

مدل تعمیر و نگهداری هوشمند مبتنی بر قابلیت اطمینان برای مولد سیستم توان

محمد رضا محمدیان آسیاب (نویسنده مسئول)^۱، جابر کوچکی سفد داربنی^۲

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشکده مکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج
mohammadrezamohammadiyan28@yahoo.com

^۲ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشکده مکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج jabber.koochaki@gmail.com

چکیده

به منظور ارائه خدمات و عرضه قابل اطمینان در بیشتر اوقات، تمام مولدها در یک شبکه برق باید در معرض یک طرح تعمیر و نگهداری موثر قرار گیرند. هرچه نگهداری اجرا شده هوشمندتر باشد، عملکرد بهتری از سیستم خواهد داشت. با این حال، یک چالش به حداقل رساندن هزینه‌های نگهداری است که منافع را به خطر نمی‌اندازد. با توجه به این حقایق، این مطالعه یک رویکرد تعمیر و نگهداری هوشمند مبتنی بر قابلیت اطمینان مولدها را برای محاسبه سود اقتصادی حداکثر - خالص ارائه می‌دهد. این رویکرد از نوع مدل کیجیما ۱ برای توصیف تاثیر نگهداری بر سن مجازی اجزا و زنجیره مارکوف برای مدل کردن طول عمر اجزا به دست آمده است. برای دستیابی به یک مدل واقعی‌تر، شکست مولدها و نرخ‌های تعمیر متغیرهای وابسته به زمان در نظر گرفته می‌شوند. سپس، برنامه نگهداری پیشگیرانه بهینه با استفاده از یک الگوریتم پیشرفته به نام بهینه‌سازی ازدحام ذرات کوانتومی تسریع شده در ترکیب با شبیه‌سازی مونت کارلو متوالی به دست می‌آید.

واژه‌های کلیدی

قابلیت اطمینان، تعمیر و نگهداری، بهینه‌سازی، الگوریتم، مولد سیستم توان

لطفاً چکیده مقاله در صفحه اول و اصل مقاله در صفحه دوم به بعد نگارش شود.

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

سیستم‌های توان برای دستیابی به سطح بالاتری از قابلیت اطمینان به نگهداری تطبیقی و دینامیکی اجزای خود نیاز دارند. چنین راهبردهای تعمیر و نگهداری برای محدود کردن خرابی و به حداقل رساندن خرابی اجزای حیاتی هستند [۱]. تعمیر و نگهداری می‌تواند به طور گسترده به دو طرح اصلی طبقه‌بندی شود: (۱) تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM)، که در فواصل از پیش تعیین شده و یا مطابق با معیارهای تجویز شده، با هدف کاهش خطر شکست و یا تخریب عملکرد تجهیزات انجام می‌شود [۲]؛ (۲) نگهداری اصلاحی (CM)، که پس از تشخیص خطا انجام می‌شود و با هدف بازگرداندن یک دارایی به شرایطی است که در آن می‌تواند عملکرد مورد نظر خود را انجام دهد [۲]. تعمیر و نگهداری پیشگیرانه دوره‌ای (PPM) یک راهبرد معمول است که در بسیاری از اجزای سیستم توان استفاده می‌شود. این راهبرد، طرح تعمیر و نگهداری معمول را با توجه به مشخصات کارخانه پیشنهاد می‌کند. اگرچه PPM عملکرد قابل اعتمادی از اجزا را فراهم می‌کند، چندین مطالعه [۳، ۴] اثبات کرده‌اند که ممکن است لزوماً منجر به مزایای بهینه نشود. این به این دلیل است که PPM عملیات سیستم ترکیبی را در نظر نمی‌گیرد، در نتیجه، تعداد نگهداری بالا است و بنابراین هزینه نگهداری نیز بالا است. به همین دلیل، رویکردهای جدید نگهداری در دو دهه اخیر توسعه داده شده‌اند [۵ - ۷]. در میان راهبردهای تعمیر و نگهداری پیشرفته، متون موضوع تعمیر و نگهداری با محوریت قابلیت اطمینان (RCM) [۷] را به عنوان یکی از محبوب‌ترین راهبردها نشان می‌دهد. آزمایش RCM یک مساله بهینه‌سازی زمان‌بندی تعمیر و نگهداری را پیشنهاد می‌کند که هدف آن به حداقل رساندن هزینه تعمیر و نگهداری در حالی است که قابلیت اطمینان کافی سیستم را حفظ می‌کند [۸]. مقالات، تغییرات RCM را با ترکیب روش‌های بهینه‌سازی مختلف مانند الگوریتم ژنتیک [۹]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۱۰] و بهینه‌سازی بازپخت [۱۱] گزارش می‌دهند. اگرچه این مطالعات مدل‌های پیشرفته‌ای را برای تضمین در دسترس بودن اجزا پیشنهاد می‌کنند، اشکال اصلی در مدل قابلیت اطمینان اجزا است. در این زمینه، مقالات مدل قابلیت اطمینان جز را به عنوان فرآیند مارکوف بین حالت «عملیاتی» و «در حال کار» نشان می‌دهند [۱۲]. این ایده دو اشکال اصلی را به همراه دارد. در مثال اول، نرخ شکست و تعمیر مولفه‌ها با استفاده از توزیع نمایی [۱۲]، تخمین عمر و به دست آوردن دقت کم‌تر در ارزیابی قابلیت اطمینان مدل‌سازی شده‌است. اگرچه مطالعات اخیر در [۷، ۸] توزیع ویبول را به صورت RCM برای مدل‌سازی اثر پیری پیشنهاد نموده‌اند، اما تحلیل‌های عمیق‌تر بر روی این موارد نشان می‌دهد که ارزیابی تخریب جز به طور دقیق منعکس نشده است. در مثال دوم، فرآیند نوسازی متناوب، شمول PM را در مدل در نظر نمی‌گیرد و تنها CM را در نظر می‌گیرد. مفهوم نگهداری به الگوی جدیدی از نگهداری هوشمند (SM) رسیده‌است. چندین محقق این دیدگاه را براساس برخی کاربردها با در نظر گرفتن بازرسی‌های هوشمند، دستگاه‌های هوشمند، خدمات هوشمند و مدیریت دارایی پیشنهاد کرده‌اند. در این راستا، فاهاتی و همکاران [۱۳] یک طرح SM با پیاده‌سازی دستگاه‌های هوشمند برای نظارت بر عملکرد ترانسفورماتورها و قطع‌کننده‌های مدار در یک سیستم توزیع در مقیاس کوچک پیشنهاد کردند. این مطالعه شامل یک چارچوب ریاضی است که امکان کمی کردن تاثیر نظارت سیستم بر قابلیت اطمینان سیستم را به صورت تحلیلی فراهم می‌کند. پس از آن، مطالعه با ادغام یک شاخص جدید به نام «درجه نظارت» توسعه می‌یابد [۱۴]. چشم‌انداز SM با اجرای بازرسی هوشمند و خدمات هوشمند در [۱۵] پیشنهاد شده‌است. این روش براساس مبدل جریان گردابی است که توسط یک ربات بازرسی برای ثبت وضعیت خطوط انتقال انجام می‌شود. این رویکرد مزایای موثری را برای برنامه‌ریزی یک برنامه SM فراهم می‌کند. چارچوب نظری SM مبتنی بر دارایی‌های مدیریتی در [۱۶] ارائه شده‌است. چنین مطالعه‌ای یک سیستم پشتیبانی تصمیم SM را نشان می‌دهد که از تحلیل داده‌های بزرگ شرکت استفاده می‌کند، که برای ترانسفورماتورها و قطع‌کننده‌های مدار به کار می‌رود. دیدگاه جامع SM مبتنی بر دارایی‌های مدیریتی در [۱۷] ارائه شده‌است. در این مقاله، نویسندگان روشی را برای مقابله با سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای تصمیم‌گیری متوسط و بلند مدت بهینه شرکت‌های توزیع در حضور جریمه - پاداش پیشنهاد می‌کنند. در سطح تولید توان، تحقیقات اخیر رویکردهای مختلف SM را براساس مساله برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری مولدها ارائه می‌دهند. با این حال، چنین رویکردهایی شفافیت محدودی از چارچوب‌های ریاضی را فراهم می‌کنند که می‌تواند به طور موثر تاثیر برنامه‌ریزی طولانی‌مدت PM را بر تخریب (ناشی از پیری) مولدها به دست آورد. به عنوان مثال، بالاجی و همکاران [۱۸] یک روش SM را با استفاده از تکرار لاندای معمولی در ترکیب با الگوریتم تکامل تفاضلی برای به حداقل رساندن هزینه عملیات کلی مولد در حالی که محدودیت‌های عملیاتی سیستم توان را برآورده می‌کند، پیشنهاد کردند. اشکال اصلی [۱۸] عدم در نظر گرفتن پارامترهای قابلیت اطمینان مولدها مانند نرخ خرابی و تعمیر است. بنابراین، اختلالات ناگهانی ناشی از خرابی مولد تصادفی در تحلیل در نظر گرفته

