور و همچنین نوسانات ناشی از ولتاژ شبکه. سپس یک رتوستا به یک فاز رتور متصل شد که در واقع این مقاومت معادل با بروز عیب عدم تقارن الکتریکی در رتور می‌باشد. نتایج اعمال روش پیشنهادی در حالت خطادیده در شکل ۱۵ با خط پیوسته نشان داده شده‌است. همان‌گونه که دیده می‌شود مقدار پیک‌ها در فرکانس‌های پریونیت‌شده متنظر با بروز عیب، رشد داشته‌اند که نشان‌دهنده وقوع عیب می‌باشد. در شکل ۱۶ شکل موج‌های اندازه‌گیری‌شده در حالت خطادیده نشان داده‌شده‌اند.

- Fault Diagnosis in Induction Motors under Time-Varying Conditions,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, no. 1, pp. 244–256, 2017.
- [20] A. Sapena-Bano *et al.*, “Harmonic Order Tracking Analysis: A Novel Method for Fault Diagnosis in Induction Machines,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 3, pp. 833–841, 2015.
- [21] A. Sapena-Bano, M. Riera-Guasp, R. Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, J. Perez-Cruz, and M. Pineda-Sanchez, “Harmonic Order Tracking Analysis: A Speed-Sensorless Method for Condition Monitoring of Wound Rotor Induction Generators,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 6, pp. 4719–4729, 2016.
- [22] J. Kim, S. Shin, S. Bin Lee, K. N. Gyftakis, M. Drif, and A. J. M. Cardoso, “Power Spectrum-Based Detection of Induction Motor Rotor Faults for Immunity to False Alarms,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 3, pp. 1123–1132, 2015.
- [23] J. Van de Vyver, T. L. Vandoorn, J. D. M. De Kooning, L. Vandevelde, and B. Meersman, “Shaft speed ripples in wind turbines caused by tower shadow and wind shear,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 8, no. 2, pp. 195–202, 2014.
- [24] M. Fooladi and A. Akbari Foroud, “Recognition and assessment of different factors which affect flicker in wind turbines,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 2, pp. 250–259, 2016.
- [25] D. S. L. Dolan and P. W. Lehn, “Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow,” *2006 IEEE PES Power Syst. Conf. Expo. PSCE 2006 - Proc.*, vol. 21, no. 3, pp. 2050–2057, 2006.
- [26] H. Sintra, V. M. F. Mendes, and R. Melicio, “Modeling and Simulation of Wind Shear and Tower Shadow on Wind Turbines,” *Procedia Technol.*, vol. 17, pp. 471–477, 2014.
- [27] R. K. Ibrahim, S. J. Watson, S. Djurović, and C. J. Crabtree, “An Effective Approach for Rotor Electrical Asymmetry Detection in Wind Turbine DFIGs,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 11, pp. 8872–8881, 2018.
- [28] F. Cheng, J. Wang, L. Qu, and W. Qiao, “Rotor Current-based Fault Diagnosis for DFIG Wind Turbine Drivetrain Gearboxes using Frequency Analysis and a Deep Classifier,” in *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS 2017*, 2017, vol. 2017–Janua, no. 2, pp. 1–9.
- “Quantitative broken rotor bar fault detection for closed-loop controlled induction motors,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 10, no. 5, pp. 403–410, 2016.
- [9] T. Ghanbari, “Autocorrelation function-based technique for stator turn-fault detection of induction motor,” *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 100–110, 2016.
- [10] B. Mirafzal and N. a O. Demerdash, “On Innovative Methods of Induction Motor Inter turn and Broken-Bar Fault Diagnostics,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 2, pp. 405–414, 2006.
- [11] N. R. Devi, “Diagnosis and Classification of Stator Winding Insulation Faults on a Three-phase Induction Motor using Wavelet and MNN,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 5, 2016.
- [12] S. Bin Lee *et al.*, “Identification of False Rotor Fault Indications Produced by Online MCSA for Medium-Voltage Induction Machines,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 1, pp. 729–739, Jan. 2016.
- [13] T. Yang, H. Pen, Z. Wang, and C. S. Chang, “Feature Knowledge Based Fault Detection of Induction Motors Through the Analysis of Stator Current Data,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, no. 3, pp. 549–558, 2016.
- [14] T. A. Garcia-Calva, D. Morinigo-Sotelo, and R. De Jesus Romero-Troncoso, “Non-Uniform Time Resampling for Diagnosing Broken Rotor Bars in Inverter-Fed Induction Motors,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 3, pp. 2306–2315, 2017.
- [15] Y. Trachi, E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, and M. E. H. Benbouzid, “Induction Machines Fault Detection Based on Subspace Spectral Estimation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 9, pp. 5641–5651, 2016.
- [16] K. Yahia, M. Sahraoui, A. J. M. Cardoso, and A. Ghoggal, “The use of a modified prony’s method to detect the airgap-eccentricity occurrence in induction motors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 5, pp. 3869–3877, 2016.
- [17] A. H. Boudinar, N. Benouzza, A. Bendiabdellah, and M.-E.-A. Khodja, “Induction Motor Bearing Fault Analysis Using a Root-MUSIC Method,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 5, pp. 3851–3860, 2016.
- [18] S. H. Kia, H. Henao, and G. A. Capolino, “Fault Index Statistical Study for Gear Fault Detection Using Stator Current Space Vector Analysis,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 6, pp. 4781–4788, 2016.
- [19] A. Sapena-Bano, J. Burriel-Valencia, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, and M. Riera-Guasp, “The Harmonic Order Tracking Analysis Method for the

زیر نویس ها

⁷ Gabor

⁸ Kurtosis

⁹ Skewness

¹⁰ Wind shear

¹¹ Tower shadow

¹ Fault feature (characteristics)

² Fault signature

³ Stationary

⁴ Non-stationary

⁵ Motor Current Signature Analysis

⁶ Harmonic Order Tracking Analysis