# بهبود عملکرد در مدار قرار گرفتن واحدهای دارای قیود امنیتی با استفاده از روش تجزیه بندرز و ضرایب توزیع وقفه خطوط

پرنیان محمدی پور[۱]، سیدمحسن سیدموسوی*[۲]

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، parnian_mohmedi@yahoo.com

*۲- استادیار، گروه برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، mohsenmoosavi2000@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۲۷

**چکیده: در مدار قرار گرفتن واحدها با در نظر گرفتن قید امنیت، یک روش کاربردی برای برنامه‌ریزی و عملکرد در زمان واقعی، توسط بهره بردار سیستم است. یکی از راهکارهای حل مسائل در مدار قرار گرفتن واحدهای دارای قیود امنیتی در مقیاس بزرگ استفاده از روش تجزیه بندرز می‌باشد؛ تقویت نحوه فرمول‌بندی مسئله تغییر زیادی روی سرعت حل و حجم محاسباتی می‌گذارد. در این بررسی با استفاده از مفهوم ضرایب توزیع خروج خطوط و ترکیب آن با شرایط امنیتی N-K به بررسی مسئله برنامه‌ریزی چگونگی در مدار قرار گرفتن واحدها پرداخته شد و شاخص جدیدی را تحت عنوان خطوط حساس در شرایط بیان‌شده معرفی گردید. استفاده از این مفهوم این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان در شرایط یکسان حجم محاسبات را در مقیاس‌های بزرگ کاهش داد؛ بنابراین، برنامه‌ریزی در مدت‌زمان کمتری قابل‌حل بوده که برای برنامه‌ریزی‌های روزانه و یا دوره‌های زمانی کوتاه‌تر از اهمیت زیادی برخوردار است. محاسبه و مقایسه روی شبکه ۱۱۸ شینه IEEE انجام گرفته برای انجام محاسبات و حل مسئله پخش بار بهینه از نرم افزار گمز و جعبه ابزار MATPOWER برای تحلیل و محاسبه ضرایب توزیع توان استفاده شده است. برای اجرای شرایط N-k از یک حلقه تکرار شناسایی قیود استفاده شده و نتایج نشان می‌دهد حلقه باعث کاهش زمان حجم محاسبات می‌گردد. در روش پیشنهادی خطوط حساس شناسایی و شرایط بهره‌برداری از این خطوط نشان داده شده است که می‌توان به پاسخ مناسبی با قابلیت اجرا در شرایط بروز خطا رسید.**

**کلمات کلیدی: بهبود عملکرد در مدار قرار گرفتن واحدها، قیود امنیتی، ضرایب توزیع وقفه خطوط، شرایط N-k**

## ۱- مقدمه:

در مدار قرار گرفتن واحدها با در نظر گرفتن قید امنیت[۱]، نحوه مدل‌سازی شبکه یکی از فاکتورهای اساسی در شبکه قدرت می‌باشد. چراکه مسئله SCUC با در نظرگیری معادلات کامل پخش توان، شامل پخش توان اکتیو و راکتیو، به یک مدل غیرخطی و غیر محدب[۲] تبدیل شده است[۱]. در فرمول نویسی پیشنهادی به‌منظور استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح[۳] از پخش بار



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

مستقیم[۴] بجای پخش بار متناوب[۵] استفاده‌شده است[۲،۳]. برای بررسی تغییرات در پخش بار شبکه در شرایط N-1 از ضرایب توزیع جابجایی توان[۶] استفاده‌شده است، چراکه معادلات مربوطه شامل متغیرهای کمتری نسبت به روش‌های برنامه‌ریزی مجدد بوده و مقادیر زاویه ولتاژ تمام نقاط را وارد مدل نمی‌کنند[۴]. به‌هرحال، تنها عیب اجرای شرایط N-k برای خطوط انتقال با استفاده از ضرایب توزیع تزریق[۷] افزایش تعداد حالات و فضای حل است که حجم بار محاسباتی را در مسئله SCUC افزایش می‌دهد و این ضرایب برای بررسی خروج نیروگاه‌ها مناسب‌تر می‌باشند. علت این امر تغییر در میزان مصرف یا تولید نقاط مختلف در صورت خروج یک خط می‌باشد و لازم است تأثیر جداگانه این تغییرات بر روی خطوط فعال شبکه بررسی گردد؛ بنابراین، برای کاهش بار محاسباتی مسئله SCUC نیاز به مدل‌سازی فضای حل به‌صورت فشرده‌تری خواهیم داشت. ضرایب توزیع تزریق به عبارتی جزو ضرایب توزیع خطی می‌باشند که از انواع دیگر آن می‌توان به ضرایب توزیع وقفه خطوط[۸] اشاره کرد که در محاسبه پخش بار اقتصادی[۵]، مسائل توسعه تولید[۶]، عملکرد زمان حقیقی[۷] و محاسبه توان احتمالی عبوری از خطوط در صورت خطا[۸] کاربرد دارد. این ضرایب به علت بیان ارتباط مستقیم تأثیر تغییر توان خطوط در شرایط خروج خط دارای متغیرهای کمتری بوده و برای بررسی شرایط N-k مناسب می‌باشند. جنبه منفی دیگر مسئله SCUC اندازه و حجم محاسباتی این برنامه‌ریزی می‌باشد (مانند تعداد متغیرها، قیود و المان‌های غیر صفر). این شرایط با در نظرگیری شرایط N-1 و بروز خطا به‌مراتب بدتر شده و حجم مسئله بزرگ‌تر و بزرگ‌تر می‌شود[۹]. یکی از راهکارهای حل مسائل SCUC در مقیاس بزرگ استفاده از روش تجزیه بندرز می‌باشد[۱۰]؛ اما تقویت نحوه فرمول بندی مسئله تغییر زیادی روی سرعت حل و حجم محاسباتی می‌گذارد[۱۱]. علاوه بر این، حتی باوجود شرایط N-k تمام قیود مسئله لزومی به بررسی نداشته و فضای جواب قابلیت کوچک شدن را دارا می‌باشد[۱۲]. در مدل پیشنهادی خطاهای موردبررسی در یک حلقه شناسایی‌شده و با اضافه کردن قیود لازم برای برنامه‌ریزی اقدام به کنترل توان عبوری خطوط می‌شود. نحوه عملکرد حلقه شناسایی به صورتی می‌باشد که در هر مرحله قیود مربوط به خطوط شبکه انتقال بررسی‌شده و در صورت وجود اضافه‌بار، در شرایط خطا، قید مربوطه در اجرای بعدی فعال می‌گردد. روند فوق باعث می‌شود که قیود اضافی در هر ساعت و در هر خط مشخص گردند. همچنین در این شرایط خطوط حساس شبکه که با خروج خطوط دارای خطا دچار اضافه‌بار می‌شوند شناسایی می‌گردند.

