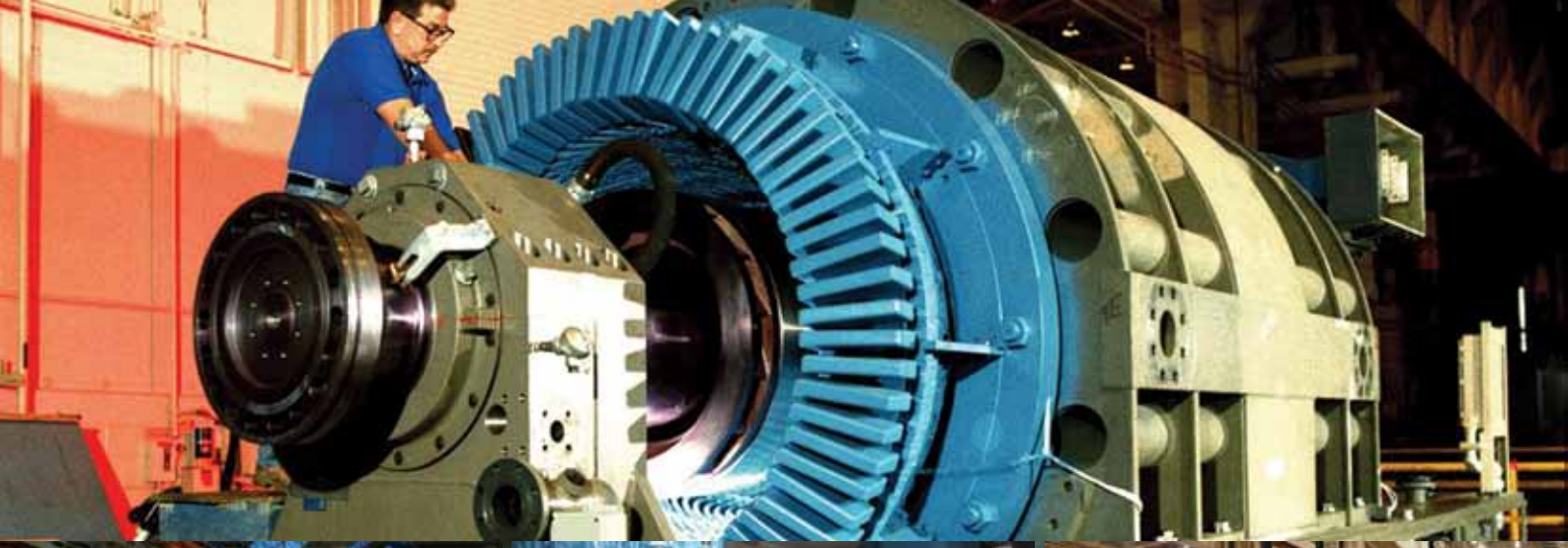


استراتژی‌های تعمیر و نگهداری ژنراتورهای نیروگاهی و تدوین برنامه تست

محمد فرشاد/ استادیار گروه مهندسی برق/ دانشکده علوم پایه و فنی مهندسی دانشگاه گنبد کاووس farshad@gonbad.ac.ir

حبیب رجبی مشهدی/ استاد گروه مهندسی برق/ دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد/ h_mashhadi@um.ac.ir

هاشم مرتضوی/ دکترای مهندسی برق/ استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه صنعتی سجاد/ h_mortazavi@yahoo.com

چکیده

یکی از راهکارهایی که جهت کاهش زمان خروج غیرمنتظره و افزایش قابلیت اطمینان تولید ژنراتورهای نیروگاهی وجود دارد، اجرای عملیات تعمیر و نگهداری در قالب یک برنامه مناسب و کارا می‌باشد. در چنین برنامه‌ای باید از تست‌هایی بهره برد که علاوه بر جامعیت و کارایی در تشخیص و کاهش زمان خروج غیرمنتظره ژنراتور، زمان خروج برنامه‌ریزی‌شده ژنراتورها را نیز کاهش دهند و تا حد امکان، اثرات مخرب کمتری بر عمر مفید و عملکرد فنی ژنراتورها داشته باشند. در این مقاله، ابتدا برخی استراتژی‌های متداول تعمیر و نگهداری در صنعت برق معرفی می‌شوند. در ادامه، پیشنهادهایی جهت تنظیم برنامه‌های تعمیر و نگهداری ژنراتورها در قالب استراتژی‌های تعمیر و نگهداری زمان‌بندی شده (TBM) و تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط (CBM) ارائه می‌شود.

کلمات کلیدی: ژنراتورهای نیروگاهی، استراتژی‌های تعمیر و نگهداری، تست‌های ژنراتور

۱- مقدمه

در صنعت برق، ژنراتورهای نیروگاهی جزو مهم‌ترین و حیاتی‌ترین عناصر محسوب می‌شوند و در مدار بودن آن‌ها و تولید انرژی الکتریکی مداوم جزو اهداف شرکت‌های برق و متولیان امر قرار دارد. از مدار خارج شدن یک ژنراتور به‌صورت ناگهانی و غیرمنتظره می‌تواند تبعات گسترده‌ای از جمله کمبود تولید در سیستم و اختلال در امر برق‌رسانی به مصرف‌کنندگان را به‌دنبال داشته باشد. یکی از راهکارهایی که جهت کاهش زمان خروج غیرمنتظره و افزایش قابلیت اطمینان تولید ژنراتورهای نیروگاهی وجود دارد، اجرای استراتژی‌ها و برنامه‌های تعمیر و نگهداری است.

