

برنامه‌ریزی احتمالی توسعه تولید و شبکه انتقال تحت نفوذ گسترده منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر

ابراهیم اسماعیل‌زاده^۱، محمدحسین جاویدی دشت‌بیاض^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، esmaeilzadeh676@yahoo.com

^۲ استاد، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، hossein_javidi@yahoo.com

چکیده - در سال‌های اخیر با توجه به مقرون به صرفه شدن فناوری‌های نوین تولید برق از طریق منابع تجدیدپذیر و لزوم توجه ویژه به مسائل زیست‌محیطی، استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر همچون منابع انرژی بادی و خورشیدی رشد زیادی داشته است. با نفوذ روزافزون و گسترده این منابع، نحوه برنامه‌ریزی توسعه شبکه قدرت، تغییراتی خواهد داشت. هدف این مقاله، بررسی اثرات بلندمدت منابع تولید پراکنده بادی، فوتوولتائیک و حرارتی خورشیدی بر برنامه‌ریزی توسعه بخش تولید و شبکه انتقال است. برای این منظور، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری منابع تولید پراکنده، خطوط و نیروگاه‌های آبی، بخار و سیکل ترکیبی در قالب یک مسأله بهینه‌سازی احتمالی، مدل شده‌اند. به دلیل عدم قطعیت بار گره‌های شبکه، از برنامه‌ریزی احتمالی برای مدل‌سازی طبیعت بار استفاده شده است. شبیه‌سازی بر روی شبکه نیجریه که مستعد انرژی‌های تجدیدپذیر بوده و همچنین نسبت به دیگر شبکه‌های واقعی ضعیف‌تر است، انجام شده است. نتایج حاصل، حاکی از کاهش هزینه کل سرمایه‌گذاری در توسعه شبکه انتقال، در صورت در نظر گرفتن نقش منابع تولید پراکنده است. همچنین منابع فوتوولتائیک، به دلیل اینکه هزینه سرمایه‌گذاری بالاتری نسبت به دیگر فناوری‌های معمول و تجدیدپذیر در نظر گرفته شده دارند، سهمی در توسعه بهینه تولید ندارند.

کلید واژه - انرژی‌های تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی احتمالی، برنامه‌ریزی توسعه تولید، برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال، بهینه‌سازی، منابع تولید پراکنده

دهه اخیر با پیشرفت فناوری و کاهش هزینه‌های منابع تولید پراکنده از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر، و با توجه به مزایای استفاده از این منابع همچون کاهش تلفات [۲] [۳]، بهبود پروفیل ولتاژ [۴]، کاهش پیک بار شبکه [۵]، کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی [۳] ناشی از تولید برق، کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی، هزینه بهره‌برداری کمتر نسبت به فناوری‌های معمول و غیره، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، اساس برنامه‌ریزی طولانی مدت انرژی^۳ اکثر کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه شده است [۶]. مزایای منابع تجدیدپذیر انرژی، بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته را بر آن داشته که در سبب توسعه تولید انرژی خود، سهم قابل توجهی را به این منابع نظیر انرژی بادی، فوتوولتائیک و حرارتی خورشیدی^۴ اختصاص دهند و طرح‌های مشوق محور متعددی برای توسعه بهینه این منابع تدوین کنند [۶] [۷]. بنابراین، افزایش نفوذ این منابع و در نتیجه تامین بخش قابل توجهی از برق مصرفی کشورها از این

۱. مقدمه

با رشد روزافزون بار شبکه قدرت و افزایش دامنه استفاده از برق در فعالیت‌های گوناگون، بحث‌های اقتصادی و امنیتی صنعت برق تبدیل به مسأله پیچیده‌ای شده که چالش‌های پیش روی این صنعت بزرگ را بیشتر کرده است. به دنبال اثرات مخرب زیست‌محیطی فناوری‌های معمول تولید نظیر توربین‌های آبی، بخار و گازی و محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، و همچنین رقابتی‌تر شدن هزینه‌های استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر^۱، گرایش به سمت منابع تجدیدپذیر انرژی رو به فزونی است. در شبکه قدرت، عملکرد مناسب و تأمین مطلوب بار به طور هم‌زمان با بهره‌برداری و برنامه‌ریزی بهینه، در گرو مصالحه‌ای بین هزینه و کارایی شبکه است که بهره‌بردار شبکه^۲ به دنبال یافتن بهترین پاسخ برای این مسأله است [۱]. در سه