با توجه به مطالب گفته شده و اهمیت حل مسائل برنامه‌ریزی چگونگی در مدار قرار گرفتن واحدها و پیدا کردن یک روش مناسب برای حل بهینه و سریع این مسئله در مقیاس‌های بزرگ، در این بررسی قصد داریم با استفاده از مفهوم ضرایب توزیع خروج خطوط و ترکیب آن با شرایط امنیتی N-K به بررسی مسئله برنامه‌ریزی چگونگی در مدار قرار گرفتن واحدها پرداخته شود و شاخص جدیدی را تحت عنوان خطوط حساس در شرایط بیان‌شده معرفی شود. استفاده از این مفهوم این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان در شرایط یکسان حجم محاسبات را در مقیاس‌های بزرگ کاهش داد؛ و برنامه‌ریزی در مدت‌زمان کمتری قابل‌حل بوده که این امر برای برنامه‌ریزی‌های روزانه و یا دوره‌های زمانی کوتاه‌تر از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف اصلی در این مقاله، طراحی یک سیستم مدیریت انرژی برای برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن قیود امنیتی شبکه است؛ بنابراین در ادامه و در بخش دوم، به تجزیه و تحلیل اطلاعات پرداخته می‌شود. در بخش سوم، الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌گردد در ادامه و بخش چهارم مشخصات شبکه موردبررسی و نتایج شبیه‌سازی ارائه و تحلیل می‌شوند در بخش پنجم، نتیجه‌گیری کلی از مطالب گفته‌شده بیان خواهد شد.

## ۲-روش‌های تجزیه وتحلیل اطلاعات:

در این تحقیق برای محاسبه ضرایب توزیع توان، ضرایب توزیع وقفه خطوط و ماتریس ادمیتانس شبکه از نرم‌افزار متلب و برای مدل‌سازی الگوریتم پیشنهادی و ایجاد برش‌های بندرز از نرم‌افزار گمز استفاده شده است.

با توجه به توضیحات ارایه شده، استفاده از ضرایب توزیع وقفه خطوط به جای ضرایب توزیع جابجایی توان که باعث کاهش قیود برنامه ریزی می‌گردد استفاده شده است، همچنین در ادامه به بیان فرمول‌بندی مورد استفاده و ارائه الگوریتم پیشنهادی پرداخته خواهد شد. لذا در ابتدا نحوه محاسبه و تأثیر ضرایب تزریق خطی



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

بیان‌شده و در ادامه تابع هدف و قیود برنامه‌ریزی به‌طور کامل معرفی شده است.

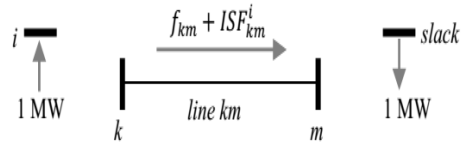
## ۲-۱- ضرایب تزریق خطی

به‌طورکلی زمانی که از پخش بار خطی (پخش بار مستقیم) برای بررسی سیستم استفاده می‌شود، ضرایب تزریق در این حالت ضرایب تزریق خطی نامیده می‌شوند. ضرایب تزریق با استفاده از ماتریس ژاکوبین به‌دست‌آمده از معادلات پخش بار محاسبه می‌شود. این ضرایب به‌راحتی حتی برای شبکه‌های بزرگ نیز قابل‌محاسبه بوده و تنها به ساختار فیزیکی شبکه وابسته هستند. درنتیجه مقادیر آن‌ها برای یک شبکه با ساختار فیزیکی مشخص، ثابت است. این ضرایب به‌طورمعمول در محاسبات پخش بار بهینه استفاده می‌شوند. در این بررسی از ضرایب تزریق خطی برای تعیین خطوط دارای اضافه‌بار استفاده‌شده است. ضرایب استفاده و محاسبه‌شده در این بررسی در ادامه معرفی‌شده‌اند:

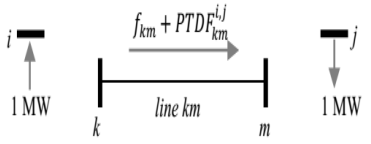
۱) ضرایب توزیع تزریق توان: نشان‌دهنده تأثیر تغییرات توان تزریقی یک نقطه (به ازای یک مگاوات) بر روی خطوط انتقال شبکه است (شکل ۱).

۲) ضرایب توزیع جابجایی توان: نشان‌دهنده تأثیر تغییرات توان یک خط بر روی خطوط دیگر شبکه است (شکل ۲).

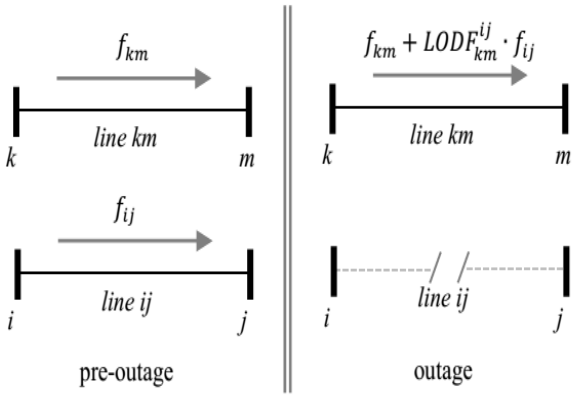
۳) ضرایب توزیع خروج خطوط: نشان‌دهنده اضافه توان عبوری و تغییرات توان عبوری به ازای خروج یک خط از خطوط انتقال است (شکل ۳).




شکل (۱): ضرایب توزیع تزریق توان (ISF)




شکل (۲): ضرایب توزیع جابجایی توان (PTDF)




شکل (۳): ضرایب توزیع خروج خطوط (LODF)

در بررسی پخش بار مستقیم، محاسبه ISF با استفاده از فرمول (۳-۱) است. همچنین PTDF و LODF با استفاده از ISF و معادلات (۲) و (۳) محاسبه گردید. در این معادلات PTDF و LODF به نقطه مبنا بستگی نداشته و تأثیر نقطه مبنا در بررسی پخش بار متناوب اهمیت پیدا می‌کند.

$$ISF^{i}_{km} = \frac{X_{ki} - X_{mi}}{X_{km}} \qquad (۱)$$

$$PTDF^{i,j}_{km} = ISF^{i}_{km} - ISF^{J}_{km} \qquad (۲)$$

$$LODF^{ij}_{km} = \frac{PTDF^{i,j}_{km}}{1 - PTDF^{i,j}_{ij}} \qquad (۳)$$

## ۲-۲- برنامه‌ریزی چگونگی در مدار قرار گرفتن واحدها

در اکثر مطالعات مسئله برنامه‌ریزی تولید از دید بهره‌بردار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت کنترل کلیه تجهیزات در دست بهره‌بردار بوده و هدف، حداقل نمودن هزینه کل سیستم است. در حالت واقعی، بهره‌بردار وظیفه دارد با توجه به قراردادهای بسته‌شده در بازار، بهترین ترکیب را انتخاب نموده و اجرا کند. مسئله برنامه‌ریزی تولید از دو دیدگاه هزینه و یا سود موردبررسی قرار می‌گیرد؛ به‌عبارت‌دیگر تولیدکنندگان این مسئله را باهدف حداکثر نمودن سود خود حل می‌نمایند و از طرف دیگر بهره‌بردار سیستم، این مسئله را به‌منظور حداقل نمودن هزینه با در نظر گرفتن قیود سیستم حل می‌نماید. در مسائلی که هدف حداقل کردن هزینه است، برنامه‌ریزی از دیدگاه ISO موردبررسی قرار



[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

می‌گیرد. در این حالت با توجه به میزان بار مصرفی و قیود، توابع هدف به شکل‌های مختلفی قابل‌بیان می‌باشند. در ادامه مفاهیم ریاضی و فرمول‌بندی استفاده‌شده برای حل مسئله برنامه‌ریزی چگونگی در مدار قرار گرفتن واحدها ارائه‌شده است.