از سالیان گذشته، سازندگان ژنراتورها و همچنین استانداردهای معتبر تست‌های مختلف و متنوعی برای اجرای برنامه‌های تعمیر و نگهداری پیشنهاد داده‌اند. جهت اجرای برخی از این تست‌ها نیاز به خروج ژنراتور از مدار به‌مدت طولانی می‌باشد. حتی ممکن است اجرای برخی از این تست‌ها اثرات مخربی در پی داشته و باعث کاهش عمر مفید ژنراتور گردند. مطالعات در خصوص بهبود و اصلاح نوع و نحوه اجرای تست‌های دوره‌ای ژنراتورها هم‌اکنون نیز ادامه داشته و

در سال‌های اخیر نیز تست‌ها و روش‌های اجرای جدیدی پیشنهاد شده‌اند. سیاست‌گذاری و استراتژی‌های مختلفی جهت اعمال تست‌ها و تنظیم برنامه‌های تعمیر و نگهداری ژنراتورها وجود دارد و حتی ممکن است نوع و نحوه اجرای تست‌ها با توجه به این استراتژی‌ها تغییر نماید. این تفاوت در استراتژی‌ها بیشتر به‌واسطه پیشرفت در فناوری تجهیزات تست و تحول و پدیدار شدن ایده‌های نو در روش اجرای تست‌ها و تحلیل نتایج بدست آمده است. انتخاب بهترین استراتژی تنظیم برنامه تعمیر و نگهداری و نحوه اجرای تست‌های دوره‌ای ژنراتورها مستلزم امکان‌سنجی از دیدگاه اقتصادی و فنی بوده و بهترین انتخاب با بررسی امکان دسترسی به تجهیزات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری لازم و آماده بودن بستر جهت اجرای تست‌ها از دیدگاه فیزیکی و نیروی انسانی متخصص تحقق خواهد یافت.

در این مقاله، ابتدا استراتژی‌های مختلف تعمیر و نگهداری معرفی می‌شوند. سپس، پیشنهاداتی جهت تنظیم برنامه‌های تعمیر و نگهداری ژنراتورها در قالب دو استراتژی تعمیر و نگهداری معمول و کارآمد ارائه می‌گردد. به‌طور کلی، هدف آن است که بتوان در قالب یک برنامه تعمیر و نگهداری مناسب از تست‌هایی بهره برد که در ضمن جامعیت و کارایی در تشخیص و کاهش زمان خروج غیرمنتظره ژنراتور، زمان خروج برنامه‌ریزی‌شده ژنراتورها را نیز کاهش دهند و تا حد امکان، اثرات مخرب کمتری بر عمر مفید و عملکرد فنی ژنراتورها داشته باشند.

۲- استراتژی‌های تعمیر و نگهداری

عملیات تعمیر و نگهداری ژنراتور به مجموعه فعالیت‌هایی گفته می‌شود که در راستای حفظ وضعیت عملیاتی و کارایی فنی ژنراتور در سطح مطلوب و یا بازگرداندن ژنراتور معیوب به چرخه تولید انرژی الکتریکی انجام می‌شوند و هدف کلی آن‌ها افزایش قابلیت اطمینان تولید و عمر مفید ژنراتور می‌باشد. چند استراتژی متداول تعمیر و نگهداری در صنعت برق عبارتند از[۳-۱]:

الف- تعمیر و نگهداری به‌هنگام از کارافتادگی (BM)[۱] یا تعمیر و نگهداری واکنشی(RM)[۲] یا تعمیر و نگهداری کار تا خرابی (RTF)[۳] یا تعمیر و نگهداری اصلاحی (CM)[۴]

ب- تعمیر و نگهداری زمان‌بندی‌شده (TBM)[۵] یا تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی‌شده (PM)[۶] یا تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PVM)[۷]

ج- تعمیر و نگهداری پیش‌بینانه (PDM)[۸]

د- تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط (CBM)[۹]

لازم به ذکر است که در برخی مراجع و متون علمی، استراتژی CBM با نام PDM نیز خوانده شده[۳، ۲] که در این مقاله، مفاهیم متفاوتی برای این دو استراتژی ارائه می‌شوند. انتخاب استراتژی‌های بیان‌شده کاملاً وابسته به مشخصات سیستم و تجهیز موردنظر و همچنین تابعی از دیدگاه مدیریت سیستم نسبت به هزینه و سود ناشی از تعمیر و نگهداری می‌باشد. در تنظیم برنامه‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات صنعت برق ممکن است ترکیبی از این استراتژی‌ها اتخاذ شود[۲].

