

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 پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۳

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 بیان شده 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 قابل حل 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:

توان، شامل پخش توان اکتیو و راکتیو، به یک مدل غیرخطی و غیر محذب^۱ تبدیل شده است [۱]. در فرمول نویسی پیشنهادی به‌منظور استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح^۲ از پخش بار

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

در صورت وجود اضافه بار، 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 اضافه بار می‌شوند شناسایی می‌گردند.

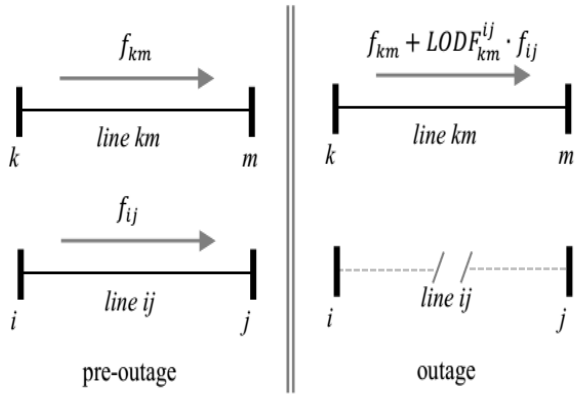
با توجه به مطالب گفته شده و اهمیت حل مسائل برنامه‌ریزی چگونگی در مدار قرار گرفتن واحدها و پیدا کردن یک روش مناسب برای حل بهینه و سریع این مسئله در مقیاس‌های بزرگ، در این بررسی قصد داریم با استفاده از مفهوم ضرایب توزیع خروج خطوط و ترکیب آن با شرایط امنیتی $N-K$ به بررسی مسئله برنامه‌ریزی چگونگی در مدار قرار گرفتن واحدها پرداخته شود و شاخص جدیدی را تحت عنوان خطوط حساس در شرایط بیان شده 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 قابل حل 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 مورد بررسی و نتایج شبیه‌سازی ارائه و تحلیل می‌شوند در بخش پنجم، نتیجه‌گیری کلی از مطالب گفته شده بیان خواهد شد.

۲- روش‌های تجزیه و تحلیل اطلاعات:

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

با توجه به توضیحات ارائه 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

مستقیم^۴ بجای پخش بار متناوب^۵ استفاده شده است [۲،۳]. برای بررسی تغییرات در پخش بار شبکه در شرایط $N-1$ از ضرایب توزیع جابجایی توان^۶ استفاده شده است، چراکه معادلات مربوطه شامل متغیرهای کمتری نسبت به روش‌های برنامه‌ریزی مجدد بوده و مقادیر زاویه ولتاژ تمام نقاط را وارد مدل نمی‌کنند [۴]. به هر حال، 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 به صورت 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 به مراتب 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 با وجود شرایط $N-K$ تمام قیود مسئله لزومی به بررسی نداشته و فضای جواب قابلیت کوچک شدن را دارا می‌باشد [۱۲]. در مدل پیشنهادی خطاهای مورد بررسی در یک حلقه شناسایی شده 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 بررسی شده و



شکل (۳): ضرایب توزیع خروج خطوط (LODF)

در بررسی پخش بار مستقیم، محاسبه ISF با استفاده از فرمول (۱-۳) 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.

$$ISF_{km}^i = \frac{X_{ki} - X_{mi}}{X_{km}} \quad (1)$$

$$PTDF_{km}^{i,j} = ISF_{km}^i - ISF_{km}^j \quad (2)$$

$$LODF_{km}^{ij} = \frac{PTDF_{km}^{i,j}}{1 - PTDF_{ij}^{i,j}} \quad (3)$$

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؛ به عبارت دیگر تولیدکنندگان این مسئله را باهدف حداکثر نمودن سود خود حل می‌نمایند و از طرف دیگر بهره‌بردار سیستم، این مسئله را به منظور 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

بیان شده و در ادامه تابع هدف و قیود برنامه‌ریزی به طور کامل معرفی شده است.

