

امکان‌سنجی اقتصادی احداث واحدهای تولید پراکنده در پست‌های فوق‌توزیع

حمید فلقی

دانشجوی دکتری بخش مهندسی برق - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

محمودرضا حقی‌فام

استاد بخش مهندسی برق - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

محسن پارسامقدم

دانشیار بخش مهندسی برق - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۸۴/۴/۲۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۵/۵/۲، تاریخ تصویب ۸۵/۷/۸)

چکیده

ارزیابی فنی و اقتصادی اتصال واحدهای تولید پراکنده به سیستم قدرت یکی از مراحل اساسی مطالعات مرتبط با این تولیدات محسوب می‌گردد. قابلیت‌هایی همچون حضور اپراتور و وجود سیستم‌های کنترل و نظارت در پست‌های فوق‌توزیع، این پست‌ها را به مکان مناسبی برای احداث واحدهای تولید پراکنده مبدل نموده است. در این مقاله روشی برای امکان‌سنجی اقتصادی احداث واحدهای تولید پراکنده تحت مدیریت و مالکیت شرکت‌های توزیع در پست‌های فوق‌توزیع ارائه شده است. در همین راستا ابتدا هزینه‌ها و منافع اقتصادی ناشی از احداث واحد تولیدی در این پست‌ها به صورت ریاضی مدل‌سازی شده و از ترکیب آنها تابع هدف مسأله فرموله‌بندی شده است. همچنین محدودیت‌های بهره‌برداری از واحدهای تولیدی مبتنی بر ژنراتورهای سنکرون که سهم عمده فناوری‌های مرسوم تولیدات پراکنده را به خود اختصاص داده‌اند، در مدل‌سازی منظور شده است. از مدل و روش پیشنهادی می‌توان در تعیین ظرفیت بهینه تولید پراکنده در پست‌های فوق‌توزیع استفاده نمود. علاوه بر این مدل‌سازی به گونه‌ای است که استراتژی بهینه بهره‌برداری از واحد تولیدی نیز مشخص می‌گردد. در انتها با انجام آزمایش‌هایی کاربردی مدل پیشنهادی نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: تولید پراکنده، پست فوق‌توزیع، امکان‌سنجی، ظرفیت‌یابی

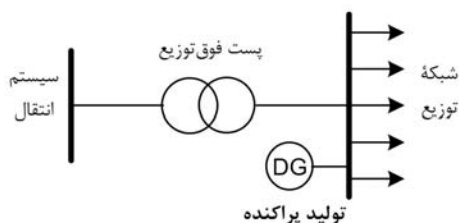
مقدمه

با توجه به ماهیت تولید پراکنده، شبکه‌های توزیع مناسب‌ترین بخش جهت اتصال آن به سیستم‌قدرت محسوب می‌شوند [۱]. مهمترین گام در بکارگیری واحدهای تولید پراکنده در این شبکه‌ها، مطالعه اقتصادی و فنی جهت تعیین مکان و ظرفیت مناسب آنهاست. قطعاً بدون شناخت دقیق و انجام مطالعات امکان‌سنجی نمی‌توان به قابلیت‌های بالقوه این تولیدات در شبکه‌های توزیع و منافع اقتصادی حاصل از آن دست یافت.

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه مکان‌یابی واحدهای DG در شبکه‌های توزیع انجام شده است که در آنها کاهش هزینه‌های مرتبط با تلفات، قابلیت اطمینان و هزینه احداث واحدهای تولیدی به عنوان هدف طراحی مورد نظر بوده است. در مرجع [۴] روشی برای شناسایی مکان و ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده در فیدرهای

تغییر ساختار در صنعت برق موجب دگرگونی قوانین و معیارهای اقتصادی در سیستم قدرت شده است. این تغییرات فرآیند طراحی و بهره‌برداری از سیستم را تحت تأثیر قرار داده و موجب گردیده است که اهداف، معیارها و محدودیت‌های جدیدی در این پروسه‌ها وارد شود. یکی از پدیده‌هایی که تجدید ساختار در صنعت برق نقش مهمی در حضور آن داشته است، پیدایش واحدهای تولیدی کوچک موسوم به تولید پراکنده^۱ (DG) در سیستم قدرت می‌باشد. با پیشرفت تکنولوژی، افزایش راندمان و کاهش قیمت فناوری‌های مرتبط با تولیدات پراکنده و نیز هماهنگی این تولیدات با معیارهای اقتصادی سیستم‌های قدرت تجدید ساختار شده مانند ریسک‌پذیری پایین، انتظار می‌رود DG نقش فزاینده‌ای را در صنعت برق بازی کند [۱-۳].

اختصاص داده شده است، پست‌های فوق‌توزیع نیز از دیدگاه شرکت‌های توزیع می‌توانند مکان مناسبی برای احداث این تولیدات باشند (شکل ۱). این پست‌ها به عنوان نقاط اتصال شبکه‌های توزیع به سیستم انتقال و تزریق توان به فیدهای فشارمتوسط، دارای پتانسیل‌های قابل توجهی برای حضور واحدهای تولید پراکنده هستند. احداث و بهره‌برداری از DG در یک پست فوق‌توزیع می‌تواند روی بارگذاری ترانسفورماتور پست و توان دریافتی از سیستم انتقال تأثیر گذاشته و منافع اقتصادی قابل توجهی را برای شرکت‌های توزیع به دنبال داشته باشد. ضمن اینکه حضور اپراتور و وجود سیستم‌های کنترل و مونی‌تورینگ اطلاعات SCADA^۲ در پست‌های فوق‌توزیع می‌تواند در بهره‌برداری مناسب از واحدهای تولیدی نیز مورد استفاده قرار گیرد. این امر می‌تواند در بکارگیری اقتصادی واحدهای تولید پراکنده تأثیر بسزایی داشته باشد.



شکل ۱: احداث DG در پست فوق‌توزیع.

در این مقاله احداث واحدهای تولید پراکنده در پست‌های فوق‌توزیع در قالب یک مسأله امکان‌سنجی اقتصادی مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد. در این تحقیق واحدهای DG در اختیار و تحت مدیریت و مالکیت شرکت‌های توزیع فرض شده‌اند و به عبارتی مالک DG و مالک شبکه یک نهاد فرض شده و متناسب با آن مدل‌سازی ریاضی انجام شده است. در این مطالعه سعی شده است تا حد امکان اجزای سود و هزینه مرتبط با طرح در قالب تابع هدف به صورت ریاضی مدل‌سازی گردد ضمن اینکه محدودیت‌های فنی مرتبط با ژنراتورهای سنکرون که سهم عمده واحدهای تولیدی را تشکیل می‌دهد، مورد توجه قرار گرفته است.

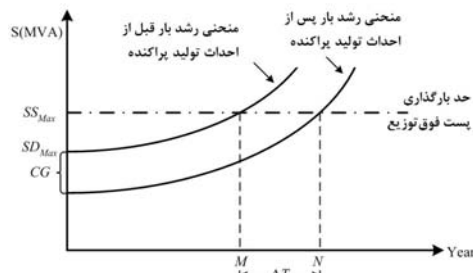
تابع هدف و محدودیت‌های مرتبط با آن یک مدل ریاضی غیرخطی را تشکیل می‌دهند که برای بهینه‌سازی آن از روش‌های بهینه‌سازی تحلیلی استفاده شده است. در انتها با انجام چند آزمایش روی یک پست فوق‌توزیع ۶۳/۲۰ کیلوولت و تحلیل نتایج به دست آمده،

