به نام خدا

تشخیص زودهنگام ترک و شکست تیغه در توربین‌های گازی با استفاده از تحلیل ارتعاش پهن‌باند پوسته و روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال

نویسنده :امیرحسین شاه‌مرادی

وابستگی سازمانی :دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده

توربین‌های گازی از جمله تجهیزات حیاتی در صنایع نیروگاهی، نفت و گاز و هوافضا محسوب می‌شوند .تیغه‌های این تجهیزات در طول عملکرد خود تحت تأثیر بارهای مکانیکی، حرارتی و آیرودینامیکی شدید قرار دارند .بروز ترک‌های اولیه و گسترش آن‌ها می‌تواند موجب تغییر رفتار دینامیکی تیغه، کاهش راندمان عملکرد و در نهایت شکست ناگهانی و خسارات سنگین تجهیزاتی شود .ازاین‌رو، توسعه .روش‌های قابل‌اعتماد برای پایش وضعیت و تشخیص زودهنگام عیوب تیغه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است

برای تشخیص ترک و (Broadband Casing Vibration) در این مقاله، رویکردی مبتنی بر تحلیل ارتعاش پهن‌باند پوسته توربین شکست تیغه بررسی می‌شود .در این چارچوب، ابتدا داده‌های ارتعاشی با استفاده از شتاب‌سنج‌ها و سایر حسگرهای غیرتماسی جمع‌آوری استخراج می‌شوند .سپس روش طیف (FRF) شده و پس از پیش‌پردازش، ویژگی‌های دینامیکی سیستم با استفاده از تابع پاسخ فرکانسی برای جداسازی (AVKF) و فیلتر تطبیقی ولد–کالمن (BPF) برای شناسایی فرکانس گذر تیغه (SHPS) حاصل‌ضرب هارمونیکی تنک مؤلفه‌های مرتبط با تیغه به کار گرفته می‌شوند .در مرحله نهایی، ویژگی‌های استخراج‌شده می‌توانند به‌عنوان ورودی الگوریتم‌های .مورد استفاده قرار گیرند (SVM) و ماشین بردار پشتیبان Autoencoder یادگیری ماشین نظیر

این رویکرد با هدف ارائه یک چارچوب غیرتماسی، قابل توسعه و مناسب برای پایش مستمر سلامت تیغه‌های توربین‌های گازی تدوین .شده است و می‌تواند زمینه کاهش توقف‌های ناخواسته و هزینه‌های تعمیرات را فراهم کند.

واژگان کلیدی : توربین گازی، ترک تیغه، شکست تیغه، تحلیل ارتعاشات، ارتعاش پهن‌باند پوسته، FRF ، SHPS ، AVKF ، یادگیری ماشین، پایش وضعیت.

۱. مقدمه

توربین‌های گازی به دلیل چگالی توان بالا، قابلیت اطمینان و کاربرد گسترده در صنایع مختلف، نقش مهمی در تولید انرژی و فرآیندهای صنعتی ایفا می‌کنند .یکی از مهم‌ترین اجزای این ماشین‌ها، تیغه‌های روتور و استاتور هستند که وظیفه انتقال انرژی بین جریان سیال و مجموعه دوار را بر عهده دارند.

این اجزا در شرایط کاری دشوار، تحت تأثیر تنش‌های مکانیکی، بارهای حرارتی متغیر، نیروهای گریز از مرکز و تحریک‌های آیرودینامیکی قرار می‌گیرند .ترکیب این عوامل می‌تواند موجب ایجاد خستگی، تمرکز تنش، تشکیل ترک و در نهایت شکست تیغه شود.

شکست تیغه در توربین گازی تنها یک خرابی موضعی محسوب نمی‌شود؛ زیرا قطعات جداشده ممکن است به سایر اجزای داخلی آسیب وارد کنند و موجب توقف کامل مجموعه شوند .به همین دلیل، تشخیص عیب پیش از رسیدن به مرحله شکست اهمیت اساسی دارد.

