

استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر به منظور تامین انرژی امن در مراکز حساس

رضا غفارپور^۱، علیرضا جم^۲

تاریخ دریافت مقاله:

۹۴/۹/۶

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۵/۲/۲۸

چکیده:

بخش های مختلف شبکه قدرت تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله حوادث طبیعی و یا خطاهای پیش بینی نشده قرار دارند. در نظر گرفتن این موضوع به منظور تقویت شبکه های موجود و یا طراحی شبکه های الکتریکی جهت تامین توان این مراکز دارای اهمیت است به طوری که آمادگی سیستم برای بازیابی در کوتاه ترین زمان ممکن و با کمترین خسارت افزایش می یابد. هدف این مطالعه، افزایش امنیت تامین انرژی الکتریکی در مراکز حساس با استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر است به طوری که قیود فنی شبکه در کنار عدم قطعیت منابع انرژی و اولویت قطع بارهای حساس برآورده شوند. با توجه به حضور منابع تولید پراکنده و عدم قطعیت تولید توان آنها، روش های متداول بررسی امنیت تامین انرژی به طور مستقیم قابل اعمال نیستند. مدل سازی نهایی بر اساس الگوریتم رقابت استعماری، کاهش سناریو و پخش بار بهینه انجام شده است و برای ارزیابی کیفیت تامین انرژی مصرف کنندگان از مجموعه ای از مسئله های پخش بار بهینه استفاده شده است. مدل ارائه شده در محیط نرم افزارهای MATLAB و GAMS حل شده است و ترکیب بهینه منابع انرژی تجدید پذیر جهت افزایش قابلیت اطمینان به دست آمده است. نتایج نهایی نشان دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی در طراحی مناسب منابع انرژی ترکیبی و افزایش قابل توجه امنیت تامین انرژی الکتریکی است.

کلمات کلیدی:

قابلیت اطمینان، پخش بار بهینه، انرژی های تجدید پذیر، انرژی تامین نشده مورد انتظار، الگوریتم رقابت استعماری

مقدمه

آسیب‌پذیری المان‌های بخش‌های تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی موضوعی است که در ارتباط با قابلیت اطمینان سیستم قدرت اهمیت ویژه می‌یابد و تدوین چارچوب فنی جهت حضور بهینه منابع انرژی به منظور تامین انرژی الکتریکی ضروری به نظر می‌رسد. تخصیص بهینه منابع انرژی با هدف تعیین نوع، ظرفیت و محل نصب مناسب این منابع و با در نظر گرفتن ویژگی‌های ذاتی منابع و مصرف‌کنندگان و به‌منظور تأمین اهداف مشخص انجام می‌شود. واحدهای تولید پراکنده (DG) به واحدهای تولید توان کوچکی گفته می‌شود که معمولاً در نزدیکی مرکز بار قرار می‌گیرد. امکان بهره‌گیری از واحدهای تولید توان الکتریکی بویژه واحدهای مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر به‌صورت تولید پراکنده باعث می‌شود تا بتوان در مواقع بروز بحران در مناطق حساس، از این منابع جهت برقرسانی به‌صورت متصل و جدا از شبکه استفاده نمود [۲۲، ۱۸].

روش‌های مختلفی جهت تخصیص بهینه واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های الکتریکی و با اهداف مختلف از قبیل بهبود قابلیت اطمینان سیستم، بهبود پروفایل ولتاژ، کاهش تلفات شبکه و غیره صورت گرفته است. در مراجع [۲۳، ۱۵، ۱۲]، هدف از مکان‌یابی DG، کمینه نمودن تلفات شبکه در بازه زمانی مورد مطالعه است. مرجع [۲۳] عدم قطعیت بار، ضریب نفوذهای مختلف DG و امکان تأمین توان راکتیو توسط DG را برای مدل‌سازی در نظر گرفته و از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای حل مسأله کاهش تلفات شبکه استفاده نموده است. مرجع [۷] روشی جهت به حداقل رساندن تلفات انرژی سالیانه سیستم توزیع، با مکان‌یابی مناسب توربین‌های بادی ارائه داده و مسأله در محیط نرم‌افزار GAMS شبیه‌سازی شده است. مرجع [۲۴] هدف از مکان‌یابی DG را بهبود قابلیت اطمینان و کاهش تلفات در نظر گرفته و برای حل این مسأله از ادغام روش‌های تجمع ذرات گسسته و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