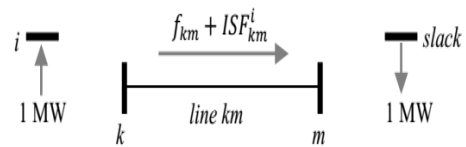
۲-۱- ضرایب تزریق خطی

به طور کلی 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 به دست آمده از معادلات پخش بار محاسبه می‌شود. این ضرایب به راحتی حتی برای شبکه‌های بزرگ نیز قابل محاسبه بوده و تنها به ساختار فیزیکی شبکه وابسته هستند. در نتیجه مقادیر آن‌ها برای یک شبکه با ساختار فیزیکی مشخص، ثابت است. این ضرایب به طور معمول در محاسبات پخش بار بهینه استفاده می‌شوند. در این بررسی از ضرایب تزریق خطی برای تعیین خطوط دارای اضافه بار استفاده شده است. ضرایب استفاده و محاسبه شده در این بررسی در ادامه معرفی شده‌اند:

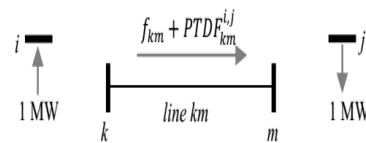
(۱) ضرایب توزیع تزریق توان: نشان‌دهنده تأثیر تغییرات توان تزریقی یک نقطه (به ازای یک مگاوات) بر روی خطوط انتقال شبکه است (شکل ۱).

(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)

قیود برنامه‌ریزی

قیود در نظر گرفته شده برای حل مسئله SCUC به صورت زیر است:

❖ تعادل توان

$$\sum_t p_{nt}^T + \sum_h p_{nh} + \sum_i ig_{ni} + \sum_i ens_{ni} = \sum_i D_{ni} \quad (5)$$

$\forall n$

در این رابطه بیان شده 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

$$\sum_t ru_{nt} + \sum_h ru_{nh} \geq DU_n \quad (6)$$

$$\sum_t rd_{nt} + \sum_h rd_{nh} \geq DD_n \quad (7)$$

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

❖ محدودیت تولید توان نیروگاه‌های حرارتی

$$p_{1t} + ru_{1t} \leq uc_{1t} (\bar{p}_t - \underline{p}_t) \quad (8)$$

$$p_{nt} + ru_{nt} \leq uc_{nt} (\bar{P}_t - \underline{P}_t) - sd_{n+1,t} (\bar{P}_t - PSD_t) \quad (9)$$

$$-su_{nt} \cdot \max(PSD_t - PSU_t, 0)$$

$$\sum_n p_{nh} \leq E_h \quad \forall t, n$$

$$0 \leq ru_{nh} \leq PRD_h = 2, \dots, \quad (10)$$

$$0 \leq ig_{ni} \leq IG_{ni} \quad N-1$$

$\forall ni$

$$P_{Nt} + ru_{Nt} \leq uc_{Nt} (\bar{P} - \underline{P}_t) \quad \forall t \quad (11)$$

$$-su_{Nt} (\bar{P} - PSU_t)$$

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

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

۲-۳- فرمول‌بندی

در تحقیق مسئله SCUC فرمول‌بندی‌های متفاوتی از نظر پیچیدگی معادلات و قیود امنیتی ارائه شده است. در این تحقیق از فرمول‌بندی کلی ارائه شده در [۱۳] به عنوان مرجع استفاده شده 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 دسته‌بندی شده به صورت زیر است که در ادامه توضیح داده شده‌اند:

