



## روشی نوین در پخش بار بهینه مقید به قید پایداری گذرا با استفاده از تکنیک حساسیت

### تابع انرژی

بهزاد مرادی<sup>۱</sup>، عباس کارگر<sup>۲\*</sup>، سید علی نبوی نیای<sup>۳</sup>، سید یاسر درخشنده<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

moradi@stu.sku.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

kargar@ieee.org

۳- دانشیار، دانشگاه تورنتو، تورنتو، کانادا

nabavi@ieee.org

۴- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

y\_derakhshandeh@eng.sku.ac.ir

**چکیده:** با مرور سابقه تحقیق مسئله پخش بار بهینه مقید به قید پایداری گذرا (TSCOPF) مشخص می‌شود هنگام استفاده از تکنیک ضرایب حساسیت توابع انرژی، تنها توان مکانیکی ورودی واحدها در ارزیابی پایداری گذرا مبنای قرار می‌گیرد و تغییرات ولتاژ ماشین‌ها در این ارزیابی ترتیب اثر نمی‌یابد. این مقاله با به‌کارگیری AC-OPF، احتساب اثر تغییرات ولتاژ ماشین‌ها در ارزیابی پایداری گذرا را مدنظر قرار می‌دهد. به‌منظور ارزیابی پایداری گذرا شاخص جدیدی از خانواده تکنیک‌های ترکیبی، پیشنهاد و نشان داده شد نرخ تغییرات شاخص پیشنهادی نسبت به متغیرهای تصمیم مسئله در بازه نسبتاً طولی خطی است. بدین ترتیب، به‌منظور کاهش بار محاسباتی حل مسئله از این ویژگی خطی در تعریف قید پایداری گذرا استفاده می‌شود. چارچوب پیشنهادی روی شبکه تست ۳۹ باس New England پیاده شده است. مقایسه نتایج حاصل با پاسخ‌های سابقه تحقیق نشان می‌دهد علاوه بر پایداری سازی شبکه در برابر رخداد تحت بررسی، به‌کارگیری روش پیشنهادی، هزینه بهره‌برداری را از ۶۱۷۹۹/۶۸ دلار بر ساعت به رقم ۶۰۹۲۷/۸۶ دلار بر ساعت می‌رساند که صرفه‌جویی ۱/۴۱٪ در هزینه سوخت را به دست می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** آنالیز حساسیت، پخش بار بهینه، پایداری گذرا، حد پایداری گذرای بهبودیافته.

### ۱- مقدمه

بی‌بدیلی در تأمین نیاز به انرژی پیدا کرده است [۱]. در شرایطی که رشد سریع مصرف انرژی الکتریکی، بهره‌برداران را ناگزیر از استفاده حداکثری از ظرفیت سیستم انتقال قدرت می‌کند، بروز رخدادهای شدید و محتمل در شبکه انتقال قدرت، زمینه بروز انواع ناپایداری‌ها را فراهم می‌آورد [۲]. در این میان، ضرورت حفظ پایداری گذرای ماشین‌های سنکرون شبکه قدرت، اهمیت دوچندان می‌یابد. منظور از پایداری گذرا، توانایی شبکه قدرت در حفظ سنکرونیسم ماشین‌ها پس از بروز رخدادهای بزرگ و شدید (برای مثال،

در سال‌های اخیر، انرژی الکتریکی به‌عنوان چرخ اصلی گرداننده اقتصادهای در حال توسعه و توسعه‌یافته، نقش

\* تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۰

نام نویسنده مسئول: عباس کارگر

نشانی نویسنده مسئول: ایران، شهرکرد، دانشگاه شهرکرد، دانشکده فنی و مهندسی

هنگام استفاده از مدل‌های دقیق ماشین‌ها از جمله کاستی‌های این رویکرد به‌شمار می‌روند.

رویکردهای مبتنی بر مواجهه مستقیم توانسته‌اند کاستی‌های رویکردهای سنتی را تا حدود زیادی پوشش دهند. در این رویکردها ابتدا وضعیت پایداری گذرای سیستم قدرت، تعیین وضعیت و سپس از نتایج آن در پایداری یا مستقیماً در حل مسئله استفاده شد. در [۸] مؤلفان با به‌کارگیری ضرایب حساسیت زوایای روتور ماشین‌ها نسبت به توان مکانیکی ورودی واحدها، توان‌های تولیدی را به گونه‌ای جابه‌جا کرده‌اند تا پایداری گذرای شبکه برای رخداد مدنظر تضمین شود. سپس پارامترهای دیگر شبکه را از طریق OPF تعیین کرده‌اند. با پیشنهاد مفهوم ماشین معادل<sup>۱</sup> (SIME) [۲] پژوهش‌های متعددی حول استفاده از این تکنیک، برای حل TSCOPF انجام شده است. به کمک SIME در [۹] ابتدا شبکه با جابه‌جایی تولید از ماشین‌های بحرانی به ماشین‌های غیربحرانی، پایدار می‌شود، سپس باقی متغیرهای ماشین‌های غیربحرانی و شبکه تعیین می‌شوند. در این موارد پژوهشی، مؤلفان با تقلیل مدل چندماشین شبکه قدرت به مدل تک ماشین [۱۰]، استفاده از آنالیز حساسیت [۱۱]، تخمین مرز پایداری با ایجاد رابطه‌ای شبه‌خطی میان مقادیر ناپایدار شاخص پایداری و انحرافات زاویه‌ای [۱۲]، استفاده از بسط سری تیلور در اطراف نقطه کاری شبکه [۱۳] تلاش کرده‌اند بار محاسباتی ارزیابی پایداری گذرای شبکه را کاهش دهند. با توجه به اینکه حین استفاده از تکنیک SIME در حالت‌های شدیداً ناپایدار، امکان برخورد منحنی توان شتاب‌دهنده با توان مکانیکی ورودی برای سنجش حد پایداری گذرا وجود ندارد، در [۱۴] مکانیزمی برای رفع این مشکل و نیز پیشگیری از پایداری‌سازی بیش از حد پیشنهاد شده است. مؤلفان در [۱۵] با به‌کارگیری تفکیک بندرز<sup>۲</sup> (BD) ارزیابی پایداری گذرا را یک زیرمسئله مجزا و موازی در نظر گرفته و با استفاده از ضرایب حساسیت تابع انرژی پیشنهادی و الحاق آنها به مسئله اصلی، شیوه ابتکاری جدیدی برای حل مسئله ارائه کرده‌اند. رویکردهای مبتنی بر مواجهه مستقیم، راندمان محاسباتی بیشتری نسبت به روش‌های سنتی دارند؛ بی‌نیاز از حل عددی معادلات دیفرانسیلی دسته اول‌اند؛

خروج یک خط انتقال) است [۳]. به‌منظور حفظ پایداری گذرا نقطه کاری بهره‌برداری از سیستم قدرت باید به گونه‌ای تعیین شود که واحدها تاب‌آوری لازم را در برابر دینامیک‌های سریع ناشی از بروز رخداد‌های شدید در خود داشته باشند. پخش بار بهینه مقید به قید پایداری گذرا<sup>۱</sup> (TSCOPF) ابزاری است که این امکان را فراهم می‌آورد. رویکردهای حل TSCOPF موجود در سابقه تحقیق بر حسب شیوه ارزیابی پایداری گذرا و نحوه الحاق آن به مسئله اصلی و نیز روش حل مسئله نهایی در دسته‌های زیر طبقه‌بندی می‌شوند: رویکردهای سنتی، رویکردهای مبتنی بر مواجهه مستقیم و رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی.

