

جلوگیری از رخداد ناپایداری‌های گذرا و ولتاژ با استفاده از یک طرح اقدامات اصلاحی مبتنی بر قطع تولید و حذف بار

مهدی درفشیان مرام^{۱*}، نیما امجدی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۲۲	<p>بررسی تجربیات گذشته نشان می‌دهد که بروز حوادث شدید در شبکه‌های قدرت از جمله خروج کلیه واحدهای یک نیروگاه یا سقوط یک دکل از خطی چند مداره می‌تواند بیش از یک نوع پایداری را در سیستم قدرت در معرض خطر قرار دهد. طی سالیان اخیر خاموشی‌های سراسری بسیاری در سرتاسر نقاط جهان به علت بروز ناپایداری ولتاژ، گذرا و یا ترکیبی از آنها رخ داده است. یکی از راهکارهای مناسب و کارآمد در این زمینه به کارگیری طرح‌های اقدامات اصلاحی می‌باشد. در این مقاله یک طرح اقدامات اصلاحی جدید حادثه محور مبتنی بر قطع تولید و حذف بار، جهت جلوگیری از بروز ناپایداری‌های گذرا و ولتاژ پیشنهاد شده است. در همین راستا یک مساله بهینه‌سازی بر اساس یک چارچوب چند منظوره ایجاد شده که حل این مساله بهینه‌سازی چندهدفه کمینه‌ترین مقادیر حذف بار و قطع تولید را جهت رسیدن به بیشترین حاشیه پایداری بعد از رخداد حوادث شدید تعیین می‌کند. همچنین یک روش مؤثر جهت حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده است. این روش و مدل پیشنهادی بر روی شبکه انتقال ایران در پیک سال ۱۳۹۳ پیاده‌سازی شده است و نتایج به دست آمده کارآمدی روش فوق را در مقایسه با طرح‌های فعلی اقدامات اصلاحی و سایر روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی نشان می‌دهد.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۲۰	
<p>واژگان کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفه، پایداری گذرا، پایداری ولتاژ، طرح‌های اقدامات اصلاحی.</p>	

۱- مقدمه

به علت وجود محدودیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، سیستم‌های قدرت در پاسخ به افزایش روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی نمی‌توانند بی وقفه گسترش پیدا کنند و باید بیش از پیش در نزدیکی مرزهای پایداری مورد بهره‌برداری قرار گیرند. بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت در چنین شرایط پراسترسی زمینه بروز انواع ناپایداری‌ها و به تبع آن خاموشی‌های گسترده را فراهم آورده است. در نتیجه این امر، دیگر سیستم‌ها و طرح‌های حفاظتی متداول توانایی حفظ پایداری سیستم قدرت را در برابر

حوادث شدید و ترکیبی دارا نیستند [۱]. از این رو امروزه بکارگیری طرح‌های اقدامات اصلاحی^۲ برای جلوگیری از بروز انواع ناپایداری‌ها در صورت وقوع پیشامدهای چنگانه و شدید ضرورتی غیر قابل اجتناب می‌باشد [۱]. یکی از انواع پیشامدهای چنگانه، می‌تواند خروج یک ابر تجهیز باشد که به عنوان SCC^۳ شناخته می‌شود [۱-۳]. از جمله این پیشامدها می‌توان به خروج تمامی واحدهای یک نیروگاه، تجهیزات یک پست یا خطوط یک دکل چند مداره اشاره کرد. به طور مثال اشکال در سیستم سوخت یک نیروگاه یا خط انتقال گاز به نیروگاه می‌تواند منجر به خروج همزمان تمامی واحدها شود. همین‌طور وقوع یک خطای اتصال کوتاه بر روی یکی از باسبارهای یک پست با

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: derafshian@semnan.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان.

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان.

^۱ Remedial action scheme

^۲ Super Component Contingency

گذرا و تنظیم کننده ولتاژ پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۰] یک مدل پخش بار بهینه جهت تعیین کمترین هزینه با در نظر گرفتن بهبود همزمان پایداری ولتاژ و زاویه‌ای پیشنهاد شده است. در مدل ارائه شده به جای اینکه همانند روش‌های مرسوم پخش بار بهینه، تزریق توان به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شود از زاویه شاخه‌ها استفاده شده است. در مرجع [۱۱] با استفاده از یک طرح کنترلی مبتنی بر WAMS سعی شده است تا پس از رخداد حوادث شدید، حذف بار بهینه به گونه‌ای انجام شود که علاوه بر افزایش حاشیه پایداری ولتاژ، پایداری زاویه‌ای سیستم نیز تضمین گردد. در این طرح برای تعیین شدت حوادث از مدل SFR استفاده شده است و پایداری زاویه‌ای تنها به صورت یک قید در نظر گرفته شده است. در مراجع [۱۲-۱۵] روش‌های مختلفی با بکارگیری ادوات FACTS ارائه شده است که در آنها به طور همزمان پایداری ولتاژ و زاویه‌ای با استفاده از اعمال کنترلی پیشگیرانه بهبود می‌یابند.

بررسی کارهای گذشته در این زمینه نشان می‌دهد که تمرکز آنها بیشتر بر روی اقدامات پیشگیرانه بوده در صورتی که بعد از حوادث شدید از جمله رخداد یک SCC بکارگیری طرح‌های حفاظتی شامل اقدامات اصلاحی جهت حفظ پایداری سیستم ناگزیر خواهد بود. در این مقاله یک طرح حفاظت ویژه جدید حادثه محور^۱ مبتنی بر قطع تولید و حذف بار، جهت جلوگیری از بروز ناپایداری‌های گذرا و ولتاژ پیشنهاد شده است. در همین راستا یک مساله بهینه‌سازی بر اساس یک چارچوب چند منظوره ایجاد شده که حل این مساله بهینه‌سازی چندهدفه کمینه‌ترین مقادیر حذف بار و قطع تولید را جهت رسیدن به بیشترین حاشیه پایداری بعد از رخداد حوادث شدید تعیین می‌کند. برای محاسبه حاشیه پایداری گذرا از معیار CTEM^۲ استفاده شده است که به دلیل دارا بودن رفتاری خطی در بازه‌ای وسیع به هنگام تغییر پارامترهای سیستم، در مسائل بهینه‌سازی و طراحی کنترل‌کننده‌ها بسیار کارگشا عمل می‌کند. همچنین برای محاسبه حاشیه پایداری ولتاژ از روش آنالیز مدال که یک روش کارآمد در بررسی پایداری ولتاژ و عوامل موثر در آن می‌باشد، استفاده شده است. برای حل مساله بهینه‌سازی

توجه به آرایش آن پست می‌تواند باعث خروج همه یا بخش اعظمی از تجهیزات پست گردد. در مورد دکل‌های چند مداره نیز این موضوع می‌تواند با سقوط یک دکل و متعاقباً خروج چند خط همراه شود. در [۴ و ۵] تجربه‌های بسیاری شامل این نوع حوادث ذکر شده است که لزوم توجه به بررسی این پیشامدها را جهت بهره‌برداری ایمن از شبکه‌های قدرت نشان می‌دهد.

برای روشن شدن بهتر موضوع فرض می‌شود برای بر طرف کردن خطای اتصال کوتاه سه فاز که بر اثر سقوط یک دکل از خطی چند مداره (این خطوط چند مداره معمولاً خطوط بین ناحیه‌ای بوده و دارای بارگذاری زیادی هستند) اتفاق افتاده، چند خط انتقال اصلی از مدار خارج شوند. خروج خط‌های انتقال بین ناحیه‌ای علاوه بر پربار شدن سایر خطوط می‌تواند مشکلات ناشی از ناپایداری ولتاژ را در پی داشته باشد [۶]. از طرف دیگر پایداری گذرای ناحیه به دلیل رخداد یک خطای اتصال کوتاه شدید در معرض خطر می‌باشد. بنابراین برای مقابله با ناپایداری ولتاژ و گذرا طرح‌های اقدامات اصلاحی در ناحیه به کار گرفته می‌شوند. حال اگر این طرح‌ها مستقل از یکدیگر عمل کرده و محل حادثه نقشی اساسی در عملکرد آنها نداشته باشد مشکلاتی پدید خواهد آمد که در قسمت‌های ۴ و ۶ مقاله به تفصیل در مورد آن توضیح داده خواهد شد. بنابراین در نظر گرفتن همزمان بیش از یک نوع پایداری امریست که باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد چنانکه در ادامه در مروری مختصر به تحقیقات پیشین در این زمینه اشاره می‌شود.