توزیع در قالب یک مدل فازی ترکیب شده با الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. در مرجع [۵] ضمن بررسی تأثیر واحدهای DG روی تلفات اهمی و ظرفیت سیستم توزیع، الگوریتمی برای یافتن پاسخ تقریبی مکان واحدهای DG روی خطوط به جهت کاهش تلفات سیستم پیشنهاد شده است. مسأله جایابی واحدهای تولید پراکنده در فیدهای شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات توسط الگوریتم ژنتیک نیز حل شده است [۶]. در این مطالعه محدودیت‌های فنی همچون افت ولتاژ، بارگذاری خطوط و جریان اتصال کوتاه در شبکه مورد توجه قرار گرفته است. روشی تحلیلی نیز برای مکان‌یابی واحدهای DG با هدف کاهش تلفات در [۷] ارائه شده است. روش دیگری برای حل مسأله مبتنی بر قواعد ساده سرانگشتی در مرجع [۸] آمده است. اصول این روش مطابق «قانون ۲/۳» است که اغلب برای خازن‌گذاری در شبکه توزیع با فرض بار توزیع شده یکسان در طول فیدر مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق این روش بهترین مکان احداث واحد DG با ظرفیت ۲/۳ بار کل فیدر روی خطوط در فاصله ۲/۳ از ابتدای آن است. در مراجع [۹] و [۱۰] با فرض امکان نصب DG در تمام باس‌های مصرف در سیستم، روشی مبتنی بر پخش بار برای یافتن ظرفیت واحدهای DG در هر باس پیشنهاد شده است. مسأله جایابی واحدهای DG روی فیدها در قالب بهینه‌سازی چند منظوره در مرجع [۱۱] مدل‌سازی و حل شده است. در این مطالعه کاهش هزینه‌های ثابت و متغیر سیستم در قالب اهداف مدل منظور شده است. در مرجع [۱۲] جایابی واحدهای تولید پراکنده در پست‌های سیستم انتقال در کنار دیگر گزینه‌های ممکن برای توسعه شبکه انتقال همچون احداث و یا تقویت خطوط و پست‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق مسأله مکان‌یابی واحدهای تولیدی از دیدگاه طراحی سیستم انتقال مورد توجه قرار گرفته و منافع اقتصادی شبکه‌های توزیع مورد نظر نبوده است. در [۱۳] مسأله تعیین مکان و ظرفیت واحدهای DG روی فیدهای فشارمتوسط در محیط تجدیدساختار شده مطرح و با بکارگیری یک الگوریتم جستجوی ابتکاری حل شده است. در این تحقیق حداقل‌سازی سرمایه‌گذاری و هزینه‌های بهره‌برداری شامل تلفات و تأمین انرژی مورد نیاز شبکه، به عنوان هدف مورد توجه قرار گرفته است.

علاوه بر فیدهای توزیع که تقریباً تمامی تحقیقات انجام شده در زمینه جایابی واحدهای تولید پراکنده به آنها

۱- تعویق در توسعه ظرفیت پست

رشد سالیانه مصرف انرژی الکتریکی توسعه شبکه توزیع را امری اجتناب‌ناپذیر ساخته است. در خصوص پست‌های فوق‌توزیع این توسعه معمولاً در قالب افزایش ظرفیت توسط اضافه نمودن ترانسفورماتور مطرح می‌گردد [۱۴]. همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، با رشد سالیانه مصرف، پیک بار کنونی پست (SD_{Max}) پس از M سال به حد بارگذاری پست (SS_{Max}) رسیده و برای تغذیه بار پس از آن باید ظرفیت ترانسفورماتور پست توسعه یابد. در صورت احداث واحد تولیدی با ظرفیت CG در پست و با فرض وجود همان نرخ رشد بار سالیانه، پیک توان عبوری از ترانسفورماتور کاهش یافته و پس از N سال به حداکثر بارگذاری آن می‌رسد. بنابراین زمان توسعه پست به مدت $\Delta T = N - M$ سال به تعویق می‌افتد.



شکل ۲: تعویق در توسعه پست به علت احداث واحد تولیدی.

اگر α نرخ رشد مصرف سالیانه بار پست و γ نسبت ظرفیت واحد DG به پیک بار کنونی پست باشد، برای حالت قبل از احداث DG داریم،

$$SD_{Max}(1+\alpha)^M = SS_{Max} \quad (1)$$

پس از احداث واحد تولیدی با ظرفیت CG داریم،

$$SD_{Max}(1-\gamma)(1+\alpha)^N = SS_{Max} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{CG}{SL_{Max}} \quad (3)$$

با تساوی قرار دادن مؤلفه‌های سمت چپ روابط (۱) و (۲) و حل معادله حاصل، مدت زمان تعویق در توسعه پست به دست می‌آید که برابر است با:

$$\Delta T = N - M = \frac{\log \frac{1}{1-\gamma}}{\log(1+\alpha)} \quad (4)$$

کارایی مدل پیشنهادی نشان داده شده است.

مدل بار پست فوق‌توزیع

اجزای سود و هزینه در تعیین ظرفیت DG جهت احداث در پست فوق‌توزیع، به نحوه بهره‌برداری از واحدها مرتبط است بنابراین به منظور دستیابی به یک پاسخ عملی بهینه، لازم است استراتژی بهینه بهره‌برداری از DG تعیین و متناسب با آن اجزای سود و هزینه طرح ارزیابی گردد. به این ترتیب دیگر منظور نمودن بار پست در یک نقطه کاری کافی و مناسب نبوده و می‌بایست سطوح مختلف بارگذاری در مدل‌سازی لحاظ گردد. در دقیق‌ترین حالت می‌توان تغییرات سالیانه مصرف را در قالب منحنی ساعتی بار مدل نمود اما باید توجه داشت که افزایش سطوح بارگذاری موجب افزایش تعداد متغیرهای تصمیم مسئله شده و حجم و مدت زمان انجام محاسبات را شدیداً افزایش خواهد داد. در این مقاله اطلاعات بار اکتیو و راکتیو پست در قالب منحنی‌های ۲۴ ساعته روزانه مدل‌سازی شده‌اند. این منحنی‌ها در واقع نماینده‌ای از بارگذاری روزانه در کل سال می‌باشند و برای مدل‌سازی تغییرات بار سالیانه از تکرار ۳۶۵ تایی این منحنی‌ها استفاده شده است. لازم به ذکر است که مدل‌سازی ریاضی ارائه شده در این مقاله به راحتی برای مقادیر بیشتری از سطوح بارگذاری نیز قابل تعمیم و استفاده است.

مدل‌سازی ریاضی سود و هزینه

در این قسمت فرموله‌بندی ریاضی فواید اقتصادی و هزینه‌های مرتبط با احداث DG تحت مالکیت و مدیریت شرکت توزیع، در پست‌های فوق‌توزیع ارائه می‌گردد. در این مدل‌سازی فرض بر این است که شرکت‌های توزیع وظیفه تأمین انرژی مشترکین، مدیریت، طراحی و بهره‌برداری از سیستم توزیع شامل شبکه فشارضعیف، فشارمتوسط و پست‌های فوق‌توزیع را با هدف کاهش هزینه‌ها، افزایش کارایی و بهبود سرویس مشترکین به عهده دارند.

فواید اقتصادی

مجموعه فواید ناشی از احداث تولید پراکنده در یک پست فوق‌توزیع را می‌توان به ترتیب زیر برشمرد:

باشد و معمولاً در ساعات پیک بیشتر و در دیگر ساعات کمتر است. در این مقاله از مدل چند سطحی برای قیمت خرید توان اکتیو به صورت تابعی از توان اکتیو دریافتی از سیستم انتقال مانند شکل (۳) استفاده شده است.

با احداث DG در پست فوق توزیع این امکان به وجود می‌آید که شرکت توزیع بخشی از توان اکتیو مورد نیاز شبکه را از طریق بهره‌برداری از واحد تولیدی تأمین کند و توان کمتری از طریق سیستم انتقال خریداری و تأمین گردد. در این حالت توان اکتیو دریافتی از سیستم انتقال کاهش پیدا کرده و برابر خواهد بود با:

$$PT_{a,i} = PD_i - PG_i + \frac{(SD_i - SG_i)^2}{S_N^2} \times P_{LN} \quad (9)$$

بنابراین هزینه سالیانه تأمین توان اکتیو شبکه از سیستم انتقال پس از احداث DG برابر خواهد بود با:

$$CP_a = 365 \sum_{i=1}^{24} [PT_{a,i} \times C_{MWhT}(PT_{a,i})] \quad (10)$$

با توجه به توضیحات فوق سود اقتصادی سالیانه ناشی از کاهش هزینه خرید توان اکتیو که عاید شرکت توزیع خواهد شد، عبارتست از:

$$B_2 = CP_b - CP_a \quad (11)$$

از آنجاکه این سود اقتصادی به صورت جاری می‌باشد، معادل ارزش کنونی آن را در طول عمر مفید واحد تولیدی می‌توان از رابطه (۱۲) به دست آورد.

$$NPV(B_2) = B_2 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1 + InfR}{1 + IntR} \right)^t \quad (12)$$

لازم به یادآوری است که با توجه به اینکه در این تحقیق احداث DGها روی پستهای فوق توزیع که نقاط تغذیه توان به شبکه‌های توزیع هستند، مورد بحث قرار گرفته است، طبیعتاً تلفات شبکه توزیع (فیدرهای فشارمتوسط و دیگر بخش‌های پایین دست پست‌های فوق توزیع) متأثر از حضور DGها نبوده و تغییری نخواهد کرد.