در دسته نخست، قید پایداری گذرای سیستم قدرت که عمدتاً با معادلات نوسان زاویه روتور و مدل کلاسیک ماشین سنکرون فرمول‌بندی شده‌اند [۳]، مستقیماً به مسئله پخش بار بهینه<sup>۲</sup> (OPF) اضافه و مسئله TSCOPF حاصل به‌صورت یکجا و یکپارچه حل می‌شود. در این دسته از رویکردها زوایای روتور ماشین‌ها بر حسب مرکز لختی<sup>۳</sup> (COI) بیان می‌شوند و مبنای سنجش وضعیت پایداری سیستم قدرت قرار می‌گیرند. متناسب با استانداردهای بهره‌برداران، تغییرات مجاز این شاخص در گستره‌ای از  $\pi$  تا  $3\pi$  تعریف می‌شود [۴]. در [۵] گان و همکاران مسئله دیفرانسیلی حاصل را به کمک تکنیک‌های گسسته‌سازی به معادلات عددی معادل، تبدیل و به کمک برنامه‌ریزی خطی<sup>۴</sup> (LP) مسئله TSCOPF حاصل را حل کردند. مؤلفان در [۶] با ارائه تکنیکی به نام «نگاشت معادل»، مسئله TSCOPF را با به‌کارگیری ماتریس ژاکوبین و هسین اصلاح‌شده TSCOPF در بهینه‌سازی مبتنی بر نقطه درونی<sup>۵</sup> (IP)، به فرم ساده‌ای نظیر OPF کاهش حجم دادند. در [۷] جیانگ و هانگ با ارائه تکنیکی برای بهبود گسسته‌سازی عددی مسئله، بار محاسباتی حل مسئله مبتنی بر بهینه‌سازی IP را تا ۵۰٪ کاهش دادند. رویکردهای سنتی، مدل دینامیکی سیستم قدرت را حفظ می‌کنند و وضعیت پایداری شبکه را به خوبی بازتاب می‌دهند؛ با این حال، ناتوانی در تعیین پارامتر دخیل در ناپایداری شبکه، بار محاسباتی بالا به‌خصوص حین استفاده بر شبکه‌های بزرگ و حین ارزیابی رخداد‌های چندگانه و همچنین، عدم تضمین همگرایی

اصلاح شده<sup>۸</sup> (CTEF) در ارزیابی پایداری گذرا پیشنهاد شده [۲۵] که با وجود استفاده از آن در بعضی از حوزه‌های بهره‌برداری از سیستم قدرت (از جمله در مسئله مدیریت گرفتگی خطوط [۲۶-۲۹])، استفاده از این تکنیک در حل مسئله TSCOPF در سابقه تحقیق گزارش نشده است؛ از این رو، در تحقیق جاری از تکنیک CTEF برای ارزیابی پایداری گذرا استفاده خواهد شد. حد انرژی گذرای اصلاح شده<sup>۹</sup> (CTEM) [۲۶] و نیز حد پایداری گذرا<sup>۱۰</sup> (TSM) [۲۹] که از فرآورده‌های تکنیک CTEF به‌شمار می‌روند، در برابر تغییرات متغیرهای کلیدی و تأثیرگذار (نظیر توان مکانیکی ورودی به ماشین‌ها) در بازه نسبتاً گسترده‌ای رفتار خطی دارند. به دلیل سهولت در محاسبه و همین‌طور حذف محاسبات مربوط به محاسبه انتگرال زمانی موجود در روند استخراج CTEM، شاخص TSM بار محاسباتی کمتری نسبت به CTEM دارد. در تحقیق حاضر، هنگام استخراج شاخص TSM برای حالت‌های ناپایدار مشاهده شد که ویژگی خطی تغییرات شاخص TSM نسبت به تغییر شاخص‌های کلیدی در محدوده شاخص‌های ناپایدار از دست می‌رود. به منظور بازگرداندن این ویژگی خطی و استفاده از آن در TSCOPF، اصلاحیه‌ای برای محاسبه شاخص در حالت‌های ناپایدار، پیشنهاد و به کار گرفته شده است. در اصلاحیه پیشنهادی علاوه بر بازگرداندن ویژگی خطی، با حذف محاسبات مربوطه به لحظه گذار از صفر در محاسبه شاخص TSM برای حالت‌های ناپایدار، بار محاسباتی شاخص پیشنهادی نیز نسبت به TSM کاهش می‌یابد. روش پیشنهادی به‌صورت بالقوه قابلیت به‌کارگیری در شبکه‌های حقیقی با تعداد ماشین‌های زیاد را خواهد داشت. گرچه با افزایش تعداد ماشین‌های شبکه یا استفاده از مدل‌های دقیق و نیز با استخراج ضرایب حساسیت برای تعداد بیشتری از ماشین‌ها، به‌طور طبیعی فضا و زمان لازم برای انجام محاسبات تا حدودی افزایش خواهد یافت، این افزایش با توجه به دسته‌بندی ماشین‌ها به‌صورت تصاعدی نخواهد بود.

تا لحظه نگارش مقاله حاضر، مرور سابقه تحقیق از جمله [۱۰-۱۵] نشان می‌دهد جمع مراجع تنها از توان مکانیکی ورودی ماشین‌ها به‌عنوان متغیر کلیدی در استخراج

قابلیت دربرگیری معادلات دقیق ماشین‌ها و رخدادهای چندگانه را دارند و علاوه بر این، می‌توانند اطلاعات مشخصی درخصوص عوامل و پارامترهای تأثیرگذار در پایداری یا ناپایداری شبکه ارائه دهند.

در دسته سوم، رویکردهای مبتنی بر استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند و شبکه عصبی جای می‌گیرند. در سابقه تحقیق می‌توان به استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی [۱۶، ۱۷]، زنبور عسل [۱۸، ۱۹]، ژنتیک [۲۰]، گله کرپل جداشده [۲۱]، نهنگ قاتل [۲۲] و غیره در ایجاد دسته پاسخ‌های ممکن و یافتن پاسخ با کیفیت اشاره کرد. در این کاربری‌ها ابتدا یک شبیه‌سازی در حوزه زمان برای پاسخ مدنظر، انجام و در صورت پایداری، پاسخ مدنظر به‌عنوان پاسخ مناسب ذخیره می‌شود. با ادامه یافتن الگوریتم بهینه‌ساز و تکرار پاسخ‌های دیگر، به مرور پاسخ‌ها از کیفیت بیشتری برخوردار می‌شوند و با رسیدن به آستانه توقف، پاسخ نهایی ارائه می‌شود. در [۲۳] نیز از شبکه عصبی مصنوعی برای ایجاد مدلی برای معادلسازی رفتار شبکه چندماشینه سیستم قدرت و تعیین حدود پایداری گذرا استفاده شده است. رویکردهای دسته سوم، محدودیتی در به‌کارگیری مدل‌های مرتبه بالای ماشین‌ها و ملزومات کنترلی مرتبط با آنها ندارند. این رویکردها به‌صورت بالقوه توانایی زیادی در جستجوی آزادانه در فضای حل و یافتن پاسخ باکیفیت دارند؛ با این حال، یافتن پاسخ بهینه در آنها تضمین شده نیست و با افزایش حجم مسئله، فضای حل حجیم مسئله، تبدیل به نقطه ضعف آن می‌شود؛ تا حدی که ممکن است در همگرایی مسئله تردید جدی وارد کند.