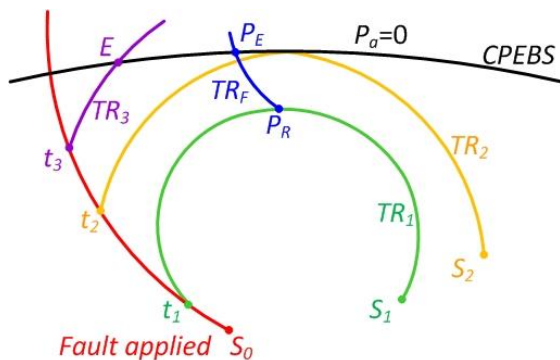
در مراجع [۷ و ۸] کاهش شدید ولتاژ به علت وقوع حوادث در شبکه و به تبع آن عملکرد ژنراتورها با اضافه جریان تحریک که به علت کاهش گشتاور میراکننده می‌تواند منجر به بروز ناپایداری زاویه‌ای نوسانی شود، مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۹] کنترل یکپارچه سیستم قدرت مد نظر می‌باشد. پایداری ولتاژ و زاویه‌ای هر دو بخش مهمی از طرح‌های کنترلی در سیستم قدرت را به خود اختصاص داده‌اند که در نوع مدلسازی و مراحل بهره‌برداری تفاوت دارند. طرح‌های کنترلی معمولاً در دو قسمت مجزا به این دو پایداری می‌پردازند که منجر به رفتاری گسسته در برخورد با حوادث خواهد شد. برای رفع معایب مذکور در مرجع [۹] یک کنترل کننده یکپارچه برای هماهنگی بین پایداری

^۱ Event-Based^۲ Corrected transient energy margin

زاویه در بین مجموعه ماشین‌های بحرانی و غیر بحرانی به علت ایجاد انرژی‌های جنبشی و پتانسیل گذرا در سیستم به دلیل بروز خطا ناشی می‌شود. تابع انرژی گذرا اصلاح شده (CTEF) برای یک سیستم به صورت زیر تعریف می‌شود که می‌توان ثابت بودن آن در طول زمان را اثبات کرد [۱۷]:

$$CTEF = CTKE + CTPE$$

$$= \frac{1}{2} M_T \omega_{CN}^2 - \int_{\delta(P_R)}^{\delta(P_E)} (P_a) d\delta \quad (1)$$



شکل (۱): مسیرهای مختلف برای پایداری گذرا در فضای زاویه ماشین‌ها

که در آن M_T ثابت اینرسی معادل ماشین‌های سیستم، ω_{CN} اختلاف سرعت بین مرکز اینرسی ماشین‌های بحرانی و غیر بحرانی، P_a توان شتاب‌دهنده و δ زاویه روتور ماشین معادل در مدل OMIB می‌باشند. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در نقطه S_0 خطا در سیستم رخ می‌دهد؛ اگر در زمان t_1 خطا بر طرف شود مسیر طی شده سیستم با گذشت زمان TR_1 بوده و پایداری سیستم حفظ خواهد شد؛ اگر خطا در زمان t_2 ($t_2 > t_1$) رفع شود مسیر طی شده سیستم TR_2 بوده و سیستم تا مرز ناپایداری پیش خواهد رفت ولی در نهایت پایدار خواهد ماند؛ اگر در زمان t_3 خطا بر طرف شود مسیر طی شده سیستم با گذشت زمان TR_3 بوده که در نقطه E از سطح مرز انرژی پتانسیل اصلاح شده (CPEBS) که در آن انرژی شتاب دهنده صفر است) عبور کرده و در نهایت سیستم ناپایدار خواهد شد. در حالتی که سیستم در اولین نوسان ناپایدار باشد مقدار انرژی جنبشی گذرای اصلاح شده (CTKE) در نقطه عبور از CPEBS

چندهدفه ارائه شده که یک مساله عدد صحیح-مختلط و غیرخطی (MINLP^۱)، غیر محدب، دارای بهینه‌های محلی فراوان و همچنین ابعاد بزرگ می‌باشد یک روش جدید ارائه شده است که توانایی تولید جواب‌های پارتوکارآمد را دارا می‌باشد.

در ادامه در قسمت دوم معیار CTEM و در قسمت سوم روش آنالیز مدال شرح داده شده‌اند. در قسمت چهارم چارچوب پیشنهادی طرح اقدامات اصلاحی که شامل مساله بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد، ارائه شده است. در قسمت پنجم روش پیشنهادی حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه معرفی می‌شود و در نهایت در قسمت ششم این روش و مدل پیشنهادی بر روی شبکه انتقال ایران در پیک سال ۱۳۹۳ پیاده‌سازی شده و نتایج به دست آمده جهت اثبات کارآمدی روش فوق با طرح‌های فعلی اقدامات اصلاحی و سایر روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی، مقایسه شده است.

۲- معیار CTEM جهت ارزیابی پایداری گذرا

شاخص‌های ارزیابی عملکرد پایداری گذرا را می‌توان با توجه به روش تحلیل پایداری گذرا در دو گروه زیر طبقه‌بندی کرد:

- ۱- شاخص‌های مبتنی بر روش شبیه‌سازی در حوزه زمان.
- ۲- شاخص‌های مبتنی بر روش‌های مستقیم، مانند تابع انرژی یا روش لیاپانوف.

روش‌های ترکیبی نیز در برخی مراجع استفاده شده که در آنها، از تلفیق روش شبیه‌سازی در حوزه زمان و روش مستقیم برای ارزیابی پایداری گذرا استفاده می‌شود [۱۶]. روش محاسبه معیار CTEM، ترکیبی از روش زمانی و روش مستقیم است. در بازه‌ای کوتاه شبیه‌سازی زمانی انجام می‌شود، سپس با تشکیل OMIB^۲ و با کمک معیار سطوح برابر حدود پایداری سیستم، تعیین می‌گردد. در این روش در ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی در حوزه زمان در حین وقوع خطا و بعد از آن در هر گام زمانی از شبیه‌سازی، ماشین‌هایی که زاویه روتور آنها به نسبت زوایای ماشین‌های مجاور و همسان بیشترین تغییرات و فاصله را دارند به عنوان کاندیدای ماشین‌های بحرانی (CMs) شناخته می‌شوند. وجود اختلاف در سرعت و

^۱ Mixed-integer non-linear programming

^۲ One machine- infinite bus

قابل تعریف نیست؛ برای محاسبه ضرایب حساسیت به روش عددی تغییرات $CTEM$ را نسبت به یک اغتشاش کوچک در بار یا تولید، حول نقطه کار محاسبه می‌کنند.

$$S_i^G = \frac{\partial CTEM}{\partial P_i^G} \approx \frac{\Delta CTEM}{\Delta P_i^G} \quad (۴)$$

که در آن P_i^G تولید توان اکتیو واحد i ام و S_i^G حساسیت $CTEM$ به نسبت تغییرات P_i^G می‌باشد. همانطور که تصریح شد $CTEM$ نسبت به تغییرات بسیاری از پارامترها در بازه‌ی وسیعی رفتار خطی دارد [۱۷]، بنابراین با استفاده از خاصیت جمع آثار برای سیستم‌های خطی داریم:

$$\Delta CTEM(P_1^G, \dots, P_i^G, \dots, P_N^G) \cong \sum_{i=1}^N S_i^G (\Delta P_i^G) \quad (۵)$$

به همان ترتیب که در (۴) و (۵) نشان داده شده می‌توان برای تغییرات بار هم ضرایب حساسیت را تعریف کرده و بر اساس آن تغییرات $CTEM$ را محاسبه نمود.

۳- روش تحلیل مدال

یکی از روش‌های مناسب جهت تحلیل استاتیکی پایداری ولتاژ تحلیل مدال می‌باشد. در این روش مشخصه‌های پایداری ولتاژ سیستم را می‌توان با محاسبه مقادیر و بردارهای ویژه ماتریس ژاکوبین شناسایی نمود. در روش تحلیل مدال بایستی ماتریس ژاکوبین را در نقطه کار سیستم محاسبه نمود. برای این منظور از معادله خطی شده پخش بار حول نقطه کار به صورت (۶) استفاده می‌شود [۱۸].

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (۶)$$

ΔP : تغییرات اکتیو شین‌های PV و PQ

ΔQ : تغییرات توان راکتیو شین‌های PQ

$\Delta \theta$: تغییر زاویه ولتاژ شین‌ها

ΔV : تغییر دامنه ولتاژ شین‌ها

$J_{P\theta}$ ، J_{PV} ، $J_{Q\theta}$ ، J_{QV} عناصر ماتریس ژاکوبین هستند که بیانگر حساسیت بین توان انتقالی و تغییرات ولتاژ شین می‌باشند. مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین (λ_i) می‌تواند به عنوان شاخص پایداری ولتاژ استفاده شود. در صورتیکه تمام مقادیر ویژه مثبت باشند، نشان دهنده پایداری ولتاژ سیستم است و اگر حداقل یکی از مقادیر

(نقطه E) با علامت منفی، معیاری جهت سنجش میزان ناپایداری سیستم می‌باشد.