## ۲-۳- فرمول‌بندی

در تحقیق مسئله SCUC فرمول‌بندی‌های متفاوتی ازنظر پیچیدگی معادلات و قیود امنیتی ارائه‌شده است. در این تحقیق از فرمول‌بندی کلی ارائه شده در [۱۳] به‌عنوان مرجع استفاده‌شده است. تابع هدف در این تحقیق حداقل کردن هزینه کل متغیرها است (شامل هزینه تولید، هزینه‌های روشن و خاموش شدن نیروگاه‌ها، هزینه بار مصرفی تأمین نشده و ...). این مسئله شامل قیود دسته‌بندی‌شده به‌صورت زیر است که در ادامه توضیح داده‌شده‌اند:

- قیود شبکه
- قیود واحدهای تولیدی
- قیود منطقی و تصمیم‌گیری

**تابع هدف**

تابع هدف در نظر گرفته‌شده برای حل مسئله SCUC به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned}&\min \sum_{n,t} CSU_t.su_{nt} + \sum_{n,t} CSD_t.sd \\ &+\sum_{n,t} CF_t.uc_{nt} + \sum_{n,t} CV_t.p^T{}_{nt} \\ &+\sum_{n,t} CRU_t.ru_{nt} + \sum_{n,t} CRD_t.rd_{nt} \\ &+\sum_{n,i} C^{ENS}.ens_{ni} + \sum_{n,iic,jjc} CF'_{iic}.\Delta f'^{jjc}_{n,iic}\end{aligned} \quad (۴)$$

با توجه به معادله (۴) مشخص است که تابع هدف از ۸ بخش هزینه تشکیل‌شده است که به ترتیب بیانگر: ۱- هزینه روشن شدن نیروگاه، ۲- هزینه خاموش شدن نیروگاه، ۳- هزینه ثابت نیروگاه، ۴- هزینه توان تولیدی (هزینه متغیر)، ۵- هزینه افزایش رزرو ثانویه، ۶- هزینه کاهش رزرو ثانویه، ۷- هزینه حذف بار مصرفی و ۸- هزینه تخطی توان عبوری از خط است.

**قیود برنامه‌ریزی**

قیود در نظر گرفته‌شده برای حل مسئله SCUC به‌صورت زیر است:

❖ تعادل توان

$$\sum_t p^T_{nt} + \sum_h p_{nh} + \sum_i ig_{ni} + \sum_i ens_{ni} = \sum_i D_{ni} \quad (۵)$$
$$\forall n$$

در این رابطه بیان‌شده است که مجموع تولید (شامل نیروگاه‌ها حرارتی، آبی و منابع تجدید پذیر) و تقاضای تأمین نشده باید برابر با بار فعال شبکه باشد.

❖ رزرو ثانویه

$$\sum_t ru_{nt} + \sum_h ru_{nh} \geq DU_n \quad (۶)$$

$$\sum_t rd_{nt} + \sum_h rd_{nh} \geq DD_n \quad (۷)$$

در این قید میزان حداقل رزرو ثانویه نیروگاه‌های حرارتی و آبی برای افزایش و کاهش تولید نشان داده‌شده است.

❖ محدودیت تولید توان نیروگاه‌های حرارتی

$$p_{1t} + ru_{1t} \leq uc_{1t}(\overline{p}_t - \underline{p}_t) \quad (۸)$$

$$\begin{aligned}&p_{nt} + ru_{nt} \leq uc_{nt}(\overline{P}_t - \underline{P}_t) \\ &-sd_{n+1,t}(\overline{P}_t - PSD_t) \\ &-su_{nt}.\max(PSD_t - PSU_{t,}0)\end{aligned} \quad (۹)$$

$$\begin{aligned}&\sum_n p_{nh} \leq E_h \quad \forall t,n \\ &0 \leq ru_{nh} \leq PRD_h \quad = 2,..., \\ &0 \leq ig_{ni} \leq IG_{ni} \quad N-1 \\ &\forall ni\end{aligned} \quad (۱۰)$$

$$\begin{aligned}&P_{Nt} + ru_{Nt} \leq uc_{Nt}(\overline{P} - \underline{P}_t) \quad \forall t \\ &-su_{Nt}(\overline{P} - PSU_t)\end{aligned} \quad (۱۱)$$

در قیود فوق نحوه بهره‌برداری از واحدهای حرارتی و میزان تولید در لحظه روشن شدن و خاموش شدن مشخص‌شده است. همچنین به‌منظور تأمین قیود برنامه‌ریزی در دوره اول، این قید در معادله (۸) جدا از دوره‌های بعدی ارائه‌شده است.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

❖ محدودیت تغییر توان خروجی

$$p_{nt} - p_{n-1,t} + ru_{nt} \le RU_t \quad (۱۲)$$

$$p_{nt} - p_{n-1,t} + ru_{nt} \le RU_t \quad (۱۳)$$

در قیود فوق محدودیت تغییر افزایشی و کاهشی میزان تولید نیروگاه‌ها با توجه به مقدار رزرو ثانویه بیان‌شده است.

❖ قیود منطقی وضعیت نیروگاه‌ها

$$uc_{nt} - uc_{n-1,t} = su_{nt} - sd_n \quad (۱۴)$$

$$\sum_{n'=n+1-TU_t}^{n} su_{n't} \le uc_{nt} \quad (۱۵)$$

$$\sum_{n'=n+1-TU_t}^{n} su_{n't} \le 1 - uc_{nt} \quad (۱۶)$$

در معادلات فوق قیود تصمیم‌گیری برای مشخص کردن برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن واحدها به همراه ارتباط آن با متغیر وضعیت روشنایی و خاموشی نیروگاه بیان‌شده است.

❖ محدودیت تولید توان نیروگاه‌های آبی

$$\sum_n p_{nh} \le E_h \quad (۱۷)$$

$$0 \le ru_{nh} \le PRU_h \quad (۱۸)$$

$$0 \le ru_{nh} \le PRD_h \quad (۱۹)$$

در این قیود نحوه بهره‌برداری از نیروگاه‌های آبی و حداکثر رزرو قابل تأمین توسط آن‌ها مشخص‌شده است.

❖ حداکثر تولید متناوب

$$0 \le ig_{ni} \le IG_{ni} \qquad \forall ni \quad (۲۰)$$

در قید فوق حداکثر میزان تولید متناوب نیروگاه‌های تجدید پذیر در هر نقطه مشخص‌شده است.