با توجه به سابقه تحقیق، رویکردهای دسته دوم توانسته‌اند توازن قابل دفاعی میان دقت ارزیابی پایداری گذرا و راندمان محاسباتی ایجاد کنند. علاوه بر آن، در این رویکرد توانایی به‌کارگیری مدل دقیق ماشین‌ها نیز محفوظ است. نکته درخور ذکر اینکه شاخص پایداری گذرا در تکنیک SIME ( $\eta$ ) در شرایطی نسبت به پارامترهای بحرانی، رفتار غیریکنواختی از خود بروز می‌دهد [۲۴]. این مسئله ممکن است کاربرد عملی این تکنیک برای ارزیابی پایداری گذرا را محدود سازد. به موازات ابداع و گسترش استفاده از تکنیک SIME، تکنیک تابع انرژی گذرای

$$J = \sum_{i=1}^{n_g} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (\$/h) \quad (1)$$

که در آن  $P_{Gi}$  توان حقیقی تولیدی واحد  $i$  بر حسب مگاوات،  $n_g$  تعداد واحدهای در مدار قرار گرفته و  $a_i, b_i, c_i$  و نیز ضرایب هزینه سوخت واحد نام هستند.

## ۲-۲-۲-۱- قیود استاتیک

## ۲-۲-۲-۱- قیود برابری (توازن توان حقیقی و راکتیو)

قیود برابری مسئله، معادلات تعادل توان حقیقی و توان راکتیو در هر باس شبکه‌اند که در پخش بار AC-OPF به صورت زیر بیان می‌شوند [۳]:

$$P_{Gi} - P_{Di} = |V_i| \sum_{k=1}^{n_t} |V_k| |Y_{ik}| \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = |V_i| \sum_{k=1}^{n_t} |V_k| |Y_{ik}| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (3)$$

در روابط بالا  $n_t$  تعداد باس‌های شبکه،  $P_{Di}$  و  $P_{Gi}$  به ترتیب توان‌های حقیقی تولیدی و تقاضای بار در باس  $i$ ،  $|V_i|$  و  $|V_k|$  اندازه ولتاژ باس‌های  $i$  و  $k$ ،  $\delta_i$  و  $\delta_k$  زوایای ولتاژ باس‌های  $i$  و  $k$ ،  $|Y_{ik}|$  و  $\theta_{ik}$  به ترتیب اندازه و زاویه ادمیتانس سری خط انتقال میان باس‌های  $i$  و  $k$ ،  $Q_{Di}$  و  $Q_{Gi}$  نیز به ترتیب توان‌های راکتیو تولیدی و تقاضای بار در باس  $i$  هستند.

## ۲-۲-۲-۲- قیود نابرابری

مقادیر ولتاژ، توان حقیقی و توان راکتیو تولیدی ماشین‌های شبکه به کران‌های بالا و پایین مشخصی محدود می‌شوند. این محدودیت‌ها به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$V_{Gi}^{min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{max} \quad i = 1, \dots, n_g \quad (4)$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad i = 1, \dots, n_g \quad (5)$$

ضرایب حساسیت شاخص پایداری گذرا استفاده کرده‌اند. در مقاله حاضر، علاوه بر توان مکانیکی ورودی، از ولتاژ ماشین‌های شبکه نیز در استخراج ضرایب حساسیت شاخص پایداری گذرا استفاده می‌شود.

بدین ترتیب، نوآوری‌های کلیدی در مقاله حاضر به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

۱- ارائه شاخص جدید حد پایداری گذرای بهبودیافته (ITSM) برای ارزیابی پایداری گذرا.  
۲- به کارگیری شاخص ITSM از خانواده تکنیک‌های ترکیبی اصلاح شده در مسئله TSCOPF.

۳- بهره‌گیری از ولتاژ ماشین‌های شبکه علاوه بر توان مکانیکی ورودی به ماشین‌ها به عنوان متغیر کلیدی و تأثیرگذار در ارزیابی پایداری گذرا در استخراج ضرایب حساسیت شاخص پایداری گذرا.

باقی مطالب مقاله در ادامه به صورت زیر ارائه می‌شوند. در بخش (۲) فرمول‌بندی عمومی مسئله پخش بار بهینه به همراه قیود مربوطه بیان می‌شود. در ادامه، نحوه ارزیابی پایداری گذرای شبکه و شاخص TISM تشریح می‌شود. در بخش (۳) رویکرد پیشنهادی حل مسئله، بیان و در بخش (۴) پیاده‌سازی آن روی شبکه نمونه، بررسی و پیشنهاداتی برای ادامه تحقیقات بیان می‌شود. بخش (۵) نیز به جمع‌بندی موارد بیان شده اختصاص دارد.

## ۲- فرمول‌بندی مسئله

فرمول‌بندی تعریف شده برای مسئله TSCOPF مشابه فرمول‌بندی مسئله OPF متداول است. تفاوت این دو در اضافه شدن معادلات دیفرانسیلی بیان‌کننده دینامیک ماشین‌های شبکه به مسئله OPF است. در ادامه، صورت مسئله OPF متداول و همچنین، نحوه مواجهه با معادلات دیفرانسیلی زوایای روتور ماشین‌های شبکه و تبدیل آن به قید پایداری گذرا برای استفاده در OPF تشریح می‌شوند.

## ۲-۱- تابع هدف

تابع هدف مسئله، کمینه‌سازی هزینه سوخت واحدها است [۳۰]:

حفظ اختصار از ذکر آنها خودداری می‌شود. در مطالعه حاضر هنگام استفاده از شاخص TSM در حالت‌های ناپایدار مشاهده شد نسبت خطی میان تغییرات توان مکانیکی ورودی واحدها و شاخص TSM از دست می‌رود. برای رفع این مشکل و برقراری مجدد ویژگی خطی، نحوه محاسبه شاخص TSM اصلاح و شاخص حاشیه پایداری گذرای بهبودیافته<sup>۱۵</sup> (ITSM) به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

۱. با پایش  $\omega_{AB}$  در بازه زمانی پس از رفع خطا، اگر  $\omega_{AB}$  از مثبت به منفی تغییر علامت دهد، سیستم پستارخداد پایدار است. در غیر این صورت، سیستم ناپایدار است و تنها از یک مقدار کمینه مثبت عبور می‌کند.

۲. در حالت پایدار، شاخص ITSM به صورت فاصله میان CTKE در لحظه رفع خطا و CTKE بحرانی تعریف می‌شود. در این حالت، شاخص ITSM مقدار مثبت داشته و دارای حاشیه کافی برای برقراری پایداری گذرا است.