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

نمی‌شوند، که عدم قطعیت را به نتایج می‌آورد. مساله مشابه در [۱۹] نیز دیده می‌شود، با این تفاوت که نویسندگان الگوریتم جستجوی فاخته عدد صحیح گسسته را پیشنهاد کرده‌اند. در [۲۰، ۲۱] نویسندگان یک چشم‌انداز از SM را با استفاده از برنامه‌ریزی چند جمله‌ای عدد صحیح مختلط تصادفی برای به دست آوردن یک طرح PM فعال که قابلیت اطمینان سیستم را به حداکثر می‌رساند، پیشنهاد کرده‌اند. اگرچه روش‌های ارائه‌شده، دستاوردهای محاسباتی قابل‌توجهی را نشان می‌دهند، اما آن‌ها به طرح‌های شکست ثبت‌شده نیاز دارند که گاهی اوقات در مقالات منتشر شده در دسترس نیستند. نویسندگان [۲۲، ۲۳] به ترتیب یک برنامه SM را برای مولدها براساس نظریه قابلیت اطمینان و الگوریتم جستجوی محلی اکتشافی حریصانه ارائه کرده‌اند. هر دو مطالعه به دنبال به حداکثر رساندن احتمال عدم موفقیت واحدهای تولید برق در سیستم توان در طول پنجره برنامه‌ریزی هستند. اگرچه مدل قابلیت اطمینان مولدها به خوبی در [۲۲، ۲۳] ارائه شده‌است، نقص اصلی آن‌ها استفاده از خطای مستقل از زمان و نرخ‌های تعمیر است که عدم دقت را برای کاربردهای دنیای واقعی ایجاد می‌کند. در [۲۴]، تصویری از SM برای سیستم‌های برق آبی واقعی یافت شده‌است. در این مطالعه، نویسندگان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را پیشنهاد می‌کنند که پنجره زمانی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری را با غیر خطی بودن و قطع اتصال توابع تولید برق آبی برای ایجاد یک برنامه تعمیر و نگهداری موثر در نظر می‌گیرد. شکاف موجود در این مطالعه این است که بر برنامه‌ریزی مدیریت پروژه کوتاه‌مدت و میان‌مدت تمرکز می‌کند. به منظور دستیابی به یک بینش از هر رویکرد SM، جدول ۱ یک مقایسه کیفی از مقالات ارائه‌شده را نشان می‌دهد. در حالی که اجرای اثر پیری تقریباً در تمام مقالات موجود محدود است، کارهای کمی وجود دارند که چنین اثری را در نظر بگیرند. با این وجود، این مطالعات محدود به برنامه‌های PM کوتاه‌مدت و میان‌مدت هستند. علاوه بر این، این مطالعات منحنی وان و شکل نیم قوس را برای مدل‌سازی رفتار واقعی‌تر نرخ خرابی و نرخ تعمیر در نظر نمی‌گیرند. بنابراین، مدل‌های قابلیت اطمینان در این مطالعات دارای دقت کمتری برای نشان دادن تاثیر واقعی برنامه PM بر قابلیت اطمینان سیستم هستند. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، این مقاله یک طرح SM نوآورانه از مولدها را برای افزایش قابلیت اطمینان یک سیستم توان پیشنهاد می‌کند. این مدل براساس مراحل زیر است: اول، مدل کیجیما نوع ۱ (KMI) برای ایجاد ارتباط بین سن مجازی مولفه اتخاذ می‌شود؛ سپس با استفاده از زنجیره مارکوف، مدل قابلیت اطمینان اجزا به دست می‌آید. SM یک مساله بهینه‌سازی برنامه نگهداری را فرمول‌بندی می‌کند که با استفاده از یک الگوریتم پیشرفته ارائه‌شده در این مقاله به عنوان بهینه‌سازی ازدحام ذرات کوانتومی تسریع شده (AQPSO) حل شده‌است. سهم اصلی این مقاله عبارتند از: (۱) یک مدل قابلیت اطمینان واقع‌بینانه تر و دقیق‌تر فرسودگی، که وضعیت منسوخ شدن مولد برق را در نظر می‌گیرد؛ (۲) یک الگوریتم جدید مبتنی بر AQPSO برای برنامه‌ریزی PM بهینه مولد برق در دراز مدت؛ (۳) یک فرمول ریاضی جدید که رابطه بین طول عمر تولید کننده، سن مجازی، تنزل و نرخ انتقال را توصیف می‌کند؛ و (۴) یک الگوریتم پیشرفته SM برای ارزیابی کفایت تولید بهینه سیستم توان.