^۳ Long Term Energy Planning

^۴ Centralized Solar Thermal Power (CST)

^۱ Renewable Distributed Generation Resources

^۲ Network Operator (NO)

بخش‌های ۵ و ۶ نیز، به ترتیب، نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه مورد مطالعه و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲. برنامه‌ریزی توسعه تولید و شبکه انتقال

برنامه‌ریزی توسعه سیستم قدرت شامل برنامه‌ریزی توسعه تولید و برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال است. برنامه‌ریزی توسعه تولید، محل، ظرفیت و نوع نیروگاه‌ها و برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال، میزان توسعه خطوط موجود یا محل و ظرفیت خطوط جدید را تعیین می‌کند. با توجه به اثرات متقابل این دو برنامه‌ریزی، مطلوب است که برنامه‌ریزی توسعه تولید و شبکه انتقال، به طور هم‌زمان انجام شود [۱۱].

برنامه‌ریزی توسعه تولید و شبکه انتقال، یک مسأله بهینه‌سازی با تابع هدف کمینه کردن هزینه‌ها است. این هزینه‌ها، شامل هزینه‌های احداث و بهره‌برداری نیروگاه‌ها و خطوط می‌شود. قیود مسأله نیز، قیود مساوی و نامساوی مربوط به تعادل بار و تولید و قیود مربوط به نیروگاه‌ها و خطوط است [۱۲] [۱۳]. شکل (۱)، شمای کلی این مسأله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. متغیر تصمیم‌گیری در این مسأله بهینه‌سازی، تعداد، محل و ظرفیتی است که باید احداث شود تا قیود رعایت شود و بار به طور مطلوبی تأمین شود. داده‌های ورودی مسأله شامل مشخصات شبکه موجود نظیر ظرفیت خطوط و نیروگاه‌ها، توپولوژی شبکه، پیش‌بینی بار هر گره، مسیرهای کاندید احداث خط جدید و گره‌های کاندید احداث نیروگاه، می‌شود.

Min

$$[Transmission\ Investment\ Cost \\ + Generation\ Investment\ Cost \\ + Operation\ Cost]$$

S.t. :

**Energy Balance Constraint
Generation Constraint
Transmission Constraint**

شکل ۱: تابع هدف و قیود برنامه‌ریزی هم‌زمان توسعه تولید و شبکه انتقال

برای برنامه‌ریزی توسعه تولید و شبکه انتقال، به طور هم‌زمان، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است [۱۱]. در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده در برنامه‌ریزی توسعه، مسأله را تبدیل

طریق، نیاز به تدابیر و برنامه‌ریزی ویژه دارد. با مدیریت بهینه توسعه منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر با ظرفیت بالا، می‌توان از توسعه این منابع، در جهت توسعه بهینه سیستم قدرت نیز بهره برد [۸] [۹] [۱۰].

نکته حائز اهمیتی که در توسعه منابع تولید پراکنده، اغلب، مغفول واقع شده آن است که تولید در سمت مصرف و کاهش چشم‌گیر فاصله مراکز ثقل بار از تولید، باعث آزادسازی بخش قابل‌توجهی از فیدرهای سطح توزیع می‌شود [۸]. در نتیجه، می‌توان با در نظر گرفتن رشد روزافزون منابع تولید پراکنده، برنامه‌ریزی توسعه خطوط سطح فوق توزیع و انتقال را طوری بهینه کرد که رشد این منابع در گره‌های مختلف، منجر به پرشدگی خطوط انتقال نشود. پس با برنامه‌ریزی صحیح توسعه منابع تولید پراکنده در کنار برنامه‌ریزی توسعه تولید^۵ و برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال^۶، هزینه توسعه شبکه به تعویق می‌افتد. به عبارت بهتر، بهینه‌سازی توسعه منابع تولید پراکنده اعم از تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر می‌تواند علاوه بر مزایای گفته شده در سطح توزیع، آزادسازی بخشی از ظرفیت شبکه انتقال، به تعویق افتادن هزینه‌های توسعه شبکه انتقال و کاهش نیاز به توسعه منابع تولید معمول را به همراه داشته باشد [۸] [۱۰]. این در حالی است که تاثیر منابع تولید پراکنده بر روی تولید و شبکه انتقال اغلب بلند مدت بوده و در بازه‌های زمانی میان‌مدت و بلند مدت قابل بررسی است.