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

تابع هدف

تابع هدف در نظر گرفته شده برای حل مسئله SCUC به صورت زیر است:

$$\min \sum_{n,t} CSU_t \cdot su_{nt} + \sum_{n,t} CSD_t \cdot sd$$

$$+ \sum_{n,t} CF_t \cdot uc_{nt} + \sum_{n,t} CV_t \cdot p_{nt}^T \quad (4)$$

$$+ \sum_{n,t} CRU_t \cdot ru_{nt} + \sum_{n,t} CRD_t \cdot rd_{nt}$$

$$+ \sum_{n,t} C^{ENS} \cdot ens_{ni} + \sum_{n,ii,jj} CF'_{iic} \cdot \Delta f'_{n,ii,jj}$$

با توجه به معادله (۴) مشخص است که تابع هدف از ۸ بخش هزینه تشکیل شده 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.

❖ محدودیت تغییر توان خروجی

$$P_{nt} - P_{n-1,t} + ru_{nt} \leq RU_t \quad (12)$$

$$P_{nt} - P_{n-1,t} + ru_{nt} \leq RU_t \quad (13)$$

در قیود فوق محدودیت تغییر افزایشی و کاهش میزبان تولید نیروگاه‌ها با توجه به مقدار رزرو ثانویه بیان شده است.

❖ قیود منطقی وضعیت نیروگاه‌ها

$$uc_{nt} - uc_{n-1,t} = su_{nt} - sd_n \quad (14)$$

$$\sum_{n'=n+1-TU_t}^n su_{n't} \leq uc_{nt} \quad (15)$$

$$\sum_{n'=n+1-TU_t}^n su_{n't} \leq 1 - uc_{nt} \quad (16)$$

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 بیان شده است.

❖ محدودیت تولید توان نیروگاه‌های آبی

$$\sum_n P_{nh} \leq E_h \quad (17)$$

$$0 \leq ru_{nh} \leq PRU_h \quad (18)$$

$$0 \leq ru_{nh} \leq PRD_h \quad (19)$$

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

❖ حداکثر تولید متناوب

$$0 \leq ig_{ni} \leq IG_{ni} \quad \forall ni \quad (20)$$

در قید فوق حداکثر میزان تولید متناوب نیروگاه‌های تجدید پذیر در هر نقطه مشخص شده 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 گرفته شده 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 در نتیجه شرایط N-1 با استفاده از معادله (۲۲) قابل اجرا است. در حقیقت، معادله (۲۳) یک فرمول کلی بوده و ISF را می‌توان برای خروج خطوط مختلف در شبکه محاسبه کرد.

$$f_{n,iic} = \sum_i ISF_{iic}^i \cdot (\sum_{t \in gi} P_{nt}^T + \sum_{h \in gi} P_{nh} + ig_{ni} + ens_{ni} - D_{ni}) \quad (21)$$

$$f'_{n,iic} = \sum_i ISF_{iic}^{i,jjc} \cdot (\sum_{t \in gi} P_{nt}^T + \sum_{h \in gi} P_{nh} + ig_{ni} + ens_{ni} - D_{ni})' \quad (22)$$

$$\forall n, iic, jjc \quad |f_{n,iic}| \leq \bar{F}_{iic} \quad , \quad \forall n, iic \quad (23)$$

$$|f'_{n,iic}| \leq \bar{F}'_{iic} + \Delta f'_{n,iic} \quad , \quad \forall n, iic, jjc \quad (24)$$

نقطه منفی معادله (۲۲) این است که تعداد قیود با افزایش تعداد خطوط، نقاط و خطاهای خروج خط به شدت افزایش پیدا کرده 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

ضرایب غیر صفر	قیود امنیتی و شرایط N-1
NL . NO . NB . NG	ISF
NL . NO	LODF
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)

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 به صورت دستی اقدام به ایجاد تراکم در این گونه شبکه‌ها نموده‌اند. در میان اطلاعات فوق، اطلاعات مربوط به خطوط شامل امپدانس و ظرفیت خطوط و اطلاعات مربوط به توابع هزینه نیروگاه‌ها از جمله اطلاعات حیاتی برای برنامه‌ریزی می‌باشند.