جدول ۱: دیدگاه‌های اخیر SM برای مولد سیستم توان

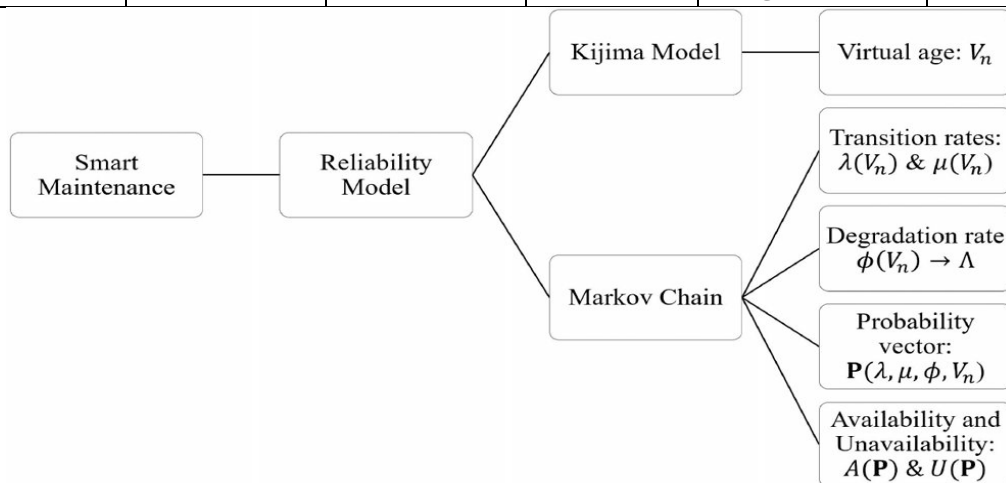
مرجع	(و λ نرخ شکست) (μ ترمیم)	در نظر گرفتن تخریب ناشی از افزایش عمر	حالت در هر مولفه	سال‌های تجزیه و تحلیل	روش به کار گرفته شده
بالاجی و همکاران [۱۸]	اعمال نشده است	خیر	اعمال نشده است	یکی	رویکرد تکرار لامبدا و تکامل افتراقی
لاکشمینارایان و کائور [۱۹]	اعمال نشده است	خیر	دو	یکی	گسسته جستجوی فاخته
باسیفتچی و همکاران [۲۰]	مشخص نشده است: λ مشخص نشده است: μ	خیر	مشخص نشده	یکی	برنامه نویسی تصادفی عدد صحیح و تقریب متوسط نمونه
جو و همکاران [۲۱]	مشخص نشده است: λ	خیر	مشخص نشده	یکی	برنامه نویسی چند جمله

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

ای مختلط				مشخص نشده است: μ	
نظریه قابلیت اطمینان	یکی	دو	خیر	ثابت: λ ثابت: μ	ایگلار و همکاران [۲۲]
الگوریتم حریصانه جستجوی محلی اکتشافی	یکی	مشخص نشده	خیر	ثابت: λ ثابت: μ	حسینی و همکاران [۲۳]
برنامه نویسی مختلط	یکی	اعمال نشده است	خیر	اعمال نشده است	رودریگز و همکاران [۲۴]
رویداد گسسته مارکوفیان و مونت کارلو	یکی	دو	بله	تنوع وایبول: λ ثابت: μ	آزاده و همکاران [۲۵]
عدد صحیح مختلط	یکی	دو	بله	وایبول: λ وایبول: μ	یلدریم و همکاران [۲۶]
بهینه سازی و برنامه ریزی خطی مونت کارلو و مونت کارلو	بیست	دو	بله	تنوع وایبول: λ ثابت: μ	مو و سانسوینی [۲۷]
ارزیابی ایمنی احتمالی مبتنی بر شرایط	سی	سه	بله	تنوع وایبول: λ مشخص نشده: μ است	حسینی و همکاران [۲۸]
الگوریتم ژنتیک و مونت کارلو	ده	دو	بله	تنوع وایبول: λ مشخص نشده: μ است	سلوی و همکاران [۲۹]
و دنباله ای AQPSO مونت کارلو	پنجاه	سه	بله	منحنی وان: λ شکل نیمه قوسی: μ	رویکرد پیشنهادی در این گروه

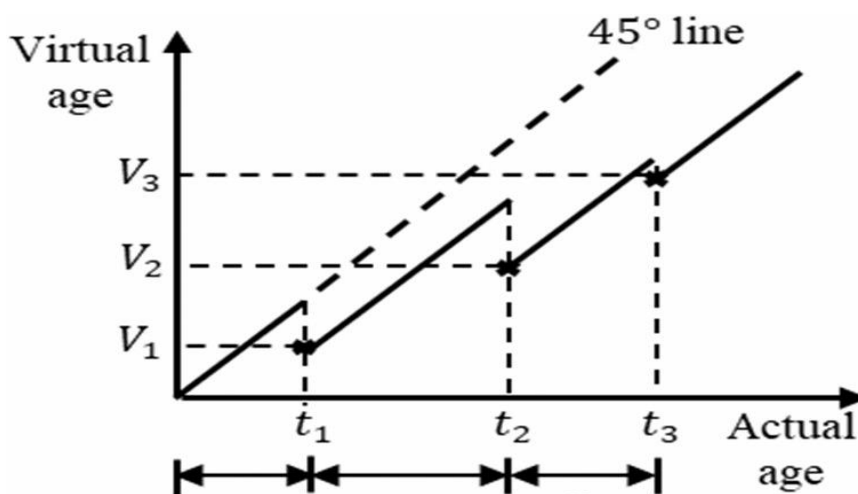


شکل ۱ مفاهیم قابلیت اطمینان برای SM

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir



شکل ۲ سن مجازی به عنوان تابعی از سن واقعی

۲. چارچوب ریاضی تعمیر و نگهداری هوشمند

SM یک راهبرد پیشرفته است که ویژگی‌های قابلیت اطمینان اجزا را برای تنظیم یک طرح تعمیر و نگهداری موثر به عنوان ورودی اتخاذ می‌کند. شکل ۱ مفاهیم قابلیت اطمینان مورد نیاز برای فرمول‌بندی چارچوب ریاضی SM را نشان می‌دهد.

۱.۲. زنجیره مارکوف، نرخ انتقال و طول عمر

زنجیره مارکوف تصویری است که شامل حالات احتمالی یک جز است که توسط نرخ‌های انتقال به هم متصل شده‌اند. این نکته از زمانی که طول عمر این جز از یک فرآیند مارکوفی پیروی می‌کند، که با نرخ خرابی و تعمیر آن تعریف می‌شود، اهمیت پیدا می‌کند. با توجه به نرخ خرابی مولدها، استفاده از منحنی وان برای توصیف آن رایج است. منحنی باتون به چهار مرحله تقسیم می‌شود [۳۰]. مرحله اول مرگ و میر نوزادان است، که توسط سیاست تولید کننده تعریف می‌شود و با دوره تضمین متناظر است. در این مرحله، این جز در وضعیت «عملیات خوب به اندازه جدید» قرار دارد. هر زمان که یک شکست رخ می‌دهد، جز به دولتی می‌رود که با «سیاست جایگزینی» مشخص می‌شود. این فرآیند تکرار می‌شود، و جز تنها در صورتی به مرحله بعدی می‌رود که هیچ رویداد شکست در طول دوره ضمانت رخ ندهد ($0 \leq t < T_U$). مرحله بعدی، زندگی مفید ($T_U \leq t < T_V$) است، که در آن جز در معرض «عملیات عادی» قرار می‌گیرد و «در حالت خدمت نیست». حالت «عملیات عادی» نشان می‌دهد که جز تحت شرایط مجاز عمل می‌کند، در حالی که حالت «در خدمت نیست» توسط هر گونه شکست که عملیات جز را قطع می‌کند، هدایت می‌شود. در این مرحله، نرخ شکست یک مقدار ثابت می‌گیرد. مرحله بعدی فرسایش است ($T_V \leq t < T_W$)، که در آن مولفه رخداد بالایی از شکست را نشان می‌دهد. این امر به این دلیل است که اثرات پیرسازی به قدری شدید می‌شوند که باعث افزایش تدریجی نرخ شکست جز می‌شوند. آخرین مرحله ($t \geq T_W$) منحنی طول عمر نهایی است که شامل حالت «کهنگی» است. این مرحله مهم‌ترین مرحله است زیرا مولفه کاملاً تخریب شده‌است. نرخ شکست مقادیر بسیار بالایی دارد. در نتیجه، تعویض اجزا مورد نیاز است.