## ۲-۴- خروج خط و شرایط N-1

با توجه به مطالب گفته‌شده، مشخص شد که ISF به‌طور گسترده‌ای برای نمایش عملکرد شبکه بکار گرفته‌شده است [۱۴] و فرمول‌بندی آن نیز در همین بخش ارائه شد؛ بنابراین، توان عبوری از خط را می‌توان با استفاده از توان تزریقی تمام نقاط (توان تولیدی منهای بار مصرفی) با استفاده از معادله (۲۱) محاسبه کرد. ضرایب ISF را می‌توان برای خروج هر خط و ساختار فیزیکی جدید محاسبه کرد و درنتیجه شرایط N-1 با استفاده از معادله (۲۲) قابل‌اجرا است. در حقیقت، معادله (۲۳) یک فرمول کلی بوده و ISF را می‌توان برای خروج خطوط مختلف در شبکه محاسبه کرد.

$$f_{n,iic} = \sum_i ISF_{iic}^{i} \cdot \left(\sum_{t\in gi} p_{nt}^{T} + \sum_{h\in gi} p_{nh} + ig_{ni} + ens_{ni} - D_{ni}\right) \quad (۲۱)$$

$$f'^{jjc}_{n,iic} = \sum_i ISF'^{i,jjc}_{iic} \cdot \left(\sum_{t\in gi} p_{nt}^{T} + \sum_{h\in gi} p_{nh} + ig_{ni} + ens_{ni} - D_{ni}\right)' \quad (۲۲)$$

$$\forall n, iic, jjc$$

$$|f_{n,iic}| \le \bar{F}_{iic} \qquad , \forall n, iic \quad (۲۳)$$

$$|f'^{jjc}_{n,iic}| \le \bar{F}'_{iic} + \Delta f'^{jjc}_{n,iic} \quad , \forall n, iic, jjc \quad (۲۴)$$

نقطه منفی معادله (۲۲) این است که تعداد قیود با افزایش تعداد خطوط، نقاط و خطاهای خروج خط به‌شدت افزایش پیداکرده و بار محاسباتی زیادی را به خاطر ضرایب غیر صفر موجود ناشی می‌شود (با توجه به جدول (۱)). معادلات (۲۳) و (۲۴) به ترتیب نشان‌دهنده ظرفیت خط و ظرفیت اضطراری خط در شرایط خاص است.

جدول (۱): تعداد ضرایب غیر صفر

| قیود امنیتی و شرایط N-1 | ضرائب غیر صفر |
|---|---|
| ISF | NL . NO . NB . NG |
| LODF | NL . NO |
| NL= number OF LINE, NO= number of outages, NB=number of buses, NG=number of generators | |

در این تحقیق و با توجه به مشکلات موجود برای روش‌های موجود، از ضرایب LODF با استفاده از معادله (۲۵)



[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

برای تخمین توان عبوری از خطوط انتقال در پخش بار مستقیم استفاده‌شده است؛ بنابراین با یکسان بودن تعداد قیود، تعداد ضرایب غیر صفر کمتری در معادلات موجود بوده و بار محاسباتی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که معادله (۲۱) علاوه بر موارد فوق نیاز به محاسبه توان عبوری از خط در حالت پایدار یا قبل رخ دادن خطا دارد.

$$f'^{jjc}_{n,iic} = F_{n,iic} + LODF^{jjc}_{iic} . f_{n,jjc} \ \forall n, iic, jjc \quad (۲۵)$$

**نحوه شناسایی و ایجاد قیود لازم بهینه‌سازی**

همان‌طور که گفته شد، مشکل مسائل SCUC در مقیاس بزرگ زیاد بودن حجم محاسبات و وجود قیود غیرضروری در مسئله بهینه‌سازی است. این قیود می‌تواند شامل ارتباط بین خط خارج‌شده و توان عبوری از خطوط بعد از رخداد خطا باشد؛ بنابراین، از یک حلقه شناسایی بر اساس LODF برای پیدا کردن قیود لازم برای قرار گرفتن در محدوده جواب استفاده‌شده است. در لحظه شناسایی فوق از معادله (۲۵) استفاده‌شده و در پایان هر تکرار توان عبوری از خطوط بعد از رخداد خطا با استفاده از فرمول (۲۶) محاسبه می‌شود.

$$\hat{F}'^{jjc}_{n,iic} = F_{n,iic} + LODF^{jjc}_{iic} . f_{n,jjc} \quad , \quad \forall n, iic, jjc \quad (۲۶)$$

## ۳- الگوریتم پیشنهادی

در این بخش به ارائه الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله SCUC و نحوه شناسایی و ایجاد قیود لازم برای حل مسئله پرداخته شده است. همچنین در این الگوریتم نحوه شناسایی خطوط حساس نیز بیان میشود. مراحل موجود درروش پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده‌شده است. در اجرای این الگوریتم پنج مرحله اساسی به‌صورت زیر به اجرا گذاشته می‌شود:

**مرحله اول:** در این مرحله، اطلاعات کامل شبکه شامل مشخصات خطوط انتقال، ژنراتورها و بارهای شبکه جمع‌آوری می‌شود. در بسیاری از موارد، اطلاعات مربوط به ظرفیت خطوط برای شبکه‌های آزمایشی در دسترس نیست و پژوهشگران با اعمال ظرفیت به‌صورت دستی اقدام به ایجاد تراکم در این‌گونه شبکه‌ها نموده‌اند. در میان اطلاعات فوق، اطلاعات مربوط به خطوط شامل امپدانس و ظرفیت خطوط و اطلاعات مربوط به توابع هزینه نیروگاه‌ها ازجمله اطلاعات حیاتی برای برنامه‌ریزی می‌باشند.