حسگرهای کرنش و روش‌های (Blade Tip Timing – BTT)، روش‌های متداول پایش تیغه شامل سیستم زمان‌سنجی نوک تیغه اندازه‌گیری مستقیم هستند .با وجود دقت مناسب، برخی از این روش‌ها به تجهیزات تخصصی، نصب پیچیده و دسترسی مستقیم به ناحیه مورد اندازه‌گیری نیاز دارند.

در مقابل، تحلیل ارتعاش پهن‌باند پوسته توربین امکان بررسی رفتار دینامیکی مجموعه را از طریق حسگرهای نصب‌شده روی پوسته فراهم می‌کند .این روش به‌ویژه در شرایطی که دسترسی مستقیم به تیغه‌ها دشوار است، اهمیت پیدا می‌کند.

هدف اصلی این مقاله، بررسی یک چارچوب ترکیبی برای استخراج اطلاعات مربوط به سلامت تیغه از سیگنال‌های ارتعاشی پوسته و استفاده از روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال برای تشخیص زودهنگام عیب است.

۲. مبانی پایش ارتعاشی تیغه‌های توربین گازی

۲-۱ – ماهیت ارتعاشات در توربین‌های گازی

سیگنال ارتعاشی اندازه‌گیری‌شده روی پوسته توربین، معمولاً حاصل برهم‌کنش چندین منبع تحریک است .مهم‌ترین این منابع عبارت‌اند از:

- ارتعاشات ناشی از چرخش روتور؛
- تحریک‌های ناشی از عبور تیغه‌ها؛
- نیروهای آیرودینامیکی جریان سیال؛
- ارتعاشات یاتاقان‌ها و اجزای نگهدارنده؛
- نویزهای محیطی و ارتعاشات منتقل‌شده از تجهیزات مجاور.

بنابراین، سیگنال ثبت‌شده ترکیبی از مؤلفه‌های مختلف است و استخراج اطلاعات مربوط به یک تیغه مشخص نیازمند روش‌های پردازش سیگنال مناسب خواهد بود.

۲-۲ - (BPF) فرکانس گذر تیغه.

یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های فرکانسی در تحلیل ارتعاشات توربین، فرکانس گذر تیغه است.

این فرکانس با تعداد تیغه‌ها و سرعت دوران روتور ارتباط مستقیم دارد:

$$BPF=Z\times \frac{RPM}{60}$$

در این رابطه :

- Z : تعداد تیغه‌های ردیف مورد بررسی
- RPM : سرعت دوران بر حسب دور بر دقیقه
- BPF : فرکانس گذر تیغه بر حسب هرتز.

فرکانس گذر تیغه و هارمونیک‌های آن اطلاعات مهمی درباره وضعیت دینامیکی مجموعه تیغه‌ها ارائه می‌کنند .ایجاد ترک یا شکست در یک تیغه می‌تواند توزیع انرژی طیفی اطراف این فرکانس را تغییر دهد.

۳. سیستم‌های حسگر و روش‌های جمع‌آوری داده

برای پایش وضعیت تیغه‌ها می‌توان از چندین نوع حسگر استفاده کرد .انتخاب حسگر به شرایط کاری توربین، محل نصب، دمای محیط، محدوده فرکانسی مورد نیاز و دقت اندازه‌گیری وابسته است.

۳-۱- (Accelerometers) شتاب‌سنج‌ها

شتاب‌سنج‌ها از متداول‌ترین ابزارهای اندازه‌گیری ارتعاش هستند .عملکرد آن‌ها بر اساس اندازه‌گیری پاسخ یک جرم داخلی نسبت به بدنه حسگر است.

با نصب شتاب‌سنج روی پوسته توربین، می‌توان ارتعاشات ناشی از چرخش روتور، عبور تیغه‌ها و جریان سیال را ثبت کرد.

مزیت اصلی این روش، امکان پایش پیوسته و عدم نیاز به تماس مستقیم با تیغه است.