مرحله دوم: در این مرحله، پخش بار بهینه برای تعیین وضعیت شبکه انجام شده و توان عبوری خطوط محاسبه می‌شود. پخش بار صورت گرفته در این مرحله به صورت 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 به دست آمده بر اساس خروج خطوط مختلف و تغییرات حاصل در شرایط جدید در شبکه بررسی شده و قابلیت عملیاتی بودن آن بررسی می‌شود. به شکلی که خطوط دارای احتمال خروج بررسی شده 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 انجام شده 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 شناسایی شده و بعد از برنامه‌ریزی شبکه با قیود مورد نظر شاخص‌ها و مبادلات اقتصادی شبکه و تابع هدف محاسبه می‌گردد. در این میان مواردی مانند هزینه تولید نیروگاه‌ها و تعداد و نوع محدودیت‌های اعمال شده مشخص می‌شود.

برای تخمین توان عبوری از خطوط انتقال در پخش بار مستقیم استفاده شده 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.

$$f'_{n,iic}{}^{jic} = F_{n,iic} + LODF_{iic}{}^{jic} \cdot f_{n,jic} \quad \forall n, iic, jic \quad (25)$$

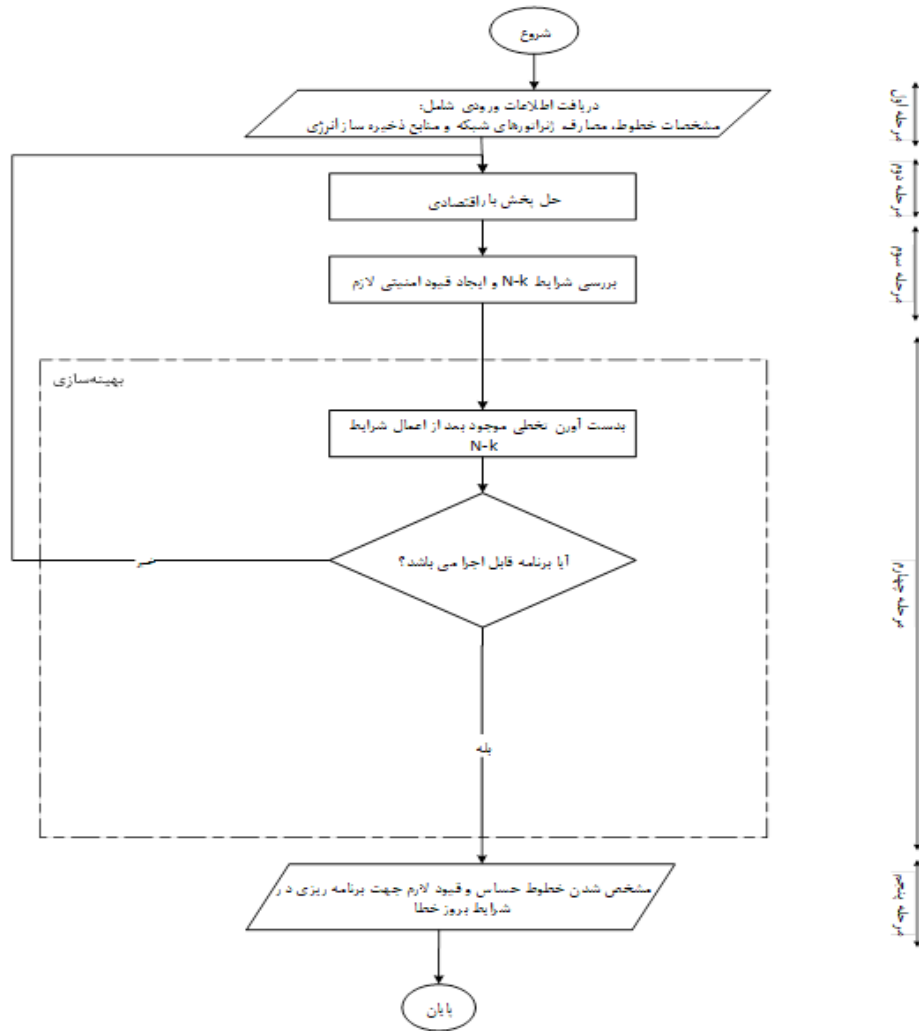
نحوه شناسایی و ایجاد قیود لازم بهینه‌سازی