۳. برای حالات ناپایدار، شاخص ITSM به صورت فاصله میان CTKE بحرانی و CTKE در لحظه رفع خطا تعریف می‌شود. در این حالت، شاخص ITSM مقدار منفی دارد و عمق ناپایداری گذرا را نشان می‌دهد.

در حالت‌های پایدار نوسان اول، تفاوتی در نحوه محاسبه TSM و ITSM وجود ندارد؛ اما در حالت‌های ناپایدار شاخص ITSM به صورت فاصله میان CTKE بحرانی و CKTE در لحظه رفع خطا تعریف می‌شود. در حالت‌های ناپایدار عمق ناپایداری شاخص TSM به کمک رابطه  $1/2M_{eq}\omega^2(T_A)$  تعریف می‌شود که در آن  $T_A$  لحظه برخورد مسیر حالت با صفحه CPEBS است (معادل با  $P_{cr-sys} = 0$ ) [۲۵]. در به‌کارگیری شاخص ITSM برای حالت‌های ناپایدار، با توجه به اینکه دیگر نیازی به محاسبه  $T_A$  نیست، حجم محاسبات ITSM نسبت به TSM کاهش می‌یابد. علاوه بر این، ویژگی خطی تغییرات شاخص پایداری نسبت به تغییر پارامترهای کلیدی نیز احیا می‌شود.

(شکل ۱) رفتار این دو شاخص نسبت به تغییرات توان یکی از واحدها را برای رخداد در نظر گرفته شده در این مقاله نشان می‌دهد. در این شکل به وضوح خطی بودن رفتار شاخص ITSM و رفتار غیر یکنواخت شاخص TSM نسبت به جابه‌جایی تولید مولد ۹ نشان داده شده است.

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad i = 1, \dots, n_g \quad (۶)$$

علاوه بر این، ولتاژ باس‌های غیر ژنراتوری شبکه و نیز بارگذاری خطوط انتقال شبکه نیز محدودیت‌های خود را دارند که به صورت زیر مدنظر قرار می‌گیرند:

$$V_{Li}^{min} \leq V_{Li} \leq V_{Li}^{max} \quad i = 1, \dots, n_d \quad (۷)$$

$$S_{Li} \leq S_{Li}^{max} \quad i = 1, \dots, n_l \quad (۸)$$

در روابط بالا  $n_d$  تعداد باس‌های بار شبکه و  $n_l$  تعداد خطوط انتقال شبکه‌اند.

## ۲-۳- ارزیابی پایداری گذرا

به منظور ارزیابی پایداری گذرا، در سابقه تحقیق روش‌های مختلفی نظیر شبیه‌سازی در حوزه زمان [۳۱، ۳۲]، روش‌های مستقیم [۳۳]، روش‌های ترکیبی [۲۵] و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی [۲۳] پیشنهاد شده‌اند. روش‌های ترکیبی با ترکیب روش‌های دو دسته اول، تا حدودی نقاط ضعف یکدیگر را پوشش داده و از نقاط قوت هر دو روش استفاده کرده‌اند. مزیت عمده این دسته از روش‌ها قابلیت آنها در به‌کارگیری مدل دقیق ماشین‌ها، سیستم‌های تحریک و بارهای غیرخطی و تأمین سطوح مناسبی از راندمان محاسباتی است. در یک شاخه از طرح‌های اولیه این روش با استفاده از مفهوم گذار از سطح مرزی انرژی پتانسیل<sup>۱۱</sup> (PEBS)، شاخص عمومی حاشیه پایداری گذرا پیشنهاد شد؛ اما مشاهده شد مجموع انرژی جنبشی گذرا و انرژی پتانسیل گذرا در طول دوره مطالعه ثابت نبوده است و این شاخص نسبت به برخی از متغیرهای کلیدی شبکه نظیر تغییرات توان مکانیکی ماشین‌ها رفتاری نامناسب و غیرخطی بروز می‌دهد [۳۴]. به منظور حل این مشکلات، توابع انرژی جنبشی گذرای اصلاح‌شده<sup>۱۲</sup> (CTKE)، انرژی پتانسیل گذرای اصلاح‌شده<sup>۱۳</sup> (CTPE) و مفهوم گذار از سطح مرزی انرژی پتانسیل اصلاح‌شده<sup>۱۴</sup> (CPEBS) پیشنهاد شده‌اند که به کمک آنها شاخص حاشیه پایداری گذرای اصلاح‌شده (CTEM) [۲۵] و شاخص حاشیه پایداری گذرا (TSM) [۲۹] معرفی شده‌اند.

با توجه به اینکه روابط حاکم در محاسبه شاخص پیشنهادی و شاخص TSM [۲۹] مشابه یکدیگرند، برای

### ۳- چارچوب حل پیشنهادی

همان‌طور که در سابقه تحقیق مرور شد روش‌های حل مختلفی برای حل مسئله مبتنی بر ضرایب حساسیت توابع انرژی پیشنهاد شده است. از تکنیک‌های محاسبات عددی تا استفاده از بهینه‌سازهای کلاسیک نظیر برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم‌های هوشمند. در مقاله حاضر، استفاده از جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار Matlab پیشنهاد شده است؛ به همین منظور، فرمول‌بندی ارائه شده در بخش ۲ مبنای کدنویسی قرار می‌گیرد. (شکل ۲) روندنمای حل مسئله را نشان می‌دهد.

نحوه مدل‌سازی قید پایداری گذرا در ادامه، تشریح و از آن به‌عنوان قید مسئله OPF در کدنویسی حل مسئله استفاده می‌شود.

### ۳-۱- مدل‌سازی قید پایداری گذرا

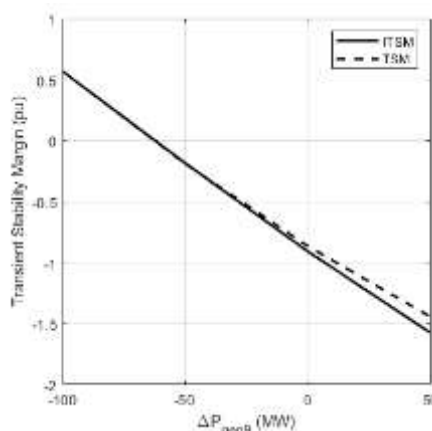
همان‌طور که در مقدمه به آن اشاره شد در مقاله حاضر از تکنیک تکه‌ای - خطی برای مدل‌سازی رفتار تغییرات شاخص ITSM نسبت به تغییرات توان مکانیکی ورودی واحدها و ولتاژ ماشین‌ها استفاده شده است. در این شیوه، ابتدا نقطه کاری معینی برای بهره‌برداری از شبکه تعیین می‌شود (نتایج پخش بار بهینه متداول). سپس شاخص پایداری ITSM به‌ازای تغییرات معینی از متغیرهای تصمیم محاسبه می‌شود که در گام‌های معینی تکرار شده‌اند. با استفاده از بسط مرتبه اول سری تیلور حول نقطه کاری در هر بازه، ضرایب حساسیت شاخص ITSM متناسب با این تغییرات استخراج می‌شوند. تابع پیشنهادی برای مدل‌سازی قید پایداری گذرا به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$ITSM_{new} \cong ITSM_{BC} + \sum_{i=1}^{ng} \left( \frac{\partial ITSM}{\partial P_{Gi}} \cdot \Delta P_{Gi} + \frac{\partial ITSM}{\partial V_i} \cdot \Delta V_i \right) \quad (9)$$