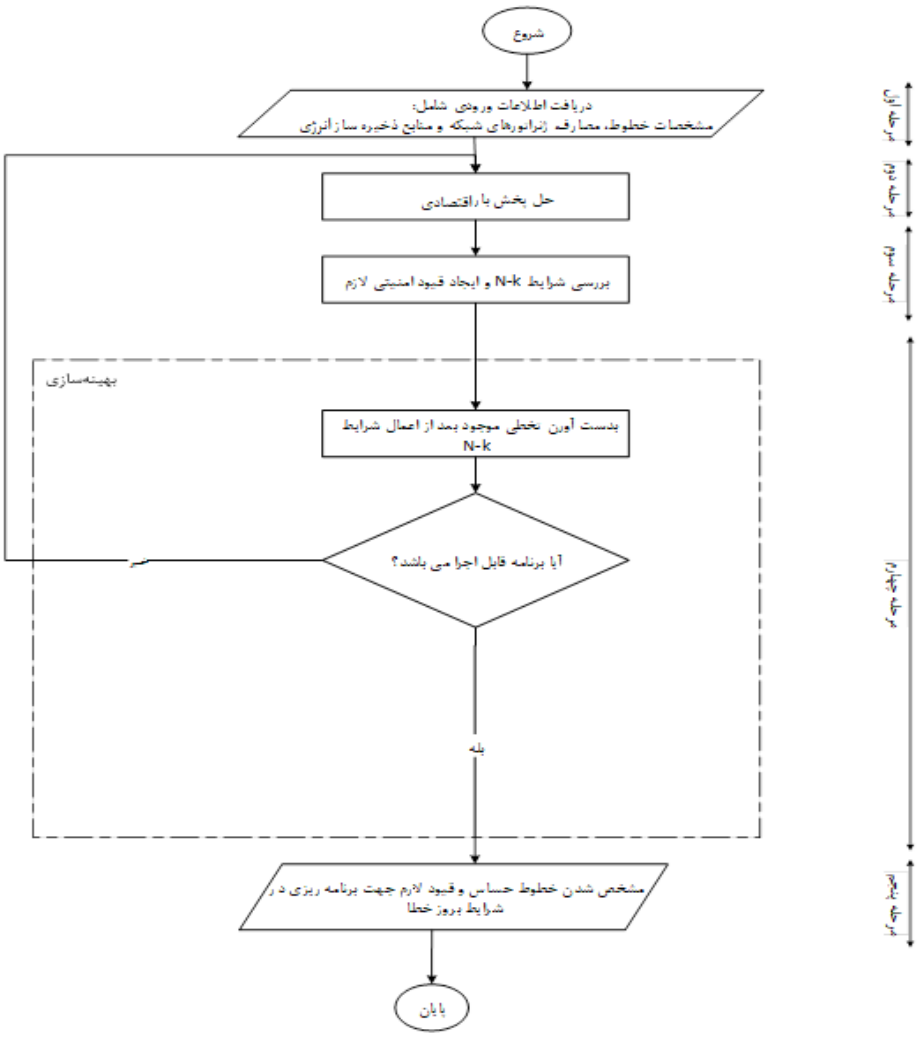
**مرحله دوم:** در این مرحله، پخش بار بهینه برای تعیین وضعیت شبکه انجام‌شده و توان عبوری خطوط محاسبه می‌شود. پخش بار صورت گرفته در این مرحله به‌صورت جریان مستقیم بوده و کلیه قیود امنیتی مربوط به شبکه مانند محدودیت‌های تولید، محدودیت ظرفیت خطوط در نظر گرفته می‌شود.

**مرحله سوم:** در این مرحله، برنامه‌ریزی به‌دست‌آمده بر اساس خروج خطوط مختلف و تغییرات حاصل در شرایط جدید در شبکه بررسی‌شده و قابلیت عملیاتی بودن آن بررسی می‌شود. به شکلی که خطوط دارای احتمال خروج بررسی‌شده و انحراف و تخطی کل در شرایط N-k برای خطوط انتخابی به دست می‌آید. در این شرایط با توجه به برش‌ها و خطوطی که بارخداد خطا دچار اضافه بار می‌شوند اقدام به شناسایی خطوط حساس شبکه با توجه به موقعیت تولیدات و مصارف شده است.

**مرحله چهارم:** در این مرحله، با توجه به نتایج مرحله قبل و خطوط حساس شبکه، برش‌های (قیود) لازم برای کنترل محدودیت‌های امنیتی شبکه به قیود برنامه‌ریزی اضافه می‌گردد. سپس برنامه‌ریزی مجدد انجام‌شده و این حلقه تا صفر شدن مقدار تخطی کل ادامه پیدا می‌کند.

**مرحله پنجم:** در این مرحله، با توجه به خروجی مرحله قبل، قیود مؤثر در برنامه‌ریزی شرایط N-k شناسایی‌شده و بعد از برنامه‌ریزی شبکه با قیود موردنظر شاخص‌ها و مبادلات اقتصادی شبکه و تابع هدف محاسبه می‌گردد. در این میان مواردی مانند هزینه تولید نیروگاه‌ها و تعداد و نوع محدودیت‌های اعمال‌شده مشخص می‌شود.

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021




شکل (۴): الگوریتم پیشنهادی

**مراحل اجرای الگوریتم بندرز:**

در این بخش فرمول نویسی مربوط به الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. با توجه به الگوریتم ارائه‌شده در بخش قبل، برنامه‌ریزی در چهار مرحله صورت گرفته است. در مرحله اول برنامه‌ریزی با توجه به خطاهای در نظر گرفته‌شده مشخص می‌گردد، سپس با استفاده از برش‌های نهایی به‌دست‌آمده خطوط حساس شبکه با استفاده از معادله (۲۷) شناسایی می‌شوند.

$$New_l = Min(1, \sum_{n=1}^{N} \sum_{l'=1}^{L} Cut_{n,l,l'}) \qquad (۲۷)$$

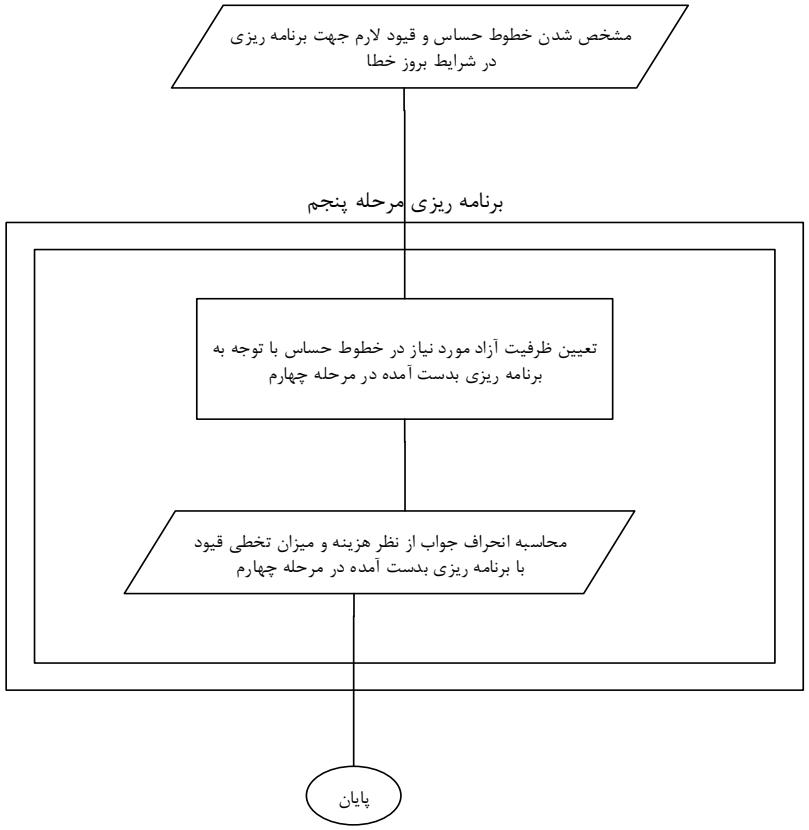
New یک متغیر باینری بوده و نشان‌دهنده حساسیت یا عدم حساسیت خط انتقال در خطاهای در نظر گرفته‌شده است. سپس، برای خطوط حساس با استفاده رابطه (۲۸) ظرفیت مجاز تعیین می‌گردد:

$$Limit_l = Max(|\ f_{n,l}\ |) \qquad (۲۸)$$

مقدار f، برابر با توان عبوری به‌دست‌آمده از خط حساس پس از حل مرحله اول است. در این شرایط برنامه‌ریزی برای آخرین بار و با توجه به ظرفیت‌های جدید و بدون استفاده از برش‌های به‌دست آمده در مرحله سوم انجام می‌گیرد. الگوریتم برنامه‌ریزی در شرایط بروز خطا با توجه به خطوط حساس در شکل (۲) نشان داده‌شده است.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021