در حالتی که سیستم در اولین نوسان پایدار باشد، $CTEM$ (معیار سنجش پایداری گذرا) با استفاده از انرژی پتانسیل گذرا ($CTPE$) محاسبه می‌شود. به همین منظور خطایی ماندگار با همان شدت اولیه که در نقطه S رخ داده بود در نقطه پیک (P_R) $CTPE$ به سیستم اعمال می‌شود. مقدار افزایش $CTPE$ از نقطه P_R تا نقطه خروج از $CPEBS$ (P_E) به عنوان حاشیه پایداری گذرای سیستم یا همان ($CTEM$) در نظر گرفته می‌شود. تعبیر فیزیکی این شاخص بدین معناست که سیستم بعد از وقوع اغتشاش و رفع آن تا چه حد توانایی جذب انرژی جنبشی و تبدیل آن به انرژی پتانسیل را داراست. در نهایت $CTEM$ برای حالت ناپایدار با استفاده از معادله زیر تعیین می‌شود [۱۷].

$$EM = \frac{1}{2} M_T \omega_{CN}^2(t_E) \quad (۲)$$

همچنین حاشیه پایداری گذرا در حالت پایدار یا همان $CTEM$ با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$CTEM = \int_{\delta(P_R)}^{\delta(P_E)} -(P_a) d\delta \quad (۳)$$

انتگرال فوق برای مدل سیستمی با در نظر گرفتن مقاومت خطوط انتقال وابسته به مسیر می‌باشد که برای حل آن می‌توان از روش‌های عددی مانند روش دوزنقه‌ای استفاده کرد. مقادیر مثبت $CTEM$ نشانگر اندازه پایداری سیستم و مقادیر منفی نشانگر اندازه ناپایداری سیستم می‌باشند. یکی از ویژگی‌های بارز $CTEM$ خطی بودن آن در بازه وسیعی از تغییرات پارامترها از جمله تغییرات تولید، بار، زمان رفع خطا و ... می‌باشد. وجود این مزیت باعث می‌شود که با تعریف ضرایب حساسیت بعد از اعمال تغییرات در توان تولیدی یا مصرفی دیگر مراحل زمانبر محاسبه $CTEM$ را تکرار نکرده و با استفاده از خاصیت خطی بودن و جمع آثار و همچنین ضرایب حساسیت تعریف شده، مقدار جدید $CTEM$ را محاسبه نمود.

برای بدست آوردن ضرایب حساسیت با توجه به تغییرات بار یا تولید، از تقریب درجه اول سری تیلور حول نقطه کار سیستم استفاده می‌شود. از آنجا که بین $CTEM$ و پارامترهای سیستم (بار و تولید) در یک مدل شبکه شامل جزییات ماشین‌ها و بار رابطه صریح و مشتق‌پذیر ریاضی

سیستم شده که رله‌های حفاظتی با قطع خطوط، خطا را ایزوله می‌کنند. اتصال کوتاه رخ داده می‌تواند موجب تهدید پایداری گذرا و قطع خطوط انتقال پر بار پایداری ولتاژ را دچار خطر کند. بنابراین در چنین حوادثی باید هر دو پایداری گذرا و ولتاژ مورد توجه قرار گیرند. اقدام اصلاحی جهت بهبود پایداری ولتاژ در صورت وقوع حوادث شدید حذف بار و جهت بهبود پایداری گذرا قطع تولید می‌باشد. پرواضح است که قطع تولید در مواقعی که پایداری ولتاژ مورد تهدید واقع شده وضعیت پایداری ولتاژ در ناحیه حادثه دیده را به دلیل کاهش منابع توان راکتیو و بارگذاری بیشتر خطوط بدتر می‌کند. همچنین حذف بار هنگامی که پایداری گذرا به علت بروز خطای اتصال کوتاه و شتاب گرفتن ژنراتورها مورد تهدید واقع شده، وضعیت پایداری گذرا در ناحیه حادثه دیده را به دلیل ایجاد افزایش اختلاف بین توان الکتریکی و مکانیکی (که منجر به شتاب گرفتن ژنراتورها می‌شود) بدتر می‌کند. بنابراین در حوادثی که همزمان پایداری‌های ولتاژ و گذرا مورد تهدید واقع شده باید اقدامات اصلاحی جهت مقابله با هر نوع پایداری در زمان مناسب آن به کار گرفته شود. به بیان دیگر به صورت همزمان باید مقدار بهینه حذف بار جهت بهبود پایداری ولتاژ و مقدار بهینه قطع تولید بهبود پایداری گذرا در نظر گرفته شود.

در نتیجه چارچوب پیشنهادی برای ایجاد یک طرح اقدامات اصلاحی که در آن به طور همزمان پایداری‌های گذرا و ولتاژ در نظر گرفته شده‌اند از یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه تشکیل می‌شود که توابع هدف آن (OF_i) همانطور که به ترتیب در روابط (۱۴)-(۱۱) نشان داده شده‌اند عبارتند از: ۱- حاشیه پایداری گذرا ۲- حاشیه پایداری ولتاژ ۳- مقدار قطع تولید ۴- مقدار حذف بار.

$$OF_1(A^{lc}, A^{gsh}) = 1/CTEM \quad (11)$$

$$OF_2(A^{lc}, A^{gsh}) = 1/VSM = 1/\lambda_{\min} \quad (12)$$

$$OF_3(A^{lc}, A^{gsh}) = TLC = \sum_{i \in \Psi(L_c)} A_i^{lc} \quad (13)$$

$$OF_4(A^{lc}, A^{gsh}) = TGS = \sum_{i \in \Psi(G_{sh})} A_i^{gsh} \quad (14)$$

ویژه ماتریس ژاکوبین منفی باشد، مبین ناپایداری ولتاژ در سیستم قدرت است. هر چه مقدار (λ_i) کوچکتر باشد، به معنای این است که مد i ام ناپایدارتر است. به کوچکترین مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین (λ_{\min}) ، مقدار ویژه بحرانی (مد بحرانی) گویند. با توجه به بزرگ بودن ابعاد ماتریس ژاکوبین و زمان بر بودن محاسبات که در تحلیل On Line اهمیت دارد از ماتریس ژاکوبین کاهش یافته با فرض $\Delta P = 0$ به صورت (۷) استفاده می‌شود.

$$\Delta Q = J_{RQV} \cdot \Delta V \quad (7)$$

$$J_{RQV} = J_{QV} - J_{Q\theta}^{-1} J_{PV} \quad (8)$$

از مقدار ویژه بحرانی ماتریس J_{RQV} نیز می‌توان به عنوان معیار نسبی نزدیکی به حد ناپایداری ولتاژ استفاده نمود. ماتریس J_{RQV} بر اساس مقادیر ویژه و بردارهای ویژه به صورت رابطه (۹) قابل نمایش است [۱۸و۱].

$$J_{RQV} = X \cdot \Lambda \cdot Y \quad (9)$$

که در آن X ، ماتریس بردار ویژه راست J_{RQV} ، Λ ، ماتریس قطری مقادیر ویژه J_{RQV} و Y ماتریس بردار ویژه چپ J_{RQV} می‌باشد. یکی از کاربردهای مفید تحلیل مدال، تعیین ضریب مشارکت شین، خط و ژنراتور در هر مد می‌باشد. مشارکت نسبی شین K ام در مد i ام که به ضریب مشارکت شین معروف است از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$P_{ki} = X_{ki} \cdot Y_{ki} \quad (10)$$

X_{ki} ، Y_{ki} عناصر ماتریسهای ویژه چپ و راست هستند. با توجه به اینکه بردارهای ویژه راست و چپ نرمالیزه هستند، لذا مجموع ضرایب مشارکت برای هر مد برابر یک است. اندازه مشارکت شین در هر مد، میزان مؤثر بودن اقدامات انجام شده در آن شین را برای پایداری مد نشان می‌دهد. به عنوان نمونه برای انجام حذف بار با هدف بهبود پایداری ولتاژ، ضرایب مشارکت شین در مد بحرانی (کمترین مقدار ویژه ماتریس J_{RQV}) محاسبه شده و شین‌هایی که دارای ضرایب مشارکت بالاتری هستند جهت حذف بار انتخاب می‌شوند.

۴- چارچوب پیشنهادی طرح حفاظت ویژه

همانطور که پیشتر بدان اشاره شد سقوط یک دکل از یک خط چند مداره موجب بروز خطای اتصال کوتاه در

نمی‌باشد. به همین دلیل کاهش توان در ماشین‌های کاندید که همان ماشین‌های بحرانی سیستم هستند باید یا به صورت قطع کامل تولید انجام شود که به وسیله توربین تریپ یا بستن والوهای کنترلی صورت می‌گیرد یا با اعمال runback که با خارج کردن یکی از پمپ‌های کندانسور (CWP^۱)، بویلر (BFP^۲) و یا فن دمنده‌ی هوا (FDF^۳) در واحدهای بخار و رساندن تولید واحد به ۵۰٪ از توان حداکثر در چند ثانیه اتفاق می‌افتد، صورت پذیرد. جزئیات این روش‌ها در [۱۹] آمده است. بنابراین مقدار کاهش تولید اعمال شده (A_i^{gsh}) تنها می‌تواند مقادیر گسسته: ۱- بدون کاهش ($A_i^{gsh} = \{00\}$)، ۲- کاهش ۵۰٪ ($A_i^{gsh} = \{10\}$)، ۳- کاهش ۱۰۰٪ یا قطع تولید ($A_i^{gsh} = \{11\}$) را داشته باشد. در نتیجه این محدودیت‌ها مساله بهینه‌سازی چندهدفه به یک مساله Mixed-Integer تبدیل می‌شود.