۳ - کاهش هزینه تأمین توان راکتیو

در سیستم اقتصادی رقابتی حاکم بر شبکه قدرت

میزان سود اقتصادی ناشی از این تأخیر در توسعه پست که در سال M حاصل می‌گردد و معادل ارزش کنونی آن را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$B_1 = C_{invT} \left(1 - \left(\frac{1 + InfR}{1 + IntR} \right)^{\Delta T} \right) \quad (5)$$

$$NPV(B_1) = B_1 \left(\frac{1 + InfR}{1 + IntR} \right)^M \quad (6)$$

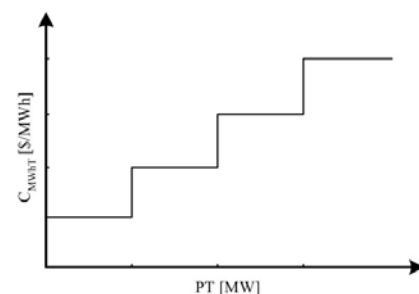
۲ - کاهش هزینه تأمین توان اکتیو

در یک بازار برق رقابتی، شرکت‌های توزیع می‌بایست انرژی الکتریکی مورد نیاز شبکه تحت پوشش خود را از طریق سیستم انتقال خریداری نمایند. توان اکتیو دریافتی از سیستم انتقال شامل دو بخش است: یک بخش بار شبکه توزیع که در سمت ثانویه ترانسفورماتور پست فوق توزیع و ورودی فیدرهای فشارمتوسط اندازه‌گیری می‌شود و بخش دیگر به تلفات اهمی ترانسفورماتور پست مربوط می‌شود. این توان اکتیو دریافتی را به صورت ریاضی می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$PT_{b,i} = PD_i + \frac{SD_i^2}{S_N^2} \times P_{LN} \quad (7)$$

بنابراین در این حالت هزینه سالیانه تأمین بار اکتیو شبکه توزیع که از سیستم انتقال خریداری می‌شود برابر است با:

$$CP_b = 365 \sum_{i=1}^{24} [PT_{b,i} \times C_{MWhT}(PT_{b,i})] \quad (8)$$



شکل ۳: قیمت برق سیستم انتقال به صورت تابعی از توان مورد نیاز.

قیمت توان اکتیو می‌تواند در ساعات مختلف متفاوت

۴ - بهبود قابلیت اطمینان سیستم

نصب واحد تولیدی در پست فوق توزیع تأثیر چندانی روی بهبود قابلیت اطمینان ناشی از خطاهای رخ داده در شبکه توزیع ندارد اما می‌تواند روی خاموشی مشترکین این شبکه ناشی از عدم اعتماد سیستم انتقال و تولید تأثیر بگذارد. در محاسبات قابلیت اطمینان سیستم‌های ترکیبی انتقال و تولید^۳ برای هر یک از باس‌های مصرف (که پست‌های فوق توزیع نیز جزو آنها به شمار می‌آید)، شاخص‌هایی محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده تعداد و مدت تداوم مورد انتظار خاموشی‌ها در این باس‌هاست [۱۶]. اندیس مدت زمان سالیانه بی‌برقی (U) یکی از این اندیس‌هاست که با استفاده از آن می‌توان میزان انرژی توزیع نشده و در پی آن هزینه عدم تأمین برق بار پست فوق توزیع ناشی از خطاهای سیستم بالادستی را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$CR_b = U \times SD_{Max} \times LF \times C_{MVAhms} \quad (17)$$

در صورت احداث واحد DG در پست فوق توزیع می‌توان از آن به عنوان منبع تولیدی پشتیبان در هنگام وقوع خاموشی ناشی از سیستم انتقال و تولید استفاده کرد و بخشی از بار شبکه را حداکثر به میزان ظرفیت واحد تولیدی تأمین نمود و قابلیت اطمینان سیستم را بالا برد. در آن صورت هزینه عدم تأمین برق بار پست ناشی از خطاهای سیستم بالادستی به صورت زیر خواهد بود.

$$CR_a = U \times (SD_{Max} \times LF - CG) \times C_{MVAhms} \quad (18)$$

بنابراین سود سالیانه‌ای که شرکت توزیع ناشی از بهبود قابلیت اطمینان سیستم به دست می‌آورد، برابر است با:

$$B_4 = CR_b - CR_a = U \times CG \times C_{MVAhms} \quad (19)$$

معادل ارزش کنونی این سود سالیانه را در عمر مفید واحد DG می‌توان با توجه به پارامترهای اقتصاد مهندسی نرخ بهره و نرخ تورم از رابطه زیر به دست آورد:

$$NPV(B_4) = B_4 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1 + InfR}{1 + IntR} \right)^t \quad (20)$$

۳-۲- هزینه‌ها

منظور نمودن هزینه‌های مرتبط با احداث و بهره‌برداری

تجدیدساختار شده، اپراتور سیستم انتقال هزینه‌ای را بابت توان راکتیو تزریق شده به شبکه توزیع از شرکت‌های توزیع دریافت می‌کند [۱۵]. به عبارت دیگر شرکت‌های توزیع می‌بایست همانند توان اکتیو، هزینه توان راکتیو دریافتی از شبکه انتقال را نیز بپردازند. در حالت کلی این هزینه سالیانه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$CQ_b = 365 \times C_{MVArhT} \sum_{i=1}^{24} QD_i \quad (13)$$

با نصب DG در پست فوق توزیع این امکان برای شرکت‌های توزیع ایجاد می‌شود که بخشی از توان راکتیو مورد نیاز شبکه را از طریق این واحد تولیدی تأمین نمایند. در آن صورت هزینه سالیانه تأمین توان راکتیو شبکه به صورت زیر خواهد بود.

$$CQ_a = 365 \times C_{MVArhT} \sum_{i=1}^{24} [QD_i - QG_i] \quad (14)$$

بنابراین شرکت‌های توزیع سود اقتصادی سالیانه‌ای بابت کاهش هزینه تأمین توان راکتیو شبکه از سیستم انتقال مطابق رابطه زیر به دست می‌آورند.

$$B_3 = CQ_b - CQ_a = 365 \times C_{MVArhT} \sum_{i=1}^{24} QG_i \quad (15)$$

معادل ارزش کنونی این سود اقتصادی با توجه به بهره‌برداری در عمر مفید واحد DG از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$NPV(B_3) = B_3 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1 + InfR}{1 + IntR} \right)^t \quad (16)$$

با توجه به پایین بودن ظرفیت واحدهای DG و نیز محدودیت تولید توان راکتیو توسط این واحدها، در بسیاری از زمان‌ها توان راکتیو بار شبکه توزیع بیشتر از توان راکتیو تولیدی DG بوده و لذا امکان تزریق توان راکتیو از شبکه توزیع به سمت انتقال بسیار اندک خواهد بود. از این رو در این مطالعه تنها سود اقتصادی ناشی از حضور DG در کاهش هزینه خرید توان راکتیو از شبکه انتقال برای شرکت توزیع مورد توجه قرار گرفته و امکان فروش توان راکتیو در نظر گرفته نشده است.

$$NPV(C_3) = C_3 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1 + InfR}{1 + IntR} \right)^t \quad (25)$$

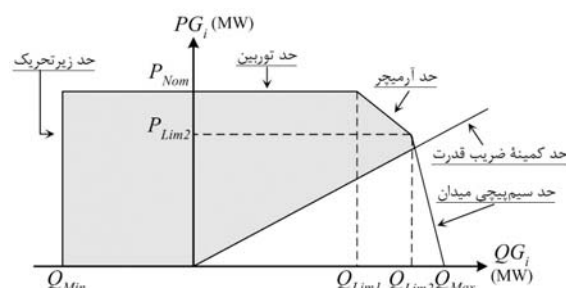
تابع هدف و محدودیت‌ها

از ترکیب مجموعه‌ی فواید و هزینه‌هایی که در بخش قبل ارائه شد، تابع هدف طرح ساخته می‌شود.

$$\text{Max } F = \sum_{i=1}^4 NPV(B_i) - \sum_{j=1}^3 NPV(C_j) \quad (26)$$

تابع هدف مذکور به همراه مجموعه‌ای از محدودیت‌ها، مدل کلی بهینه‌سازی را تشکیل می‌دهند. این قیود عبارتند از:

۱ - محدودیت بهره‌برداری از ژنراتورهای سنکرون
این قیود در واقع از مشخصات کاری واحد تولیدی نشأت گرفته و محدودیت تولید توان اکتیو و راکتیو واحد را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه در اکثریت قریب به اتفاق فناوری‌های مرسوم DG از ژنراتورهای سنکرون استفاده می‌شود، در این مقاله این نوع ژنراتورها مورد بحث و توجه قرار گرفته است.