با رشد گسترده منابع تولید پراکنده و انگیزه‌های فراوانی که برای استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی وجود دارد، در آینده نزدیک، شاهد شبکه قدرت دارای منابع متعدد تولید پراکنده خواهیم بود. در این مقاله، روشی مبتنی بر برنامه‌ریزی احتمالی^۷ برای توسعه تولید و شبکه انتقال در حضور و عدم حضور منابع تولید پراکنده معرفی می‌شود. بر پایه روش پیشنهادی، به صورت کمی، هزینه‌های به تعویق افتاده در سرمایه‌گذاری توسعه تولید و شبکه انتقال، در حضور منابع تولید پراکنده محاسبه می‌شود.

ساختار مقاله از ۶ بخش تشکیل شده است. بخش ۲ به تبیین مبانی برنامه‌ریزی توسعه تولید و شبکه انتقال می‌پردازد. در بخش ۳، روش پیشنهادی برای برنامه‌ریزی احتمالی توسعه تولید و شبکه انتقال، در حضور و عدم حضور منابع تولید پراکنده ارائه می‌شود. در بخش ۴، شبکه مورد مطالعه معرفی می‌شود. در

^۵ Generation Expansion Planning (GEP)

^۶ Transmission Expansion Planning (TEP)

^۷ Probabilistic Optimisation

خط l ام، بیانگر تغییر توان عبوری خط، نسبت به تغییر در توان تزریقی گره‌های شبکه است که برای هر خط نسبت به تمام گره‌ها، تشکیل یک بردار می‌دهد [۱۴]. تابع هدف و قیود مسأله به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \forall i \in I, l \in L, s \in S, n \in N \\ & Min \\ & \sum_i \gamma_i \times \overline{G_i} \times (V_i - EGV_i) \\ & + \sum_l \alpha_l \times length_l \times (V_l - ELV_l) \\ & + 8760 \times \sum_s p_s \times \sum_i \beta_i \times G_i^s \\ & + \sum_s p_s \times \sum_n \lambda \times (\overline{D_n} - D_n^s) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_i G_i^s = \sum_n D_n^s \quad (2)$$

$$G_i^s \leq \overline{CF} \times \overline{G_i} \times V_i \quad (3)$$

$$G_i^s \geq \underline{CF} \times \overline{G_i} \times V_i \quad (4)$$

$$PTDF_l \times (GCM \times G_i^s - D_n^s) \leq \overline{P_l} \times V_l \quad (5)$$

$$PTDF_l \times (GCM \times G_i^s - D_n^s) \geq -\overline{P_l} \times V_l \quad (6)$$

$$D_n^s \leq \overline{D_n} \quad (7)$$

$$D_n^s \geq 0.8 \times \overline{D_n} \quad (8)$$

رابطه (۱) بیان‌گر تابع هدف یعنی مجموع هزینه‌های احداث نیروگاه، احداث خط، بهره‌برداری نیروگاه و هزینه بار تأمین نشده است. γ_i ، هزینه احداث نیروگاه i ام به ازای هر مگاوات، $\overline{G_i}$ ، ظرفیت نصب شده در نیروگاه i ام، V_i ، متغیر صحیح بیان‌گر تعداد نیروگاه‌هایی که باید ساخته شود، EGV_i ، متغیر صحیح تعداد نیروگاه‌های موجود، α_l ، هزینه احداث هر کیلومتر خط در مسیر l ، $length_l$ ، طول خط در مسیر l ، V_l ، متغیر صحیح تعداد خطوطی که در مسیر l باید ساخته شود، ELV_l ، متغیر صحیح تعداد خطوط موجود در مسیر l ، p_s ، احتمال رخداد سناریوی s ، β_i ، هزینه بهره‌برداری از نیروگاه i ام، G_i^s ، میزان تولید نیروگاه i ام در سناریوی s ، λ ، جریمه بار تأمین نشده، $\overline{D_n}$ ، بیشینه بار در گره n ام، D_n^s ، بار تأمین شده در گره n ام در سناریوی s است. رابطه (۲)، قید تعادل تولید و بار و رابطه (۳) و (۴)، به ترتیب، قیود بیشینه و کمینه بهره‌برداری از نیروگاه‌ها است. در این دو رابطه، \overline{CF} و \underline{CF} ، به ترتیب، ضریب