قیدهای مربوط به چارچوب پیشنهادی مساله بهینه‌سازی چندهدفه عبارتند از:

$$CTEM > 0 \quad (18)$$

$$VSM > 0 \quad (19)$$

$$0 \leq A_i^{lc} \leq A_i^L \quad (20)$$

- قیود توان تولیدی اکتیو و راکتیو

$$P_i^{G,\min} \leq P_i^G \leq P_i^{G,\max} \quad i \in \Psi(G) \quad (21)$$

$$Q_i^{G,\min} \leq Q_i^G \leq Q_i^{G,\max} \quad i \in \Psi(G) \quad (22)$$

- قیود توازن نقطه‌ای توان (پخش بار AC)

$$A_i^G - A_i^L + A_i^{lc} - A_i^{gsh} = \sum_{j \in \Psi(B)} (V^i V^j) [G_{ij} \cos(\alpha_{ij}) + B_{ij} \sin(\alpha_{ij})] \quad (23)$$

$$R_i^G - R_i^L + R_i^{lc} - R_i^{gsh} = \sum_{j \in \Psi(B)} (V^i V^j) [G_{ij} \sin(\alpha_{ij}) - B_{ij} \cos(\alpha_{ij})] \quad (24)$$

^۱ Cooling water pump

^۲ Boiler feed pump

^۳ Forced draft fan

که در آن $A^{lc}, A^{gsh}, \Psi(L_C), \Psi(G_{sh})$ به ترتیب بردارهای حذف بار و قطع تولید و مجموعه باسبارها و ماشین‌های کاندید جهت حذف بار و قطع تولید می‌باشند. مقدار $1/VSM$ و $1/CTEM$ به این جهت در نظر گرفته شده‌اند تا تمامی توابع هدف ($OF_i(.)$) کمینه شوند. پرواضح است که با افزایش حاشیه پایداری گذرا ($CTEM$) و حاشیه پایداری ولتاژ (λ_{\min}) مقادیر OF_1 و OF_2 کمینه می‌شوند. در مورد OF_3 و OF_4 نیز مشخص می‌باشد که بهینه‌سازی باید در جهت کمینه‌سازی مجموع مقادیر حذف بار و قطع تولید انجام پذیرد. تمامی توابع هدف تابعی از مقادیر حذف بار (A^{lc}) و قطع تولید (A_i^{gsh}) می‌باشند به طوریکه:

$$A^{lc} = [A_j^{lc}], \quad j \in \Psi(L_C) \quad (15)$$

$$A^{gsh} = [A_i^{gsh}], \quad i \in \Psi(G_{sh}) \quad (16)$$

$$A_i^{gsh} \in \{00, 10, 11\} \quad (17)$$

که در آن (A_j^{lc}) و (A_i^{gsh}) مقادیر حذف بار و قطع تولید در باسبار j ام و ماشین i ام می‌باشند. نکته مهمی که در توضیح رابطه (۱۷) باید بیان گردد اینست که مقدار تولید ماشین‌های کاندید (CMS) جهت کاهش توان تولیدی نمی‌تواند هر مقداری (پیوسته) را در بازه مجاز توان تولیدی واحد داشته باشد. به بیان دیگر در این اقدام اصلاحی (کاهش تولید واحد) توان ماشین به دلیل وجود محدودیت‌های فنی در نیروگاه‌ها تنها می‌تواند مقادیری محدود (گسسته) داشته باشد. دلیل این امر اینست که کاهش توان تولیدی واحدها به منظور جبران افزایش شتاب ماشین‌ها بعد از وقوع خطای اتصال کوتاه انجام می‌شود که این امر به دلیل دینامیک‌های بسیار سریع دخیل در ناپایداری گذرا باید در زمانی بسیار کوتاه (معمولاً در حد چند ثانیه) صورت پذیرد. حال آنکه زمان کاهش تولید سریع‌ترین واحدهای حرارتی در مد Fast loading اتفاق می‌افتد که این نرخ کاهش برای توربین‌های گاز ۹۴،۲ V در حدود ۲۰-۳۰ MW/min می‌باشد که جوابگوی مکانیزم سریع ناپایداری گذرا

چندهدفه (p تعداد توابع تکهدفه) را به مجموعه‌ای از مسائل تکهدفه به شکل زیر تبدیل می‌نماید [۲۰]:

$$\text{Minimize } OF_1(X) \quad (27)$$

Subject to: $OF_2(X) \leq \varepsilon_2^j, \dots, OF_q(X) \leq \varepsilon_p^j$

به طوریکه مقادیر $\varepsilon_2^j, \dots, \varepsilon_p^j$ از ماتریس بازده بدست می‌آیند. به همین منظور مساله بهینه‌سازی باید برای تک تک توابع هدف به صورت جداگانه حل شود تا جواب‌های بهینه X_1^*, \dots, X_p^* محاسبه شوند. که در آن $\min(O F_i) = O F_i(X_i^*)$ می‌باشد. سپس ماتریس بازده (Γ) به شکل زیر تشکیل می‌شود:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} OF_1(X_1^*) & \dots & OF_p(X_1^*) \\ \vdots & & \vdots \\ OF_1(X_p^*) & \dots & OF_p(X_p^*) \end{bmatrix} \quad (28)$$

در نهایت برای محاسبه $\varepsilon_2^j, \dots, \varepsilon_p^j$ خواهیم داشت:

$$\varepsilon_i^j = \text{Min}(OF_i) + \frac{R_i}{q} \times j \quad (29)$$

$$i = 2, 3, \dots, p \quad , \quad j = 0, 1, \dots, q$$

$$R_i = \text{Max}(OF_i) - \text{Min}(OF_i), \quad i = 2, 3, \dots, p \quad (30)$$

که در آن R_i محدوده تابع هدف i ام می‌باشد. برای هر مجموعه از مقادیر $\varepsilon_2^j, \dots, \varepsilon_p^j$ که از روابط (۳۰) - (۲۹) بدست می‌آیند، یک مساله بهینه‌سازی تکهدفه به شکل رابطه (۲۷) ایجاد می‌شود که با حل آن یک جواب بهینه پارتو برای مساله بهینه‌سازی چندهدفه بدست می‌آید. با در نظر گرفتن محدوده i و j در رابطه (۲۹)، تعداد $(q+1)^p$ مساله بهینه‌سازی تکهدفه ساخته می‌شود. این امکان وجود دارد که برای بعضی از این مسائل راه حل ممکن یافت نشود که در این صورت از آن صرف نظر می‌شود. یکی از مشخصات مطلوب این روش وجود قابلیت کنترل چگالی مجموعه جواب‌های پارتو با تنظیم پارامتر q می‌باشد. مقادیر بالاتر q منجر به بروز تفکیک‌پذیری^۱ بالاتر در حل مساله بهینه‌سازی چندهدفه می‌شود که در نتیجه باعث رسیدن به مجموعه جواب‌های پارتوی بیشتری در ازای افزایش حجم محاسبات خواهد شد. جزئیات بیشتر در مورد روش ε -constraint در [۲۰] ارائه شده است. ضعف اصلی این

^۱ Resolution

- قید حداکثر بارگذاری خطوط

$$|S_{ij}| \leq S_{ij}^{\max} \quad i, j \in \Psi(B) \quad (25)$$

- قید اندازه ولتاژ

$$V_B^{\min} \leq V_B^i(t) \leq V_B^{\max} \quad i \in \Psi(B) \quad (26)$$

که در آن $A_i^G, R_i^G, A_i^L, R_i^L$ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تولیدی و مصرفی در باس i ، R_i^{lc}, R_i^{gsh} مقادیر بار و تولید راکتیو حذف شده از باس i ، V^i اندازه فازور ولتاژ باس i ، $G_{ij}, B_{ij}, \alpha_{ij}, S_{ij}$ به ترتیب سوسپتانس، کاندوکتانس، اختلاف زاویه و توان ظاهری بین باس‌های i و j ، $\Psi(B)$ مجموعه باس‌های سیستم و $V_B^i(t)$ اندازه ولتاژ باس i در زمان t می‌باشند.

شناسایی ماشین‌های بحرانی (CMS) به عنوان کاندید کاهش تولید مطابق آنچه در قسمت ۲ بدان اشاره شد، صورت می‌گیرد. همچنین با استفاده از ضرایب مشارکت باس‌هایی که بیشترین اثر را در مد ناپایداری ولتاژ دارند به عنوان باس‌های کاندید حذف بار در نظر گرفته می‌شوند.

بعد از انجام این مراحل، این مساله بهینه‌سازی چندهدفه، عدد صحیح-مختلط، غیر خطی، غیر محدب، دارای بهینه‌های محلی فراوان و ابعاد بزرگ با رعایت قیود (۲۶)-(۱۸) توسط روشی که در قسمت بعد شرح داده می‌شود، حل می‌گردد.

۵- روش پیشنهادی حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه

در ادامه در ابتدا روش ε -constraint و سپس روش ε -constraint تقویت شده (A- ε -constraint) شرح داده می‌شوند و در نهایت روش پیشنهادی جهت حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه می‌شود.