شکل ۴: محدوده بهره‌برداری از یک DG با ظرفیت یک مگاوات آمپر.

محدوده تولید توان اکتیو و راکتیو در ژنراتورهای سنکرون با توجه به منحنی عملکرد آنها تعیین می‌گردد. این منحنی در واقع نقاط کار ژنراتور سنکرون را با توجه به محدودیت مکانیکی توربین، حد حرارتی سیم‌پیچی‌های آرمیچر و میدان و نیز محدودیت زیرتحرک ژنراتور نشان می‌دهد [۱۷]. از طرف دیگر با توجه به ملاحظات اقتصادی معمولاً بهره‌برداری از واحدهای DG در ضریب قدرت‌های پایین مقرون به صرفه به نظر نمی‌رسد. لذا در بهره‌برداری از واحدهای تولیدی می‌توان محدودیتی مرتبط با حد

از واحدهای تولید پراکنده در انجام مطالعه امکان‌سنجی اقتصادی ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. اجزای این هزینه‌ها به ترتیب زیر می‌باشند.

۱ - هزینه‌ی احداث واحد تولیدی

سرمایه‌گذاری اولیه مورد نیاز جهت احداث DG در پست فوق‌توزیع به ظرفیت واحد تولیدی بستگی دارد. با توجه به ماژولی بودن ماهیت فناوری‌های DG می‌توان هزینه‌ی احداث واحد تولیدی را (که با ارزش کنونی آن برابر است) به صورت زیر بیان نمود.

$$C_1 = NPV(C_1) = CG \times C_{MVDG} \quad (21)$$

۲ - هزینه‌ی تولید توان

تولید توان در واحد DG نیازمند صرف هزینه جهت تأمین منبع انرژی ورودی آن است. هزینه‌ی سالیانه تولید توان در واحد تولید پراکنده تابع میزان تولید توان در سال است. این هزینه‌ی جاری سالیانه و معادل ارزش کنونی آن در عمر مفید واحد تولیدی از روابط زیر محاسبه می‌گردد.

$$C_2 = 365 \times C_{MWhDG} \sum_{i=1}^{24} PG_i \quad (22)$$

$$NPV(C_2) = C_2 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1 + InfR}{1 + IntR} \right)^t \quad (23)$$

۳ - هزینه‌ی تعمیرات و نگهداری

یکی دیگر از هزینه‌های جاری سالیانه استفاده از DG به تعمیرات و نگهداری آن مربوط می‌شود. این هزینه شامل دو بخش است: یک بخش ثابت که با ظرفیت واحد تولیدی متناسب است و یک بخش متغیر که به میزان بهره‌برداری از واحد در سال وابسته است. لذا می‌توان گفت،

$$C_3 = C_{Mf} \times CG + C_{Mv} \times 365 \sum_{i=1}^{24} PG_i \quad (24)$$

معادل ارزش کنونی هزینه‌ی تعمیرات و نگهداری واحد تولیدی در طول عمر مفید آن از رابطه (۲۵) به دست می‌آید.

۳ - محدودیت حداکثر ظرفیت DG

در مطالعه امکان‌سنجی مورد نظر، این قید ظرفیت DG جهت احداث در پست فوق‌توزیع را محدود می‌سازد به طوریکه ظرفیت واحد تولیدی از حد خاصی فراتر نرود. این محدودیت را در قالب ریاضی می‌توان به صورت زیر نشان داد.

$$CG \leq CG_{Max}$$

(۳۰)

منظور نمودن این قید از آنجا لازم به نظر می‌رسد که در توسعه و بهبود شبکه‌های توزیع گاهی طرح‌هایی یافت می‌شود که از نظر کلی سود و هزینه برای شرکت‌های توزیع صرفه اقتصادی به همراه دارند و لیکن به علت محدودیت منابع مالی، شرکت‌های توزیع بودجه اولیه لازم برای اجرای طرح را در اختیار نداشته و قادر به پیاده‌سازی طرح نیستند بنابراین با وجود این قید، طراح می‌تواند ظرفیت DG را محدود ساخته و به جواب کاربردی مسأله دست یابد. از طرف دیگر این محدودیت می‌تواند در مواردی که به دلایل فنی نیز احداث DG بیشتر از یک ظرفیت خاص امکان‌پذیر نیست، مورد استفاده قرار گیرد.

مطالعات عددی

ارزیابی اقتصادی احداث DG مطابق با روش پیشنهادی روی یک پست فوق‌توزیع مورد مطالعه قرار گرفته است. این پست ۶۳/۲۰ کیلوولت دارای ظرفیت نامی ۳۰ مگاوات‌آمپر بوده و منحنی بار اکتیو و راکتیو روزانه آن در شکل (۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر بار راکتیو سیستم در ساعت‌های مختلف، توان راکتیوی را نشان می‌دهد که با وجود منابع کنترل توان راکتیو در شبکه توزیع و نیز پست فوق‌توزیع، از سیستم انتقال کشیده می‌شود. مشخصات فنی ژنراتورهای سنکرون واحدهای تولیدی مورد استفاده در جدول (۱) و دیگر اطلاعات فنی و اقتصادی مورد نیاز این مطالعات عددی در جدول (۲) ارائه شده است. در خصوص حداکثر ظرفیت قابل بارگذاری پست فوق‌توزیع (SS_{Max}) باید توجه داشت که این پارامتر با توجه به محدودیت‌های بهره‌برداری از ترانسفورماتور پست معمولاً به صورت درصدی از ظرفیت نامی منظور می‌گردد. در اینجا نیز این پارامتر با فرض حداکثر ۸۵٪ ظرفیت نامی ترانسفورماتور پست منظور شده است.

کمینه ضریب قدرت بارگذاری نیز منظور نمود. محدوده بهره‌برداری از یک DG با ظرفیت واحد به صورت گرافیکی در شکل (۴) نمایش داده شده است.

با توجه به توضیحات فوق‌الذکر فضای نقاط کاری بهره‌برداری از واحد DG مبتنی بر ژنراتور سنکرون با ظرفیت CG را به صورت ریاضی می‌توان توسط مجموعه روابط نامساوی زیر تعریف نمود.

$$PG_i \leq P_{Nom} \times CG$$

$$QG_i \geq Q_{Min} \times CG$$

$$PG_i \leq \frac{P_{Nom} - P_{Lim2}}{Q_{Lim1} - Q_{Lim2}} (QG_i - Q_{Lim1} \times CG) + P_{Nom} \times CG$$

$$PG_i \leq \frac{P_{Lim2}}{Q_{Lim2} - Q_{Max}} (QG_i - Q_{Max} \times CG)$$

$$PG_i \geq 0$$

$$\text{for } i=1, 2, 3, \dots, 24 \quad PG_i \geq QG_i \times \frac{PF_{Min}}{\sqrt{1 - PF_{Min}^2}} \quad (27)$$

۲ - محدودیت حداکثر تولید توان اکتیو و راکتیو DG

اگرچه بهره‌برداری از DG در پست فوق‌توزیع طبق روابط بیان شده می‌تواند منافع اقتصادی به دنبال داشته باشد، اما باید توجه داشت که این منافع تا هنگامی است که میزان توان اکتیو و راکتیو تولیدی DG از بار شبکه فراتر نرود. در غیر این صورت توان مازاد تولیدی به سیستم انتقال تزریق می‌شود و با توجه به فرض عدم وجود جایگاهی برای شرکت‌های توزیع در بازار فروش برق انتقال، این امر سودی را برای این شرکت‌ها به دنبال نخواهد داشت. برای جلوگیری از این حالت می‌توان حداکثر توان اکتیو و راکتیو تولیدی DG در هر ساعت را توسط قیود زیر محدود نمود.

$$PG_i \leq PD_i \quad , i=1, 2, 3, \dots, 24$$

(۲۸)

$$QG_i \leq QD_i \quad , i=1, 2, 3, \dots, 24$$

(۲۹)

لازم به ذکر است که در صورت وجود امکان فروش توان و شرکت DG در بازار برق سیستم انتقال، مدل ارائه شده در این مقاله می‌تواند به منظور لحاظ نمودن این امر توسعه یابد.

جدول ۲: اطلاعات فنی و اقتصادی مورد نیاز برای انجام مطالعه.