همان‌طور که گفته شد، مشکل مسائل SCUC در مقیاس بزرگ زیاد بودن حجم محاسبات و وجود قیود غیر ضروری در مسئله بهینه‌سازی است. این قیود می‌تواند شامل ارتباط بین خط خارج شده 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 استفاده شده است. در لحظه شناسایی فوق از معادله (۲۵) استفاده شده و در پایان هر تکرار توان عبوری از خطوط بعد از رخداد خطا با استفاده از فرمول (۲۶) محاسبه می‌شود.

$$\hat{F}'_{n,iic}{}^{jic} = F_{n,iic} + LODF_{iic}{}^{jic} \cdot f_{n,jic} \quad \forall n, iic, jic \quad (26)$$

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 در روش پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است. در اجرای این الگوریتم پنج مرحله اساسی به صورت زیر به اجرا گذاشته می‌شود:



شکل (۴): الگوریتم پیشنهادی

مراحل اجرای الگوریتم بندرز:

در این بخش فرمول نویسی مربوط به الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. با توجه به الگوریتم ارائه شده در بخش قبل، برنامه ریزی در چهار مرحله صورت گرفته است. در مرحله اول برنامه ریزی با توجه به خطاهای در نظر گرفته شده مشخص می گردد، سپس با استفاده از برش های نهایی به دست آمده خطوط حساس شبکه با استفاده از معادله (۲۷) شناسایی می شوند.

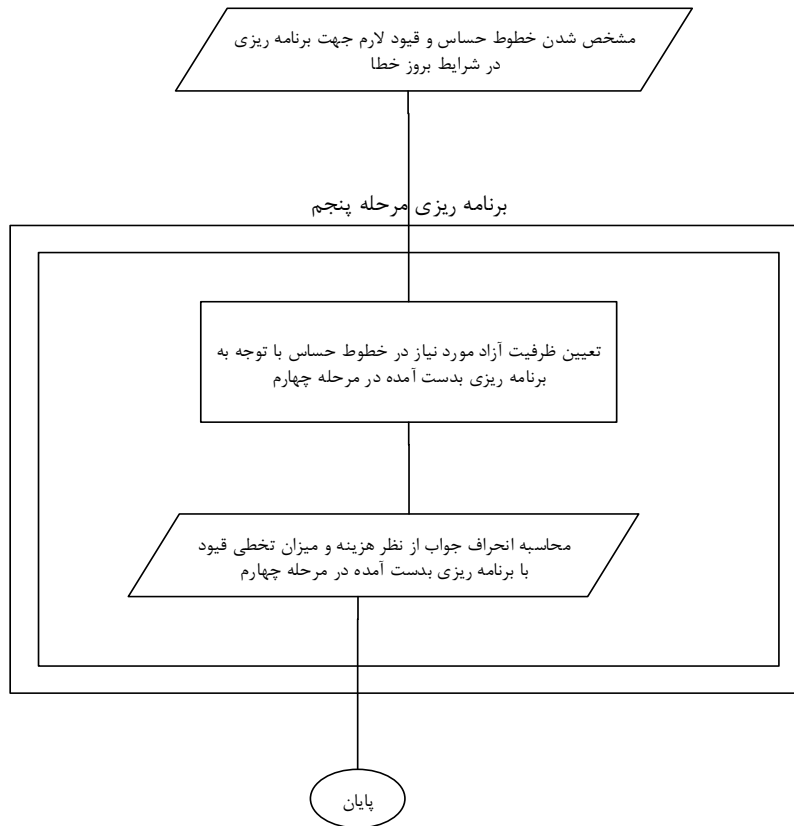
$$New_l = \text{Min}(1, \sum_{n=1}^N \sum_{l'=1}^L Cut_{n,l,l'}) \quad (27)$$