۵-۱- روش ε -constraint

در روش ε -constraint برای حل مسائل چندهدفه یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی بهینه می‌شود و سایر توابع هدف به عنوان قیود مساله در نظر گرفته می‌شوند. روش ε -constraint مساله بهینه‌سازی

ε -constraint تقویت شده باید به صورت زیر اصلاح شود:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \{OF_1(X) - (w_2^n S_2^V + \dots + w_p^n S_p^V)\} \\ & \text{Subject to: } OF_2(X) + S_2^V = \varepsilon_2^j, \dots, \\ & OF_p(X) + S_p^V = \varepsilon_p^j, \quad S_2^V, \dots, S_p^V \in R^+ \end{aligned} \quad (32)$$

به طوریکه:

$$w_2^n = \frac{w_2}{w_1}, w_3^n = \frac{w_3}{w_1}, \dots, w_p^n = \frac{w_p}{w_1} \quad (33)$$

اهمیت نسبی توابع هدف در (۳۲) به وسیله استفاده از ضرایب نرمالیزه وزنی w_2^n, \dots, w_p^n در نظر گرفته شده است. باید به این نکته توجه کرد که اگرچه در روش پیشنهادی MA- ε -constraint ضرایب وزنی توابع هدف در نظر گرفته می‌شوند اما با روش متداول ضرایب وزنی که در حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد تفاوتی اساسی دارد. زمانی که ضرایب وزنی تعیین می‌شوند، روش ضرایب وزنی تنها توانایی تولید یک جواب بهینه پارتو را دارد که معمولاً کارآمد نیز نمی‌باشد در حالیکه در روش پیشنهادی MA- ε -constraint مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتوکارآمد با قابلیت کنترل تعداد جواب‌های مجموعه بدست می‌آید. همچنین برای جلوگیری از بروز مشکلات مربوط به مقیاس متفاوت متغیرها (masking effect) محدوده تغییرات توابع هدف نیز در روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است:

$$\text{Minimize } \left\{ OF_1(X) - \left(\frac{w_2^n S_2^V}{R_2} + \dots + \frac{w_p^n S_p^V}{R_p} \right) \right\} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} & \text{Subject to: } OF_2(X) + S_2^V = \varepsilon_2^j, \dots, \\ & OF_p(X) + S_p^V = \varepsilon_p^j, \quad S_2^V, \dots, S_p^V \in R^+ \end{aligned}$$

در نهایت رابطه (۳۴) فرمول‌بندی روش پیشنهادی MA- ε -constraint را تکمیل می‌کند. جزء بعدی از روش پیشنهادی حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) می‌باشد. این روش وزن توابع هدف را بر اساس اهمیت نسبی آنها در مساله بهینه‌سازی مورد نظر تعیین می‌کند. به همین منظور در ابتدا باید ماتریس تصمیم‌گیری d_M تشکیل داده شود [۱]:

$$d_M = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (35)$$

روش عدم وجود تضمین در کارآمد^۱ بودن جواب‌های بهینه پارتو محاسبه شده می‌باشد. جواب پارتویی کارآمد است که مقدار یک تابع هدف را نتوان بهبود بخشید مگر اینکه حداقل مقدار یکی دیگر از توابع هدف بدتر شود. برای جبران این نقص، در روش ε -constraint تقویت شده قیدهای نامساوی در رابطه (۲۷) با استفاده از متغیرهای شناور^۲ (S_i^V) به قیود تساوی تبدیل می‌شوند:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \{OF_1(X) - \sigma \times (S_2^V + S_3^V + \dots + S_p^V)\} \\ & \text{Subject to: } OF_2(X) + S_2^V = \varepsilon_2^j, \dots, \\ & OF_p(X) + S_p^V = \varepsilon_p^j, \quad S_2^V, \dots, S_p^V \in R^+ \end{aligned} \quad (31)$$

σ یک عدد کوچک است که معمولاً در بازه $(10^{-6}, 10^{-3})$ قرار دارد. ویژگی روش ε -constraint تقویت شده اینست که تمامی راه‌های بدست‌آمده بهینه پارتوکارآمد هستند. اثبات ریاضی این موضوع در [۲۰] ارائه شده است.

۲-۵- روش پیشنهادی MA- ε -constraint^۳

همانطور که در رابطه (۳۱) نشان داده شده است تمامی متغیرهای شناور متناظر با توابع هدف دارای وزنی یکسان هستند در حالی که در مساله بهینه‌سازی توابع هدف دارای اهمیتی متفاوت از یکدیگر می‌باشند. در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه که توابع هدف در رقابت با یکدیگر هستند (همانند مدل پیشنهادی برای RAS) معمولاً به دلیل ناسازگاری موجود بین توابع هدف نمی‌توان راه حلی را یافت که بتواند به طور همزمان تمامی آنها را بهینه کند. بنابراین در اینگونه مسائل به جای جستجوی جواب بهینه سراسری (Global optimal) به دنبال جستجوی مطلوب‌ترین جواب (Most preferred) هستیم که بهترین مصالحه را در بین توابع هدف رقیب و ناسازگار برقرار می‌کند. مطلوب‌ترین جواب بر اساس اهمیت نسبی توابع هدف توسط تصمیم‌گیرنده مساله انتخاب می‌شوند در حالیکه در روش ε -constraint تقویت شده این موضوع در تولید جواب‌ها در نظر گرفته نمی‌شود که ممکن است با خط‌مشی تصمیم‌گیرنده مساله مغایرت داشته باشد. برای برطرف نمودن این ناسازگاری روش

^۱ Efficient

^۲ Slack variables

^۳ Modified augmented ε -constraint

$$\text{Best Solution} = [n_{best,1} \ \dots \ n_{best,p}] \quad (39)$$

$$n_{best,i} = w_i \times \frac{\text{Min}(OF_i)}{\sqrt{\sum_{k=1}^L (OF_{k,i}^*)^2}}, \quad i = 1, \dots, p \quad (40)$$

$$\text{Worst Solution} = [n_{worst,1} \ \dots \ n_{worst,4}] \quad (41)$$

$$n_{worst,i} = w_i \times \frac{\text{Max}(OF_i)}{\sqrt{\sum_{k=1}^L (OF_{k,i}^*)^2}}, \quad i = 1, \dots, p \quad (42)$$

۴- محاسبه فاصله اقلیدوسی هر جواب پارتو از بهترین و بدترین جواب:

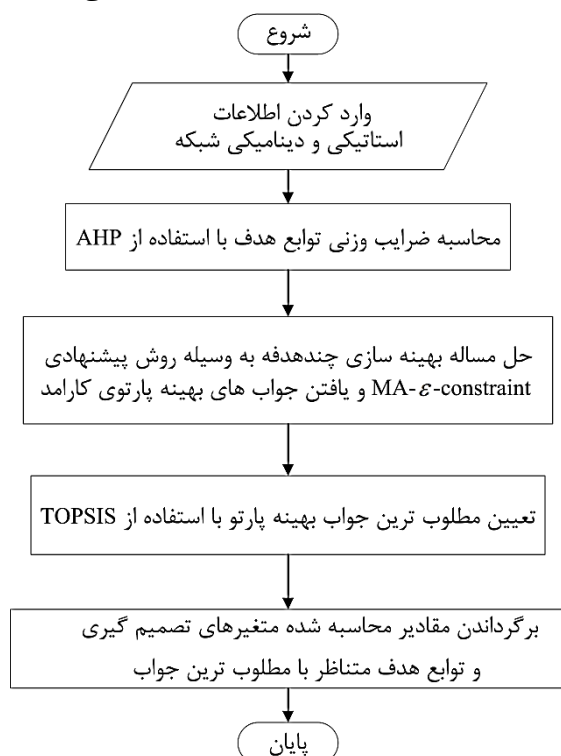
$$D_j^{best} = \sqrt{\sum_{i=1}^p (n_{j,i} - n_{best,i})^2}, \quad j = 1, \dots, L \quad (43)$$

$$D_j^{worst} = \sqrt{\sum_{i=1}^p (n_{j,i} - n_{worst,i})^2}, \quad j = 1, \dots, L \quad (44)$$

۵- محاسبه معیار نزدیکی نسبی برای هر جواب پارتو:

$$RCC_j = \frac{D_j^{best}}{D_j^{best} + D_j^{worst}}, \quad j = 1, \dots, L \quad (45)$$

جواب بهینه پارتو X_j^* با کمترین مقدار RCC_j توسط TOPSIS به عنوان مطلوبترین جواب برگزیده می‌شود.



شکل (۲): روندنمای روش پیشنهادی حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه

به وسیله وزن‌های تعیین شده توسط AHP، روش MA-ε-constraint مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو

درايه‌های ماتریس تصمیم‌گیری (d_{ij}) بر اساس مقادیر جدول (۱) تعیین می‌شوند. به طور مثال اگر تابع هدف (OF_1) به نسبت تابع هدف (OF_2) دارای اهمیت مطلق باشد آنگاه $(d_{12} = 9)$ و $(d_{21} = 1/9)$ قرار داده می‌شود.

جدول (۱): مقایسه بین اهداف

۱	اهمیت یکسان
۳	اهمیت نسبی
۵	اهمیت زیاد
۷	اهمیت خیلی زیاد
۹	اهمیت مطلق

آخرین جزء روش پیشنهادی حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه TOPSIS می‌باشد که مطلوبترین جواب بهینه پارتو را از بین جواب‌های تولید شده توسط MA-ε-constraint انتخاب می‌کند. TOPSIS مطلوبترین جواب را بر اساس فاصله اقلیدوسی از بهترین و بدترین جواب تعیین می‌کند [۲۱]. در ادامه این روش به طور خلاصه شرح داده می‌شود:

۱- ایجاد ماتریس M_{OF} :

$$M_{OF} = \begin{bmatrix} OF_{1,1}^* & OF_{1,2}^* & \dots & OF_{1,p}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ OF_{L,1}^* & OF_{L,2}^* & \dots & OF_{L,p}^* \end{bmatrix} \quad (36)$$

هر ردیف از ماتریس M_{OF} شامل مقادیر توابع هدف از یک جواب بهینه پارتو $(OF_{i,j}^*)$ می‌باشد. همانطور که در توضیح رابطه (۳۲) بیان شد تعداد جواب‌های بهینه پارتو $L = (q+1)^p$ می‌باشد که $L = (q+1)^p$.