مقدار	پارامتر
۵	نرخ سالیانه رشد بار سیستم [%]
۷۰۰۰۰۰	هزینه توسعه ظرفیت پست [\$]
۲۵/۵	حداکثر ظرفیت قابل بارگذاری پست فوق توزیع [MVA]
۲۳/۷۱	پیک توان ظاهری مصرف بار سیستم [MVA]
۰/۱۳۷	تلفات اهمی ترانسفورماتور پست در بارگذاری نامی [MW]
۱/۵	قیمت خرید توان راکتیو از سیستم انتقال [\$/MVA-hour]
۱۰۰	هزینه عدم تأمین توان سیستم [\$/MVA-hour]
۳۱۸۰۰۰	هزینه احداث DG [\$/MVA]
۲۹	هزینه تولید توان DG [\$/MWh]
۲۰۰۰	هزینه ثابت تعمیرات و نگهداری DG [\$/MVA-year]
۰/۷	هزینه متغیر تعمیرات و نگهداری DG [\$/MWh]
۲۰	عمر مفید واحد DG [year]
۰/۰۹	نرخ تورم سالیانه
۰/۱۴	نرخ بهره سالیانه
۰/۶۳	ضریب بار پست فوق توزیع
۰/۸	حداقل ضریب قدرت بهره‌برداری از DG
۳۰	مدت زمان بی‌برقی سالیانه پست فوق توزیع [hour/year]

آزمایش ۱- حالت پایه‌ای سیستم

در این آزمایش با در نظر گرفتن سیستم مورد مطالعه و اطلاعات ورودی فوق‌الذکر، مسأله امکان‌سنجی احداث DG در پست فوق‌توزیع مزبور حل شده است. در این آزمایش محدودیتی برای حداکثر ظرفیت DG منظور نشده و قیمت خرید برق از سیستم انتقال در چهار سطح به صورت زیر فرض شده است.

$$C_{MWhT}(PT_i) = \begin{cases} 20 & \text{if } 0 \leq PT_i < 10 \\ 25 & \text{if } 10 \leq PT_i < 15 \\ 30 & \text{if } 15 \leq PT_i < 20 \\ 40 & \text{if } 20 \leq PT_i \end{cases} \quad \text{for } i=1, 2, \dots, 24$$

پس از اجرای آزمایش ظرفیت بهینه DG جهت احداث برابر ۹ مگاوات آمپر و استراتژی بهینه بهره‌برداری از آن مطابق شکل (۶) به دست آمده است. دیگر نتایج حاصل از انجام این آزمایش شامل اجزای سود و هزینه همچنین مدت زمان تعویق در توسعه ظرفیت پست در جدول (۳) آمده است.

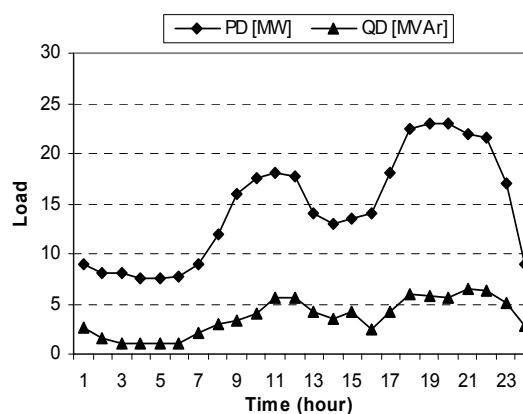
در این مطالعات فرض بر این است که ظرفیت DG به صورت ضربی از یک مگاوات آمپر می‌باشد همچنین به علت ظرفیت پایین و نیز مشخصات فنی، این واحدهای تولیدی توانایی تغییر سریع در میزان توان خروجی را داشته و لذا محدودیتی در کمترین زمان خاموش^۴ و یا روشن بودن^۵ واحد وجود ندارد [۱۳]. با این توضیحات تابع هدف پیشنهادی به همراه قیود مرتبط با آن یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته^۶ (MINLP) را تشکیل می‌دهد که برای حل آن از نرم‌افزار LINGO (ضمیمه) که از روش‌های بهینه‌سازی تحلیلی در حل مدل‌های ریاضی بهره می‌برد، استفاده شده است [۱۸]. پس از حل مسأله با استفاده از مدل پیشنهادی علاوه بر ظرفیت بهینه DG جهت احداث در پست فوق‌توزیع، استراتژی بهره‌برداری توان اکتیو و راکتیو واحد تولیدی نیز به عنوان خروجی حاصل می‌گردد.

برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، آزمایش‌های زیر طراحی و اجرا شده‌اند که در ادامه تشریح و نتایج حاصل از آنها ارائه می‌شود.

۱- در نظر گرفتن حالت پایه‌ای سیستم

۲- بررسی تأثیر تغییر در قیمت خرید برق از سیستم انتقال

۳- بررسی تأثیر محدودیت حداکثر ظرفیت DG



شکل ۵: منحنی روزانه تغییرات بار اکتیو و راکتیو پست فوق‌توزیع.

جدول ۱: مشخصات فنی ژنراتور سنکرون هر واحد تولیدی با ظرفیت یک مگاوات آمپر مورد استفاده در مطالعات عددی [۱۵].

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
MVAr ۰/۷۶۰۳	Q_{Max}	MW ۰/۸۹۴۵	P_{Nom}
MVAr ۰/۴۴۷۲	Q_{Lim1}	MW ۰/۶۸۸۱	P_{Lim2}
MVAr ۰/۵۸۱۴	Q_{Lim2}	MVAr ۰/۳۵۷۸	Q_{Min}

در قیمت خرید برق از سیستم انتقال روی امکان‌سنجی احداث DG در پست فوق‌توزیع طراحی شده است. به همین منظور مسأله در چهار حالت زیر حل شده است:

حالت ۱-۲: اطلاعات ورودی و شرایط همانند حالت پایه‌ای آزمایش ۱ می‌باشد با این تفاوت که قیمت برق در هر چهار سطوح نسبت به آن ۵ واحد پول بیشتر فرض شده است. به عبارت دیگر،

$$C_{MWhT}(PT_i) = \begin{cases} 25 & \text{if } 0 \leq PT_i < 10 \\ 30 & \text{if } 10 \leq PT_i < 15 \\ 35 & \text{if } 15 \leq PT_i < 20 \\ 45 & \text{if } 20 \leq PT_i \end{cases} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 24$$

حالت ۲-۲: تمامی شرایط همانند حالت ۱-۲ است ولی قیمت برق در سطوح مختلف به صورت زیر فرض شده است.

$$C_{MWhT}(PT_i) = \begin{cases} 15 & \text{if } 0 \leq PT_i < 10 \\ 20 & \text{if } 10 \leq PT_i < 15 \\ 25 & \text{if } 15 \leq PT_i < 20 \\ 35 & \text{if } 20 \leq PT_i \end{cases} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 24$$

حالت ۳-۲: در این حالت قیمت برق نسبت به حالت پایه‌ای آزمایش ۱، در سه سطح اول ۵ واحد پول کمتر و در سطح چهارم ۵ واحد پول افزایش داده شده است. به صورت ریاضی قیمت برق در این حالت به صورت زیر است.

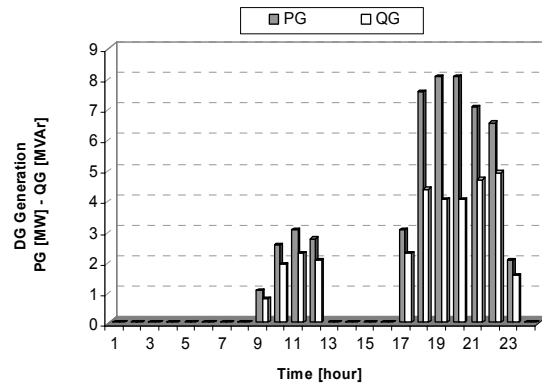
$$C_{MWhT}(PT_i) = \begin{cases} 15 & \text{if } 0 \leq PT_i < 10 \\ 20 & \text{if } 10 \leq PT_i < 15 \\ 25 & \text{if } 15 \leq PT_i < 20 \\ 45 & \text{if } 20 \leq PT_i \end{cases} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 24$$

دیگر شرایط و اطلاعات ورودی مشابه حالت پایه‌ای آزمایش ۱ می‌باشد. در این حالت به نوعی افزایش قیمت برق در توان‌های بالا به علت وجود تراکم در سیستم انتقال^۷ مدل‌سازی شده است.