که در آن  $\partial ITSM / (\partial V_i)$  و  $\partial ITSM / (\partial P_{Gi})$  به‌ترتیب ضرایب حساسیت شاخص ITSM نسبت به تغییر توان تولیدی واحدها و ولتاژ ماشین‌ها،  $ITSM_{BC}$  شاخص پایداری گذرای برای نقطه کاری پایه و  $ITSM_{new}$  شاخص

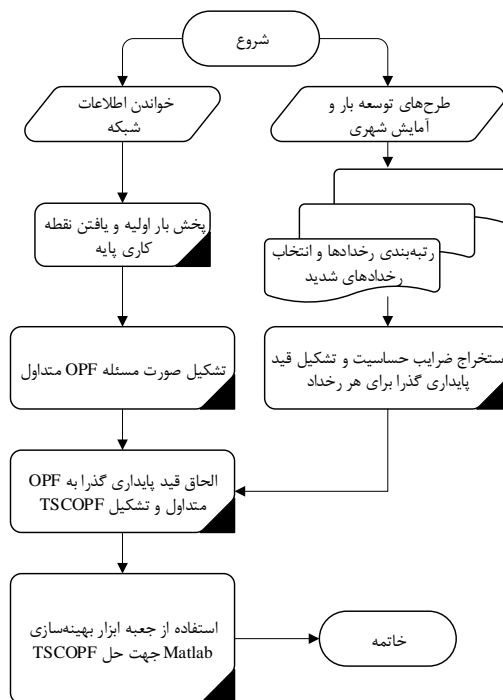
به‌منظور تقریب رفتار تابع در بازه تغییرات کوچک، می‌توان از بسط مرتبه اول سری تیلور حول نقطه کاری مدنظر استفاده کرد. چنین کاربردی حجم محاسبات را کاهش می‌دهد.

در مقاله حاضر به‌منظور پایداری‌سازی سیستم قدرت نیاز به جابه‌جایی توان مکانیکی ورودی نسبتاً بزرگی است (مولد ۹ ناپایدار)؛ به همین دلیل، تکنیک تکه‌ای - خطی برای مدل‌سازی رفتار این تغییرات در فواصل بزرگ‌تر پیشنهاد شده است.



شکل (۱). مقایسه تغییرات شاخص‌های ITSM و TSM نسبت

به تغییر جابه‌جایی تولید مولد ۹



شکل (۲): روندنمای چارچوب پیشنهادی برای حل مسئله

TSCOPF

(شکل ۳-الف) و به صورت خاص (شکل ۳-ب)، به خوبی اهمیت بارگذاری مناسب واحدها (ژنراتور شماره ۹) را در برقراری پایداری گذرا ذیل مسئله TSCOPF نشان می دهند.

پایداری گذرا در نقطه کاری جدید و  $\Delta P_{Gi}$  و  $\Delta V_i$  نیز به ترتیب تغییرات تولید و تغییرات ولتاژ مولد نام است. قید پایداری گذرا به صورت زیر تعریف می شود:

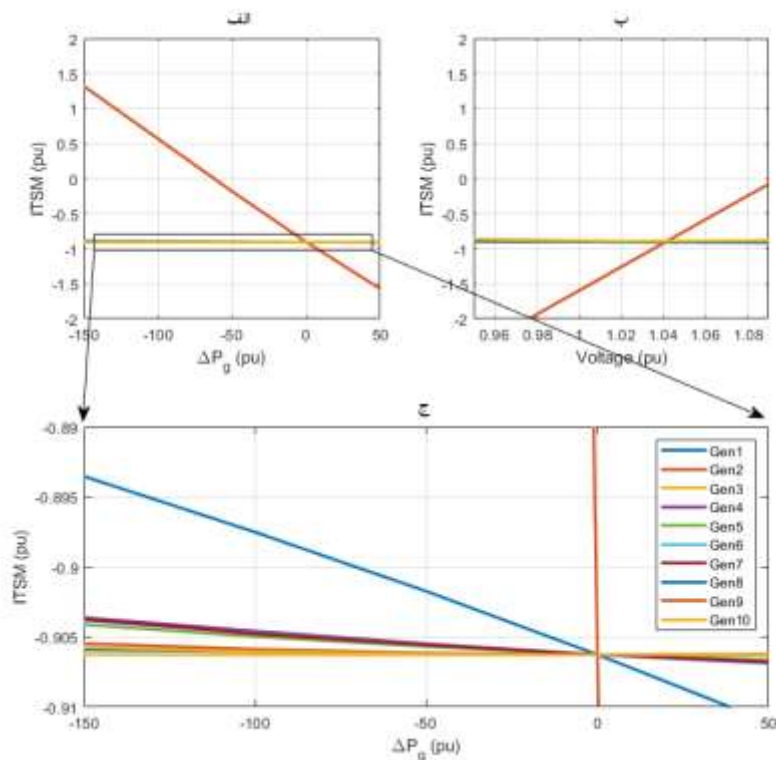
$$ITSM_{min} \leq ITSM_{new} \quad (10)$$

#### ۴- پیاده سازی روی شبکه نمونه

چارچوب پیشنهادی روی شبکه ۳۹ باس New England [۳۵] پیاده شده است. در این مطالعه، محدودیت های ولتاژ باس ها از [۱۰] و ضرایب هزینه سوخت واحدها به همراه ظرفیت تولید ماشین ها از [۸] گرفته شده است. در این مطالعه، مولد ۱۰ (مولد متصل به باس ۳۹) به عنوان باس Slack در نظر گرفته شده است. به منظور استخراج ضرایب حساسیت شاخص پایداری گذرا و انجام بهینه سازی های مسئله به ترتیب از بسته PSAT [۳۶] ۲،۱،۱۱ و جعبه ابزار بهینه سازی در Matlab استفاده شده است.

که در آن  $ITSM_{min}$  حد آستانه پایداری گذراست. در تحقیق حاضر، مقدار آستانه معادل ۰/۰۱ در مبنای واحد به کار گرفته شده است. نمودار تغییرات شاخص ITSM نسبت به تغییرات تولید واحدها و تغییرات ولتاژ ماشین ها به ترتیب در (شکل ۳-الف) و (شکل ۳-ب) نشان داده شده اند.

در این شکل ها تغییرات شاخص ITSM به ازای جابجایی تولید واحدها در گستره [۰، +۵۰] و تغییر ولتاژ ماشین ها در گستره [۰/۹۵، ۱/۰۹] تصویر شده است. این نمودارها نشان می دهند در صورت استفاده از نتایج پخش بار بهینه متداول، شبکه قدرت در برابر رخداد در نظر گرفته شده پایدار گذرا نخواهد ماند. علاوه بر این،



شکل (۳): نمودار تغییرات شاخص ITSM نسبت به تغییرات متغیرهای کلیدی.