تست‌های ژنراتور را به دو دسته کلی تست‌های off-line و مانیتورینگ on-line تقسیم می‌نمایند. برای اجرای تست‌های off-line، ژنراتور مورد تست باید برای مدت زمانی هر چند کوتاه خارج از مدار باشد. مانیتورینگ on-line ژنراتور، شامل عملیات و تست‌هایی می‌شود که بدون نیاز به خاموشی ژنراتور و در حالت بهره‌برداری از آن قابل تحقق هستند. ممکن است هر یک از این گروه تست‌های on-line و off-line و یا ترکیبی از آن‌ها، در قالب استراتژی‌های مختلف تعمیر و نگهداری و با توجه به قیود و امکانات موجود انتخاب گردند.

۲-۱- تعمیر و نگهداری به‌هنگام از کار افتادگی (BM)

این نوع استراتژی تعمیر و نگهداری به‌نام‌های دیگری همچون RM RTF و یا CM نیز شناخته می‌شود[۴]. در این استراتژی، تا زمانی که تجهیز از کار نیافتد و مادامی که خرابی قابل رویت به‌صورت فیزیکی و یا در خروجی رخ ندهد، هیچ‌گونه عملیات تعمیراتی انجام نمی‌شود. در صورت اعمال این استراتژی بر روی یک ژنراتور نیروگاهی ممکن است اثرات ناشی از وقوع خرابی احتمالی به حدی بزرگ و وسیع باشد که دیگر تعمیر خرابی توجیه اقتصادی نداشته و یا ژنراتور موردنظر کارایی اولیه را از دست بدهد[۵، ۳-۱].

۲-۲- تعمیر و نگهداری زمان‌بندی‌شده (TBM)

این نوع استراتژی تعمیر و نگهداری به‌نام‌های دیگری همچون PM و یا PVM نیز خوانده می‌شود. در این نوع استراتژی، فعالیت‌های تعمیر و نگهداری تجهیز در بازه‌های زمانی مشخص و یا در تعداد ساعات و سیکل‌های بهره‌برداری معینی صورت می‌پذیرد. نوع تست‌ها و روش‌های اعمالی و همچنین زمان‌بندی تعمیرات معمولاً بر اساس پیشنهاد سازندگان ژنراتورها و همچنین استانداردهای معتبر موجود تنظیم می‌شوند، که برحسب معمول حاصل تجربیات سالیان متمادی بهره‌برداری ژنراتورها بوده و با توجه به طراحی و قابلیت اطمینان قطعات ژنراتور، عمر ژنراتور، شرایط آب و هوایی، میزان دسترسی به پرسنل، میزان تقاضای مصرف، هماهنگی با سایر واحدهای موجود در سیستم موردنظر و موارد دیگری از این قبیل ارائه می‌گردند. مثلاً در نیروگاه‌های هسته‌ای سیکل‌های سوخت‌گیری دوباره عامل اصلی در تعیین بازه زمانی اجرای عملیات تعمیر و نگهداری تجهیزات مهمی همچون ژنراتورها محسوب می‌شوند (بازه زمانی در حدود ۱۸ ماه)[۶]. اجرای زمان بندی‌شده عملیات تعمیر و نگهداری به‌عنوان دیدگاهی غالب جهت تعمیر و نگهداری ژنراتورهای نیروگاهی محسوب می‌شود[۲، ۱]. این استراتژی برای تجهیزات و بخش‌هایی که مشخصه فرسایشی و استهلاکی معینی دارند می‌تواند کارا و مناسب باشد، ولی برای خرابی‌های تصادفی نمی‌تواند نگرانی‌ها را کاملاً برطرف سازد[۷].

۲-۳- تعمیر و نگهداری پیش‌بینانه (PDM)

در این استراتژی، زمان و نوع فعالیت‌های تعمیر و نگهداری بر مبنای محاسبات آماری و احتمالاتی پیش‌بینی می‌شود. در این محاسبات، پارامترهایی همچون زمان متوسط بین خرابی‌های (MTBF)[۱۰] اجزای مهم، عمر اجزای عایقی، نوع سیستم عایقی، سیکل‌های بارگیری و رخدادهای بهره‌برداری غیرعادی مدنظر قرار می‌گیرند. باید توجه داشت که استراتژی PDM همچون استراتژی TBM، در بیشتر مواقع نمی‌تواند زمان بهینه اجرای عملیات بازبینی، تعمیر و نگهداری و یا تعویض قطعه تجهیزات پیچیده‌ای همچون ژنراتورهای بزرگ نیروگاهی را مشخص کند[۱].