ارزیابی کفایت سیستم‌های توزیع شامل واحدهای تولید پراکنده بادی و طی مدهای مختلف عملکردی، در مرجع [۵] بررسی شده است. در این مقاله از دو روش شبیه‌سازی مونت کارلو و تکنیک تحلیلی با در نظر گرفتن حالت جزیره‌ای جهت ارزیابی قابلیت اطمینان استفاده شده است. مرجع [۲] یک تابع چندهدفه را برای تخصیص بهینه DG در محل مناسب در نظر گرفته و برای حل مسأله از یک روش ترکیبی تجمع ذرات بهبودیافته و شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. شاخص انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار (EENS) پس از تقسیم شبکه مورد بررسی به هشت ناحیه مختلف محاسبه شده است. مرجع [۲۱] به نصب DG با هدف حداکثر نمودن سود این واحدها پرداخته است. در این مقاله، عملکرد جزیره‌ای برای بهبود قابلیت اطمینان، زمانی مجاز شمرده شده است که توان تولیدی DG بیشتر از درصد مشخصی از بار باشد.

احداث DG در مجاورت مراکز حساس می‌تواند این مراکز را از خطر خاموشی در مواقع بحرانی نجات دهد. امکان تشکیل جزیره برنامه‌ریزی شده می‌تواند سطح قابلیت اطمینان مشترکان را بهبود دهد و از خاموشی این مراکز جلوگیری

کند. بدین منظور، مرجع [۱] الگوریتمی جهت بهره‌برداری از این منابع در شرایط بحرانی ارائه داده است. مراجع [۸،۲] عملکرد DG را به صورت متصل به شبکه و مراجع [۳] و [۱۷] به ترتیب به صورت پشتیبان آماده بکار و دارای عملکرد مستقل از شبکه در نظر گرفته‌اند. در اکثر مطالعات انجام‌شده، به منظور ارزیابی تأثیر DG بر شبکه از روش‌های تحلیلی استفاده شده‌است و DG تنها زمانی می‌تواند به صورت جزیره‌ای عمل کند که توان آن بزرگتر از درصدی از توان بار باشد [۲۲،۸]. مراجع [۵،۲] برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده نموده‌اند. در این روش‌ها برای محاسبه قابلیت اطمینان شبکه، قیود فنی مربوط به ولتاژ و توان عبوری خطوط در نظر گرفته نمی‌شود.

بررسی مطالب انجام‌شده نشان می‌دهد که در اکثر آنها جهت ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه در حضور منابع تولید پراکنده، قیود فنی شبکه لحاظ نشده‌است درحالی که وقوع یک پیشامد در شبکه و وقوع اضافه بار یا خارج شدن ولتاژ از محدوده مجاز نیز می‌تواند منجر به قطعی شود. هدف این مطالعه، تخصیص منابع انرژی ترکیبی مناسب به منظور بررسی تأثیر آن بر روی امنیت تأمین انرژی الکتریکی و کاهش آسیب‌پذیری ناشی از قطع برق در شبکه توزیع در کنار اولویت بارهای حساس است. به دلیل وجود بارهای حساس و حساسیت آنها به پارامترهای فنی شبکه، جهت انجام دقیق‌تر محاسبات از مجموعه‌ای از مسأله‌های پخش بار بهینه اصلاح‌شده جهت ارزیابی کفایت تأمین انرژی مصرف‌کنندگان استفاده خواهد شد.

مدل ترکیبی سرعت باد-تابش خورشید

هدف این بخش آن است که از روی اطلاعات ۳ ساله مربوط به سایت مورد بررسی که به صورت ۱۵ دقیقه‌ای نمونه‌گیری شده‌است [۱۳]، مشخصه سالانه برای سرعت باد و تابش خورشید ارائه شود.