۳-۲- (BTT) سیستم زمان‌سنجی نوک تیغه

حسگرهای نوری، مغناطیسی یا خازنی در نزدیکی مسیر حرکت نوک تیغه نصب می‌شوند، BTT در سیستم هر بار که نوک تیغه از مقابل حسگر عبور می‌کند، یک پالس ثبت می‌شود .با مقایسه زمان واقعی عبور تیغه با زمان مرجع، می‌توان تغییر مکان نوک تیغه را محاسبه کرد . وجود ترک یا تغییر سختی تیغه می‌تواند رفتار ارتعاشی آن را تغییر داده و موجب انحراف در زمان عبور شود .

۳-۳- (Strain Gauges) حسگرهای کرنش

حسگرهای کرنش بر اساس تغییر مقاومت الکتریکی در اثر تغییر شکل ماده عمل می‌کنند.

این حسگرها معمولاً روی سطح قطعه نصب شده و امکان اندازه‌گیری تغییرات کرنش ناشی از بارگذاری دینامیکی را فراهم می‌کنند

تمرکز تنش در اطراف ترک می‌تواند الگوی کرنش را تغییر دهد .بااین‌حال، محدودیت‌های نصب و دوام در شرایط عملیاتی سخت، استفاده از این حسگرها را محدود می‌کند.

۳-۴- (LDV) لرزه‌سنج لیزری داپلر

این روش بر اساس اثر داپلر عمل می‌کند .پرتو لیزر به سطح مرتعش تابیده شده و تغییر فرکانس نور بازتابی برای محاسبه سرعت و جابه‌جایی ارتعاشی سطح استفاده می‌شود .

از این روش می‌توان برای اندازه‌گیری دقیق ارتعاشات در مطالعات آزمایشگاهی و اعتبارسنجی سایر روش‌ها استفاده کرد.

۳-۵. (Acoustic Emission) انتشار آکوستیک

حسگرهای انتشار آکوستیک، امواج الاستیک با فرکانس بالا را که در اثر آزاد شدن انرژی ناشی از رشد ترک یا تغییر شکل ماده ایجاد می‌شوند، ثبت می‌کنند.

نسبت به رویدادهای فعال تخریب AE برخلاف شتاب‌سنج‌ها که رفتار کلی ارتعاشی سیستم را اندازه‌گیری می‌کنند، حسگرهای حساس هستند و می‌توانند برای شناسایی آغاز رشد ترک به کار روند.

۳-۶. (Sensor Fusion) ترکیب حسگرها

ترکیب اطلاعات حسگرهای مختلف می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم تشخیص را افزایش دهد.

برای شناسایی رویدادهای مرتبط با رشد ترک استفاده می‌شوند . AE برای مثال، ارتعاش پوسته برای پایش پیوسته و حسگرهای ادغام این اطلاعات در سطح سیگنال، ویژگی یا تصمیم نهایی می‌تواند احتمال هشدارهای کاذب را کاهش دهد.

۴. (FRF) تحلیل تابع پاسخ فرکانسی

تابع پاسخ فرکانسی یکی از ابزارهای اصلی تحلیل دینامیکی سیستم‌های مکانیکی است .این تابع رابطه میان تحریک ورودی و پاسخ ارتعاشی سیستم را در حوزه فرکانس توصیف می‌کند.

رابطه کلی آن به شکل زیر بیان می‌شود:

$$H(f)=\frac{X(f)}{F(f)}$$

که در آن:

- تابع پاسخ فرکانسی؛ :\(H(f)\)
- طیف پاسخ ارتعاشی؛ :\(X(f)\)
- طیف نیروی تحریک :\(F(f)\).

پاسخ سیستم در فرکانس‌های مختلف بررسی شده و اطلاعاتی مانند فرکانس‌های طبیعی، دامنه تشدید و میرایی FRF، در تحلیل استخراج می‌شود.

۴-۱. نقش ترک در تغییر رفتار دینامیکی

ایجاد ترک در تیغه موجب کاهش سختی موضعی می‌شود .این تغییر می‌تواند بر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی اثر بگذارد.

مهم‌ترین شاخص‌های قابل بررسی عبارت‌اند از:

۱. جابه‌جایی فرکانس‌های طبیعی به سمت مقادیر پایین‌تر؛
۲. تغییر دامنه قله‌های تشدید؛
۳. افزایش پهنای باند قله‌های رزونانسی و تغییر میرایی ظاهری.