۳. روش بهینه‌سازی AQPSO

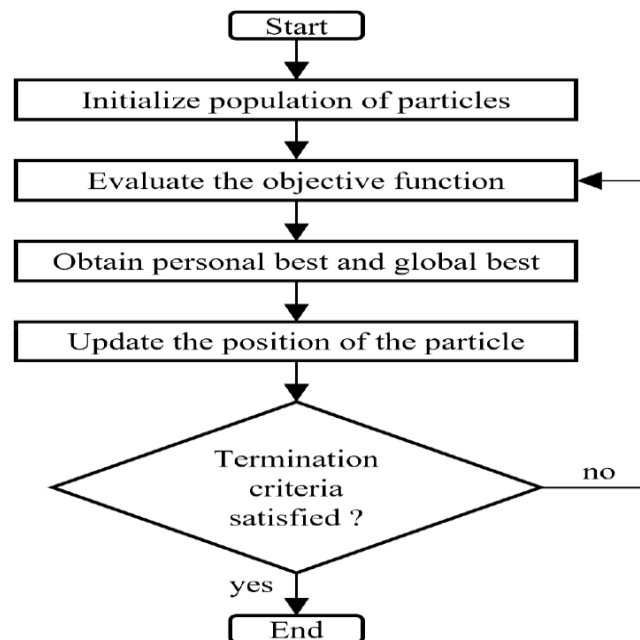
روش‌های فراابتکاری حالات مختلفی را برای توصیف حرکت یک ذره تعریف می‌کنند. برای مثال، PSO مرسوم ذرات با ویژگی‌های فیزیکی کلاسیک، مانند اینرسی، سرعت، شتاب و غیره را ارائه می‌دهد. بنابراین حرکت ذرات در این حالت توسط قوانین دینامیک و سینماتیک

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

کنترل می‌شود. مثال دیگر در [۳۱] آورده شده است که ذرات مغناطیسی را پیشنهاد می‌دهد و حرکت آن با استفاده از نظریه الکترومغناطیس توصیف می‌شود. AQPSO طرحی را پیشنهاد می‌کند که در آن یک ذره تک‌بعدی در یک چاه پتانسیل دلتای کوانتومی قرار دارد. حرکت ذره از مفاهیم مکانیک کوانتومی ناشی می‌شود. AQPSO فرآیند شرح داده شده در شکل ۳ را دنبال می‌کند. شروع به تعریف جمعیت اولیه ذرات SS و تعداد کل تکرارها می‌کند. موقعیت ذره (x) نشان‌دهنده راه حلی برای مساله بهینه‌سازی است؛ بنابراین می‌توان از آن برای ارزیابی تابع هدف استفاده کرد. هر ذره کوانتومی دو ویژگی خاص را نشان می‌دهد که به حافظه و ارتباط مرتبط می‌باشند.



شکل ۳. روند کلی در AQPSO

۴. الگوریتم پیشنهادی برای زمانبندی بهینه PM

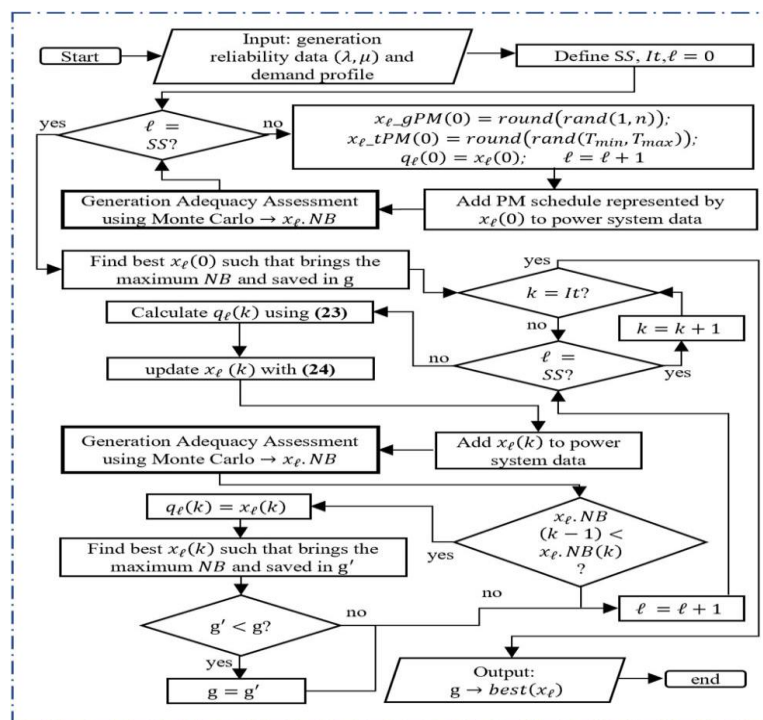
الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر AQPSO بوده و به عنوان ورودی داده‌های قابلیت اطمینان مولد، به ویژه نرخ خرابی و تعمیر مولدها و مشخصات تقاضای بار در طول زمان تحلیل در نظر گرفته می‌شود. سپس، حداکثر تعداد تکرارها و اندازه گروه SS تعریف می‌شود. ذره x_e نشان‌دهنده یک برنامه PM است. مولد در معرض PM در $x_e \cdot gPM$ ذخیره می‌شوند، در حالی که زمان اجرای PM در $x_e \cdot tPM$ ذخیره می‌شود. ذره شامل یک عدد گسسته است به طوری که $x_e \cdot gPM = 0$ یا $x_e \cdot gPM = 1$ «۰» نشان می‌دهد که نگهداری را انجام نمی‌دهد، در حالی که «۱» خلاف آن را نشان می‌دهد. از آنجایی که تجزیه و تحلیل برای $k = 0$ سپس $q_e(0) = x_e(0)$ است. گام بعدی اضافه کردن اطلاعات ذرات به سیستم توان است، سپس ارزیابی کفایت تولید صورت می‌گیرد و سود خالص برای هر ذره تعیین می‌شود. $g(0)$ براساس ذراتی که بیش‌ترین مقدار سود خالص را دارند، به دست می‌آید. در این مرحله، تکرار اول رخ می‌دهد و ذرات حرکت خود را آغاز می‌کنند. پارامتر جاذبه $D_e(k)$ با استفاده از به دست آمده است. سپس موقعیت جدید ذره با استفاده محاسبه می‌شود. موقعیت به روز شده ذره نشان‌دهنده برنامه PM جدیدی است که ممکن است به سود خالص بهتری منجر شود. سپس، کفایت تولید برای به دست آوردن یک مقدار سود خالص جدید محاسبه می‌شود، که در $x_e \cdot NB(k)$ ذخیره می‌شود. سپس، ذرات بین آن‌ها برای تعیین بهترین برنامه PM رقابت می‌کنند. اگر $x_e \cdot NB(k) > x_e \cdot NB(k-1)$ باشد آنگاه ذره موقعیت خود را به روز می‌کند. «بهترین شخصی» نیز به روز شده و در q_e ذخیره می‌شود. پس از آن یک مقایسه دوم صورت می‌گیرد که در آن