شدند و مشخص شد خطای سه فاز در باس ۲۹ و به دنبال آن قطع خط انتقال میان باس های ۲۸-۲۹ شدیدترین رخداد شبکه است [۹, ۱۲, ۱۷, ۲۳, ۳۴]. درخور ذکر است در تحقیق حاضر از مدل کلاسیک ماشین سنکرون استفاده شده است.

با به کارگیری پخش بار بهینه متداول، هزینه بهره برداری از این شبکه معادل با ۶۰۸۹۲/۳۳ دلار بر ساعت حاصل می شود. در این حالت، با وقوع رخداد اشاره شده، شبکه ناپایداری نوسان اول را به سرعت تجربه می کند. در این حالت، شاخص ناپایداری گذرای شبکه (ITSM) معادل با ۰/۹۰۶۳- در مبنای واحد به دست می آید. این مسئله ضرورت اندیشیدن تمهیدات خاص را برای حفظ پایداری گذرا به خوبی نشان می دهد. در ادامه کار با استخراج ضرایب حساسیت تابع انرژی، تشکیل قید پایداری گذرا و الحاق آن به مسئله OPF دنبال می شود. نتایج بهینه سازی در جدول ۱- ارائه شده اند. به منظور قیاس بهتر، نتایج ارائه شده با نتایج مشابه در سابقه تحقیق نیز مقایسه شده اند.

به منظور بررسی جوانب امنیتی بهره برداری از سیستم قدرت بدیهی به نظر می رسد در نظرگیری تمامی رخدادهای محتمل، از جمله رویدادهای غیرشدید، بار محاسباتی غیر ضروری را به مسئله تحمیل کند؛ به همین دلیل، معمولاً دسته ای از رخدادهای شدید شبکه را مدنظر قرار می دهند. در به کارگیری روش پیشنهادی، می توان دسته ای از رخدادهای را در غالب صورت مسئله ارائه شده ارزیابی کرد. برای این منظور، تنها کافی است ضرایب حساسیت  $\partial ITSM / (\partial P_G)$  و  $\partial ITSM / (\partial V)$  برای هر ماشین و برای هر رخداد به صورت مجزا محاسبه و در ارزیابی شاخص ITSM به کار گرفته شود. در ادامه با استفاده از تکنیک وزندهی، شاخص معادلی به کار گرفته می شود که مبین وضعیت پایداری گذرا بر اساس دسته رخدادهای در نظر گرفته شده باشد. در مقاله حاضر، بدون از دست دادن جامعیت روش حل و برای حفظ اختصار، تنها به ارزیابی یک رخداد اکتفا می شود. با استفاده از شاخص معرفی شده در [۳۷] تمامی رخدادهای خروج خط شبکه رتبه بندی

جدول (۱): نتایج بهینه سازی حاصل از به کارگیری رویکردهای مختلف برای رخداد خطای سه فاز در باس ۲۹ و قطع خط انتقال ۲۸-۲۹

پس از ۱۰۰ میلی ثانیه در شبکه ۳۹ باس New England

چارچوب پیشنهادی				[۲۳]		[۱۲]		متغیرهای کنترلی	
با احتساب		بدون احتساب							
ضرایب حساسیت ولتاژ		ضرایب حساسیت ولتاژ							
۱/۰۰۶۶	۲/۴۵۵۸	۱/۰۱۲۱	۲/۴۰۷۲	۱/۰۱۵۰	۲/۴۸۷۳	۰/۹۸۴۰	۲/۴۷۸۳	$V_1(pu)$	$PG_1(pu)$
۱/۰۸۳۹	۵/۷۲۴۰	۱/۰۸۶۷	۵/۲۴۱۳	۱/۰۸۷۰	۵/۷۷۸۴	۱/۰۷۴۰	۵/۷۷۲۳	$V_2(pu)$	$PG_2(pu)$
۱/۰۲۹۹	۶/۴۸۶۷	۱/۰۲۹۹	۶/۱۴۵۳	۱/۰۲۹۰	۶/۵۴۴۷	۱/۰۰۸۰	۶/۵۳۴۱	$V_3(pu)$	$PG_3(pu)$
۱/۰۱۶۰	۶/۳۷۱۰	۱/۰۱۵۴	۷/۰۹۶۰	۱/۰۱۶۰	۶/۴۵۰۰	۱/۰۱۴۰	۶/۴۳۲۸	$V_4(pu)$	$PG_4(pu)$
۱/۰۲۲۷	۵/۱۳۰۸	۱/۰۰۲۲	۵/۵۴۸۱	۱/۰۲۲۰	۵/۱۸۸۲	۱/۰۱۹۰	۵/۱۷۷۸	$V_5(pu)$	$PG_5(pu)$
۱/۰۶۲۸	۶/۵۷۶۲	۱/۰۶۱۷	۷/۲۷۹۰	۱/۰۶۲۰	۶/۶۴۳۲	۱/۰۶۷۰	۶/۶۲۴۶	$V_6(pu)$	$PG_6(pu)$
۱/۰۹۰۰	۵/۶۵۱۰	۱/۰۹۰۰	۶/۴۵۲۲	۱/۰۹۰۰	۵/۷۱۳۷	۱/۰۸۷۰	۵/۶۹۵۹	$V_7(pu)$	$PG_7(pu)$
۱/۰۳۸۸	۵/۴۱۸۵	۱/۰۴۵۹	۴/۷۲۷۳	۱/۰۴۷۰	۵/۴۷۸۱	۱/۰۱۲۰	۵/۴۳۸۸	$V_8(pu)$	$PG_8(pu)$
۱/۰۴۴۹	۷/۶۸۴۸	۱/۰۴۴۱	۷/۶۷۳۹	۱/۰۳۸۰	۷/۵۲۰۲	۱/۰۵۱۰	۷/۷۴۵۴	$V_9(pu)$	$PG_9(pu)$
۱/۰۴۴۵	۹/۸۶۳۰	۱/۰۵۱۱	۸/۸۵۸۷	۱/۰۵۳۰	۹/۹۵۶۰	۱/۰۱۹۰	۱۰/۰۰۳۵	$V_{10}(pu)$	$PG_{10}(pu)$
۶۰۹۲۷/۸۵		۶۱۲۹۲/۹۰		۶۱۶۰۰/۷۶		۶۱۷۹۹/۶۸		هزینه سوخت (دلار بر ساعت)	

رویکرد حاضر، هزینه سوخت تولید واحدها معادل با ۶۰۹۲۷/۸۶ دلار بر ساعت را نشان می دهد که در مقایسه با هزینه ۶۰۸۹۲/۳۳ دلار بر ساعت افزایش ۳۵/۵۳ دلار بر

با توجه به (جدول- ۱)، استفاده از روش پیشنهادی می تواند نتایج مناسب و قابل دفاعی را نسبت به برخی از رویکردهای سابقه تحقیق از خود نشان دهد. با به کارگیری