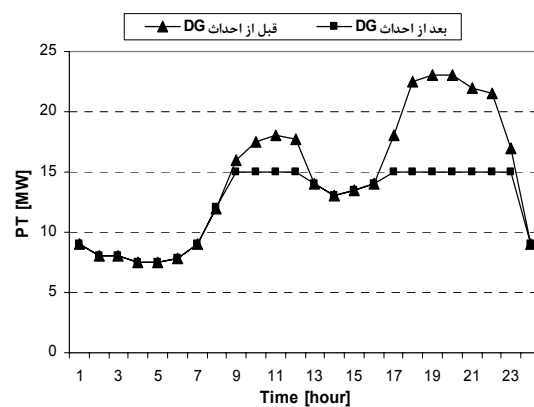
حالت ۴-۲: در این حالت قیمت خرید توان از سیستم انتقال به صورت ثابت برای تمام ساعات روز برابر ۳۵ \$/MWh فرض شده است. دیگر شرایط و اطلاعات ورودی مشابه حالت پایه‌ای آزمایش ۱ می‌باشد.

نتایج حاصل از انجام این حالت‌ها شامل اجزای سود و هزینه و همچنین مدت زمان تعویق در توسعه ظرفیت پست در جدول (۳) ارائه شده است.

در حالت ۱-۲ ظرفیت پیشنهادی برای احداث DG در پست فوق‌توزیع ۱۱ مگاوات‌آمبر است که استراتژی بهینه بهره‌برداری از آن در شکل (۸) نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد در این حالت ظرفیت DG بیشتر از حالت پایه‌ای آزمایش ۱ است. علت آن نیز افزایش



شکل ۶: استراتژی بهینه بهره‌برداری از واحد تولیدی در آزمایش ۱.



شکل ۷: پروفیل توان اکتیو دریافتی از سیستم انتقال در آزمایش ۱.

پس از احداث DG با ظرفیت پیشنهادی و بهره‌برداری از آن مطابق با استراتژی ارائه شده، توان اکتیو دریافتی از سیستم انتقال تغییر خواهد کرد. در شکل (۷) پروفیل توان اکتیو دریافتی از سیستم انتقال قبل و بعد از احداث واحد تولیدی آمده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد با بهره‌برداری از DG، پروفیل توان اکتیو دریافتی از سیستم انتقال در ساعات ۹ تا ۱۲ و ۱۷ الی ۲۳ تا مرز ۱۵ مگاوات کاهش پیدا کرده است. به عبارت بهتر بخشی از توان مورد نیاز سیستم در ساعات اوج مصرف توسط DG تأمین شده به طوری که در این ساعات قیمت خرید توان از سیستم انتقال از وضعیت قبلی که ۳۰ یا ۴۰ \$/MWh بوده به ۲۵ \$/MWh کاهش پیدا کرده است.

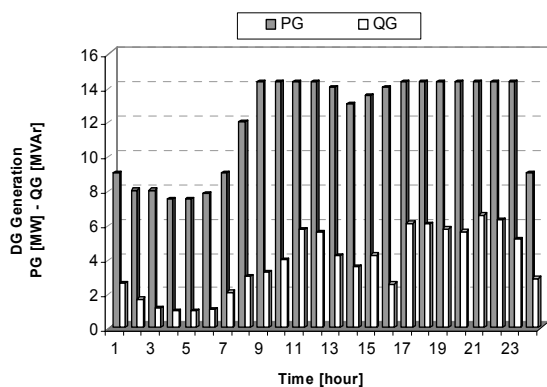
آزمایش ۲- بررسی تأثیر تغییر در قیمت خرید برق از سیستم انتقال

این آزمایش به منظور بررسی تأثیرات ناشی از تغییر

با وجود اینکه در برخی ساعات قیمت برق سیستم انتقال گرانتر از هزینه تولید DG است، احداث DG در پست مقرون به صرفه نمی‌باشد.

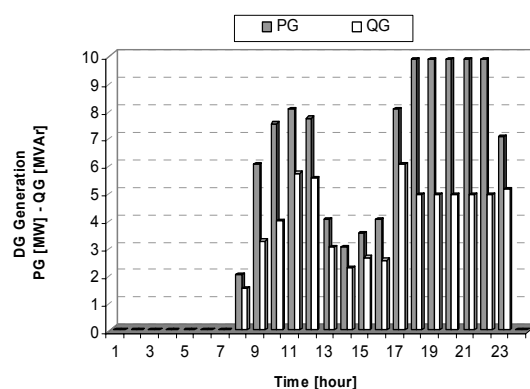
در حالت ۲-۳ ظرفیت پیشنهادی برای احداث واحد تولیدی برابر ۴ مگاوات آمپر است که رژیم بهره‌برداری از آن در شکل (۹) ارائه شده است. در این حالت با وجود اینکه قیمت خرید برق از سیستم انتقال در سه سطح اول مشابه حالت ۲-۲ کمتر از حالت پایه‌ای آزمایش ۱ بوده است اما به علت گرانتر بودن برق در سطح چهارم نسبت به حالت پایه‌ای، احداث واحد تولیدی توجیه اقتصادی پیدا کرده است. این آزمایش به نوعی قابلیت DG را در مدیریت تراکم^۸ سیستم انتقال نشان می‌دهد. تغییرات توان اکتیو ورودی از سیستم انتقال در این حالت نیز در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

در حالت ۲-۴ که قیمت برق به جای مدل چند سطحی، در تمامی زمان‌ها ثابت فرض شده است، ظرفیت پیشنهادی برای احداث DG در پست برابر ۱۶ مگاوات آمپر می‌باشد. استراتژی تولید توان اکتیو و راکتیو و تغییرات توان اکتیو ورودی از سیستم انتقال در این حالت به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) آمده است. در این حالت نیز مشاهده می‌گردد که با وجود گرانتر بودن برق سیستم انتقال در تمام زمان‌ها نسبت به بهره‌برداری از DG هنوز بخشی از بار شبکه از طریق شبکه انتقال تأمین می‌گردد. در این حالت برعکس دیگر حالات، عمده توان مورد نیاز سیستم از طریق DG تغذیه گردیده است و تنها در برخی بازه‌های زمانی بخشی از بار شبکه توسط خرید توان از سیستم انتقال تأمین شده است.

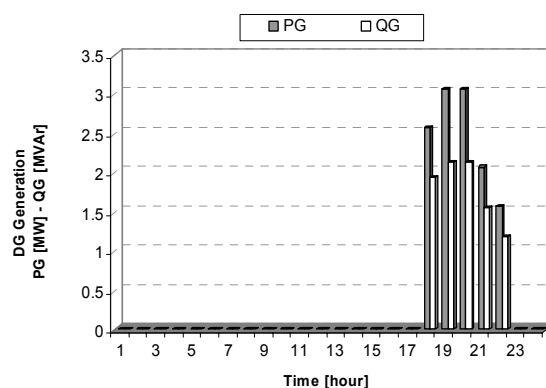


شکل ۱۰: استراتژی بهینه بهره‌برداری از واحد تولیدی در حالت ۲-۴.

قیمت خریداری برق از سیستم انتقال می‌باشد که احداث و بهره‌برداری بیشتر از DG را توجیه‌پذیر می‌سازد. تغییرات توان اکتیو ورودی از سیستم انتقال در این حالت در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. نکته قابل توجه در این حالت آن است که با وجود ارزانتر بودن هزینه بهره‌برداری از DG نسبت به قیمت خرید برق سیستم انتقال در ساعات‌های ۱۸ الی ۲۲ هنوز بخشی از توان مورد نیاز شبکه از طریق سیستم انتقال تأمین می‌گردد. علت این امر در ماهیت اقتصادی مدل است و اینکه علاوه بر هزینه جاری بهره‌برداری از DG، هزینه اولیه احداث واحد تولیدی نیز در ارزیابی طرح مهم است لذا احداث ظرفیت بیشتر از ۱۱ مگاوات آمپر برای تأمین کامل توان در ساعات‌هایی که برق سیستم انتقال گرانتر از هزینه بهره‌برداری از DG است، در مجموع صرفه اقتصادی کمتری را به دنبال دارد.



شکل ۸: استراتژی بهینه بهره‌برداری از واحد تولیدی در حالت ۲-۱.



شکل ۹: استراتژی بهینه بهره‌برداری از واحد تولیدی در حالت ۲-۳.

در حالت ۲-۲ که قیمت برق سیستم انتقال در سطوح مختلف ۵ واحد پول کمتر از حالت پایه‌ای آزمایش ۱ است،

جدول ۳: نتایج عددی حاصل از اجرای آزمایش‌های ۱ و ۲.