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

«بهترین جهانی» در نظر گرفته می شود. برای این منظور، لازم است که بهترین $x_\ell(k)$ را در میان گروه پیدا کنیم به طوری که حداکثر صرفه جویی را به ارمغان بیاورد. بهترین ذره در متغیر g' ذخیره می شود. اگر $g' \cdot NB > g \cdot NB$ ، آنگاه $x_\ell(k)$ به «بهترین جهانی» تبدیل شود، در غیر این صورت «بهترین جهانی» جایگزین نمی شود. در حالتی که $x_\ell \cdot NB(k) \leq x_\ell \cdot NB(k)$ است، سپس فرآیند با ذره بعدی ادامه می یابد و یک تکرار به پایان می رسد. سپس، فرآیند تکرار می شود. برای معیار هم گرایی یک $|x_\ell \cdot EENS(k) - x_\ell \cdot EENS(k-1)| < 10^{-6}$ در نظر بگیرید. در نهایت، نتیجه بهترین برنامه PM است. برای جزئیات بیشتر در مورد فرآیند تعیین برنامه PM موثر، شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴. نمودار جریان SM برای به حداکثر رساندن سود خالص مولدها

۵. مطالعه موردی

این مطالعه شامل سیستم تست روی بیلنتون (RBTS) است [۱۲]. چهار سناریو ارزیابی می شوند: (۱) بدون PM (NPM)؛ (۲) PM دوره ای سالانه (PPM)؛ (۳) RCM با استفاده از PSO؛ و (۴) SM. این مطالعه برای ۵۰ سال آینده انجام شده است. برای ساده سازی تحلیل، فرضیات عبارتند از: (۱) قابلیت اطمینان مولدها و داده های هزینه به ترتیب در جداول ۲ و ۳ ارائه شده اند؛ (۲) نرخ های خرابی و تعمیر هر مولد از رفتاری که در شکل ۵: (۳) قیمت انرژی $KE = ۰,۰۸۲$ [پوند / کیلووات ساعت] با افزایش سالانه ۳٪ است؛ و (۴) مشخصات بار سالانه در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش سالانه ۰,۵٪؛ (۵) همه هزینه ها یک افزایش سالانه ۲٪ را نشان می دهد؛ (۶) عملیات و عملیات تعمیر طبق راهنمای کارخانه انجام می شود (شکل ۵).

۶. نتایج و بحث

۱,۶. برنامه نگهداری هوشمند

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

PM وقوع خرابی مولدها را کاهش می‌دهد؛ سپس با افزایش تعداد PM اجرا شده، مولفه قابل‌اعتمادتر می‌شود. با این حال، باید تعادلی بین هزینه نگهداری و سود آن وجود داشته باشد و در این بیانیه نظریه SM فرمول‌بندی شده‌است. با استفاده از الگوریتم شرح داده شده در بخش ۵، برنامه PM که سود خالص را به حداکثر می‌رساند به دست می‌آید. در نتیجه، شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب برنامه‌ریزی PM بهینه اعمال شده به UG آبی و حرارتی را نشان می‌دهند. برای درک این اشکال، یک نماد برای هر UG داده شده‌است. سپس، زمانی که عمل رخ می‌دهد توسط نقطه رهگیری تشکیل شده از محور شکل داده می‌شود، یعنی، ماه توسط محور X داده می‌شود و سال توسط محور Y داده می‌شود. برای مثال، اولین PM که برای H5 (دایره آبی) اجرا می‌شود در ژوئن سال دوم است. لازم به ذکر است که بیشتر PM بعد از سال دوم شروع می‌شود. در سال‌های بعدی، میانگین یک نگهداری در هر سال توصیه می‌شود. سپس، بین سه تا چهار سال (به طور متوسط) قبل از اینکه UG به پایان عمر خود برسد، توصیه می‌شود که PM اجرا نشود. یک واقعیت مرتبط که در طول فرآیند بهینه‌سازی رخ می‌دهد این است که SM یک سطح سلسله مراتبی را برای هر UG براساس نرخ شکست، ظرفیت و طول عمر آن تعریف می‌کند. به عنوان مثال، UG هایی با نرخ شکست بالاتر، طول عمر کمتر و ظرفیت کمتر نیاز به نگهداری بیشتری نسبت به موارد با نرخ شکست پایین‌تر، طول عمر بالاتر و ظرفیت بالاتر دارند، همانطور که در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌است.

جدول ۲. داده‌های قابلیت اطمینان مولدها

T40	H40	T20	H20	T10	H5		حرارتی T: هیدروتر H: تولید واحد،
۲	۱	۱	۴	۱	۲		تعداد واحدها
۴۰	۴۰	۲۰	۲۰	۱۰	۵		اندازه، مگاوات
۳۵	۴۰	۲۵	۳۰	۲۰	۲,۵		سال T_w
۶	۳۰	۵	۲,۴	۴	۲		λ_c (سال/۱)
۰,۷۸	۰,۸۸	۰,۴	۰,۸۵	۰,۴	۰,۵	a_c	
۳۵	۴۰	۲۵	۳۰	۲۰	۲۵	a_c	
۱۹۴	۱۴۷	۱۹۵	۱۵۸	۱۹۶	۱۹۸	ω	μ_c (سال/۱)
۰,۳	۰,۳	۰,۲۵	۰,۱	۰,۱	۰,۲	b	
۰,۱۹	۰,۱۵	۰,۲۷	۰,۲۵	۰,۲۵	۰,۲۸	σ	
						γ	

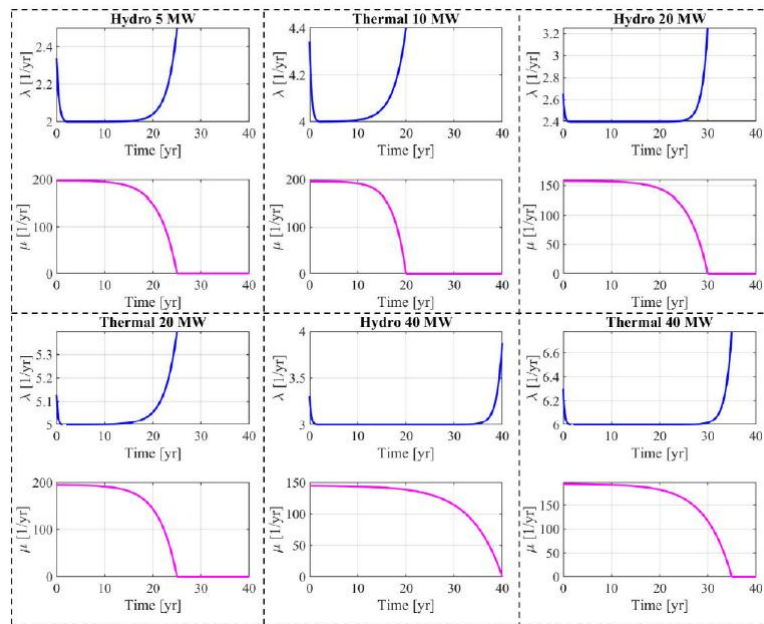
جدول ۳. هزینه تولید واحد ۴

T40	H40	T20	H10	T10	H5	UG
۸۰	۱۶۰	۶۰	۸۰	۴۰	۴۰	M هزینه مالکیت،
۷۹۰	۱۰۰	۶۸۰	۵۰	۶۰۰	۱۲,۵	k هزینه بهره برداری، سال / £
۲۲۰	۱۲۰	۲۰۰	۶۰	۱۰۰	۲۵	k, PM هزینه
۱۳۷۵	۷۵۰	۱۲۵۰	۳۷۵	۶۲۵	۱۵۶	k, CM هزینه