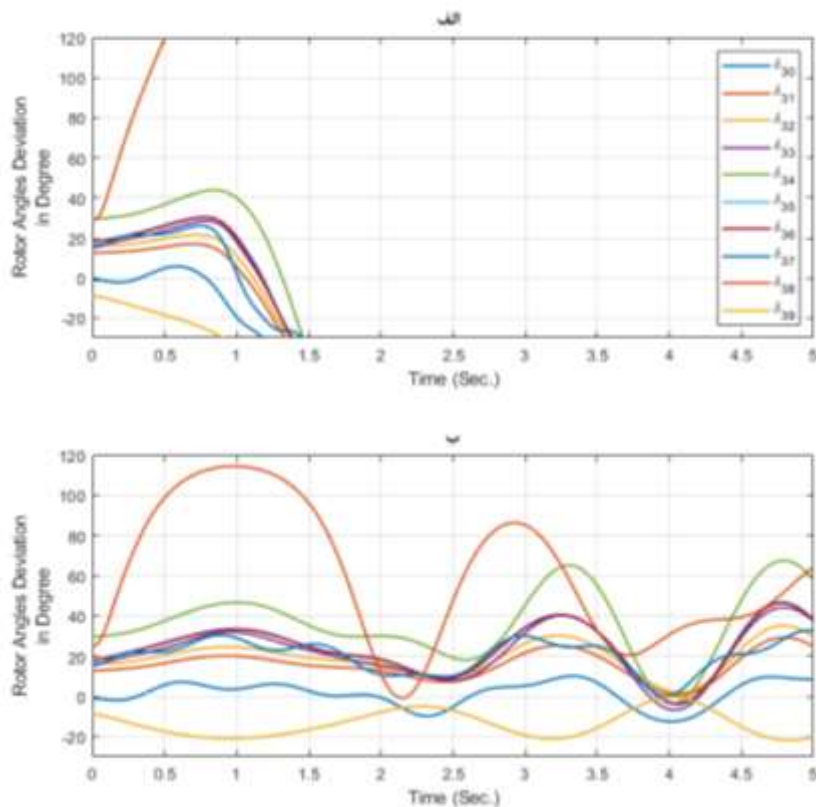
### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، رویکردی مبتنی بر استفاده از ضرایب حساسیت تابع انرژی برای حل مسئله TSCOPF ارائه شد. با بهبود شاخص حد پایداری گذرا و احیای ویژگی خطی آن، شاخص حد پایداری گذرای اصلاح شده (ITSM) پیشنهاد و از آن در ارزیابی پایداری گذرا استفاده شد. با مرور سابقه تحقیق نشان داده شد تغییرات ولتاژ ماشین‌های شبکه به عنوان متغیرهای کلیدی در تعیین ضرایب حساسیت به کار گرفته نشده‌اند. با استخراج و تشکیل قید پایداری گذرا براساس موارد ذکر شده، مسئله TSCOPF به کمک جعبه ابزار بهینه‌سازی در MATLAB حل شد و نتایج حاصل با برخی از موارد سابقه تحقیق مقایسه شدند. با به کارگیری رویکرد پیشنهادی نشان داده شد علاوه بر پایداری شبکه در برابر رخداد بررسی شده، در مقایسه با روش‌های دیگر سابقه تحقیق می‌توان تا ۱/۴۱٪ در هزینه سوخت صرفه‌جویی کرد. نتایج، موفقیت رویکرد پیشنهادی را در ارائه نتایج مناسب برای مسئله نشان می‌دهد.

ساعت را نشان می‌دهد. این هزینه در واقع هزینه تأمین امنیت به منظور حفظ پایداری گذرای شبکه است.

در این جدول، نتایج حاصل از به کارگیری ضرایب حساسیت تابع پیشنهادی تنها با توجه به تغییرات توان مکانیکی ورودی واحدها ارائه شده‌اند. نتایج این قسمت نیز نشان از برتری آن نسبت به دو رویکرد گزارش شده دیگر دارد.

پس از انجام این مطالعات انتظار می‌رود شبکه از نقطه نظر پایداری گذرا توانایی مناسبی در برابر رخداد مطالعه شده داشته باشد؛ به همین منظور، یک شبیه‌سازی در حوزه زمان به منظور نشان دادن این توانایی انجام شد که نتایج آن در شکل ۴-آ آمده‌اند. در این تصویر، ابتدا نتایج شبیه‌سازی حاصل از به کارگیری OPF نشان داده شده‌اند. شکل ۴-الف نشان می‌دهد شبکه در مقابل رخداد، ایمن نیست و اندکی پس از وقوع خطا ناپایدار می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴-ب نشان داده شد با به کارگیری رویکرد پیشنهادی، شبکه قدرت مطالعه شده توانست در مقابل رخداد مذکور تاب‌آوری لازم را از خود نشان دهد.



شکل (۴): زوایای روتور ماشین‌ها. الف) نتایج به کارگیری OPF. ب) نتایج به کارگیری TSCOPF