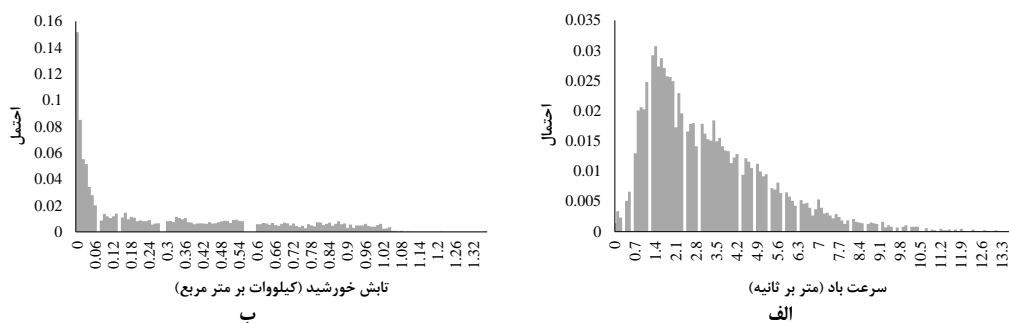
مدل‌سازی عدم قطعیت سرعت باد

برای استفاده از توان خروجی توربین بادی در مسأله برنامه‌ریزی شبکه قدرت، نیاز است تا عدم قطعیت سرعت باد به صورت یک مدل چندحالتی وارد مسأله شوند. بدین منظور، داده‌های بدست‌آمده برای سرعت باد به دسته‌های مختلف (حالت) تقسیم‌بندی می‌شود و هر حالت نشاندهنده بازه مشخصی از سرعت باد است. شکل (۱-الف) نشاندهنده تابع احتمال سرعت باد در منطقه مورد بررسی است که به بازه‌هایی با گام $0/1$ متر بر ثانیه تقسیم شده است.

مدل‌سازی عدم قطعیت تابش خورشید

مشابه مدل‌سازی عدم قطعیت سرعت باد، از روی اطلاعات نمونه‌گیری شده ۳ ساله، مشخصه تابش خورشید به صورت یک مدل احتمالاتی چندحالتی به دست می‌آید تا بتوان توان خروجی ماژول فتوولتائیک را وارد مسأله برنامه‌ریزی

نمود. شکل (۱-ب) نشاندهنده تابع احتمال تابش خورشید در منطقه مورد بررسی است که به بازه‌هایی با گام ۰/۰۱ کیلووات بر متر مربع تقسیم شده است.



شکل (۱) تابع چگالی احتمال الف-سرعت باد، ب- تابش خورشید

کاهش سناریو

برای حل مسائلی که دارای عدم قطعیت هستند، از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده می‌شود. در برنامه‌ریزی تصادفی، متغیر تصادفی توسط تعداد محدودی از سناریوها تعریف می‌شود. برای بیان یک فرایند تصادفی با دقت مناسب، نیاز است تعداد کافی از سناریوها تولید شود به طوری که این سناریوها رفتار واقعی فرایند را با دقت مناسب بیان کند [۱۰].

مدل نهایی سرعت باد-تابش خورشید

برای تشکیل مدل ترکیبی سرعت باد-تابش خورشید، نیاز به درخت سناریو است. تعداد سناریوهای بدست‌آمده برابر $\prod N_w \cdot N_s$ است که N_w تعداد حالت‌های سرعت باد و N_s تعداد حالت‌های تابش خورشید را مشخص می‌کند. تعداد سناریوهای تشکیل شده با توجه به گام‌های انتخاب شده برابر ۷۹۵۴ است. با در نظر گرفتن همزمان دقت و زمان محاسبات، درصد کاهش سناریو ۱۰ درصد برای حل مسأله انتخاب شده است. در نتیجه، تعداد سناریوهای کاهش‌یافته برابر ۴۸ عدد است.

محاسبه توان سیستم‌های تامین انرژی

توان تولیدی توربین بادی

رابطه بین توان خروجی توربین بادی و سرعت باد در یک منطقه مشخص با استفاده از پارامترهای فنی توربین تعیین می‌گردد. توان خروجی توربین بر حسب درصدی از توان نامی آن با استفاده از رابطه زیر مشخص می‌شود [۹]:

$$D(v)=\begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq V_{ci} \\ (A+B \times v+C \times v^2) & V_{ci} \leq v \leq V_r \\ 1 & V_r \leq v \leq V_{co} \\ 0 & V_{co} \leq v \end{cases} \quad (1)$$

به دلیل تأثیر توان تزریقی واحدهای تولید پراکنده بر تأمین بار شبکه، انتخاب نوع مناسب توربین بادی با توجه به شرایط منطقه نصب آن ضروری است. در این مطالعه از ۳ توربین بادی مختلف با ظرفیت‌ها و پارامترهای متفاوت طبق جدول ۱ استفاده شده است [۱۴].