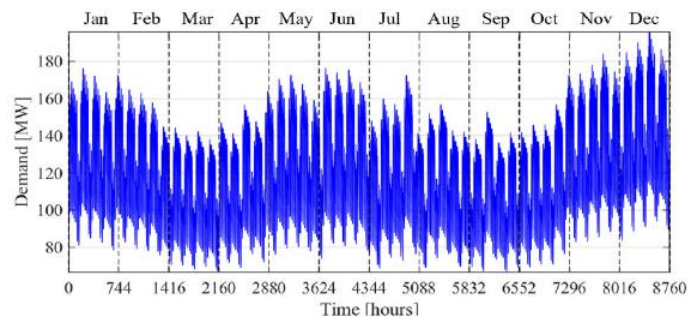
یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

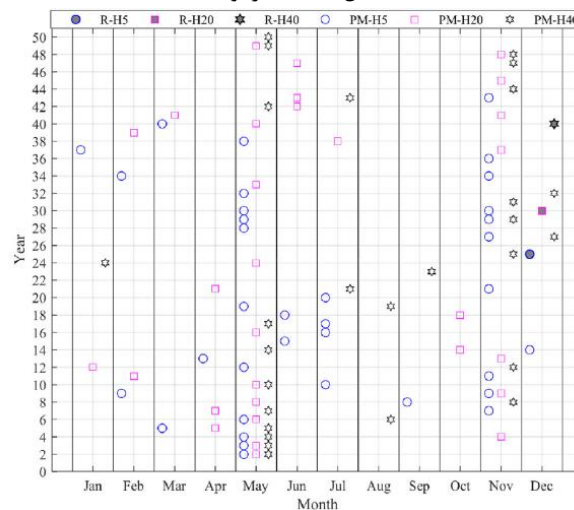
senaconf.ir



شکل ۵ نرخ خرابی و تعمیر هر تولید واحد



شکل ۶ نمایه بار اولیه



یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

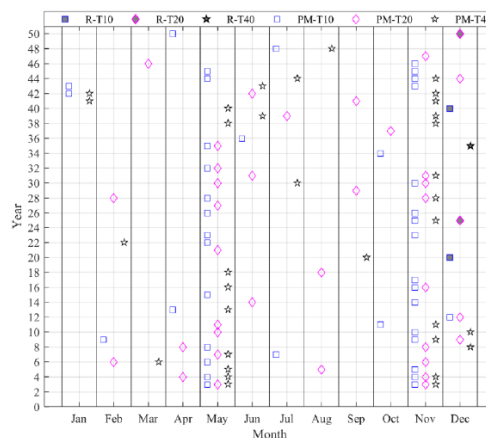
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

شکل ۷. طرح SM برای تولید واحد آبی

۲.۶. تخریب تولید واحد

تخریب هر مولد را می‌توان با استفاده از داده‌های ارائه‌شده در جدول ۲ در بیان (۸) به دست آورد. شکل ۹ تابع تخریب برای هر مولد را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که یک افزایش تدریجی در مقدار تخریب وجود دارد. مولدها زمانی به حالت کهنگی می‌رسند که تخریب، مقدار بسیار بالایی را نشان می‌دهد، همانطور که در (۹) نشان داده شده‌است.



شکل ۸. SM برای تولید واحد حرارتی

راهبرد نگهداری با کم‌ترین تخریب متعلق به PPM و پس از آن RCM و SM می‌باشد. همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده‌است، این حقیقت با تعداد PMS ها در ارتباط است. هرچه PM بیشتر عمل کند، فرآیند تخریب کندتر انجام می‌شود؛ همان طور که در بخش بعدی بحث خواهد شد، این شرایط واکنشی نسبت به قابلیت اطمینان UG دارد.

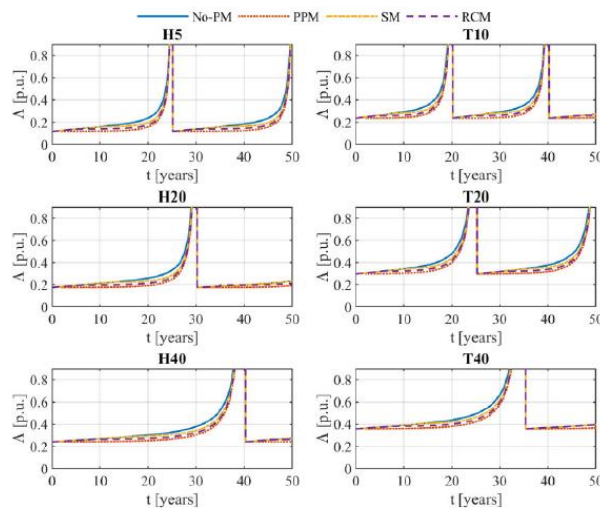
۳.۶. مدل قابلیت اطمینان تولید واحد

با استفاده از نرخ‌های خرابی و تعمیر مولفه، بردار احتمال حالت‌ها برای هر تولید واحد با دنبال کردن فرآیند شرح داده‌شده در بخش ۲.۴ تعیین می‌شود، تابع احتمال برای هر مولد به دست می‌آید. سپس مدل قابلیت اطمینان مولفه تعیین می‌شود. شکل ۱۰ در دسترس بودن را به عنوان تابعی از زمان نشان می‌دهد. می‌توان در شکل ۱۰ مشاهده کرد که با گذشت زمان، احتمال حضور در یک «عملیات نرمال» (در دسترس بودن) کاهش می‌یابد. در برخی نقاط، کهنگی ۱۰۰٪ می‌شود که نشان می‌دهد که جز به پایان عمر خود رسیده‌است، سپس جایگزینی رخ می‌دهد، و در نهایت فرآیند دوباره شروع می‌شود.

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir



شکل ۹. تخریب هر تولید واحد تحت راهبردهای مختلف نگهداری

جدول ۴ خلاصه نگهداری

ظرف ۵۰ سال PM تعداد				تولید واحد
SM	RCM	PPM	NPM	
۲۶	۳۰	۵۰	۰	H5
۳۰	۳۵	۵۰	۰	T10
۳۶	۴۰	۵۰	۰	H20
۳۹	۴۲	۵۰	۰	T20
۴۲	۴۵	۵۰	۰	H40
۴۵	۴۶	۵۰	۰	T40

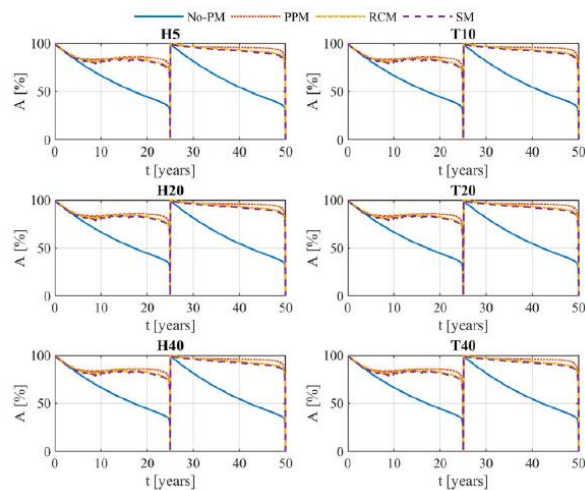
۴.۶. سود خالص

با این حال، متغیرهای متعددی در فرمولاسیون ریاضی سود خالص دخیل هستند، که عمدتاً به تعداد PMs های اجرا شده و شاخص LOEE بستگی دارد. شکل ۱۱ مقدار گسسته LOEE سالانه را برای هر طرح نشان می‌دهد. در تمام طرح‌ها، تمایل به افزایش تدریجی LOEE به دلیل پیری وجود دارد، و در برخی نقاط، مقادیر به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که به جایگزینی UG نسبت داده می‌شود. طرح no - PM بالاترین LOEE را نشان می‌دهد، در حالی که طرح SM پایین‌ترین LOEE را در بیشتر اوقات فراهم می‌کند و پس از آن PPM و RCM قرار دارند. در نتیجه، SM کم‌ترین مقدار انرژی تأمین نشده را ارائه می‌دهد و بیش‌ترین سود خالص را به ارمغان می‌آورد، زیرا یک رابطه معکوس بین سود و شاخص LOEE وجود دارد، همانطور که در نشان داده شده است. مزیت خالص برای هر طرح در جدول ۵ ارائه شده است.