۲-۴- تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط (CBM)

در سال‌های اخیر، با پیشرفت روش‌ها و تکنیک‌های تشخیص عیب on-line، استراتژی CBM طرفداران فراوانی پیدا کرده است. این استراتژی جزو جدیدترین روش‌ها برای تعیین زمان اجرای عملیات بازبینی، تعمیر و نگهداری و یا تعویض قطعه تجهیزات نیروگاهی همچون ژنراتور محسوب می‌شود. در استراتژی CBM، علاوه بر اجرای برخی تست‌های off-line، عمل مانیتورینگ on-line ژنراتور نیز به‌وسیله سنسورهای مربوط اجرا می‌شود که عیب را قبل از وقوع و یا بحرانی شدن آن از روی نشانه‌ها و علایم قابل شناسایی می‌سازد[۸]. سنسورها را می‌توان در زمان ساخت ژنراتور و در کارخانه سازنده

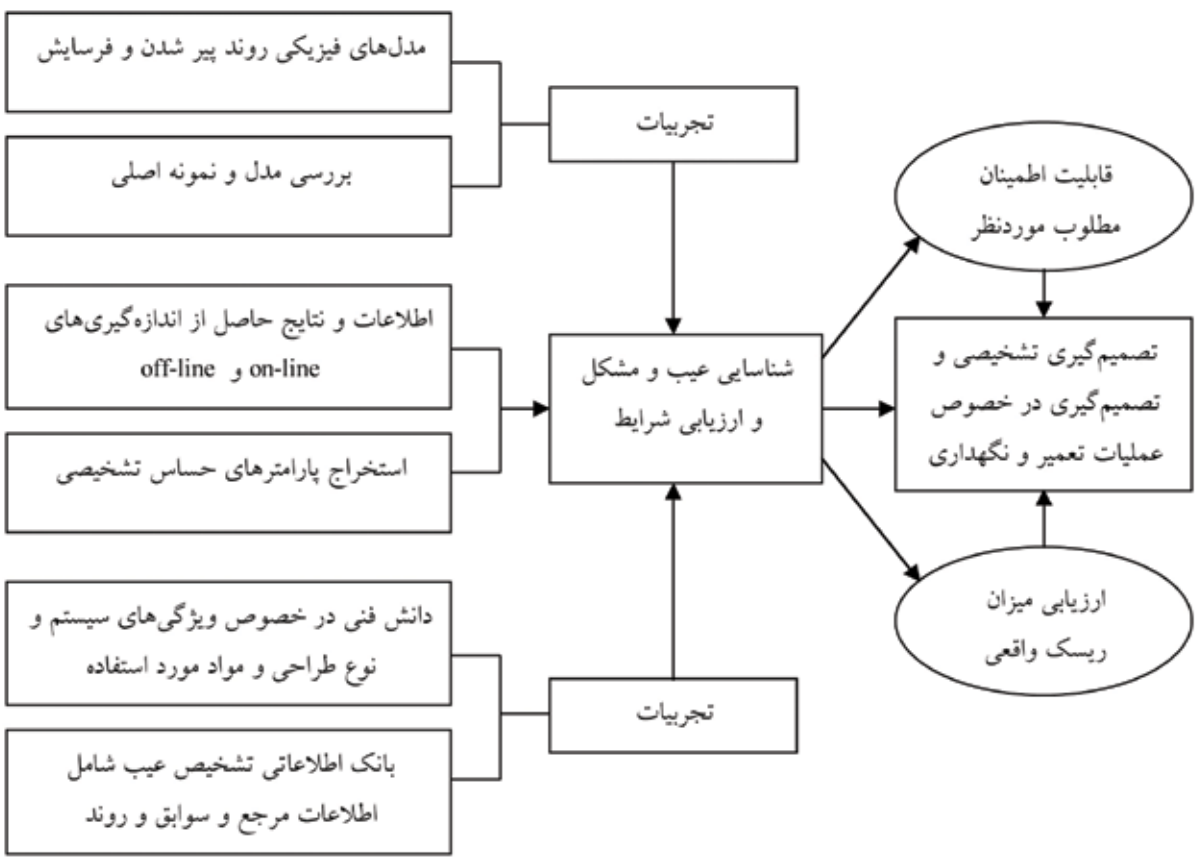
و یا در یکی از خروجی‌های تعمیراتی ژنراتور نصب نمود. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در نصب و راه‌اندازی سیستم مانیتورینگ، هزینه اولیه نصب سنسورها بر روی ژنراتور، هزینه آموزش نیروی انسانی ماهر در مانیتورینگ و ارزیابی نتایج و هزینه نرم‌افزاری جزو هزینه‌های کلی این استراتژی محسوب می‌شوند. با وجود هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به نسبت بالا جهت نصب تجهیزات اندازه‌گیری و ابزاردقیق، اتخاذ این استراتژی می‌تواند باعث افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های ناشی از خروج برنامه‌ریزی‌شده و برنامه‌ریزی‌نشده ژنراتور شود[۳، ۱]. در شکل(۱)، دانش زیربنایی لازم در فرآیند تصمیم‌گیری تشخیصی بر اساس CBM نمایش داده شده‌است. همان‌گونه که پیداست، اعمال استراتژی CBM در خصوص ژنراتورها چیزی فراتر از مانیتورینگ صرف پارامترها و حدس زدن در خصوص مفهوم اطلاعات اندازه‌گیری شده است[۹].