جدول ۱) پارامترهای فنی توربین‌های بادی

WT3	WT2	WT1	
۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	(KW) P_r
۳/۳۳۳	۳/۳۳۳	۲/۷۸۸	(m/s) V_{ci}
۸/۳۳۳	۱۱/۱۱	۱۲/۵	(m/s) V_r
۱۵/۲۸	۲۲/۲۲	۱۹/۴۴	(m/s) V_{co}

توان تولیدی ماژول فتوولتائیک

کاتالوگ کارخانه‌های سازنده، مشخصه و اطلاعات ماژول‌های فتوولتائیک را در شرایط استاندارد مشخص می‌کند. توان خروجی یک ماژول فتوولتائیک شامل n_m سلول، در شرایط دما و تابش مشخص از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۶]:

$$P_M^s = n_m \times FF \times V_{OC}^s \times I_{SC}^s \quad (2)$$

$$T^s = T^A + G^s \times (N_{OT} - 20) / 0.8 \quad (3)$$

$$FF = V_{MPP} \times I_{MPP} / V_{OC} \times I_{SC} \quad (4)$$

در این بخش نیز به منظور انتخاب نوع مناسب ماژول‌های فتوولتائیک از ۳ نوع ماژول فتوولتائیک با توان نامی و پارامترهای متفاوت طبق جدول (۲) استفاده شده است [۶].

جدول ۲) پارامترهای فنی ماژول‌های فتوولتائیک

PV3	PV2	PV1	
۷۵	۶۰	۵۰	(W) P_r
۲۱/۹۸	۲۱/۱	۵۵/۵	(V) V_{OC}
۵/۳۲	۳/۸	۱/۸	(A) I_{SC}
۱۷/۳۲	۱۷/۱	۳۸	(V) V_{MPP}
۴/۷۶	۳/۵	۱/۳۲	(A) I_{MPP}
۱۴/۴	۷۵	۱۹۴	(mV/°C) K_v
۱/۲۲	۳/۱	۱/۴	(mA/°C) K_i
۴۳	۴۳	۴۳	(°C) N_{OT}

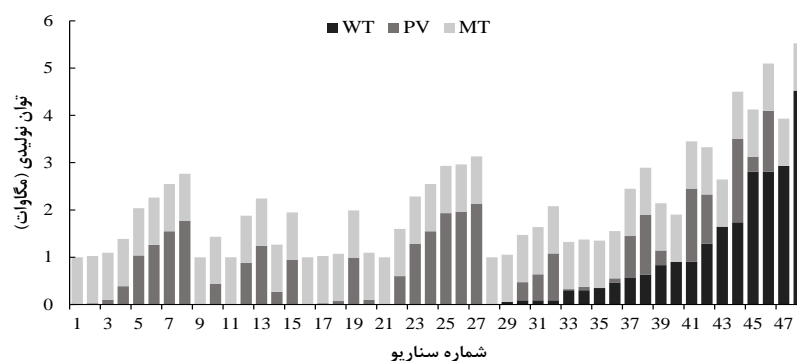
میکروتوربین

در این مطالعه در کنار واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر، از میکروتوربین‌ها به صورت توان ثابت طبق جدول (۳) استفاده می‌شود.

جدول (۳) توان نامی میکروتوربین‌ها

MT3	MT2	MT1	P_m (KW)
۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	

شکل (۲) توان تولیدی منابع انرژی مختلف را طی سناریوهای مختلف و به صورت تفکیک‌شده نشان می‌دهد.



شکل (۲) توان تولیدی منابع انرژی به صورت تفکیک‌شده

مدل پیشنهادی و الگوریتم حل مسأله

تولیدات پراکنده می‌توانند با قرارگیری در محل مناسب، قابلیت اطمینان شبکه را بهبود بخشند در حالی که تخصیص نامناسب این واحدها اثرات منفی بر روی ولتاژ، توان عبوری فیبرهای توزیع و جهت شارش توان خواهد داشت. علاوه بر این، عدم قطعیت موجود در سرعت باد و تابش خورشید نیز می‌تواند باعث عدم تعادل توان بین تولید و تقاضا در شرایط مختلف شود. در این بخش، روشی مبتنی بر معادلات پخش بار بهینه برای اختصاص ترکیب بهینه توربین‌های بادی، ماژول‌های فتوولتائیک و میکروتوربین‌ها در شبکه قدرت به منظور تامین انرژی امن مراکز حساس ارائه شده است.