شکل (۵): الگوریتم پیشنهادی در مرحله پنجم

با توجه به توضیحات ارائه‌شده مزایای الگوریتم پیشنهادی با توجه به شبکه موردبررسی، IEEE-118Bus، ارائه گردید. در توضیحات ارائه شده بیان شد که استفاده از ضرایب توزیع وقفه خطوط بجای ضرایب توزیع جابجایی توان باعث کاهش قیود برنامه‌ریزی می‌گردد. فرض کنید که خط شماره ۷ دچار مشکل شده و بهره‌برداری از آن امکان‌پذیر نیست. در این شرایط میزان تولید نقاط مختلف با توجه به ساختار جدید شبکه تغییر کرده و پخش بار باید به‌طور مجدد انجام گیرد. در این شرایط برای محاسبه توان جدید عبوری از خطوط انتقال می‌توان از جمع آثار و بررسی تأثیر تغییر تولید نقاط مختلف بر روی خطوط انتقال با استفاده از ضرایب توزیع جابجایی توان استفاده کرد. ایده مطرح‌شده استفاده از ضرایب توزیع وقفه خطوط است که به‌طور مستقیم تأثیر خروج یک خط را بر روی خطوط دیگر موردبررسی قرار می‌دهد. در این شرایط باید به این نکته اشاره شود که در استفاده از ضرایب توزیع وقفه خطوط نیز نیازی به بررسی کلیه خطوط نبوده و می‌توان توان عبوری از چندین خط را با کنترل توان یکی از خطوط در محدوده مجاز قرارداد. درروش پیشنهادی اقدام به شناسایی این خطوط شده است و برنامه‌ریزی با توجه به قیود لازم صورت می‌گیرد. فرض کنید قصد داریم تأثیر خروج ۵ خط را بر روی برنامه‌ریزی بررسی کنیم. در این شرایط با توجه به ۱۷۸ خط باقیمانده باید تعداد ۸۹۰ قید (حاصل‌ضرب ۵ خطا در ۱۷۸ خط انتقال) به برنامه‌ریزی برای یک ساعت اضافه گردد که با جمع این قیود در طول دوره برنامه‌ریزی تعداد کل قیود به ۲۱۳۶۰ قید می‌رسد. هدف از برنامه‌ریزی شناسایی قیود اصلی از بین آن‌ها است. همچنین در ادامه روش پیشنهادی بیان گردید که می‌توان با شناسایی خطوط حساس شبکه که با بروز خطا دچار اضافه‌بار می‌گردند و کنترل توان عبوری



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

از آن‌ها، اقدام به برنامه‌ریزی کرده و برنامه ای قابل اجرا در شرایط بروز خطا بدست آورد.

## ۴-نتایج شبیه سازی:

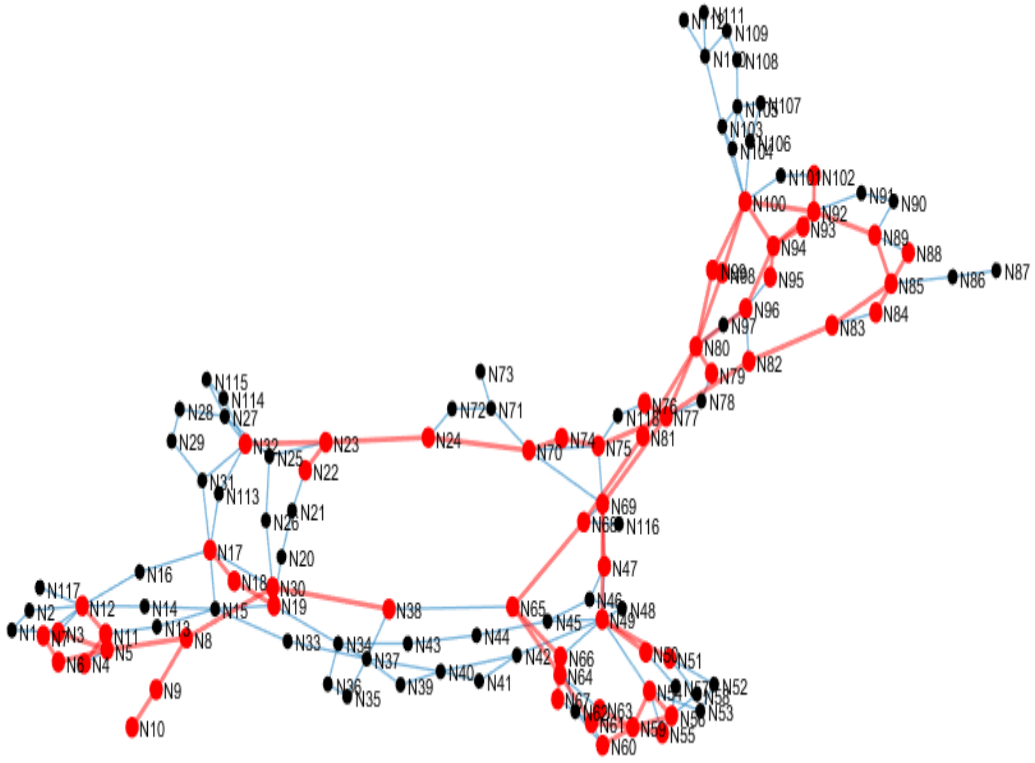
در این تحقیق، محاسبه و مقایسه روی شبکه IEEE 118-Bus انجام‌گرفته و این شبکه دارای ۵۴ نقطه تولیدکننده، ۶۴ نقطه مصرف‌کننده و ۱۷۹ خط انتقال است. اطلاعات این شبکه نیز ازنظر مشخص بودن ظرفیت خطوط کامل نیست؛ بنابراین، ظرفیت خطوط برای این شبکه به‌طور دستی و با توجه به [۱۳] تعریف‌شده‌اند درنهایت، روش پیشنهادی روی شبکه IEEE 118-Bus در ۵ خط منتخب موردبررسی قرارگرفته است. برای بررسی الگوریتم پیشنهادی دو حالت برای انتخاب خطوط دارای خطا انتخاب‌شده است (یک حالت بر اساس سطح ولتاژ و یک حالت بر اساس خطوط پربار). برای بررسی الگوریتم پیشنهادی دو حالت برای انتخاب خطوط دارای خطا انتخاب‌شده است (یک حالت بر اساس سطح ولتاژ و یک حالت بر اساس خطوط پربار). در جدول (۲) مشخصات خطوط منتخب در هر حالت نشان داده‌شده است.