۳- تست‌های پیشنهادی در قالب استراتژی TBM

در اینجا لیستی پیشنهاد می‌شود که شامل تست‌های off-line مفید جهت اجرا بر روی ژنراتورهای نیروگاهی با روتور استوانه‌ای است. این تست‌های off-line در قالب استراتژی TBM قابلیت پوشش بسیاری از عیوب را خواهند داشت. تست‌های مورد نظر جهت استاتور در جدول (۱) و تست‌های مربوط به روتور و بخش‌های جانبی در جدول (۲) ارائه شده‌اند. نکته کلیدی در اعمال تست‌های off-line، بهره‌گیری از روش‌ها، تجهیزات و فناوری جدید در اجرای تست است که می‌تواند در افزایش کارایی تست و همچنین کاهش هزینه و زمان اجرا بسیار موثر باشد. لازم به ذکر است، بازه زمانی اجرای تست‌های پیشنهادی در جداول (۱) و (۲) لزوماً با یکدیگر برابر نبوده و به عبارت دیگر ممکن است برخی از این تست‌ها به صورت هم‌زمان اجرا نشوند. جهت اطلاع از بازه‌های زمانی و نحوه اجرای دقیق هر یک از تست‌های پیشنهادی نیز می‌توان به استانداردهای مربوطه شامل IEEE Std 43،IEEE Std 62.2،IEEE Std 115، ANSI/IEEE Std 56، IEEE Std 118، IEEE Std 4، IEEE Std 95، IEEE Std C50.13، ANSI/NEMA MG 1،ANSI/IEEE Std 433، IEEE Std 522، IEEE Std 286، IEC/TR 60894، IEEE Std 1434، IEC 60270، IEEE Std 67 و IEEE Std 1129 مراجعه نمود. البته در خصوص تعیین بازه‌های زمانی اجرای تست‌های بیان‌شده، مراجعه به توصیه‌ها و پیشنهادات ارائه شده توسط سازنده و یا مشورت با سازنده ژنراتور مورد تست نیز می‌تواند راهگشا باشد. باید توجه نمود که بازه‌های زمانی اجرای تست‌ها کاملاً به وضعیت کنونی ژنراتور، عمر و سابقه بهره‌برداری ژنراتور و همچنین سابقه تعمیراتی و نتایج تست‌های گذشته وابسته است. ممکن است متخصص اجرای تست‌های ژنراتور با مراجعه به استاندارد و مشورت با سازنده و همچنین با بررسی وضعیت حال و گذشته ژنراتور، بازه اجرای تست خاصی را در خصوص یک ژنراتور هر شش ماه یک بار تعیین کند و برای ژنراتور دیگر، تشخیص بدهد که همان تست هر سه ماه یک‌بار اجرا شود.

۴- تست‌های پیشنهادی در قالب استراتژی CBM

در اینجا لیستی پیشنهاد می‌شود که شامل تست‌های on-line مفید جهت اجرا بر روی ژنراتورهای نیروگاهی با روتور استوانه‌ای (خنک‌شونده توسط هیدروژن یا هوا) می‌باشد. این تست‌های On-line در قالب استراتژی CBM قابلیت پوشش بخشی از عیوب



شکل ۱: دانش زیربنایی لازم در فرآیند تصمیم‌گیری تشخیصی بر اساس استراتژی CBM[۹]

جدول ۱: تست‌های off-line پیشنهادی در استراتژی TBM جهت اجرا بر روی استاتور ژنراتورهای نیروگاهی روتور استوانه‌ای

	نوع تست	نوع عیب تشخیصی
استاتور	بازرسی چشمی و ظاهری تمامی بخش‌های استاتور همچون سیم‌پیچی و هسته	عیوب قابل مشاهده و همچنین عیوبی که با اندازه‌گیری ساده قابل شناسایی هستند
	تست مقاومت عایقی سیم‌پیچی (IR)	مشکلات عایقی سیم‌پیچی استاتور
	تست شاخص پلاریزاسیون سیم‌پیچی (PI)	مشکلات عایقی سیم‌پیچی استاتور
	تست مقاومت DC سیم‌پیچی	عیوبی همچون اتصال کوتاه، اتصالات نامناسب، اتصالات اشتباه و مدار باز در سیم‌پیچی استاتور
	تست عایقی HiPot سیم‌پیچی	مشکلات عایقی سیم‌پیچی استاتور
	تست ضریب توان (یا اتلاف) و تست ضریب توان (یا اتلاف) افزایشی	مشکلات عایقی ناشی از آسیب‌های حرارتی و جذب رطوبت در سیم‌پیچی و بوشینگ
	تست تخلیه جزئی(PD)	تخلیه جزئی و مشکلات و عیوبی که منجر به تخلیه جزئی می‌شوند
	تست آشکارساز دمایی سیم‌پیچی	مشکلات در عایق، پیوستگی اتصالات و کالیبراسیون آشکارساز دمایی
	تست عایقی لوله خنک کننده هادی	مقادیر نامتعارف مقاومت لوله به لوله و مقاومت بین لوله و هادی مسی
	تست محکمی گوه شیار	شل بودن گوه‌های شیارهای استاتور
	تست محکمی هسته	شل بودن اتصالات ورقه‌های هسته
	تست شار کم هسته (EL-CID)	عیوب عایقی بین لایه‌های هسته
	تست مقاومت عایقی بولت‌های میانی هسته	عیوب عایقی بولت‌های میانی هسته ناشی از شل شدن مهره‌ها و حرکت ورقه‌ها
	تست مقاومت عایقی شیلد شار هسته	مشکلات عایق بین بخش‌های مختلف شیلد شار
	تست‌های مربوط به سیستم خنک کنندگی استاتور (انتخاب با توجه به نوع سیستم)	عیوب احتمالی در انواع سیستم‌های خنک‌کنندگی
	تست مقاومت تماس پوشش نیمه هادی	شل بودن سیم‌پیچی داخل شیار و یا زوال پوشش نیمه هادی
	تست ارتعاش و رزونانس	وقوع رزونانس و شل بودن سر سیم‌پیچی استاتور و ارتعاش فریم و هسته
	تست جابه‌جاسازی گروهی سیم‌پیچی	محل رشته هادی‌های صدمه دیده و یا عیوب دیگری که باعث بروز مقاومت بالا می‌شوند