این تغییرات می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های اولیه تشخیص آسیب مورد استفاده قرار گیرند.

۴-۲. ضرورت پیش‌پردازش سیگنال

سیگنال‌های اندازه‌گیری‌شده در محیط صنعتی معمولاً دارای نویز، مؤلفه‌های غیرمرتبط و تغییرات ناشی از شرایط کاری هستند.

بنابراین، پیش از تحلیل باید مراحل زیر انجام شوند:

- حذف مؤلفه DC؛
- بررسی و حذف داده‌های نامعتبر؛
- اعمال پنجره مناسب برای کاهش نشت طیفی؛
- محاسبه طیف فرکانسی با استفاده از FFT؛
- بررسی شرایط عملیاتی و سرعت دوران؛
- انتخاب محدوده فرکانسی مناسب.

پیش‌پردازش صحیح نقش مهمی در جلوگیری از تشخیص اشتباه دارد.

۵. روش طیف حاصل‌ضرب هارمونیکی تنک (SHPS)

یکی از چالش‌های اصلی تحلیل ارتعاش پهن‌باند، شناسایی دقیق فرکانس گذر تیغه در حضور نویز و مؤلفه‌های متعدد است.

مورد استفاده BPF با هدف تقویت ساختار هارمونیکی مؤلفه‌های مرتبط با Sparse Harmonic Product Spectrum روش قرار می‌گیرد.

مبنای روش طیف حاصل‌ضرب هارمونیکی این است که مؤلفه‌های واقعی هارمونیکی در چند مقیاس فرکانسی تکرار می‌شوند، درحالی‌که نویز الزاماً چنین الگویی ندارد.

طیف سیگنال در ضرایب صحیح مختلف فشرده شده و حاصل‌ضرب آن‌ها، Harmonic Product Spectrum در روش کلاسیک محاسبه می‌شود تا مؤلفه‌های هارمونیکی تقویت شوند.

نسخه تنک این رویکرد با تمرکز بر ساختار هارمونیکی مورد انتظار، به شناسایی مؤلفه هدف کمک می‌کند.

۵-۱. نقش SHPS در تشخیص عیب

ایجاد ترک یا شکست در تیغه می‌تواند موجب تغییر توزیع انرژی هارمونیکی اطراف BPF شود.

می‌توان این تغییرات را برجسته کرده و اطلاعات دقیق‌تری از رفتار طیفی مجموعه تیغه‌ها به دست آورد SHPS با استفاده از.

مرحله مهمی برای شناسایی فرکانس هدف و آماده‌سازی سیگنال جهت جداسازی مؤلفه‌های مرتبط با تیغه SHPS، در نتیجه محسوب می‌شود.

۶. فیلتر تطبیقی ولد–کالمن (AVKF)

در توربین‌های گازی، سیگنال ارتعاشی ثبت‌شده ترکیبی از مؤلفه‌های روتور، تیغه‌ها، یاتاقان‌ها، نیروهای آیرودینامیکی و نویز محیطی است.

از آنجا که سرعت دوران ممکن است تغییر کند، فرکانس مؤلفه‌های هدف نیز ثابت نیست .بنابراین فیلترهای باندگذر معمولی که دارای پهنای باند ثابت هستند، در برخی شرایط عملکرد محدودی خواهند داشت.

با استفاده از اطلاعات مسیر فرکانسی مؤلفه هدف، امکان جداسازی آن را از سیگنال کلی فراهم Vold–Kalman فیلتر تطبیقی می‌کند.

یا هارمونیک‌های آن، شناسایی می‌شود .سپس با استفاده از یک مدل BPF در این روش، ابتدا مسیر فرکانسی مؤلفه مورد نظر، مانند حالت و حل مسئله تخمین مبتنی بر کالمن، مؤلفه هدف استخراج می‌شود.

۶-۱. اهمیت AVKF در تشخیص ترک و شکست

یک سیگنال زمانی است که مؤلفه مرتبط با تیغه در آن برجسته شده و اثر سایر منابع ارتعاشی تا حد زیادی کاهش AVKF خروجی یافته است.