۲- ایجاد شکل وزن‌دهی - نرمالیزه شده ماتریس M_{OF} :

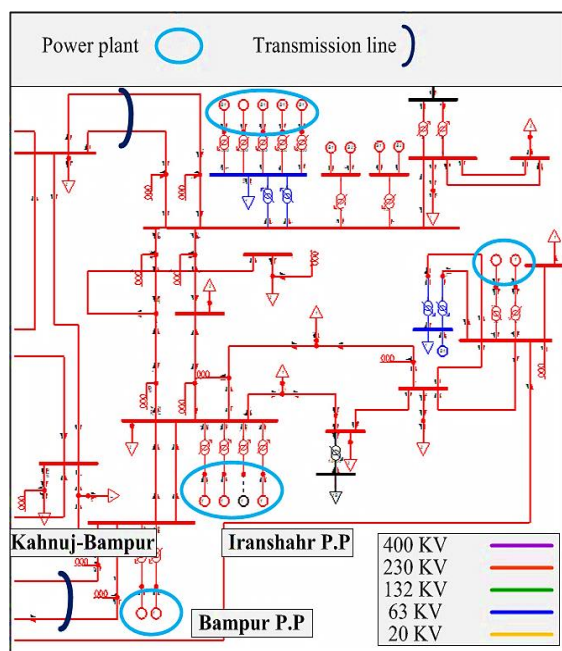
$$M_{OF}^{wn} = \begin{bmatrix} n_{1,1} & n_{1,2} & \dots & n_{1,p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{L,1} & n_{L,2} & \dots & n_{L,p} \end{bmatrix} \quad (37)$$

که در آن:

$$n_{ji} = w_i \times \frac{OF_{j,i}^*}{\sqrt{\sum_{k=1}^L (OF_{k,i}^*)^2}}, \quad j = 1, \dots, L, \quad i = 1, \dots, p \quad (38)$$

۳- هر جواب بهینه پارتو در فضای هدف یک نقطه را مشخص می‌کند که یک بردار فضایی متشکل از توابع هدف و ابعاد آنها می‌باشد. در این فضا بهترین و بدترین جواب‌های بهینه‌ی ممکن $(n_{best,i}, n_{worst,i})$ بر اساس ماتریس بازده (Γ) عبارتند از:

سوابق حوادث پیش‌آمده در این ناحیه نشان می‌دهد بروز هر دو ناپایداری منجر به خاموشی سراسری در کل منطقه سیستان و بلوچستان شده است. از اینرو این ناحیه برای بررسی SCCهای محتمل جهت ارزیابی همزمان پایداری‌های ولتاژ و گذرا در نظر گرفته شده است. در شکل (۳) نمای تک خطی این ناحیه که در نرم‌افزار PSS/E مدل شده، نشان داده شده است. SCCهای محتمل ناحیه نیز در جدول (۲) ارائه گردیده‌اند.



شکل (۳): دیاگرام تک خطی ناحیه سیستان و بلوچستان به همراه SCCهای محتمل ناحیه

جدول (۲): SCCهای محتمل ناحیه سیستان

SCC	نوع	تجهیزات
Bampur	نیروگاه	2x140 MW Units
Iranshahr	نیروگاه	4x60 MW Units
Zahedan	نیروگاه	8x20 MW Units
Iranshahr	پست	6 Lines
Zahedan	پست	5 Lines
Chabahar	پست	6 Lines
Kahnij-Bampur	خط دو مداره	2x380 MVA Lines
Bam-Zahedan	خط دو مداره	2x380 MVA Lines

یک خط دو مداره 230 KV بین ناحیه‌ای (در واقع دوخط بر روی یک دکل مشترک نصب شده‌اند) بین نیروگاه سیکل ترکیبی بمپور و پست کهنوج همانطور که در شکل (۳) نمایش داده شده از جمله خطوط ارتباطی ناحیه سیستان با ناحیه کرمان می‌باشد. سقوط هر دکل از این

و سازگار را تولید می‌کند و در نهایت TOPSIS از میان آنها مطلوب‌ترین جواب را به عنوان راه حل نهایی انتخاب می‌کند. روند نمای روش پیشنهادی حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه در شکل (۲) نشان داده شده است. برای حل مساله بهینه‌سازی ارائه شده در رابطه (۳۴) جهت یافتن جواب‌های بهینه پارتوی طرح اقدامات اصلاحی پیشنهادی، از جعبه‌ابزار بهینه‌سازی "fmincon" که مبتنی بر روش SQP و متعلق به بسته نرم‌افزاری MATLAB می‌باشد و همچنین جعبه‌ابزار افزودنی TOMLAB به نرم‌افزار MATLAB، استفاده شده است.

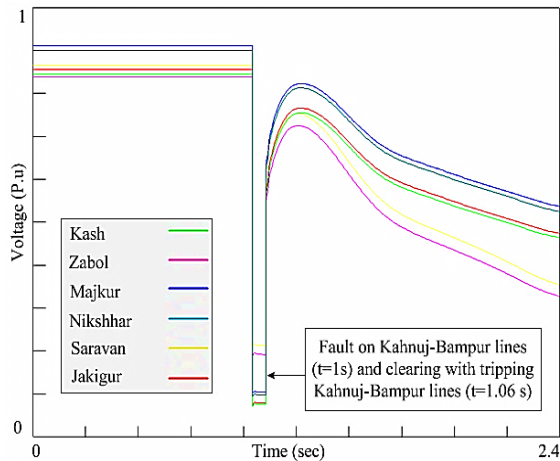
۶- نتایج عددی و شبیه‌سازی‌ها

شبکه انتقال ایران به عنوان یک شبکه واقعی با ابعاد بزرگ جهت ارزیابی چارچوب و روش حل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه انتقال ایران دارای ظرفیت نصب شده در حدود 7.0 GW، 1250 باس، 550 ترانسفورماتور، 520 ژنراتور و بیش از 1100 خط انتقال می‌باشد. در این مقاله، مطالعه موردی بر روی SCCهای محتمل در ناحیه سیستان و بلوچستان صورت گرفته است. اگرچه در تمام شبیه‌سازی‌های استاتیکی و دینامیکی از مدل کل شبکه انتقال ایران استفاده شده است.

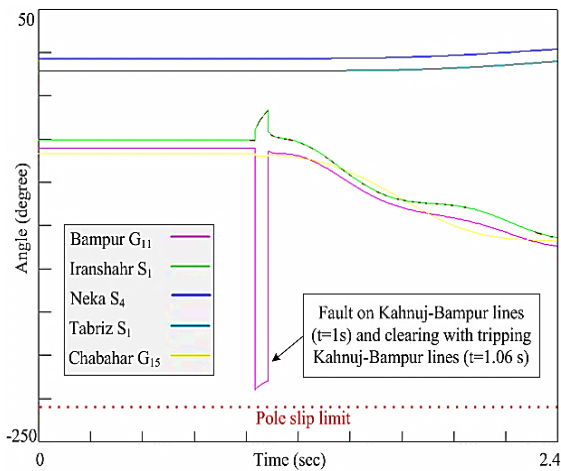
در این مطالعه از مدل مرتبه شش برای ژنراتورها استفاده شده است. برای مدلسازی گاورنرها از انواع مدل‌های IEEE1، GAST و TGOV1 استفاده شده است. همچنین برای مدلسازی AVR واحدها از انواع مدل‌های ESCA2A، ESCA2A، ESST1A و ESCA2A استفاده شده است. در شبیه‌سازی‌ها وابستگی بارها به فرکانس و ولتاژ در نظر گرفته شده است. برای اطلاع از جزئیات مدل‌های مورد استفاده می‌توان به [۲۲] رجوع کرد.

در ناحیه سیستان و بلوچستان تولید ناحیه در ایام پیک بار به نسب نیاز مصرف منطقه کمتر می‌باشد که این تراز منفی از طریق خطوط انتقالی بین منطقه‌ای از سایر واحدهای شبکه تامین می‌گردد. ارتباط ضعیف این ناحیه با سایر مناطق شبکه (وجود تعداد کمی خطوط بین ناحیه‌ای مرتبط با بقیه شبکه سراسری) و همچنین وجود خطوط بلند در ناحیه به دلیل پراکندگی جغرافیایی بار در محدوده‌ای وسیع، این ناحیه را از نظر پایداری‌های ولتاژ و گذرا آسیب‌پذیر نموده است به طوریکه بررسی در

شبکه رسم شده‌اند. نتایج جدول (۳) که در آن میزان حاشیه پایداری‌های گذرا (CTEM) و ولتاژ (VSM)، TLC و TGSH با فرض عدم عملکرد و عملکرد طرح‌های اقدامات اصلاحی فعلی و پیشنهادی پس از رخداد SCC بدست آمده است، با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های زمانی مطابقت دارد.