به یک مسأله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^۸ می‌کند. بنابراین، به دلیل تعداد زیاد متغیرها، روش حل باید نسبت به تعداد متغیرها در برنامه‌ریزی خطی^۹، به اندازه کافی، انعطاف پذیر باشد. از این رو در این مقاله از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^{۱۰} استفاده می‌شود که با ماهیت خطی مسأله سازگاری کامل دارد [۱۲]. از طرف دیگر، در این مقاله، به دلیل اینکه مسأله از دیدگاه مالک شبکه انتقال مدل‌سازی شده، نیازی به پیچیده کردن مدل با در نظر گرفتن رفتار شرکت‌های تولید و انتقال در فضای تجدید ساختار شده و رقابتی، احساس نمی‌شود. عدم قطعیت‌های موجود در بار شبکه، مسأله برنامه‌ریزی توسعه را پیچیده‌تر می‌کند [۱۰] [۱۴]. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت بار، مسأله به صورت احتمالی با در نظر گرفتن سناریوهای متعدد برای بار، مدل‌سازی می‌شود.

۳. مدل‌سازی مسأله

اغلب، برنامه‌ریزی توسعه تولید و برنامه‌ریزی توسعه انتقال به صورت مجزا از یکدیگر حل می‌شود، اما در این مقاله با حل هم‌زمان و احتمالی، در دو حالت حضور و عدم حضور منابع تولید پراکنده، توسعه شبکه انتقال و توسعه تولید بهینه‌سازی می‌شود. توسعه شبکه انتقال از طریق توسعه خطوط موجود یا احداث خط در مسیرهای کاندید، انجام می‌شود. توسعه تولید نیز در حالت اول، بدون حضور منابع تولید پراکنده و با استفاده از فناوری‌های معمول توربین آبی، بخار و سیکل ترکیبی، و در حضور منابع تولید پراکنده، با در نظر گرفتن فناوری‌های معمول گفته شده در کنار فناوری‌های بادی، فوتوولتائیک و حرارتی خورشیدی در تابع هدف مسأله برنامه‌ریزی، هزینه احداث و تعمیر و نگهداری خطوط پیشنهادی، هزینه احداث، هزینه تولید و هزینه تعمیر و نگهداری نیروگاه‌ها و منابع تولید پراکنده لحاظ می‌شود. عدم قطعیت بار پیش‌بینی شده در افق برنامه‌ریزی با تابع توزیع احتمالی مدل شده و با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف بر روی بار، بهینه‌سازی توسعه شبکه انتقال در حضور منابع تولید پراکنده و همچنین فناوری‌های معمول تولید انجام می‌شود. برای به دست آوردن توان عبوری خطوط در روند حل، از مفهوم ضریب توزیع توان عبوری خط انتقال^{۱۱} استفاده شده است. $PTDF_l$ ، برای

^۸ Mixed Integer Programming (MIP)

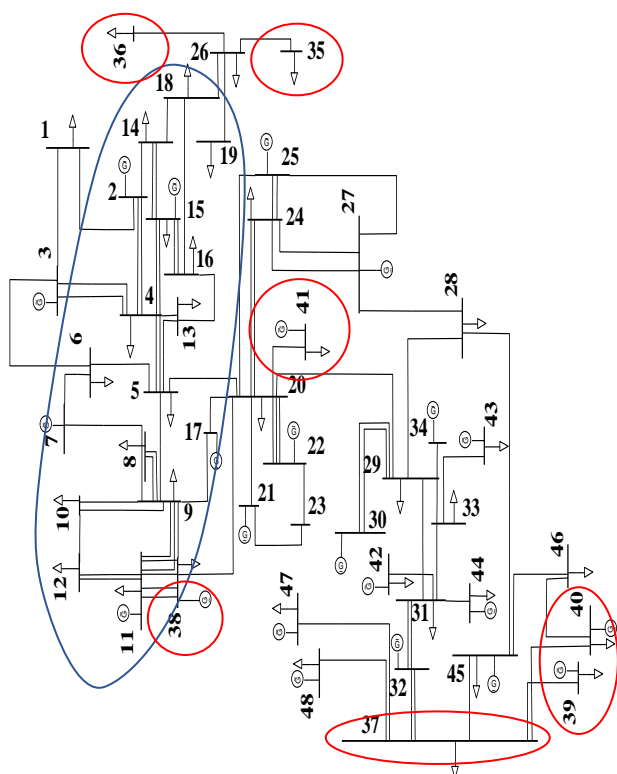
^۹ Linear Programming (LP)