جدول (۲): حالت‌های برنامه‌ریزی

| | حالت ۱ | حالت ۲ |
|---|---|---|
| سطح ولتاژ (kV) | ۳۴۵ | ۱۳۸ |
| خطوط منتخب | ۷-۳۷-۳۸-۹۱-۱۰۰ | ۸-۲۱-۳۱-۵۰-۸۷ |

### ۴-۱- نتایج شبیه‌سازی حالت اول:

در این حالت خطوط دارای خطا در سطح ولتاژ بالاتری انتخاب‌شده‌اند و خروج خطوط ۷-۳۷-۳۸-۹۱-۱۰۰ به ترتیب در نظر گرفته‌شده است. پس از بررسی اولیه و شناسایی قیود موردنیاز، مرحله دوم الگوریتم پیشنهادی اجرا می‌شود. خطوط حساس شبکه در شکل (۶) بارنگ قرمز مشخص‌شده‌اند.




شکل (۶): خطوط حساس شبکه IEEE 118-Bus در حالت اول



[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

با توجه به شکل فوق مشخص شد که تعداد ۵۵ خط از خطوط جزو خطوط حساس به خطا بوده و ظرفیت آن‌ها با فرمول ارائه‌شده تغییر داده شد. پس از مشخص شدن خطوط حساس شبکه مرحله دوم الگوریتم پیشنهادی اجراشده و جدول (۳) نتایج حاصل ارائه می‌گردد.

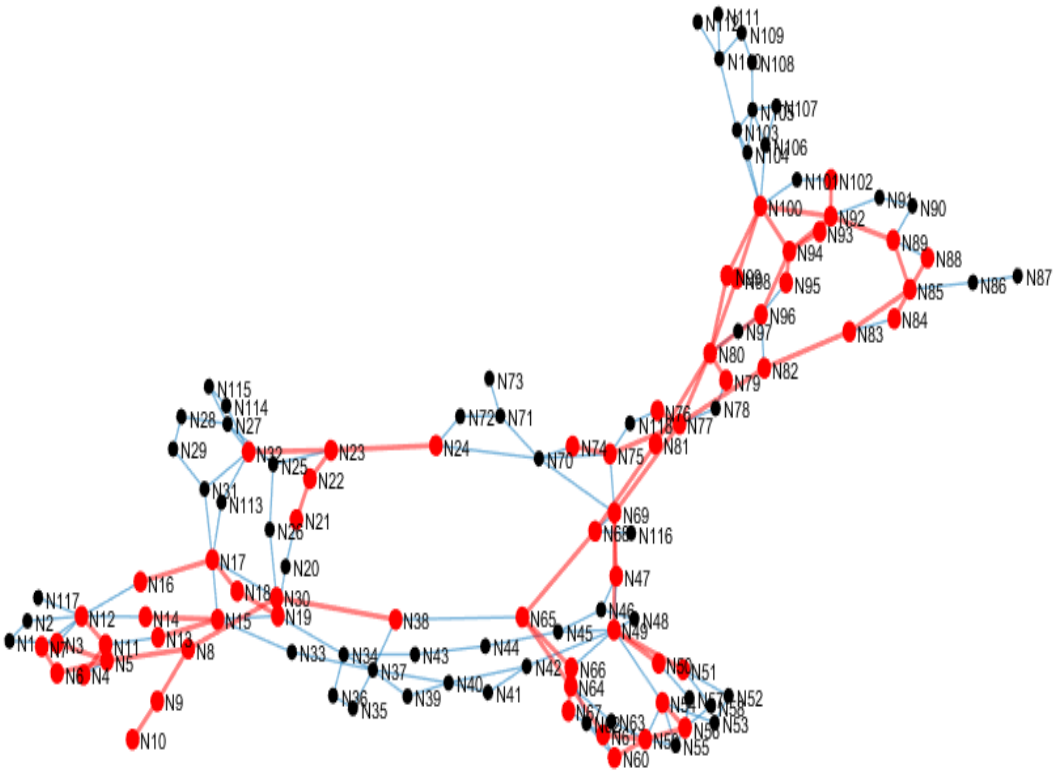
جدول (۳): پارامترهای اندازه‌گیری درروش پیشنهادی

| روش حل | هزینه برنامه‌ریزی (دلار) | زمان حل (ثانیه) |
|---|---|---|
| مرجع [۱۳] | ۵۸۰۶۳۷,۰۳۱ | ۷۶,۸۱۹ |
| روش پیشنهادی | ۵۸۰۴۳۶,۲۱۴ | ۶۳,۶۷۸ |

## ۲-۴- نتایج شبیه‌سازی حالت دوم

در این حالت خطوط دارای خطا در سطح ولتاژ ۱۳۸ کیلو ولت انتخاب‌شده‌اند با این تفاوت که این خطوط دارای کمترین ظرفیت آزاد می‌باشند.

پس از بررسی اولیه و شناسایی قیود موردنیاز، مرحله دوم الگوریتم پیشنهادی اجرا شده است. خطوط حساس شبکه در شکل (۷) بارنگ قرمز مشخص‌شده‌اند.




شکل (۷): خطوط حساس شبکه IEEE 118-Bus در حالت دوم



[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

با توجه به شکل فوق مشخص است که تعداد ۵۴ خط از خطوط جزو خطوط حساس به خطا بوده و ظرفیت آن‌ها با فرمول ارائه‌شده تغییر داده شد. پس از مشخص شدن خطوط حساس شبکه مرحله دوم الگوریتم پیشنهادی اجراشده و جدول (۴) نتایج حاصل ارائه گردید

جدول (۴): پارامترهای اندازه‌گیری درروش پیشنهادی

| زمان حل (ثانیه) | هزینه برنامه‌ریزی (دلار) | روش حل |
|---|---|---|
| ۶۹,۵۶۱ | ۵۸۲۸۲۱,۱۶۱ | مرجع [۱۳] |
| ۶۱,۴۴۵ | ۵۸۱۷۴۴,۶۱۷ | روش پیشنهادی |

با توجه به حالات موردبررسی مشخص می‌شود که روش پیشنهادی از دقت مناسبی در شرایط مختلف برخوردار بوده و همچنین خطوط حساس شبکه برای حالات مختلف نسبتاً ثابت بوده و با شناسایی این خطوط می‌توان سرعت حل مسئله را در شرایط اضطراری افزایش داد.

## ۵-نتیجه‌گیری

در این مطالعه با توجه به اهمیت بررسی خطا در سیستم انتقال شبکه‌های قدرت، در ابتدا خروج خطوط در شبکه مورد بررسی قرارگرفت و با استفاده از برش‌های مرحله‌ای و روش حل تجزیه بندرز، برنامه‌ریزی در تکرارهای متوالی حل و برنامه‌ریزی مقاوم برای خطاهای در نظر گرفته شده به دست آمد. در مرحله بعد، با توجه به برش‌ها و به‌عبارت‌دیگر شناسایی خطوطی که با رخداد خطا دارای اضافه‌بار می‌شوند، اقدام به شناسایی خطوط حساس شبکه شده است. در این مرحله و بعد از شناسایی، ظرفیت خطوط حساس به‌گونه‌ای تغییر یافته‌اند که با اعمال بیش‌ترین تغییرات توان انتقالی ناشی از خروج خط از محدوده مجاز تجاوز نکند. برای این کار از مقدار توان عبوری به‌دست‌آمده در حل مرحله اول با وجود برش‌های تعیین‌شده استفاده شده است. روش فوق بر روی شبکه IEEE 118-Bus اجرا و تعداد ۵ خط منتخب در نظر گرفته‌شده است. نتایج بدست آمده بصورت زیر می‌باشد:

۱-استفاده از حلقه شناسایی قیود فعال باعث می‌شود که حجم محاسبات تکراری در روند برنامه ریزی حذف گردد.