را خواهند داشت. تست‌های on-line پیشنهادی در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، متاسفانه هنوز راهی برای مانیتورینگ on-line تمامی فرآیندهای خرابی احتمالی ژنراتورهای نیروگاهی ارائه نشده‌است و برای پوشش این نارسایی‌ها و همچنین گاهاً جهت اطمینان بیشتر از نتایج حاصله، نیاز به اطلاعات و تست‌های تکمیلی off-line وجود دارد. انتخاب صحیح نوع اطلاعات و تست‌های تکمیلی off-line به‌لحاظ لزوم اجرا و کارایی در پوشش عیوب احتمالی ژنراتور از نکات کلیدی در اجرای استراتژی CBM است. برخی از تست‌های off-line پیشنهادی در جداول(۱) و (۲)که مربوط به فرآیندهای خرابی عایق می‌باشند یا آن مواردی که عیوب تشخیصی آن‌ها در مانیتورینگ on-line پیشنهادی قابلیت شناسایی را ندارند، همچنان باید اجرا گردند. همچنین بعضی از تست‌های بیان‌شده همچون تخلیه جزئی off-line در صورت بروز علایم تخلیه جزئی در مانیتورینگ on-line و جهت تایید نتایج آن و یا تعیین دقیق‌تر محل عیب می‌توانند اجرا شوند. به‌عنوان مثالی دیگر، تست‌های عایقی حلقه یا تست‌های تشخیص محل حلقه‌های اتصال کوتاه در سیم‌پیچی روتور را می‌توان در صورت تشخیص چنین عیب‌هایی در طی مانیتورینگ و آنالیز ارتعاشات یا مانیتورینگ شار روتور و در راستای تایید نتایج آن‌ها و یا تعیین دقیق‌تر محل عیب اعمال کرد. به هر حال، در صورت اجرای صحیح و ایده‌آل مانیتورینگ on-line در خصوص ژنراتورهای نیروگاهی می‌توان دست‌کم تعداد تست‌های off-line را در بازه‌های زمانی مناسب اعمال نمود. باید دقت کرد که ممکن است نیاز به اجرای بسیاری از تست‌های off-line با بکار بردن مانیتورینگ on-line به‌طور کامل مرتفع نگردد، ولی بازه‌های زمانی نیاز به اجرای این تست‌ها به‌طور مناسب تنظیم خواهند شد. به‌عبارت دیگر، بسیاری

جدول ۲: تست‌های off-line پیشنهادی در قالب استراتژی TBM جهت اجرا بر روی روتور و بخش‌های جانبی ژنراتورهای نیروگاهی با روتور استوانه‌ای

	نوع تست	نوع عیب تشخیصی
روتور	بازرسی چشمی و ظاهری تمامی بخش‌های روتور اعم از الکتریکی و مکانیکی	عیوب قابل مشاهده و همچنین عیوبی که با اندازه‌گیری ساده قابل شناسایی هستند
	تست مقاومت عایقی سیم‌پیچی (IR)	مشکلات عایقی سیم‌پیچی روتور
	تست شاخص پلاریزاسیون سیم‌پیچی (PI)	مشکلات عایقی سیم‌پیچی روتور
	تست مقاومت DC سیم‌پیچی	عیوبی همچون اتصال کوتاه، اتصالات نامناسب، اتصالات اشتباه و مدار باز در سیم‌پیچی روتور
	تست تشخیص محل خطای زمین در سیم‌پیچی میدان	محل خطای زمین در سیم‌پیچی روتور
	تست‌های عایقی حلقه	اتصال کوتاه در حلقه‌های سیم‌پیچی روتور
	تست تشخیص محل اتصال کوتاه حلقه	محل حلقه‌های اتصال کوتاه در سیم‌پیچی روتور
	تست جریان گردابی	حفره، شکاف، خوردگی و یا عیوب مشابه در بخش‌های مکانیکی فلزی مانند رینگ‌های نگهدارنده و دندانه روتور
	تست اولتراسونیک	حفره، شکاف و یا عیوب مشابه در بخش‌های مکانیکی فلزی مانند رینگ‌های نگهدارنده و هسته یکپارچه
	تست مایع نافذ	شکستگی و یا خرابی‌های اساسی در رینگ‌های نگهدارنده روتور و دیگر بخش‌های تحت فشار
	تست نشتی منفذ روتور	عیب در آب بندی اتصالات میله‌ای شعاعی
بخش‌های جانبی	بازرسی چشمی و ظاهری تمامی بخش‌های جانبی ژنراتور همچون سیستم خنک‌کننده، یاتاقان‌ها، Brush-Rigging، فاصله هوایی	عیوب قابل مشاهده و همچنین عیوبی که با اندازه‌گیری ساده قابل شناسایی هستند
	تست‌های مربوط به سیستم خنک‌کننده ژنراتور (انتخاب با توجه به نوع سیستم)	عیوب احتمالی در انواع سیستم‌های خنک‌کنندگی
	تست عایقی یاتاقان	زمین شدن شافت روتور از طریق یاتاقان
	تست عایقی سیستم آب بندی هیدروژن	زمین شدن شافت روتور از طریق سیستم آب بندی هیدروژن
	تست عایقی Brush-Rigging	عیب در سیستم عایقی Brush-Rigging