با بررسی تغییرات دامنه، انرژی و فاز این مؤلفه در طول زمان، می‌توان نشانه‌هایی از بروز ترک، شکست جزئی یا تغییر در بارگذاری آیرودینامیکی تیغه را شناسایی کرد.

برای مثال، افزایش ناگهانی دامنه یا ناپایداری فاز مؤلفه استخراج‌شده می‌تواند به‌عنوان یک شاخص هشدار اولیه در نظر گرفته شود.

۷. استخراج ویژگی‌ها و کاربرد یادگیری ماشین

مجموعه‌ای از ویژگی‌ها برای ارزیابی سلامت تیغه AVKF، و جداسازی مؤلفه‌ها با BPF استخراج FRF، پس از پیش‌پردازش، تحلیل در دسترس قرار می‌گیرند.

مهم‌ترین ویژگی‌های قابل استفاده عبارت‌اند از:

الف) ویژگی‌های مبتنی بر FRF

- تغییر فرکانس‌های طبیعی؛
- تغییر دامنه قله‌های رزونانسی؛
- تغییر پهنای باند قله‌ها.

ب) ویژگی‌های طیفی ارتعاش پهن‌باند

- مقدار RMS طیف پهن‌باند؛
- چگالی انرژی در باندهای فرکانسی منتخب؛
- نسبت انرژی باندی.

ج) ویژگی‌های مبتنی بر SHPS

- مقدار تخمینی BPF؛
- دامنه مؤلفه BPF؛
- تغییرات انرژی هارمونیک‌ها.

۷-۱. الگوریتم Autoencoder

یک ساختار یادگیری ماشین است که با یادگیری الگوی داده‌های سالم، امکان شناسایی نمونه‌های غیرعادی را Autoencoder فراهم می‌کند.

در کاربرد پایش تیغه، می‌توان مدل را با داده‌های مربوط به شرایط سالم آموزش داد. سپس سیگنال‌هایی که تفاوت قابل توجهی با الگوی آموخته‌شده دارند، به‌عنوان موارد مشکوک شناسایی می‌شوند.

این روش به‌ویژه در شرایطی که داده‌های دارای برچسب عیب محدود هستند، قابل بررسی است.

۷-۲. ماشین بردار پشتیبان (SVM)

الگوریتم SVM برای طبقه‌بندی داده‌ها و تفکیک گروه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مسئله تشخیص تیغه، ویژگی‌های استخراج‌شده از سیگنال می‌توانند به‌عنوان ورودی مدل استفاده شوند تا وضعیت تجهیز در گروه‌هایی مانند سالم، دارای ترک یا دارای شکست جزئی طبقه‌بندی شود.

البته عملکرد مدل به کیفیت داده‌های آموزشی، تعداد نمونه‌ها و تنوع شرایط عملیاتی وابسته است.

۸. چارچوب پیشنهادی تشخیص عیب

با ترکیب روش‌های معرفی‌شده، می‌توان یک زنجیره پردازشی برای پایش وضعیت تیغه‌های توربین گازی تعریف کرد :

مرحله اول :جمع‌آوری داده

ثبت سیگنال‌های ارتعاشی پوسته با استفاده از شتاب‌سنج‌ها و ثبت هم‌زمان سرعت دوران، بار و دمای کاری.

مرحله دوم :پیش‌پردازش

حذف مؤلفه DC، اصلاح داده‌های نامعتبر، پنجره‌گذاری و آماده‌سازی سیگنال برای تحلیل فرکانسی.

مرحله سوم :تحلیل دینامیکی

بررسی تابع پاسخ فرکانسی و استخراج تغییرات مربوط به رفتار مودال سیستم.

مرحله چهارم: شناسایی BPF

استفاده از SHPS برای شناسایی فرکانس گذر تیغه و هارمونیک‌های آن.

مرحله پنجم :جداسازی مؤلفه هدف

استفاده از AVKF برای استخراج مؤلفه مرتبط با تیغه از سیگنال ترکیبی.