^{۱۰} Mixed Integer Linear Programming (MILP)

^{۱۱} Power Transfer Distribution Factor (PTDF)

شبکه افزوده می‌شود) و شرایط آب و هوایی مناسب برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از دلایل انتخاب این شبکه است. همچنین به دلیل تعداد مش‌های کم‌تر نسبت به دیگر شبکه‌های واقعی، نیاز به توسعه خطوط انتقال در این شبکه محسوس‌تر است. شمای کلی شبکه مورد نظر در شکل (۲) نشان داده شده است.

شبکه مورد نظر دارای مصرف حدود ۳۳ گیگاوات، ۴۰ گره، ۱۶ نیروگاه، ۴۴ مسیر و ۶۳ خط انتقال در مسیرهای موجود است. در برنامه‌ریزی توسعه این شبکه، ۸ گره نیروگاهی کاندید (گره ۴۱ تا ۴۸) و ۲۱ مسیر کاندید (مسیر ۱ به ۳، ۲ به ۱۴، ۳ به ۶، ۸ به ۹، ۱۰ به ۱۲، ۱۳ به ۱۶، ۱۶ به ۱۸، ۱۹ به ۲۰، ۲۰ به ۲۵، ۲۵ به ۴۱، ۲۷ به ۲۷، ۲۷ به ۲۸، ۲۸ به ۴۵، ۳۱ به ۴۲، ۳۱ به ۴۴، ۳۳ به ۴۳، ۳۷ به ۴۵، ۳۷ به ۴۷، ۴۰ به ۴۶، ۴۵ به ۴۵) برای خطوط پیش‌بینی شده است.



شکل ۲: شبکه مورد مطالعه

در جدول (۱)، گره‌های نامزد برای نصب نیروگاه جدید در شبکه به همراه فناوری، ظرفیت نصب و هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری هریک آورده شده است.

در شکل (۲)، موقعیت گره‌های مستعد انرژی بادی و خورشیدی، با توجه به داده‌های جدول (۱)، به ترتیب با رنگ آبی و قرمز، مرزبندی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این شبکه دارای پتانسیل بالای باد و خورشید است. بعلاوه این که

ظرفیت بیشینه و کمینه برای هر فناوری تولید است. رابطه (۵) و (۶)، قیود محدودکننده توان عبوری برای مسیر l ام است که در آن، $PTDF_l$ ، بنا به تعریف بر مبنای تزریق توان اکتیو، بردار ضریب توزیع توان عبوری مسیر l ام، GCM ، ماتریس اتصال نیروگاه‌ها و \bar{P}_l ، توان عبوری از مسیر l ام است. رابطه (۷) و (۸) نیز به ترتیب، قیود محدودکننده بیشینه و کمینه بار است. قید کمینه بار، موجب می‌شود بار تأمین نشده از مقدار خاصی بیشتر نشود. i ، عضوی از مجموعه تمام نیروگاه‌ها اعم از نیروگاه‌های معمول بخار و گازی و منابع تولید پراکنده بادی، فوتوولتائیک و خورشیدی (مجموعه I)، l ، عضوی از مجموعه تمام خطوط و مسیرها اعم از خطوط موجود و مسیرهای پیشنهادی (مجموعه L)، s ، عضوی از مجموعه تمام سناریوها (مجموعه S) و n ، عضوی از مجموعه تمام گره‌ها (مجموعه N) است.

در مدل‌سازی، \bar{CF} و \underline{CF} ، برای فناوری‌های آبی، بخار و سیکل ترکیبی به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. برای فناوری‌های بادی، فوتوولتائیک و حرارتی خورشیدی، مقدار \bar{CF} ، به ترتیب، ۰/۴۵، ۰/۲۴ و ۰/۵۶ و مقدار \underline{CF} ، برای تمامی این فناوری‌ها، صفر فرض شده است [۸].

برای در نظر گرفتن عدم قطعیت بار در مدل برنامه‌ریزی احتمالی، بار هر گره، با استفاده از تابع توزیع نرمال با مقدار بیشینه ۱۴۰ درصد و میانگین ۴۰ درصد بار پیش‌بینی شده‌ی گره در سال برنامه‌ریزی مدل شده است [۱۴].