شکل (۴): ولتاژ پست‌های مؤثر ناحیه سیستم در ناپایداری ولتاژ بدون عملکرد طرح‌های اقدامات اصلاحی



شکل (۵): زاویه برخی از ماشین‌های ناحیه و سایر ماشین‌های شبکه بدون عملکرد طرح‌های اقدامات اصلاحی

جدول (۳): نتایج حاصل از عدم عملکرد و عملکرد طرح‌های اقدامات اصلاحی فعلی و پیشنهادی پس از رخداد SCC

طرح پیشنهادی	طرح فعلی	بدون حفاظت	RAS
۰/۱۰۷	۰/۰۹۲	-۰/۲۳	VSM
۵/۷۱	-۳/۴۲	۰/۰۹۱	CTEM (p.u)
۲۹۸	۲۲۰	-	TLC (MW)
۱۵۰	-	-	TGSH (MW)

خط دو مداره به علت حوادث طبیعی از جمله وزش بادهای شدید که در ناحیه سیستم پدیده‌ایست متداول می‌تواند منجر به بروز خطای اتصال کوتاه و متعاقب آن خروج خط دو مداره مذکور گردد. برخورد فازهای این خط دو مداره به زمین می‌تواند منجر به بروز خطای اتصال کوتاه شدیدی گردد که حاشیه پایداری گذرا دچار تهدید خواهد شد. علاوه بر این خروج این خطوط بعد از سقوط دکل و عملکرد رله‌های حفاظتی در ایام پیک که دارای بارگذاری زیادی به سمت ناحیه سیستم هستند می‌تواند پایداری ولتاژ ناحیه را با خطر روبرو کند. بنابراین خروج خطوط فوق بر اثر سقوط دکل مشترک به عنوان یک SCC محتمل در ناحیه برای این مطالعه در نظر گرفته شده است.

ولتاژ و زاویه برخی از پست‌ها و ژنراتورهای ناحیه بعد از وقوع SCC شرح داده شده با فرض عدم عملکرد طرح‌های اقدامات اصلاحی در ناحیه به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. همانطور که در شکل شماره (۴) نمایش داده شده، حادثه سقوط دکل مشترک خط دو مداره س.ت بمپور-کهنوج در زمان $t=1\text{sec}$ اتفاق افتاده است که رله‌های حفاظتی با ارسال فرمان قطع به بریکرهای خطوط جهت ایزوله کردن خطا در بازه‌ای در حدود سه سیکل (۶۰ msec) باعث باز کردن خطوط بمپور-کهنوج و بر طرف کردن خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در زمان $t=1.06\text{sec}$ شده‌اند. همانطور که در شبیه‌سازی‌ها مشخص شده بعد از بر طرف شدن خطا و خروج خطوط، ولتاژ در ناحیه به شدت افت می‌کند به طوریکه در زمان $t=2.4\text{sec}$ منجر به بروز فروپاشی ولتاژ در ناحیه می‌گردد (شکل شماره (۴)). اگرچه رخداد این خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین منجر به کاهش حاشیه پایداری گذرا می‌شود اما همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده تا قبل از وقوع فروپاشی ولتاژ در زمان $t=2.4\text{sec}$ ، ناحیه به رغم جدایی زاویه ژنراتورهایش از زاویه بقیه ژنراتورهای شبکه، همچنان پایداری گذرای خود را حفظ کرده است (تغییرات زاویه کمتر از زاویه بحرانی ۱۸۰ درجه که منجر به بروز پدیده لغزش قطب و در نهایت عملکرد حفاظت pole slip واحدها می‌شود، می‌باشد). این نکته قابل ذکر است که تغییرات زاویای ماشین‌ها به نسبت تغییر زاویه مرکز اینرسی (COI)

همانطور که از شکل شماره (۶) مشخص می‌باشد بعد از عملکرد رله‌های حذف بار ولتاژی در زمان $t=2\text{sec}$ نه تنها روند افت شدید ولتاژ متوقف می‌شود بلکه روندی صعودی پیدا می‌کند. اما همانگونه که در شکل (۷) نمایش داده شده بعد از انجام حذف بار به مقدار 220 MW در ناحیه روند شتاب گرفتن ژنراتورهای متأثر از خطای اتصال کوتاه (واحدهای گازی س.ت بمپور، گازی س.ت چابهار و بخار ایرانشهر) تشدید شده به طوری که در زمان $t=2,36\text{sec}$ ناپایداری گذرا در ناحیه اتفاق افتاده و سنکرونیزم از دست می‌رود. نکته قابل توجه در این حالت تداخل کارکرد عمل اصلاحی حذف بار ولتاژی در مواجهه با بروز حوادث شدیدی است که در آنها بیش از یک پایداری در معرض تهدید قرار می‌گیرد. در هنگام وقوع اتصال کوتاه توان الکتریکی ژنراتورها تقریباً به صفر می‌رسد در حالی که توان مکانیکی تقریباً ثابت می‌باشد که این اختلاف توان منجر به شتاب گرفتن روتور ژنراتور می‌شود. در مثال فوق انجام حذف بار در زمان کوتاهی بعد از اتصال کوتاه (۱ ثانیه بعد) باعث اختلاف بیشتر بین توان مکانیکی و الکتریکی شده و در نهایت منجر به از دست رفتن سنکرونیزم می‌گردد.

در مرحله بعد مساله بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهادی جهت بهبود همزمان پایداری‌های ولتاژ و گذرا بعد از وقوع SCC خطوط کهنوج-بمپور با استفاده از روش پیشنهادی حل شده که نتایج حاصل در جداول (۳) و (۵) ارائه گردیده است.

جدول (۵): مشخصات طرح اقدامات اصلاحی پیشنهادی جهت مقابله با SCC بمپور-کهنوج

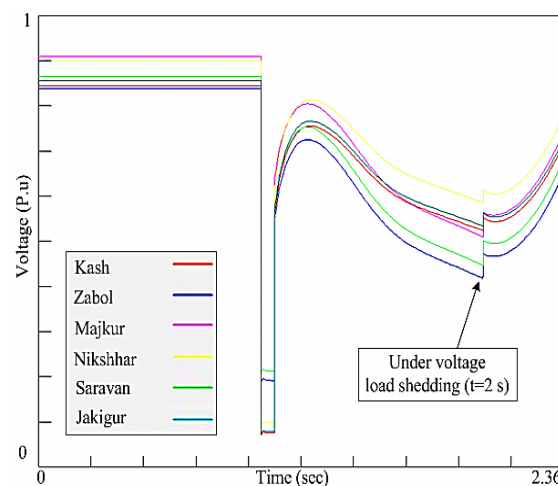
مقدار حذف بار (MW)	باسبار	مقدار قطع تولید (MW)	نیروگاه
۵۲	Khash	۱۲۰	Bampur
۸۴	Zabaol	۳۰	Iranshahr
۳۲	Majkur		
۲۸	Nikshahr		
۵۶	Saravan		
۴۶	Jakigur		

مطابق شکل‌های (۴) و (۵) در صورت عدم عملکرد طرح‌های اقدامات اصلاحی ناپایداری ولتاژ زودتر از ناپایداری گذرا اتفاق می‌افتد بنابراین حذف بار باید زودتر از وقوع ناپایداری ولتاژ اعمال گردد و بعد از آن پیش از وقوع ناپایداری گذرا قطع تولید صورت می‌گیرد. از نتایج

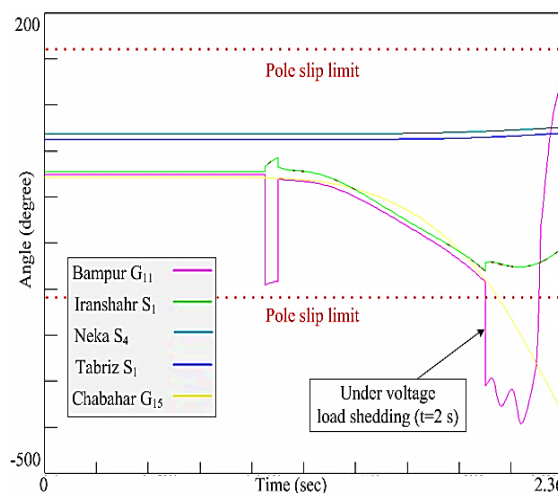
در گام بعدی عملکرد طرح‌های اقدامات اصلاحی فعلی ناحیه که مشخصات آن در جدول شماره (۴) ارائه شده در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌های زمانی در شکل‌های (۶) و (۷) نمایش داده شده است.

جدول (۴): مشخصات طرح اقدامات اصلاحی فعلی ناحیه

سیستان			
زمان پاسخ (sec)	مقدار حذف بار (MW)	آستانه ولتاژ عملکرد (p.u)	باسبار
۱	۳۰	۰/۸۸	Khash
۱	۳۸	۰/۸۸	Iranshahr
۱	۲۰	۰/۸۸	Jakigur
۱	۴۰	۰/۸۸	Zabol
۱	۲۵	۰/۸۸	Saravan
۱	۷۲	۰/۸۸	Chabahar



شکل (۶): ولتاژ پست‌های مؤثر ناحیه سیستان در ناپایداری ولتاژ با عملکرد طرح‌های اقدامات اصلاحی فعلی



شکل (۷): زاویه برخی از ماشین‌های ناحیه و سایر ماشین‌های شبکه با عملکرد طرح‌های اقدامات اصلاحی فعلی

آخرین وضعیت شبکه به جهت مقابله با SCCهای محتمل طراحی و به هنگام شده و در صورت وقوع پیشامدهای مورد نظر به صورت real time اجرا می‌شود. در نهایت باید خاطرنشان کرد که به دلیل تعداد کم SCCهای محتمل در هر ناحیه، برای هر کدام به صورت جداگانه طرحی در نظر گرفته می‌شود تا در صورت وقوع به اجرا درآید. مطلوب‌ترین جواب تولید شده توسط الگوریتم‌های ϵ -constraint، $A\epsilon$ -constraint و $MA\epsilon$ -constraint در جدول (۶) مقایسه شده‌اند. از نتایج این جدول مشخص می‌باشد که جواب تولید شده توسط روش پیشنهادی نه تنها یک جواب بهینه پارتو کارآمد می‌باشد بلکه دارای کمترین مقدار RCC نیز می‌باشد.