جدول ۳: تست‌های on-line پیشنهادی در قالب استراتژی CBM جهت اجرا بر روی ژنراتورهای نیروگاهی با روتور استوانه‌ای

نوع عیب تشخیصی	نوع مانیتورینگ
اضافه دمای زیان‌آور بخش‌های مختلف ژنراتور و همچنین عیوبی که منجر به اضافه دما می‌شوند	مانیتورینگ حرارتی
گرم شدن شدید عایق ژنراتور و محل گرما	مانیتورینگ شرایط ژنراتور (GCM) به همراه ترکیبات علامت‌گذار
تخلیه جزئی در هوا (بر روی سطح سیم‌پیچی یا شمش استاتور) و مشکلات و عیوبی که منجر به این نوع تخلیه جزئی می‌شوند	مانیتورینگ گاز اوزون
تخلیه جزئی و مشکلات و عیوبی که منجر به تخلیه جزئی می‌شوند	مانیتورینگ on-line تخلیه جزئی (PD)
اتصال کوتاه در حلقه‌های سیم‌پیچی روتور و محل حلقه‌های اتصالی	مانیتورینگ شار روتور
عیب در سیستم زمین‌کننده شافت روتور	مانیتورینگ جریان و ولتاژ شافت
وجود و تجمع مایعات در ژنراتور و دلیل آن	مانیتورینگ مایعات یا رطوبت در ژنراتور
عیوبی که در پارامترهای الکتریکی نمود دارند	مانیتورینگ پارامترهای الکتریکی
ارتعاشات غیرعادی بخش‌های مختلف ژنراتور و همچنین عیوبی که منجر به این ارتعاشات می‌شوند	مانیتورینگ و آنالیز ارتعاشات

از تست‌های off-line زمانی اجرا خواهند شد که بی‌گمان به اجرای آن‌ها نیاز است. همچنین با بکارگیری مانیتورینگ on-line، بسیاری از عیوب کوچک در مراحل اولیه وقوع و قبل از گسترش و وخیم شدن شرایط، مورد تشخیص قرار خواهند گرفت.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، به معرفی چند استراتژی معمول تعمیر و نگهداری در صنعت برق پرداخته شد. در بین این استراتژی‌ها، استراتژی تعمیر و نگهداری زمان‌بندی‌شده(TBM) واستراتژی مبتنی بر شرایط (CBM)

جزو استراتژی‌های متداول‌تر جهت اعمال بر روی ژنراتورهای نیروگاهی محسوب می‌شوند. هم اکنون استراتژی TBM با وجود تمامی کاستی‌ها و هزینه‌هایی که می‌تواند در بر داشته باشد، در خصوص بیشتر تجهیزات صنعت برق اجرا می‌شود. از سوی دیگر، استراتژی CBM با توجه به قابلیت‌هایی که دارد و پیشرفت‌هایی که در زمینه تجهیزات اندازه‌گیری و ابزار دقیق صورت پذیرفته، به‌عنوان یک جایگزین یا مکمل مناسب شناخته شده‌است. اتخاذ هر استراتژی تعمیر و نگهداری در قالب انتخاب روش‌های تست مناسب معنا می‌یابد. انتخاب تست‌های ژنراتورها باید در راستای پوشش تمامی عیوب و با کم‌ترین هزینه‌ها صورت پذیرد. برای کمینه نمودن هزینه‌ها باید هزینه‌های عملیات تعمیر و نگهداری، هزینه‌های مربوط به خروج‌های برنامه‌ریزی‌شده یا اجباری ژنراتور و همچنین هزینه‌های ناشی از گسترش و بدخیم شدن عیوب کوچک مدنظر قرار گیرند. در این مقاله، تست‌هایی جهت تنظیم برنامه‌های تعمیر و نگهداری ژنراتورها در قالب استراتژی‌های TBM و CBM پیشنهاد شدند. در تست‌های پیشنهادی، تمرکز بر روی ژنراتورهای با روتور استوانه‌ای (خنک‌شونده توسط هیدروژن یا هوا) بوده‌است.

قدردانی: در اینجا لازم است که از شرکت برق منطقه‌ای خراسان بابت حمایت از انجام این تحقیق تشکر و قدردانی شود.