برای حل مسأله، از نرم‌افزار GAMS^{۱۲} و برنامه بهینه‌یابی SCIP^{۱۳} با حد فاصله دوگان^{۱۴} ۳ درصد، شامل ۱۹۸۸ معادله، ۲۵۸ متغیر گسسته و ۳۹۴ متغیر پیوسته استفاده شده است. شبیه‌سازی با کامپیوتری با پردازنده Core i3 و حافظه 6G Ram در ۶۶۹ ثانیه به انجام رسیده است.

۴. مطالعه موردی

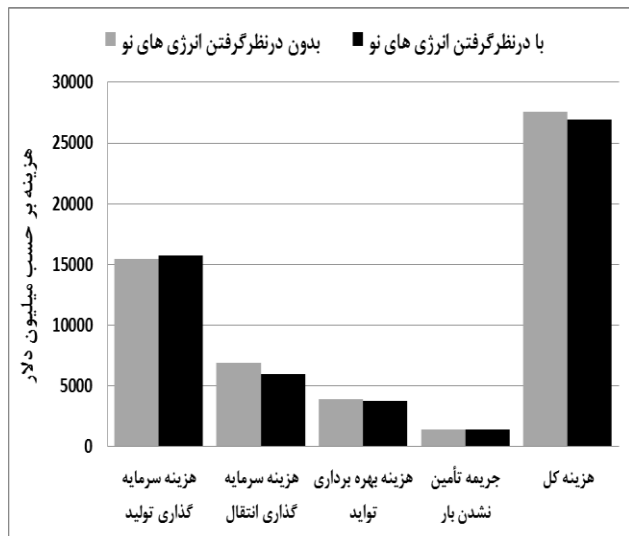
روش معرفی شده بر روی شبکه قدرت کشور نیجریه در دو حالت حضور و عدم حضور منابع تولید پراکنده اعمال شده است [۱۵]. نرخ رشد بار سالیانه بالای نزدیک به ۱۰٪ (به طوری که در پایان دوره ۱۵ ساله شبیه‌سازی ۱۸۰۸۱ مگاوات به مصرف

^{۱۲} General Algebraic Modeling System

^{۱۳} Solving Constraint Integer Programs

^{۱۴} Duality Gap

به طور متوسط، بار تأمین نشده در حالت (۱)، ۲۷۹/۳۴ مگاوات و در حالت (۲) به دلیل ضریب بار کمتر نیروگاه‌های تجدیدپذیر، این مقدار، ۲۸۸/۷۶ مگاوات است. در شکل (۳) هزینه‌های هر دو حالت شبیه‌سازی، به تفکیک، با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۳: مقایسه تفکیک شده هزینه‌های برنامه‌ریزی توسعه تولید و شبکه انتقال مورد مطالعه، در حضور و عدم حضور منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر

همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت (۲)، به علت نزدیکی منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر به مراکز بار و همچنین طبیعت متمرکز نبودن تولید در چند گره، به طور مشخص، هزینه سرمایه‌گذاری خطوط انتقال کاهش چشم‌گیری (نزدیک به ۹۰۰ میلیون دلار) داشته است. این کاهش به میزانی است که در مجموع باعث جبران هزینه سرمایه‌گذاری بالای مورد نیاز برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر شده است. در صورت تعیین مناسب مشوق از سوی بهره‌بردار شبکه می‌توان افزایش میزان نفوذ منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر را به نحوی مدیریت کرد که باعث کاهش پراشده‌گی خطوط انتقال و در نتیجه به تعویق افتادن هزینه‌های توسعه شبکه انتقال گردد. تعیین این مشوق‌ها به ویژه در فضای تجدید ساختار یافته صنعت برق و رقابت میان شرکت‌های تولید برق از اهمیت بالایی برخوردار است. در شکل (۴) ظرفیت اسمی اضافه شده به تفکیک فناوری در دو حالت حضور و عدم حضور فناوری‌های تجدیدپذیر آورده شده است.

فاصله مراکز بار از مراکز مستعد استفاده از انرژی باد و خورشید کم است. در نتیجه، توسعه منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، باعث پراشده‌گی خطوط انتقال نخواهند شد. مقادیر ضریب ظرفیت و مدل بار برابر مقداری که در بخش مدل‌سازی گفته شد، لحاظ شده است.