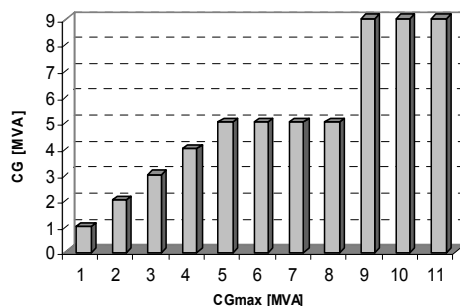
آزمایش ۲			آزمایش ۱		مدت زمان تعویق در توسعه پست (سال)
حالت ۴-۲	حالت ۳-۲	حالت ۲-۲	حالت ۱-۲	حالت پایه‌ای	
۲۳/۲۴	۳/۹۰		۱۲/۲۸	۱۰/۱۳	ارزش کنونی سود اقتصادی تعویق در توسعه پست (\$)
۴۲۳۱۷۴	۱۰۲۵۱۸	احداث DG مقرون به صرفه نمی‌باشد.	۲۸۶۴۷۴	۲۳۳۲۰۲	ارزش کنونی سود اقتصادی کاهش هزینه توان اکتیو (\$)
۵۱۳۲۴۸۵۹	۱۲۰۵۷۳۰۶		۲۵۲۹۳۴۳۱	۱۶۵۲۴۶۶۸	ارزش کنونی سود اقتصادی کاهش هزینه توان راکتیو (\$)
۶۴۰۷۳۳	۶۲۹۸۲		۴۹۷۱۲۶	۲۳۲۲۸۸	ارزش کنونی سود اقتصادی بهبود قابلیت اطمینان (\$)
۶۱۹۶۹۲	۱۵۴۹۲۳		۴۲۶۰۳۸	۳۴۸۵۷۷	هزینه احداث واحد تولیدی (\$)
۵۰۸۸۰۰۰	۱۲۷۲۰۰۰		۳۴۹۸۰۰۰	۲۸۶۲۰۰۰	ارزش کنونی هزینه بهره‌برداری از واحد تولیدی (\$)
۳۹۵۹۳۳۳۳	۱۶۸۳۶۲۱		۱۴۱۸۳۷۹۳	۷۰۴۹۳۱۵	ارزش کنونی هزینه تعمیرات و نگهداری واحد تولیدی (\$)
۱۳۶۸۸۲۹	۱۴۳۹۲۱		۶۲۶۳۹۳	۴۰۲۵۴۰	ارزش کنونی سود اقتصادی طرح (\$)
۶۹۵۸۲۹۶	۹۲۷۸۱۸۷		۸۱۹۴۸۸۲	۷۰۲۴۹۳۹	ظرفیت واحد تولیدی (مگاوات‌آمپر)
۱۶	۴		۱۱	۹	ضریب بهره‌برداری از واحد تولیدی (%)
۷۹/۴	۱۵/۸		۴۸/۸	۲۸/۴	

تا ۵ مگاوات‌آمپر افزایش می‌یابد ولی پس از آن با افزایش حد قید (CG_{Max}) تا مقدار ۸ مگاوات‌آمپر پاسخ CG روی ۵ مگاوات‌آمپر ثابت مانده است.

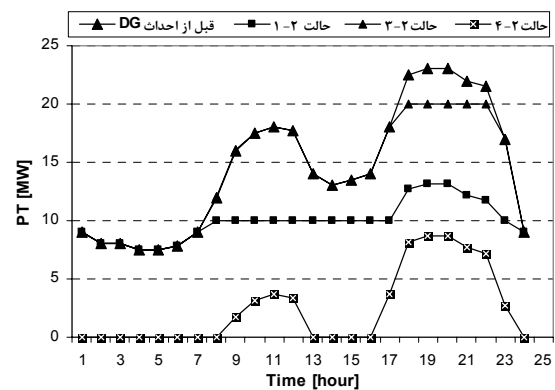
به جهت بررسی علت پاسخ حاصله در این آزمایش، با تغییر قید (۳۰) به صورت زیر مقدار بهینه تابع هدف به ازای مقادیر مختلف CG_{Max} از یک تا ۱۱ مگاوات‌آمپر محاسبه شده است که نتایج حاصله در شکل (۱۳) ارائه شده است.

$$CG = CG_{Max}$$

همانطور که مشاهده می‌شود، از میان حالت‌های CG برابر ۵ تا ۸ مگاوات‌آمپر، مقدار تابع هدف برای حالت $CG=5$ بیشینه است که این امر مؤید نتایج ارائه شده در شکل (۱۲) می‌باشد.



شکل ۱۲: ظرفیت پیشنهادی در حالت‌های مختلف آزمایش ۳.



شکل ۱۱: پروفیل توان اکتیو دریافتی از سیستم انتقال در آزمایش ۲.

آزمایش ۳- بررسی تأثیر محدودیت حداکثر ظرفیت DG

این آزمایش به منظور بررسی رفتار مسأله نسبت به تغییرات قید حداکثر ظرفیت DG تدوین شده است. به همین منظور مسأله با لحاظ نمودن قید (۳۰) در یازده حالت حل شده است. در این حالت‌ها میزان CG_{Max} به ترتیب از مقدار یک تا ۱۱ مگاوات‌آمپر تغییر می‌کند. دیگر شرایط و اطلاعات ورودی در این یازده حالت ثابت و مانند حالت پایه‌ای آزمایش ۱ می‌باشد. ظرفیت بهینه حاصل از انجام این حالت‌ها که جهت احداث در پست فوق توزیع پیشنهاد شده است در قالب نمودار شکل (۱۲) نشان داده شده است.

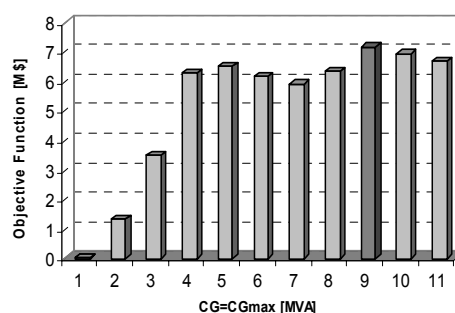
همانگونه که ملاحظه می‌گردد، با افزایش پارامتر CG_{Max} تا مقدار ۵ مگاوات‌آمپر، پاسخ CG نیز از مقدار یک

روش پیشنهادی با تغییر در پارامترهای اقتصادی سیستم است. علاوه بر این تأثیر حداکثر ظرفیت DG قابل احداث در پست روی پاسخ مسأله مورد تحلیل قرار گرفت. لازم به ذکر است در صورت امکان حضور مالکیت خصوصی برای DG، مدل ریاضی طرح عوض خواهد شد و ورود مالک خصوصی DG در بحث گزینه‌های جدیدی را در اجزای سود و هزینه مدل وارد خواهد کرد که نیاز به مطالعه دارد.

فهرست علائم

α	نرخ سالیانه رشد بار سیستم
C_{invT}	هزینه توسعه ظرفیت پست [\\$]
$C_{MVA DG}$	هزینه احداث واحد تولید پراکنده [\$/MVA]
$C_{MVA hrs}$	هزینه عدم تأمین توان سیستم [\$/MVA-hour]
$C_{MVA rht}$	قیمت خریداری توان راکتیو از سیستم انتقال [\$/MVA-hour]
$C_{MWh DG}$	هزینه تولید توان واحد تولید پراکنده [\$/MWh]
$C_{MWh T}$	قیمت خریداری توان اکتیو از سیستم انتقال [\$/MWh]
C_{Mf}	هزینه ثابت سالیانه تعمیرات و نگهداری DG [\$/MVA-hour]
C_{Mv}	هزینه متغیر تعمیرات و نگهداری DG [\$/MWh]
CG	ظرفیت واحد DG [MVA]
CG_{Max}	حداکثر ظرفیت DG قابل احداث در پست [MVA]
CP_a	هزینه تأمین توان اکتیو سیستم پس از احداث DG [\\$]
CP_b	هزینه تأمین توان اکتیو سیستم قبل از احداث DG [\\$]
CQ_a	هزینه تأمین توان راکتیو سیستم پس از احداث DG [\\$]
CQ_b	هزینه تأمین توان راکتیو سیستم قبل از احداث DG [\\$]
CR_a	هزینه عدم اعتماد سیستم پس از احداث DG [\\$]
CR_b	هزینه عدم اعتماد سیستم قبل از احداث DG [\\$]
F	مقدار تابع هدف بهینه‌سازی [\\$]
$InfR$	نرخ تورم سالیانه
$IntR$	نرخ بهره سالیانه
LF	ضریب بار پست فوق توزیع

در حالت‌هایی که CG_{Max} بیشتر از ۹ مگاوات‌آمپر است در پاسخ بهینه برای CG تغییری به وجود نیامده است. علت مشابه بودن نتایج در این حالت‌ها این است که اگرچه در آنها ظرفیت DG بیشتری نسبت به حالت‌های قبل قابل احداث است اما بهره‌گیری بیشتر از آن از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست لذا ظرفیت بیشتری انتخاب نشده است.