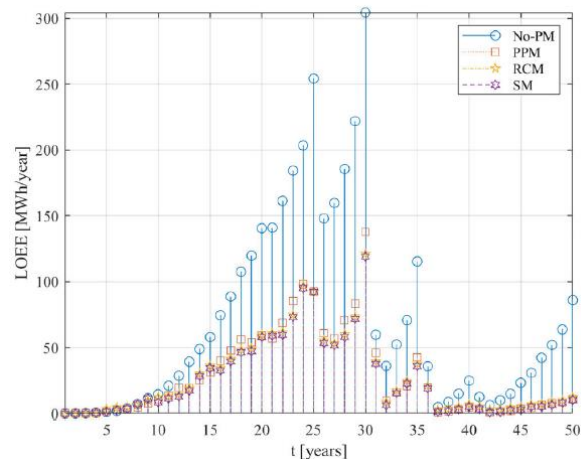
یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir



شکل ۱۰. در دسترس بودن هر تولید واحد تحت راهبردهای نگهداری مختلف



شکل ۱۱. LOEE در سال

جدول ۵ سود خالص پس از ۵۰ سال

طرح	NPM	PPM	RCM	SM
سود خالص [£]	۰,۲۴۵۶	۱,۴۷۵	۱,۷۸۹	۱,۹۸۹

۷. عملکرد محاسباتی

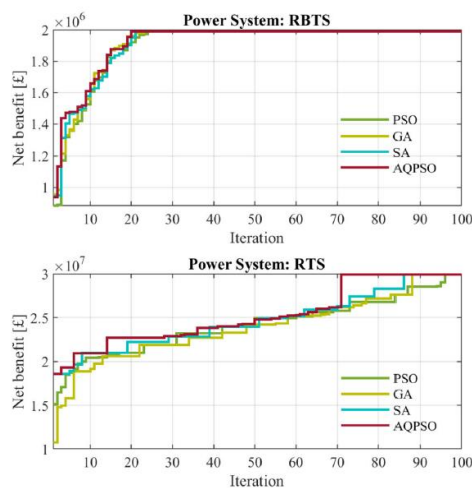
به منظور نشان دادن کارایی محاسباتی AQPSO، مساله نگهداری برنامه‌ریزی تولید مشابه با استفاده از بهینه‌سازی انبوه ذرات مرسوم با ۵۰ ذره و ۱۰۰ تکرار (PSO)، الگوریتم ژنتیک با ۵۰ ژن و ۱۰۰ نسل (GA)، و تبرید شبیه‌سازی شده با ۵۰ همسایه و ۱۰۰ مرحله (SA) حل شده‌است. یک رایانه با یک RAM ۱۶,۰ گیگابایت و پردازنده اینتل Core i7-6700 از ۳,۴۰ گیگاهرتز برای اجرای الگوریتم‌ها استفاده می‌شود. علاوه بر سیستم توان ۶ باس (RBTS) [۱۲] استفاده شده در بخش ۶، سیستم آزمایشی قابلیت اطمینان ۷۳ باسه IEEE (RTS) [۳۲] نیز به کار گرفته شده‌است. این برای مقایسه کارایی محاسباتی تحت دو اندازه مختلف سیستم توان معرفی می‌شود که با مقیاس کوچک (RBTS) و مقیاس بزرگ (RTS) است.

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

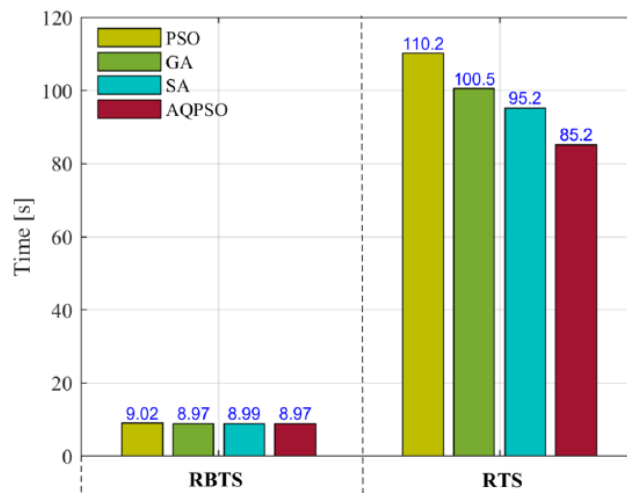
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

کارایی محاسباتی از نظر هم‌گرایی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای سیستم توان در مقیاس کوچک (RBTS)، تفاوت زیادی در هم‌گرایی بین روش‌های بهینه‌سازی وجود ندارد. با این حال، برای سیستم توان در مقیاس بزرگ (RTS)، تفاوت قابل توجهی در عملکرد محاسباتی وجود دارد. از نظر درصد، هم‌گرایی AQPSO در تکرارها به ترتیب با ۳۶،۶، ۲۲،۵، ۱۹،۷٪ به PSO، GA و SA افزایش می‌یابد. بنابراین، روش بهینه‌سازی با بالاترین عملکرد هم‌گرایی توسط AQPSO ارائه می‌شود. شبیه‌سازی زمانی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای سیستم توان در مقیاس کوچک (RBTS)، تفاوت زمان شبیه‌سازی در میان روش‌های بهینه‌سازی از ۰،۲٪ تجاوز نمی‌کند. در مقابل، تفاوت زمان شبیه‌سازی برای سیستم توان در مقیاس بزرگ بسیار قابل توجه است.



شکل ۱۲. رفتار هم‌گرایی



شکل ۱۳. زمان شبیه‌سازی در هر آزمایش

در AQPSO کم‌ترین زمان شبیه‌سازی با ۸۵،۲ ثانیه و پس از آن SA با ۹۵،۲ ثانیه، GA با ۱۰۰،۵ ثانیه و PSO با ۱۱۰،۲ ثانیه قرار دارند. بنابراین، AQPSO به دلیل ویژگی‌های ذاتی خود (تکرار هم‌گرایی و زمان شبیه‌سازی) بهترین روش بهینه‌سازی (در میان PSO، GA و SA) است.