جدول ۱: مشخصات نیروگاه‌های نامزد برای نصب در شبکه

گره نامزد نصب	فناوری	هزینه سرمایه‌گذاری (γ_i) بر حسب میلیون دلار بر مگاوات	ظرفیت واحد بر حسب مگاوات	هزینه بهره‌برداری (β_i) بر حسب میلیون دلار بر مگاوات ساعت
۲-۳ ۱۵-۱۸	آبی	۳/۲۳۹	۸۰۰	۷/۱۳
۷-۱۱ ۱۷-۲۵ ۴۱-۴۲ ۴۳-۴۵	سیکل ترکیبی	۱/۳۱۴	۵۰۰	۳۸/۲۱
۲۱-۲۷ ۳۰-۳۲ ۱۹-۴۴ ۴۷-۴۸	بخار	۲/۲۶۵	۷۰۰	۱۷/۰۲
۵ تا ۱۹	بادی	۲/۸۱۹	۳۰	۲/۱۶
۳۵ تا ۴۱	حرارتی خورشیدی	۴/۹۳۱	۵۰	۴۵/۵۸
۳۵ تا ۴۱	فتوولتائیک	۵/۶۵۳	۲/۵	۱۹/۶۹

۵. نتایج شبیه‌سازی

در جدول (۲) نتایج برنامه‌ریزی توسعه تولید و شبکه انتقال کشور نیجریه در دو حالت حضور و عدم حضور فناوری‌های تجدیدپذیر برای افق ۱۵ ساله آورده شده است.

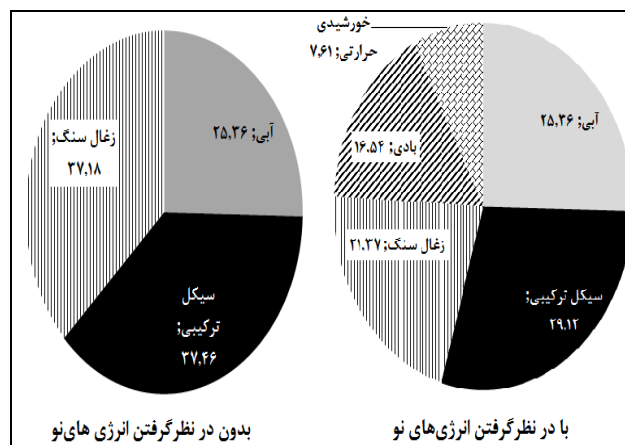
جدول ۲: هزینه‌های برنامه‌ریزی توسعه تولید و شبکه انتقال نیجریه، در حضور و عدم حضور منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر

هزینه بر حسب میلیون دلار	(۱) عدم حضور منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر	(۲) در حضور منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر
سرمایه‌گذاری تولید	۱۵۴۴۲/۵۹	۱۵۷۱۴/۶۲
نصب خط انتقال	۶۸۷۵/۶۲	۵۹۷۹/۳۹
بهره‌برداری	۳۸۷۶/۱۴	۳۷۶۷/۷۶
متوسط جریحه تأمین نشدن بار	۱۳۹۶/۷۴	۱۴۴۸/۸۰
هزینه کل	۲۷۹۵۰/۹۶	۲۶۹۱۰/۵۵

فوتوولتائیک، به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار بیشتر، در توسعه بهینه تولید، نقشی ندارد. در صورت استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، میزان کاهش هزینه‌های توسعه شبکه قدرت می‌تواند بسیار چشم‌گیری باشد که این میزان به بهینه‌سازی کاربردی توسعه منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و رقابتی‌تر شدن فناوری‌های تجدیدپذیر بستگی دارد. برای هرچه عملی‌تر کردن این صرفه‌جویی در سرمایه‌گذاری، ایجاد ساز و کار مشوق‌محور برای توسعه منابع تجدیدپذیر بسیار حیاتی است.