پی‌نوشت‌ها

1 Breakdown maintenance
2 Reactive maintenance
3 Run-to-failure
4 Corrective maintenance
5 Time-based maintenance
6 Planned maintenance
7 Preventive maintenance
8 Predictive maintenance
9 Condition-based maintenance
10 Mean time between failures

مراجع

[1] Klempner, G. and Kerszenbaum I., "Operation and maintenance of large turbo-generators," Illustrated edition, Wiley-IEEE Press, ISBN 978-0471614470, 2004.
[2] Gill, P., "Electrical power equipment maintenance and testing," 2nd edition, CRC, ISBN 978-1574446562, 2008.
[3] Stone G. C., et al, "Electrical insulation for rotating machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair," 1st edition, Wiley-IEEE Press, ISBN 978-0471445067, 2004.
[4] Xing, B. and Marwala, T., "Introduction to Smart Maintenance," in Smart Maintenance for Human–Robot Interaction: An Intelligent Search Algorithmic Perspective, Cham: Springer International Publishing, ISBN 978-3319674803, 2018, pp. 21-31.
[5] Fu, C., et al, "Predictive Maintenance in Intelligent-Control-Maintenance-Management System for Hydroelectric Generating Unit," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, PP. 179-186, March 2004.
[6] Laird, T. and Hoof, M., "An Economic Strategy for Turbine Generator Condition Based Maintenance," Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, (Indianapolis- USA), PP. 440-445, September 2004.
[7] Forsthoffer W. E., "Forsthoffer's Rotating Equipment Handbooks- vol 5: Reliability Optimization through Component Condition and Root Cause Analysis," Elsevier Science & Technology Books, ISBN 978-1856174718, 2005.
[8] Zhao, H., et al, "A condition-based opportunistic maintenance strategy for multi-component system," Structural Health Monitoring, in press, 2018.
[9] Hoof, M. and Laird, T., "A Strategy for Advanced Condition Based Maintenance of Large Generators," Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference, PP. 463-468, September 2003.

***

ادامه از صفحه ۲۵

همانطور که ملاحظه می‌شود در مدت زمان شروع تا کامل شدن سایه، توان تولیدی ژنراتورهای سنکرون سیستم قدرت افزایش می‌یابد.
در ادامه، شبیه‌سازی به‌منظور تعیین بیشترین درصد نفوذ مجاز فتوولتاییک از دیدگاه پایداری زاویه روتور و فرکانس انجام‌شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است با افزایش میزان نفوذ فتوولتاییک بیشتر از ۱۷٪، زاویه روتور ناپایدار می‌شود. همچنین مطابق شکل (۱۱) با افزایش میزان نفوذ به ۱۰٪ فرکانس شبکه از محدوده مجاز خارج می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

با افزایش سطح نفوذ تولید فتوولتاییک در سیستم قدرت، اینرسی و در نتیجه پایداری دینامیکی شبکه به‌شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده، مشاهده می‌شود هر چه میزان نفوذ تولید فتوولتاییک در شرایط سایه بیشتر می‌شود فرکانس و سطح ولتاژ باس‌ها از حالت قابل قبول فاصله بیشتری می‌گیرند. به این ترتیب و با توجه به فراوانی قابل توجه وقوع پدیده سایه نسبت به خطاهای معمول شبکه، لازم است در طرح‌های توسعه تولید پراکنده، مساله پایداری شبکه قدرت در شرایط خاص مورد توجه ویژه‌ای قرار گیرد.

۶-مراجع

[1] M. S. A. Mohammed Masum Siraj Khan, Ariful Haque, Nahid-Al-Masood, "Stability analysis of power system with the penetration of photovoltaic based generation," International Journal of Energy and Power Engineering, Vol. 2, No. 2, 2013, pp. 84-89. doi: 10.11648/
[2] S. Eftekharnejad, V. Vittal, G. T. Heydt, B. Keel, and J. Loehr, "Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems," IEEE transactions on power systems, Vol. 28, No. 2, 2013, pp. 893-901.
[3] A. Hoballah, "Power system dynamic behavior with large scale solar energy integration," in 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2015, pp. 1-6.
[4] Y. T. Tan, D. S. Kirschen, and N. Jenkins, "A model of PV generation suitable for stability analysis," IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 19, No. 4, 2004, pp. 748-755.
[5] www.Ren21.net
[6] H. Ziar, S. Mansourpour, A. Salimi, and E. Afjei, "Analysis of shadow effect in photovoltaic arrays using binary coding method," in 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), , 2011, pp. 1-6.
[7] S. Eftekharnejad, V. Vittal, G. T. Heydt, B. Keel, and J. Loehr, "Small signal stability assessment of power systems with increased penetration of photovoltaic generation: A case study," IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 4, N. 4, 2013, pp. 960-967.
[8] S. Eftekharnejad, "The Impact of increased penetration of photovoltaic generation on smart grids," Arizona State University, 2012.
[۹] محمد نیک خوی، «مدل سازی و بررسی اثر سایه بر پایداری دینامیکی شبکه قدرت در شرایط نفوذ بالای فتوولتائیک» پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق، موسسه آموزش عالی خراسان، مشهد، ایران، ۱۳۹۶

***