New یک متغیر باینری بوده و نشان دهنده حساسیت یا عدم حساسیت خط انتقال در خطاهای در نظر گرفته شده است. سپس،

برای خطوط حساس با استفاده رابطه (۲۸) ظرفیت مجاز تعیین می گردد:

$$Limit_l = \text{Max}(|f_{n,l}|) \quad (28)$$

مقدار f_l برابر با توان عبوری به دست آمده از خط حساس پس از حل مرحله اول است. در این شرایط برنامه ریزی برای آخرین بار و با توجه به ظرفیت های جدید و بدون استفاده از برش های به دست آمده در مرحله سوم انجام می گیرد. الگوریتم برنامه ریزی در شرایط بروز خطا با توجه به خطوط حساس در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۵): الگوریتم پیشنهادی در مرحله پنجم

شرایط باید به این نکته اشاره شود که در استفاده از ضرایب توزیع وقفه خطوط نیز نیازی به بررسی کلیه خطوط نبوده و می توان عبوری از چندین خط را با کنترل توان یکی از خطوط در محدوده مجاز قرارداد. در روش پیشنهادی اقدام به شناسایی این خطوط شده است و برنامه ریزی با توجه به قیود لازم صورت می گیرد. فرض کنید قصد داریم تأثیر خروج ۵ خط را بر روی برنامه ریزی بررسی کنیم. در این شرایط با توجه به ۱۷۸ خط باقیمانده باید تعداد ۸۹۰ قید (حاصل ضرب ۵ خطا در ۱۷۸ خط انتقال) به برنامه ریزی برای یک ساعت اضافه گردد که با جمع این قیود در طول دوره برنامه ریزی تعداد کل قیود به ۲۱۳۶۰ قید می رسد. هدف از برنامه ریزی شناسایی قیود اصلی از بین آن ها است. همچنین در ادامه روش پیشنهادی بیان گردید که می توان با شناسایی خطوط حساس شبکه که با بروز خطا دچار اضافه بار می گردند و کنترل توان عبوری

با توجه به توضیحات ارائه شده مزایای الگوریتم پیشنهادی با توجه به شبکه مورد بررسی، 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 برنامه ریزی می گردد. فرض کنید که خط شماره ۷ دچار مشکل شده و بهره برداری از آن امکان پذیر نیست. در این شرایط میزان تولید نقاط مختلف با توجه به ساختار جدید شبکه تغییر کرده و پخش بار باید به طور مجدد انجام گیرد. در این شرایط برای محاسبه توان جدید عبوری از خطوط انتقال می توان از جمع آثار و بررسی تأثیر تغییر تولید نقاط مختلف بر روی خطوط انتقال با استفاده از ضرایب توزیع جابجایی توان استفاده کرد. ایده مطرح شده استفاده از ضرایب توزیع وقفه خطوط است که به طور مستقیم تأثیر خروج یک خط را بر روی خطوط دیگر مورد بررسی قرار می دهد. در این

اساس سطح ولتاژ و یک حالت بر اساس خطوط پر بار). در جدول (۲) مشخصات خطوط منتخب در هر حالت نشان داده شده است.