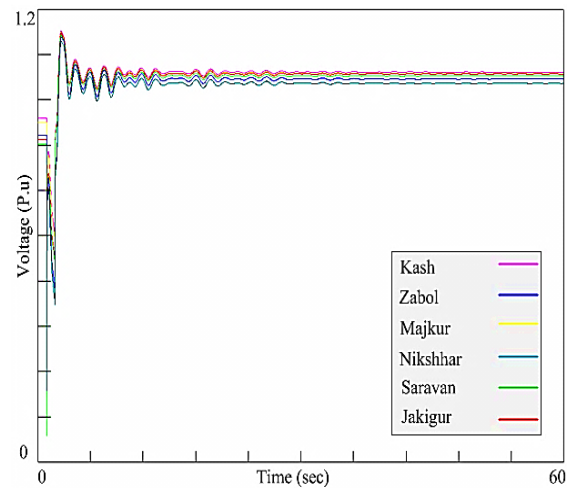
جدول (۶): نتایج حاصل از بکارگیری روش‌های مختلف حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه

	ϵ -constraint	$A\epsilon$ -constraint	$MA\epsilon$ -constraint
VSM	۰/۱۱۲	۰/۰۹۲	۰/۱۰۷
CTEM (p.u)	۶/۱۱	۳/۲۶	۵/۷۱
TLC (MW)	۳۳۶	۲۷۴	۲۹۸
TGSH (MW)	۱۸۰	۱۲۰	۱۵۰
RCC	۰/۱۷۲۱	۰/۱۶۴۱	۰/۱۲۲۳

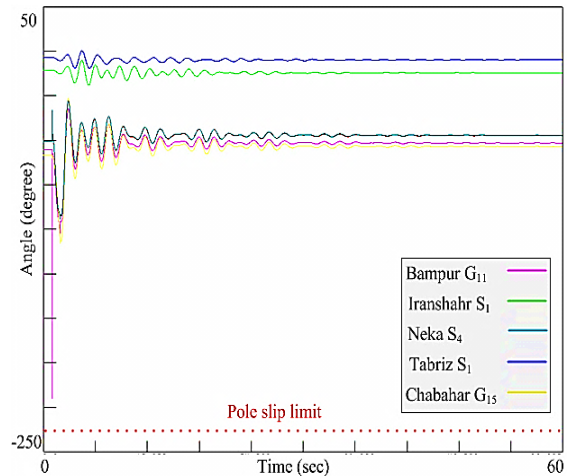
۷- نتیجه‌گیری

طرح‌های اقدامات اصلاحی متداول در برابر بروز حوادث شدید نه تنها ممکن است کارایی مناسبی از خود نشان ندهند بلکه با عملکردی متضاد موجب وخیم‌تر شدن شرایط و تسریع وقوع ناپایداری گردند. یک مثال عملی از این موضوع با سقوط دکلی از یک خط دو مداره در این مقاله شرح داده شد. برای جبران این ضعف یک طرح اقدامات اصلاحی حادثه محور مبتنی بر حذف بار و قطع تولید پیشنهاد شده که چارچوب آن بر اساس یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد. توابع هدف چارچوب طراحی شده عبارت هستند از حاشیه پایداری‌های ولتاژ و گذرا و مقادیر حذف بار و قطع تولید که مقادیر بهینه آنها توسط روش پیشنهادی $MA\epsilon$ -constraint تعیین می‌شود. کارآمدی مدل و روش پیشنهادی با انجام آزمایش بر روی ناحیه سیستم و بلوچستان مورد تایید قرار گرفته است.

جدول (۳) مشخص می‌باشد که با انجام این مقدار از حذف بار و قطع تولید بعد از رخداد SCC مورد مطالعه، هم پایداری گذرا و هم پایداری ولتاژ در ناحیه آسیب دیده حفظ خواهد شد. این موضوع در شکل‌های (۸) و (۹) نیز نشان داده شده است. جهت اطمینان از حصول پایداری ولتاژ و گذرا شبیه‌سازی‌ها تا زمان $t=60$ s ادامه پیدا کرده است.



شکل (۸): ولتاژ پست‌های مؤثر ناحیه سیستم در ناپایداری ولتاژ با عملکرد طرح اقدامات اصلاحی پیشنهادی



شکل (۹): زاویه برخی از ماشین‌های ناحیه و سایر ماشین‌های شبکه با عملکرد طرح اقدامات اصلاحی پیشنهادی

به دلیل مکانیزم سریع ناپایداری‌های ولتاژ و گذرا در صورت بروز رخداد حوادث شدید طرح‌های اقدامات اصلاحی باید با سرعتی بسیار بالا اجرا شوند. با توجه به ماهیت مساله که حل آنرا در زمان‌های بسیار کم (۱ تا ۲ ثانیه) دشوار می‌سازد، بنابراین این طرح اقدامات اصلاحی به شکل یک طرح حادثه محور در نظر گرفته شده که در محیط offline در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه بر اساس

۸- مراجع

- [۱] Derafshian M, Amjady N. Event-based remedial action scheme against super-component contingencies to avert frequency and voltage instabilities. IET Generation, Transmission & Distribution vol. 8, no. 9, pp.1591-1603, 2014.
- [۲] S. Khaitan, D. McCalley, 'System Topology based Identification of High Risk N-k Contingencies'. Iowa State University, May 2006.
- [۳] Caro, M.A. Rios, M.A. Super Components Contingencies for Severity Analysis of Power Systems. Transmission and Distribution Conference: Latin America, 2008 IEEE/PES.
- [۴] Year-in-Review: 2011 Energy Infrastructure Events and Expansions. Infrastructure Security and Energy Restoration Office of Electricity Delivery and Energy Reliability U.S. Department of Energy.
- [۵] Daily reports of Iran electrical grid incidents. Available at: <http://www.igmc.ir>
- [۶] V. Nikolaidis, C. Vournas. Design strategies for load shedding schemes against voltage collapse in the Hellenic system. IEEE Transaction on Power System 2008; 23(2):582-591.
- [۷] Craig Aumuller, Tapan Kumar Saha, "Investigating Voltage Collapse and Subsequent Transient Instability in a Large Power System", Power Engineering Society General Meeting, ۲۰۰۳, IEEE (Volume:۲).
- [۸] Cigré, "Long Term Dynamics Phase II," Cigré TF 38-02-08, 1995.
- [۹] Y. Guo, D. J. Hill, and Y. Wang, "Global transient stability and voltage regulation for power systems," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 16, no. 4, November 2001.
- [۱۰] Hui Liu, Youzhong Miao, "A novel OPF-based security pricing method with considering effects of transient stability and static voltage stability", Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Oct 2009.
- [۱۱] Wei Ma, Lin Lv, Jiyu Deng, "A Research on Power System Adaptive Load Shedding Based on WAMS Assisted Prediction", IEEE Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific.
- [۱۲] L. Conga, Y. Wang, "Transient stability and voltage regulation enhancement via coordinated control of generator excitation and SVC", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol 27, Issue 2, 2005, 121-130.
- [۱۳] Chen, H, Wang, Y, "Transient and voltage stability enhancement via coordinated excitation and UPFC control", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol: 148 (3), pp: 201-208, 2001.
- [۱۴] Ghorbanian, M.J, Goodarzvand, F, "Power quality improvement of grid connected doubly fed induction generator using STATCOM and BESS", 2014 4th International Conference on Engineering Technology and Technopreneuship (ICE2T).
- [۱۵] Jelani, N, Molinas, M, Bolognani, S, "Reactive Power Ancillary Service by Constant Power Loads in Distributed AC Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol: 28 (2), pp: 920-927, March 2013.
- [۱۶] G. M. Maria, C. Tang and J. Kim, "Hybrid Transient Stability Analysis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 5, no. 2, pp. ۳۸۴-۳۹۳, ۱۹۹۰.
- [۱۷] D. Fang, T. S. Chung, Y. Zhang, "Transient Stability Limit Conditions Analysis Using a Corrected Transient Energy Function Approach", IEEE Trans. Power Syst. vol. 15, no. 2, 2000.
- [۱۸] P. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw- Hill, 1994.
- [۱۹] R. Patel, S. Bhatti, "Improvement of Power System Transient Stability Using Fast Valving: A Review", Electric Power Components and Systems, Volume 29, Issue 10, 2001.
- [۲۰] Mavrotas, G, 'Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. Applied Mathematics and Computation 2009; 213:455-465.
- [۲۱] Hwang C. L. and Yoon K.: Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications, Springer-Verlag, 1981.
- [۲۲] PSS/E Model Library, Siemens Power Technologies International, <http://www.siemens.com/power-technologies>.