- pp. 1446-1453, 2003.
- [10] A. Pizano Martínez, C. R. Fuerte Esquivel, and D. Ruiz Vega, "Global Transient Stability-Constrained Optimal Power Flow Using an OMIB Reference Trajectory," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 1, pp. 392-4, 2010, 3.
- [11] A. Pizano Martínez, C. R. Fuerte Esquivel, and D. Ruiz Vega, "A New Practical Approach to Transient Stability-Constrained Optimal Power Flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 3, pp. 1686-1696, 2011.
- [12] X. Tu, L.-A. Dessaint, and H. Nguyen Duc, "Transient Stability Constrained Optimal Power Flow Using Independent Dynamic Simulation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 7, No. 3, pp. 244-253, 2013.
- [13] A. Pizano Martínez, C. R. Fuerte Esquivel, E. A. Zamora Cárdenas, and D. Ruiz Vega, "Selective Transient Stability-Constrained Optimal Power Flow Using a SIME and Trajectory Sensitivity Unified Analysis," *Electric Power Systems Research*, Vol. 109, pp. 32-44, 2014.
- [14] S. Xia, M. Shahidehpour, K. W. Chan, S. Bu, and G. Li, "Transient Stability Constrained Optimal Power Flow Calculation with Extremely Unstable Conditions using Energy Sensitivity Method," *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1-1, 2020.
- [15] H. Saberi, T. Amraee, C. Zhang, and Z. Y. Dong, "A Heuristic Benders-Decomposition-based Algorithm for Transient Stability Constrained Optimal Power Flow," *Electric Power Systems Research*, Vol. 185, p. 106380, 2020.
- [16] Y. Chen, F. Luo, Y. Xu, and J. Qiu, "Self-Adaptive Differential Approach for Transient Stability Constrained Optimal Power Flow," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, No. 15, pp. 3717-3726, 2016.
- [17] H. R. Cai, C. Y. Chung, and K. P. Wong, "Application of Differential Evolution Algorithm for Transient Stability Constrained Optimal Power Flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 719-728, 2008.
- [18] K. Ayan, U. Kılıç, and B. Baraklı, "Chaotic Artificial Bee Colony Algorithm Based Solution of Security and Transient Stability Constrained Optimal Power Flow," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 64, pp. 136-147, 2015.
- [19] K. Ayan and U. Kılıç, "Solution of Transient Stability-Constrained Optimal Power Flow Using Artificial Bee Colony Algorithm," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 21, pp. 360-372, 2013.
- [20] C.-J. Ye and M.-X. Huang, "Multi-Objective Optimal Power Flow Considering Transient Stability Based on Parallel NSGA-II," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 30, No. 2, pp. 857-866, 2015.
- [21] A. Mukherjee, P. K. Roy, and V. Mukherjee, "Transient Stability Constrained Optimal Power Flow Using Oppositional Krill Herd Algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 117, pp. 107537, 2020.
- در ادامه خط سیر تحقیق حاضر، به کارگیری مدل‌های دقیق ماشین‌ها پیشنهاد می‌شوند. هم‌زمان با جایگزینی ماشین‌های سنکرون با لختی بالا با منابع انرژی جدید نظیر تولید بادی و مزارع خورشیدی، به دلیل کاهش حجم ذخیره چرخان، اندکی از توانایی شبکه در هضم و تاب‌آوری رخدادهای شدید کاسته می‌شود؛ به همین دلیل، انجام مطالعات بیشتر در حضور این منابع ضرورت می‌یابد. استفاده از رویکردهای تصادفی در بررسی عدم قطعیت‌های تولید بادی یا بار شبکه نیز مبنای بخش دیگری از تحقیقات پیش رو را شکل می‌دهد.
- ### مراجع
- [1] IEA, "Annual average growth rates of electricity demand in selected regions, 2001-2020," International Energy Agency, 2020, [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-average-growth-rates-of-electricity-demand-in-selected-regions-2001-2020>.
- [2] M. Pavella, D. Ernst, and D. Ruiz Vega, *Transient Stability of Power Systems: A Unified Approach to Assessment and Control*. Springer, 2013.
- [3] P. W. Sauer, M. A. Pai, and J. H. Chow, *Power System Dynamics and Stability: With Synchrophasor Measurement and Power System Toolbox*. 2018.
- [4] R. Zarate Minano, T. Van Cutsem, F. Milano, and A. J. Conejo, "Securing Transient Stability Using Time-Domain Simulations Within an Optimal Power Flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 1, pp. 243-253, 2010.
- [5] D. Gan, R. J. Thomas, and R. D. Zimmerman, "A Transient Stability Constrained Optimal Power Flow," presented at the Bulk Power System Dynamics and Control IV - Restructuring, Santorini, Greece., 1998.
- [6] Y. Xia, K. W. Chan, and M. Liu, "Direct Nonlinear Primal-Dual Interior-Point Method for Transient Stability Constrained Optimal Power Flow," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 152, No. 1, 2005.
- [7] Q. Jiang and Z. Huang, "An Enhanced Numerical Discretization Method for Transient Stability Constrained Optimal Power Flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 4, pp. 1790-1797, 2010.
- [8] T. B. Nguyen and M. A. Pai, "Dynamic Security Constrained Rescheduling of Power Systems Using Trajectory Sensitivities," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 2, 2003.
- [9] D. Ruiz Vega and M. Pavella, "A Comprehensive Approach to Transient Stability Control: Part I-Near Optimal Preventive Control," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 4,

- "Congestion Management Enhancing Transient Stability of Power Systems," *Applied Energy*, Vol. 87, No. 3, pp. 971-981, 2010.
- [30] M. A. Abido, "Optimal Power Flow using Particle Swarm Optimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 24, No. 7, pp. 563-571, 2002.
- [31] M. Eslami, "Low Frequency Stability Based on Optimal Design of Proportional-Integral-Deferral Fuzzy Controller-Fractional Order-Intelligent Hybrid Algorithm Based," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 65-82, 2021.
- [32] C. Fu, J. D. McCalley, and J. Tong, "A Numerical Solver Design for Extended-Term Time-Domain Simulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 4, pp. 4926-4935, 2013.
- [33] T. L. Vu and K. Turitsyn, "Lyapunov Functions Family Approach to Transient Stability Assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, No. 2, pp. 1269-1277, 2016.
- [34] D.-z. Fang, T. S. Chung, and A. K. David, "Improved Techniques for Hybrid Method in Fast-Transient Stability Assessment," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 144, No. 2, pp. 107-112, 1997.
- [35] M. A. Pai and T. A. Lipo, *Energy Function Analysis for Power System Stability*. Boston: Springer US, 1989.
- [36] F. Milano. (2019, September , 2019). *Power System Analysis Toolbox (PSAT)* [Online]. Available: <http://faraday1.ucd.ie/psat.html>.
- [37] N. Amjady and M. Esmaili, "Application of a New Sensitivity Analysis Framework for Voltage Contingency Ranking," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 973-983, 2005.
- Energy Systems*, vol. 83, pp. 283-297, 2016.
- [22] D. Prasad, A. Mukherjee, G. Shankar, and V. Mukherjee, "Application of Chaotic Whale Optimisation Algorithm for Transient Stability Constrained Optimal Power Flow," *IET Science, Measurement & Technology*, Vol. 11, No. 8, pp. 1002-1013, 2017.
- [23] H. Ahmadi, H. r. Ghasemi, A. M. Haddadi, and H. Lesani, "Two Approaches to Transient Stability Constrained Optimal Power Flow," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 47, pp. 181-192, 2013.
- [24] M. Yin, C. Y. Chung, K. P. Wong, Y. Xue, and Y. Zou, "An Improved Iterative Method for Assessment of Multi-Swing Transient Stability Limit," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 4, pp. 2023-2030, 2011.
- [25] D.-z. Fang, T. S. Chung, Z. Yao, and S. Wennan, "Transient Stability Limit Conditions Analysis Using a Corrected Transient Energy Function Approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 804-810, 2000.
- [26] A. K. David and L. Xujun, "Dynamic Security Enhancement in Power-Market Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, No. 2, pp. 431-438, 2002.
- [27] M. Esmaili, H. A. Shayanfar, and N. Amjady, "Multi-Objective Congestion Management Incorporating Voltage and Transient Stabilities," *Energy*, Vol. 34, No. 9, pp. 1401-1412, 2009.
- [28] A. Rabiee, R. Kamali, and H. F. Farahani, "Incorporating Corrected Transient Energy Margin to the Clearing of Coupled Energy and Reactive Power Market," *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2011.
- [29] M. Esmaili, H. A. Shayanfar, and N. Amjady,

---

<sup>1</sup> Transient Stability Constrained Optimal Power Flow (TSCOPF)

<sup>2</sup> Optimal Power Flow (OPF)

<sup>3</sup> Center Of Inertia (COI)

<sup>4</sup> Linear Programming (LP)

<sup>5</sup> Interior Point (IP)

<sup>6</sup> Single Machine Equivalent (SIME)

<sup>7</sup> Benders Decomposition (BD)

<sup>8</sup> Corrected Transient Energy Function (CTEF)

<sup>9</sup> Corrected Transient Energy Margin (CTEM)

<sup>10</sup> Transient Stability Margin (TSM)

<sup>11</sup> Potential Energy Boundary Surface (PEBS)

<sup>12</sup> Corrected Transient Kinetic Energy (CTKE)

<sup>13</sup> Corrected Transient Potential Energy (CTPE)

<sup>14</sup> Corrected Potential Energy Boundary Surface (CPEBS)

<sup>15</sup> Improved Transient Stability Margin (ITSM)