جدول (۲): حالت‌های برنامه‌ریزی

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

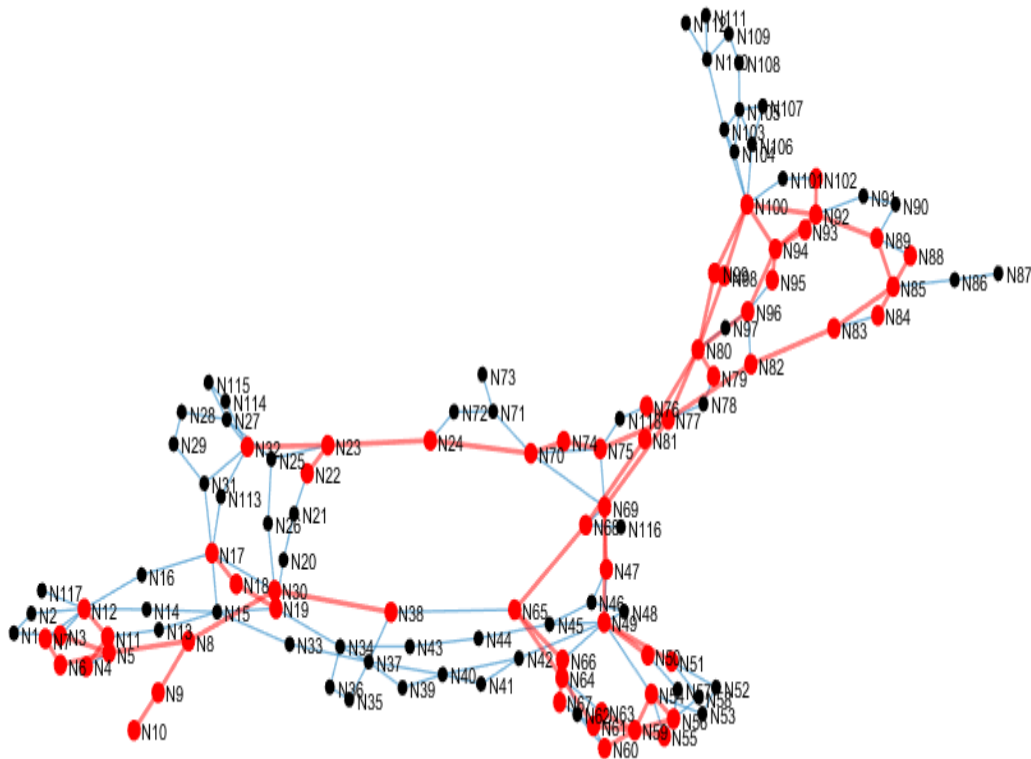
۴-۱- نتایج شبیه‌سازی حالت اول:

در این حالت خطوط دارای خطا در سطح ولتاژ بالاتری انتخاب شده‌اند و خروج خطوط ۷-۳۷-۳۸-۹۱-۱۰۰ به ترتیب در نظر گرفته شده است. پس از بررسی اولیه و شناسایی قیود مورد نیاز، مرحله دوم الگوریتم پیشنهادی اجرا می‌شود. خطوط حساس شبکه در شکل (۶) با رنگ قرمز مشخص شده‌اند.

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 انجام گرفته و این شبکه دارای ۵۴ نقطه تولیدکننده، ۶۴ نقطه مصرف‌کننده و ۱۷۹ خط انتقال است. اطلاعات این شبکه نیز از نظر مشخص بودن ظرفیت خطوط کامل نیست؛ بنابراین، ظرفیت خطوط برای این شبکه به‌طور دستی و با توجه به [۱۳] تعریف شده‌اند در نهایت، روش پیشنهادی روی شبکه IEEE 118-Bus در ۵ خط منتخب مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی الگوریتم پیشنهادی دو حالت برای انتخاب خطوط دارای خطا انتخاب شده است (یک حالت بر اساس سطح ولتاژ و یک حالت بر اساس خطوط پر بار). برای بررسی الگوریتم پیشنهادی دو حالت برای انتخاب خطوط دارای خطا انتخاب شده است (یک حالت بر