مرحله ششم :استخراج ویژگی

محاسبه ویژگی‌های دامنه، انرژی، فاز، فرکانس و شاخص‌های طیفی

مرحله هفتم :تشخیص و طبقه‌بندی

استفاده از Autoencoder برای شناسایی ناهنجاری و SVM برای طبقه‌بندی نوع عیب، در صورت وجود داده‌های آموزشی مناسب.

مرحله هشتم :تصمیم‌گیری نگهداری

ارزیابی روند تغییرات و صدور هشدار برای انجام بازرسی یا اقدامات تعمیراتی.

۹. بحث و محدودیت‌های روش

تحلیل ارتعاش پهن‌باند پوسته به دلیل عدم نیاز به نصب حسگر روی تک‌تک تیغه‌ها، می‌تواند راهکاری مناسب برای پایش .غیرتماسی باشد .بااین‌حال، استفاده از این روش با محدودیت‌هایی همراه است نخست آنکه سیگنال ثبت‌شده روی پوسته تنها به رفتار .تیغه وابسته نیست و سایر اجزای توربین نیز در آن سهم دارند .بنابراین، جداسازی مؤلفه‌های مربوط به تیغه اهمیت اساسی دارد دوم آنکه تغییر سرعت دوران، بار و دما می‌تواند موجب تغییر ویژگی‌های ارتعاشی شود .در نتیجه، مقایسه داده‌ها باید با در نظر گرفتن .شرایط عملیاتی انجام شود سوم آنکه برای آموزش و ارزیابی الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به داده‌های سالم و معیوب با کیفیت .مناسب نیاز است .همچنین برای جلوگیری از بیش‌برازش، داده‌های آموزشی و آزمون باید به‌درستی تفکیک شوند

نکته مهم دیگر این است که تشخیص وجود ناهنجاری الزاماً به معنای اثبات ترک نیست .برای تأیید نهایی عیب و تعیین محل دقیق .آن، استفاده از روش‌های بازرسی تکمیلی و اطلاعات سایر حسگرها ضروری خواهد بود

۱۰. نتیجه‌گیری

در این مقاله، چارچوبی برای تشخیص زودهنگام ترک و شکست تیغه در توربین‌های گازی بر پایه تحلیل ارتعاش پهن‌باند پوسته و روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال بررسی شد .

نتیجه بررسی مبانی نظری نشان می‌دهد که ارتعاش پهن‌باند پوسته، با وجود ماهیت پیچیده و وجود نویز، می‌تواند حاوی اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار دینامیکی تیغه‌ها باشد .

تحلیل تابع پاسخ فرکانسی، امکان شناسایی تغییرات مودال ناشی از کاهش سختی و تغییر رفتار میرایی را فراهم می‌کند .همچنین برای استخراج پایدار فرکانس گذر تیغه و هارمونیک‌های آن در حضور نویز مورد استفاده قرار می‌گیرد SHPS روش

امکان جداسازی مؤلفه مرتبط با تیغه را فراهم می‌کند.در ادامه، ویژگی‌های AVKF پس از شناسایی فرکانس هدف، فیلتر تطبیقی استخراج‌شده می‌توانند برای شناسایی ناهنجاری و طبقه‌بندی عیوب توسط الگوریتم‌های یادگیری ماشین مورد استفاده قرار گیرند

و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند یک چارچوب قابل توسعه AVKF فیلتر ،SHPS روش ،FRF در مجموع، ترکیب تحلیل برای پایش سلامت تیغه‌های توربین‌های گازی ایجاد کند .توسعه و اعتبارسنجی آزمایشگاهی این چارچوب، به‌ویژه در شرایط تغییر سرعت، بار و دمای کاری، گام ضروری برای ارزیابی قابلیت اطمینان آن در کاربردهای صنعتی خواهد بود.

منابع

۱. K. Feng et al.، Applied Sciences. مقاله مرتبط با روش‌های SHPS، AVKF و Autoencoder.

۲. Kocharla et al.، Applied Mechanics.

۳. Tiboni et al.، Applied Sciences.