شکل ۱۳: مقدار بهینه تابع هدف به ازای مقادیر مختلف ظرفیت DG در آزمایش ۳.

نتیجه‌گیری

احداث تولید پراکنده در پست‌های فوق توزیع اگر مبتنی بر مطالعات امکان‌سنجی فنی و اقتصادی انجام‌گیرد، می‌تواند منافع اقتصادی قابل توجهی را برای شرکت‌های توزیع به همراه داشته باشد. با توجه به تأثیر فاکتورهای مختلف در امر تعیین ظرفیت بهینه واحدهای DG، حل این مسأله با پیچیدگی‌های خاصی توأم گردیده است. در این مقاله مسأله ظرفیت‌یابی بهینه واحدهای تولید پراکنده تحت مدیریت و مالکیت شرکت توزیع در پست‌های فوق‌توزیع با توجه به محدودیت‌های فنی حاکم بر ژنراتورهای سنکرون و نیز منافع و هزینه‌های مرتبط با طرح، در قالب یک مدل ریاضی به صورت تابع هدف و قیود مرتبط با آن مدل‌سازی شد. در مدل ارائه شده سعی شد تا حد امکان اجزای سود و هزینه ناشی از احداث DG در پست فوق‌توزیع لحاظ گردد. مدل و روش پیشنهادی علاوه بر ظرفیت بهینه DG، استراتژی بهینه بهره‌برداری از آن را نیز به عنوان خروجی ارائه می‌دهد که می‌تواند در تعیین رژیم اقتصادی بهره‌برداری از واحد تولیدی در پست مورد استفاده قرار گیرد. آزمایش‌هایی برای بررسی کارایی روش پیشنهادی و نیز تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به قیمت خرید توان اکتیو از شبکه انتقال، روی یک پست فوق‌توزیع انجام شد. نتایج به دست آمده حاکی از تطابق

سال توسعه ظرفیت پست قبل از احداث DG	M	SD_{Max}	بیک توان ظاهری بار سیستم [MVA]
سال توسعه ظرفیت پست پس از احداث DG	N	SG_i	میزان توان ظاهری تولیدی DG در ساعت نام [MVA]
تابع تبدیل هزینه‌ها و سودها به معادل ارزش کنونی	$NPV(.)$	SS_{Max}	حداکثر ظرفیت قابل بارگذاری پست فوق توزیع [MVA]
تلفات اهمی ترانسفورماتور پست در بارگذاری نامی [MW]	P_{LN}	T	عمر مفید واحد DG [year]
میزان بار اکتیو سیستم در ساعت نام [MW]	PD_i	ΔT	مدت زمان تعویق در توسعه ظرفیت پست ناشی از احداث DG [year]
حد کمینه ضریب قدرت بهره‌برداری از DG	PF_{Min}	U	شاخص قابلیت اطمینان مدت زمان بی‌برقی سالیانه پست فوق توزیع [hour/year]
میزان توان اکتیو تولیدی DG در ساعت نام [MW]	PG_i		
میزان بار اکتیو دریافتی از سیستم انتقال در ساعت نام [MW]	PT_i		
میزان بار اکتیو دریافتی از سیستم انتقال قبل از احداث DG در ساعت نام [MW]	$PT_{a,i}$		
میزان بار اکتیو دریافتی از سیستم انتقال پس از احداث DG در ساعت نام [MW]	$PT_{b,i}$		
میزان بار راکتیو سیستم در ساعت نام [MVA _r]	QD_i		
میزان توان راکتیو تولیدی DG در ساعت نام [MVA _r]	QG_i		
ظرفیت نامی ترانسفورماتور پست فوق توزیع [MVA]	S_N		
میزان توان ظاهری بار سیستم در ساعت نام [MVA]	SD_i		

ضمیمه

نرم افزار LINGO یکی از ابزارهای کارآمد جهت حل مسایل خطی و غیرخطی است. LINGO یک بسته نرم‌افزاری با امکان برقراری ارتباط دو طرفه با کاربر می‌باشد و از آن می‌توان در حل مسایل خطی عدد صحیح و غیرخطی کمک گرفت. این نرم‌افزار قابلیت تولید مدل‌های بزرگ با سطرهای نسبتاً کم در داده‌های ورودی را دارا می‌باشد. علاوه بر این LINGO دارای یک کتابخانه بزرگ از تابع‌های ریاضی آماری و احتمالی می‌باشد و قدرت بالایی در خواندن اطلاعات از فایل‌های خارجی و نرم‌افزارهای صفحه گسترده دارد که می‌تواند برای حل بسیاری از مسایل بهینه‌سازی مفید باشد.

مراجع

- 1 - Willis, H. L. and Scott, W. G. (2000). *Distributed Power Generation Planning and Evaluation*. Marcel Dekker Pub. Co., New York.
- 2 - Barker, P. P. (2000). "Determining the impact of distributed generation on power systems: Part 1-Radial distribution systems." *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting*, PP. 1645-1656.
- 3 - *Distributed Generation in Liberalized Electricity Markets*. International Energy Agency, 2002.
- 4 - Kim, K. H., Lee, Y. J., Rhee, S. B., Lee, S. K. and You, S.K. (2002). "Dispersed generator placement using fuzzy-GA in distribution systems." *Proc. 2002 IEEE Power Engineering Soc. Summer Meeting*, Vol. 3, Chicago, IL, PP. 1148-1153.
- 5 - Griffin, T., Tomsovic, K., Secrest D. and Law, A. (2000). "Placement of dispersed generation systems for reduced losses." *Proc. 33rd Annu. Hawaii Int. Conf. Systems Sciences*, Maui, HI.
- 6 - Silvestri, A., Berizzi, A. and Buonanno, S. (1999). "Distributed generation planning using genetic algorithms," *Proc. IEEE PowerTech Budapest 99*, PP. 257.
- 7 - Wang, C. and Nehrir, M. H. (2004). "Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems." *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 4, PP. 2068-2076.

- 8 - Willis, H. L. (2000), "Analytical methods and rules of thumb for modeling DG-distribution interaction." *Proc. 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, Seattle, WA, PP. 1643–1644.
- 9 - Rau, N. S. and Wan, Y.H. (1994). "Optimum location of resources in distributed planning." *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, PP. 2014–2020.
- 10 - Kim, J. O., Nam, S. W., Park, S. K. and Singh, C. (1998). "Dispersed generation planning using improved hereford ranch algorithm." *Electric Power System Research*, Vol. 47, No. 1, PP. 47–55.
- 11 - Celli, G., Ghaiani, E., Mocci, S. and Pilo, F. (2005). "A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation." *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 2, PP. 750–757.
- 12 - Brown, R. E., Pan, J., Feng, X. and Koutlev, K. (2001). "Sitting distributed generation to defer T&D expansion." *Proc. IEEE Transmission and Distribution Conf. and Expo.* Vol. 2, PP. 622–627.
- 13 - El-Khattam, W., Bhattacharya, K., Hegazy, Y. and Salama, M. M. A. (2004). "Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market." *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 3, PP. 1674–1684.
- 14 - Rau, N. S. and Taylor, B. (1998). "A central inventory of storage and other technologies to defer distribution upgrades-optimization and economics." *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 1, PP. 194–202.
- 15 - Caldon, R., Rossetto, F. and Scala, A. (2003). "Reactive power control in distribution networks with dispersed generators: a cost based method." *Electric Power Systems Research*, Vol. 64, PP. 209–217.
- 16 - Billinton, R. and Allan, R. N. (1996). *Reliability Evaluation of Power Systems*, Plenum, New York.
- 17 - Chapman, S. (1985). *Electric Machinery Fundamentals*, Mc Graw-Hill Pub. Co., New York.
- 18 - <http://www.lindo.com>

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Distributed Generation
- 2 - Supervisory Control and Data Acquisition
- 3 - Composite Generation and Transmission System
- 4 - Minimum down Time
- 5 - Minimum up Time
- 6 - Mixed Integer Non-Linear Programming
- 7 - Transmission Congestion
- 8 - Congestion Management