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

جدول (۳): پارامترهای اندازه‌گیری در روش پیشنهادی

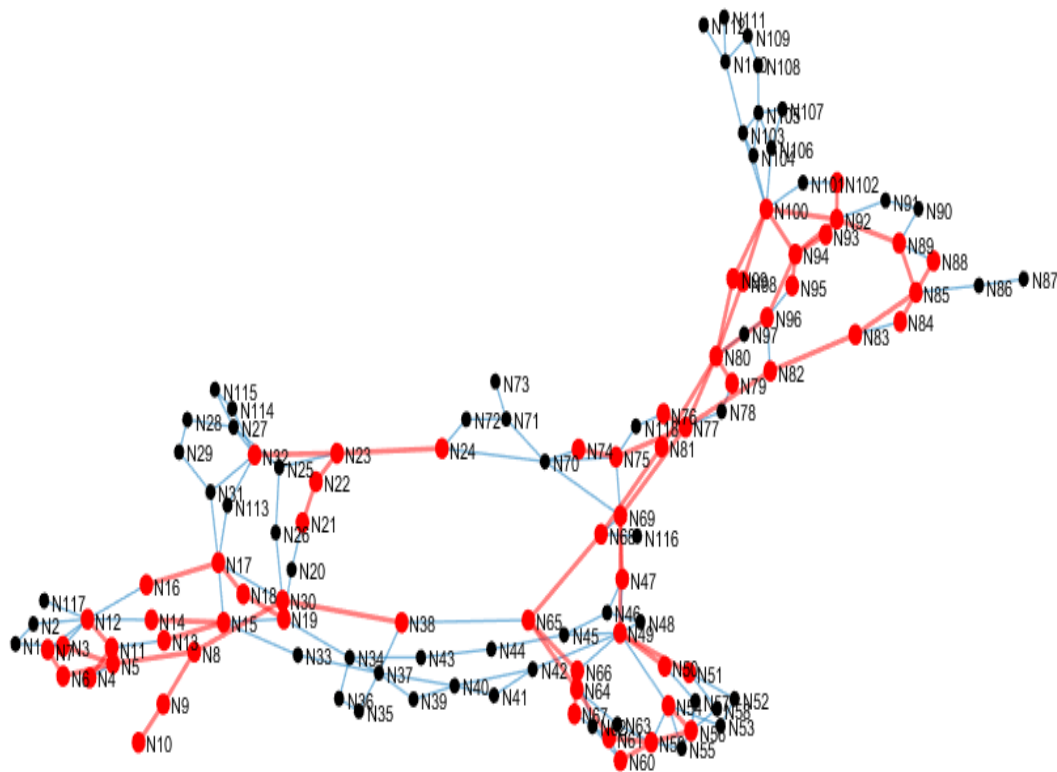
روش حل	هزینه برنامه‌ریزی (دلار)	زمان حل (ثانیه)
مرجع [۱۳]	۵۸۰۶۳۷,۰۳۱	۷۶,۸۱۹
روش پیشنهادی	۵۸۰۴۳۶,۲۱۴	۶۳,۶۷۸

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

۲-۴- نتایج شبیه‌سازی حالت دوم

در این حالت خطوط دارای خطا در سطح ولتاژ ۱۳۸ کیلو ولت انتخاب شده‌اند 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 مشخص شده‌اند.



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

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.

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

جدول (۴): پارامترهای اندازه‌گیری در روش پیشنهادی

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

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, Ibrahim 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

با توجه به حالات مورد بررسی 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 قرار گرفت 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 گرفته شده است. نتایج بدست آمده بصورت زیر می‌باشد:



سیدمحسن سیدموسوی تحصیلات
دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی
مهندسی برق الکترونیک از دانشگاه یزد
(۱۳۷۶)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-
سیستم‌های 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.

زیر نویس‌ها

- 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)

- 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-Martin, 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: forecasting, scheduling, and risk management. New York: institute of electrical and Electronic 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.

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

Parnian Mohammadi pour¹, 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