مراجع

- [1] H. Seifi and M.S. Sepasian, *Electric Power System Planning*, Springer, pp. 1-14, 2011.
- [2] L. Liu, H. Bao and H. Liu, "Siting and Sizing of Distributed Generation Based on The Minimum Transmission Losses Cost," *Proc. Int. Conf. on Power Engineering and Automation Conference (PEAM)*, Wuhan, pp. 22-25, 2011.
- [3] M.E. Hamedani Golshan and S.A. Arefifar, "Distributed Generation, Reactive Sources and Network-Configuration Planning for Power and Energy-Loss Reduction," *Proc. Int. Conf. on Gener. Transm. Distrib.* pp. 127-136, 2006.
- [4] J.M. Sexauer and S. Mohagheghi, "Voltage Quality Assessment in a Distribution System with Distributed Generation—A Probabilistic Load Flow Approach," *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 28, No. 3, pp. 1652-1662, July 2013.
- [5] V.F. Martins and C.L. T. Borges, "Active Distribution Network Integrated Planning Incorporating Distributed Generation and Load Response Uncertainties," *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 26, No. 4, pp. 2164-2172, November 2011.
- [6] G. Koepfel, "Distributed Generation - Literature Review and Outline of the Swiss Situation," 2003.
- [7] "Wind farms." [Online]. Available: <http://www.offshore-windenergie.net/en/wind-farms>.
- [8] J.H. Zhao, J. Foster, Z.Y. Dong, and K.P. Wong, "Flexible Transmission Network Planning Considering Distributed Generation Impacts," *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 26, No. 3, pp. 1434-1443, 2011.
- [9] J. Zhao and J. Foster, "Investigating the Impacts of Distributed Generation on Transmission Expansion Cost: An Australian Case Study," *Energy Economics and Management Group*, pp. 17-24, 2010.
- [10] F. Luo, J. Zhao and others, "Assessing the Transmission Expansion Cost with Distributed Generation: An Australian Case Study," *IEEE Trans. On Smart Grid*, Vol. 0, No. , pp. 1-13, 2014.
- [11] R. Hemmati, R. Hooshmand and A. Khodabakhshian, "Comprehensive review of generation and transmission expansion planning," *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 7, Iss. 9, pp. 955-964, April 2013.
- [12] N. Alguacil, A.L. Motto, and A.J. Conejo, "Transmission Expansion Planning: A Mixed-Integer LP Approach," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 18, No. 3, pp. 1070-1077, 2003.
- [13] A.J. Conejo, C. Cañizares and A.G. Exposito, *Electric Energy Systems, Analysis and Operation*, CRC Press, USA, 2009.
- [14] W. Li, *Probabilistic Transmission System Planning*, Wiley, pp. 11-46, 2011.
- [15] "Nigerian Power Sector Review Report," African Development fund ADF/BD/IF/2010/196, December 2009.



شکل ۴: ظرفیت اسمی اضافه شده به تفکیک فناوری در دو حالت حضور و عدم حضور انرژی‌های تجدیدپذیر

همان‌طور که مشاهده می‌شود با وجود سهم ۲۴/۱۵ درصدی انرژی‌های تجدیدپذیر، شاهد کاهش هزینه کل به میزان ۶۸۰ میلیون دلار هستیم. بخش عمده این کاهش، به علت کاهش هزینه توسعه شبکه انتقال است. به دلیل مزیت اقتصادی و زیست‌محیطی واحدهای آبی شاهد سهم ثابت در دو حالت شبیه‌سازی هستیم. علی‌رغم اینکه واحدهای حرارتی خورشیدی، در برنامه‌ریزی توسعه تولید سهم هستند، واحدهای فوتوولتائیک، به دلیل رقابتی نشدن هزینه سرمایه‌گذاری، سهمی در توسعه تولید ندارند.

۶. نتیجه‌گیری

با رشد گسترده منابع تولید پراکنده و انگیزه‌های فراوانی که برای استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی وجود دارد، در آینده نزدیک، شبکه قدرت دارای منابع متعدد تولید پراکنده خواهد بود. در این مقاله، روشی احتمالی، مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، برای توسعه تولید و شبکه انتقال از دیدگاه مالک شبکه انتقال، در حضور و عدم حضور منابع تولید پراکنده معرفی شد. بر پایه روش پیشنهادی، به صورت کمی، هزینه‌های به تعویق افتاده در سرمایه‌گذاری توسعه تولید و شبکه انتقال، در حضور منابع تولید پراکنده محاسبه شد. نتایج به دست آمده برای شبکه مورد مطالعه، حاکی از کاهش محسوس هزینه سرمایه‌گذاری در توسعه شبکه انتقال، حتی با وجود بیشتر بودن هزینه سرمایه‌گذاری منابع تجدیدپذیر است. البته فناوری