۲-در روش پیشنهادی بعد از شناسایی خطوط حساس با توجه به خروج خطوطی که احتمال رخداد خطا در آن‌ها زیاد است، می‌توان در زمان و با حجم محاسبات کمتری به پاسخ نهایی با دقت زیادی دست یافت.

۳-با توجه به روش پیشنهادی برای بررسی‌های روزانه و پخش بار مجدد در روز می‌توان برنامه ریزی‌های کوتاه مدت را با سرعت بسیار بالا حل کرد.

## منابع:


1. *Shafie-khah M, Siano P, Catalão JP. Optimal demand response strategies to mitigate oligopolistic behavior of generation companies using a multi-objective decision analysis. IEEE Transactions on Power Systems. 2017 Nov 15; 33(4):4264-74.*
2. *Howlader HO, Sediqi MM, Ibrahimi AM, Senjyu T. Optimal thermal unit commitment for solving duck curve problem by introducing CSP, PSH and demand response. IEEE Access. 2018 Jan 8; 6:4834-44.*
3. *Frangioni, A. and C. Gentile, Solving nonlinear single-unit commitment problems with ramping constraints. Operations Research, 2006.* ***54****(4): p. 767-775*
4. *Finardi, E.C. and E.L. da Silva, Solving the hydro unit commitment problem via dual decomposition and sequential quadratic programming. IEEE transactions on Power Systems, 2006.* ***21****(2): p. 835-844.*
5. *Takigawa, F.Y., et al., Solving the hydrothermal scheduling problem considering network constraints. Electric Power Systems Research, 2012.* ***88****: p. 89-97.*
6. *Borghetti, A., et al., An MILP approach for short-term hydro scheduling and unit commitment with head-dependent reservoir. IEEE Transactions on power systems, 2008.* ***23****(3): p. 1115-1124.*
7. *Keyhani, A., M.N. Marwali, and M. Dai, Integration of green and renewable energy in electric power systems. Vol. 20. 2010: Wiley Online Library.*
8. *Hedman, K.W., et al., Co-optimization of generation unit* commitment and *transmission*




[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

*switching with N-1 reliability. IEEE Transactions on Power Systems, 2010.* ***25****(2): p. 1052-1063*

9. *Batut, J. and A. Renaud, Daily generation scheduling optimization with transmission constraints: a new class of algorithms. IEEE Transactions on Power Systems, 1992.* ***7****(3): p. 982-989.*
10. *Hobbs, B.F., et al., Why this book? New capabilities and new needs for unit commitment modeling, in The Next Generation of Electric Power Unit Commitment Models. 2002, Springer. p. 1-14.*
11. *Keyhani, A., M.N. Marwali, and M. Dai, Integration of green and renewable energy in electric power systems. Vol. 20. 2010: Wiley Online Library.*
12. *Hobbs, B.F., et al., The next generation of electric power unit commitment models. Vol. 36. 2006: Springer Science & Business Media.*
13. *Tejada-Arango, D.A., P. Sánchez-Martın, and A. Ramos, Security constrained unit commitment using line outage distribution factors. IEEE Transactions on Power Systems, 2017.* ***33****(1): p. 329-337.*
14. *Shahidehpour.M, Yamin.H, and Li.Z, Market operation in electric power system: forcasting, scheduling, and risk management. New York: institute of electrical and Eelecronic engineers, wileyinterscience, 2002.*

## رزومه



**پرنیان محمدی پور** مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی الکترونیک در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول و مدرک کارشناسی ارشد خود را در سال ۱۳۹۸ در رشته مهندسی برق از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز دریافت کرده است. علایق تحقیقاتی فعلی وی بهره برداری و قابلیت اطمینان سیستم قدرت است.



**سیدمحسن سیدموسوی** تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق الکترونیک از دانشگاه یزد (۱۳۷۶)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق-سیتم‌های مخابراتی از دانشگاه تربیت مدرس تهران(۱۳۷۹) و دکتری مهندسی برق-کنترل از دانشگاه علوم تحقیقات واحد تهران(۱۳۹۷) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در تشخیص و جداسازی خطا، کنترل غیرخطی، کنترل بهینه در سیستم‌های قدرت است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز می‌باشد.

## زیرنویس‌ها

[1] Security Constrained Unit Commitment (SCUC)
[2] Non convex
[3] Mixed Integer Linear Programming (MILP)
[4] Direct Current Power Flow (DC)
[5] Alternating Current Power Flow (AC)
[6] Power Transfer Distribution Factor (PTDF)
[7] Injection Sensitivity Factors (ISF)
[8] Line Outage Distribution Factors (LODF)

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

# The performance improvement of Security Constrained Unit Commitment using Benders Decomposition method and Line Outage Distribution Factors

Parnian Mohammadi pour[1], Seyed Mohsen Seyed Mosavi Ph. D*[2]

1- MSc student, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, Parnian_mohmedi@yahoo.com
2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, mohsenmoosavi2000@yahoo.com

**Abstract:** Security Constrained Unit Commitment is a practical way for the system operator to plan and operate in real time. Considering the transmission system and security constraints can lead to different responses to load distribution. One of the solutions to solve problems in the circuit of units with large-scale security constraints is to use the Benders analysis method. But strengthening the way the problem is written puts a big difference on the speed of solution and the computational volume the purpose of this research is existing N-K constraint might lead possibility to ignore some other constraints and minimize the calculation. In the proposed model, studied faults are identified in a loop, and power flow control are proceeded by adding necessary constraints. In each step, transmission system constrains are defined, and in case any overloading occurs, relating constrain is going to be activated in the following step. This strategy defines necessary constraints in each hour and line. Also, sensitive network lines which are overloaded due to lines subjected to fault exit could be defined. Considering the mentioned issues, the importance of Unit Commitment and optimal solution proposition in large scale, in the thesis we are going to analyze the unit commitment by using line outage distribution factor and its combination with N-K security constraint. The calculation volume in large scale could be decreased by applying this strategy, thus, the computation is fast-speed. On the other hand, all the computations and comparisons are applied on IEEE 118-bus network using GAMS software and MATPOWER tool to analyze power distribution factors. A repeating constraint identification loop is employed to implement N-K constraint, and results show the loop reduces the computation time. In the proposed method, the sensitive lines and their operation conditions are identified that the appropriate response can be achieved in the fault conditions.

**Keywords:** security constrained, unit commitment, line outage distribution factors, N-K criterion

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.3.4.3 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021