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

۸. نتیجه گیری

این مقاله یک رویکرد نوآورانه را برای SM مولدها با هدف به حداکثر رساندن مزایای قابلیت اطمینان خالص از طریق بهبود عمر عملیاتی مولدها پیشنهاد می‌کند. این رویکرد از زنجیره KMI و مارکوف برای ایجاد رابطه بین طول عمر اجزاء، سن مجازی و نرخ انتقال استفاده می‌کند. موتور اصلی مدل براساس الگوریتم AQPSO است، که برنامه PM بهینه مولدها را تعیین می‌کند. مطالعه موردی کارایی این رویکرد را تایید کرد. نتایج نشان می‌دهند که تعداد بیشتر PMS ها می‌تواند به طور بالقوه به سطح قابل توجهی از بهبود در قابلیت اطمینان منبع برق منجر شود. با این وجود، اجرای PM در افق‌های سود برای اجتناب از جایگزینی هزینه بر سود حیاتی است. همچنین AQPSO از نظر تعداد تکرارها و زمان شبیه‌سازی بهتر از PSO، GA و SA بوده و دقت و استحکام را حفظ می‌کند. بنابراین، می‌توان AQPSO را به عنوان یکی از موثرترین روش‌ها برای حل مساله SM در نظر گرفت. اثربخشی با اندازه سیستم توان افزایش می‌یابد. روش پیشنهادی برای طراحی برنامه SM مولدها با هدف بهبود عملکرد قابلیت اطمینان در دراز مدت مفید است. اگرچه این مقاله از طرح SM برای مولدها استفاده می‌کند، این مدل را می‌توان برای دیگر اجزای سیستم توان تعمیر داد، که طیف وسیعی از فرصت‌ها را برای برنامه‌ریزی عملیاتی سیستم‌های توان مدرن فراهم می‌کند.

منابع

- [1] 'IEEE guide for maintenance, operation, and safety of industrial and commercial power systems (yellow book)', IEEE Std 902-1998, 1998, pp. 1-160
- [2] Ben-Daya, M., Kumar, U., Murthy, D.N.P.: 'Introduction to maintenance engineering: modelling, optimization and management' (John Wiley & Sons, Hoboken, USA, 2016)
- [3] Yildirim, M., Sun, X.A., Gebraeel, N.Z.: 'Sensor-driven condition-based generator maintenance scheduling – part II: incorporating operations', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2016, **31**, (6), pp. 4263-4271
- [4] Endrenyi, J., Aboresheid, S., Allan, R.N., et al.: 'The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2001, **16**, (4), pp. 638-646
- [5] Krishnasamy, L., Khan, F., Haddara, M.: 'Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant', *J. Loss Prev. Process Ind.*, 2005, **18**, (2), pp. 69-81
- [6] Nilsson, J., Bertling, L.: 'Maintenance management of wind power systems using condition monitoring systems – life cycle cost analysis for two case studies', *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2007, **22**, (1), pp. 223-229
- [7] Bertling, L., Allan, R., Eriksson, R.: 'A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2005, **20**, (1), pp. 75-82
- [8] Niu, G., Yang, B.-S., Pecht, M.: 'Development of an optimized conditionbased maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance', *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2010, **95**, (7), pp. 786-796
- [9] Lapa, C.M.F., Pereira, C.M.N.A., de Barros, M.P.: 'A model for preventive maintenance planning by genetic algorithms based in cost and reliability', *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2006, **91**, (2), pp. 233-240
- [10] Heo, J.H., Kim, M.K., Lyu, J.K.: 'Implementation of reliability-centered maintenance for transmission components using particle swarm optimization', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2014, **55**, pp. 238-245
- [11] Saraiva, J.T., Pereira, M.L., Mendes, V.T., et al.: 'A simulated annealing based approach to solve the generator maintenance scheduling problem', *Electr Power Syst Res*, 2011, **81**, (7), pp. 1283-1291

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- [12] Li, W.: 'Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods' (Springer Science & Business Media, New York, USA, 2013)
- [13] Falahati, B., Fu, Y., Mousavi, M.J.: 'Reliability modeling and evaluation of power systems with smart monitoring', *IEEE Trans Smart Grid*, 2013, **4**, (2), pp. 1087–1095
- [14] Falahati, B., Kargarian, A.: 'Power system reliability enhancement considering smart monitoring'. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 2015, pp. 1–5
- [15] Xia, Y., Jiang, X., Zhang, Z., *et al.*: 'Detecting broken strands in transmission line – part 1: design of a smart eddy current transducer carried by inspection robot', *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, 2013, **23**, (8), pp. 1409–1422
- [16] Bumblauskas, D., Gemmill, D., Igou, A., *et al.*: 'Smart maintenance decision support systems (SMDSS) based on corporate big data analytics', *Expert Syst Appl*, 2017, **90**, pp. 303–317
- [17] Jooshaki, M., Abbaspour, A., Fotuhi-Firuzabad, M., *et al.*: 'Incorporating the effects of service quality regulation in decision-making framework of distribution companies', *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2018, **12**, (18), pp. 4172–4181
- [18] Balaji, G., Balamurugan, R., Lakshminarasimman, L.: 'Mathematical approach assisted differential evolution for generator maintenance scheduling', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2016, **82**, pp. 508–518
- [19] Lakshminarayanan, S., Kaur, D.: 'Optimal maintenance scheduling of generator units using discrete integer cuckoo search optimization algorithm', *Swarm Evol. Comput.*, 2018, **42**, pp. 89–98
- [20] Başçiftci, B., Ahmed, S., Gebraeel, N., *et al.*: 'Integrated generator maintenance and operations scheduling under uncertain failure times', 2017
- [21] Jo, H.-C., Ko, R., Joo, S.-K.: 'Generator maintenance scheduling method using transformation of mixed integer polynomial programming in a power system incorporating demand response', *Energies*, 2019, **12**, (9), p. 1646
- [22] Eygelaar, J., Lötter, D.P., Van Vuuren, J.H.: 'Generator maintenance scheduling based on the risk of power generating unit failure', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2018, **95**, pp. 83–95
- [23] Hosseini, S., Kalam, S., Barker, K., *et al.*: 'Scheduling multi-component maintenance with a greedy heuristic local search algorithm', *Soft Comput.*, 2020, **24**, pp. 351–366
- [24] Rodriguez, J.A., Anjos, M.F., Côté, P., *et al.*: 'MILP formulations for generator maintenance scheduling in hydropower systems', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2018, **33**, (6), pp. 6171–6180
- [25] Azadeh, A., Asadzadeh, S.M., Salehi, N., *et al.*: 'Condition-based maintenance effectiveness for series-parallel power generation system – A combined Markovian simulation model', *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2015, **142**, pp. 357–368
- [26] Yildirim, M., Sun, X.A., Gebraeel, N.Z.: 'Sensor-driven condition-based generator maintenance scheduling – part I: maintenance problem', *IEEE Trans. Power Syst.*, 2016, **31**, (6), pp. 4253–4262
- [27] Mo, H., Sansavini, G.: 'Impact of aging and performance degradation on the operational costs of distributed generation systems', *Renew. Energy*, 2019, **143**, pp. 426–439
- [28] Hoseyni, S.M., Di Maio, F., Zio, E.: 'Condition-based probabilistic safety assessment for maintenance decision making regarding a nuclear power plant steam generator undergoing multiple degradation mechanisms', *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2019, **191**, p. 106583
- [29] Selvi, S.T., Baskar, S., Rajasekar, S.: 'An intelligent approach based on metaheuristic for generator maintenance scheduling', in 'Classical and recent aspects of power system optimization' (Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 2018), pp. 99–136
- [30] Alvarez-Alvarado, M.S., Jayaweera, D.: 'Bathtub curve as a Markovian process to describe the reliability of repairable components', *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2018, **12**, (21), pp. 5683–5689

یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

[31] Tayarani-N, M.-H., Akbarzadeh-T, M.R.: 'Magnetic optimization algorithms a new synthesis'. 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence), Hong Kong, 2008, pp. 2659–2664

[32] Grigg, C., Wong, P., Albrecht, P., *et al.*: 'The IEEE reliability test system-1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee', *IEEE Trans. Power Syst.*, 1999, **14**, (3), pp. 1010–1020