تابع هدف

نصب DG در شبکه توزیع از طریق تأمین بار یک ناحیه جزیره‌شده تا زمان بازیابی شبکه می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. تابع هدف مسأله بهینه‌سازی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$EENS = \sum_{lc \in L} \rho_{lc} \cdot I \left[\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \rho_s \cdot C_{s,j}(lc) \right] \cdot 8760 \quad (5)$$

قیدهای مسأله

معادلات پخش بار

$$P_{G_{s,i}} + \sum_{w \in W} P_{WTG_{s,w}}^s + \sum_{p \in P} P_{PV_{s,p}}^s + \sum_{m \in M} P_{MT_{s,m}} - P_{D_i} = \sum_{i \in I} V_{s,i} V_{s,j} Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_{s,j} - \delta_{s,i}), \quad \forall i, s \quad (6)$$

$$Q_{G_{s,i}} - Q_{D_i} = -\sum_{j \in I} V_{s,i} V_{s,j} Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_{s,j} - \delta_{s,i}), \quad \forall i, s \quad (7)$$

زیر مسأله محاسبه بار قطع شده در هر پیشامد

مدل ارائه شده برای محاسبه EENS، بار قطع شده سیستم را در شرایطی حداقل می کند که قیود معادلات پخش بار، توان عبوری خطوط، ولتاژ باس ها و محدودیت های توان تولیدی ژنراتورها برقرار شوند. در این معادلات، $G(V, \delta)$ مجموعه قیود مساوی شامل پخش بار و $H(V, \delta)$ مجموعه قیود نامساوی شامل محدودیت بار قطع شده، محدودیت توان عبوری خطوط و محدودیت ولتاژ باس هاست و به صورت یک مجموعه مسأله برنامه ریزی غیرخطی بیان می شود.

$$C = \text{Minimize} \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \rho_s (LP_i.C_{s,i} + E_{s,i}) \quad (8)$$

s.t.

$$G(V, \delta) = 0$$

$$H(V, \delta) \leq 0$$

$$V_{s,slack} = V_0, \quad \delta_{s,slack} = 0, \quad \forall s \quad (9)$$

$$V_{min} \leq V_{s,i} \leq V_{max}, \quad \forall s, i \notin slack \quad (10)$$

$$0 \leq S_{ij}^s \leq S_{ijmax}, \quad \forall s, i, j \quad (11)$$

$$\sum_{w \in W} N_{i,w}.P_w + \sum_{p \in P} N_{i,p}.n_M.P_{r_p} + \sum_{m \in M} N_{i,m}.P_{r_m} \leq P_{max_i}, \quad \forall i \in G \quad (12)$$

$$\sum_{i \in C} [\sum_{w \in W} CF_w.P_{WTG_{s,w}} + \sum_{p \in P} CF_p.P_{PV_{s,p}} + \sum_{m \in M} CF_m.P_{MT_{s,m}}] \leq x_i \sum_{i \in I} P_{D_i} \quad (13)$$

$$P_{WTG_{s,w}}^s = N_{i,w}.P_{r_w}.D^s, \quad \forall s, i, w$$

$$P_{PV_{s,p}}^s = N_{i,p}.P_{M_p}^s, \quad \forall s, i, p \quad (14)$$

$$P_{MT_{s,m}} = N_{i,m}.P_{r_m}, \quad \forall i, m$$

الگوریتم پیشنهادی

محاسبات اصلی در الگوریتم پیشنهادی توسط الگوریتم رقابت استعماری (ICA) [۴] و در محیط MATLAB انجام می‌شود. به منظور محاسبه شاخص قابلیت اطمینان، نرم افزار GAMS [۲۰] فراخوانی می‌شود و طی این فراخوانی، یک مجموعه مسأله NLP جداگانه حل می‌شود.

شبیه‌سازی و بررسی نتایج

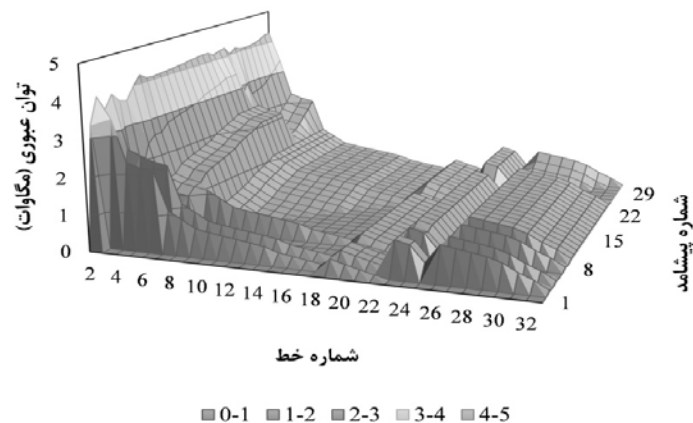
سیستم تحت مطالعه یک سیستم توزیع شعاعی ۳۳ باسه و استاندارد IEEE است [۱۹]. مراکز حساس دارای کمترین اولویت قطع (اولویت ۳) فرض شده‌اند و جدول (۴) اولویت قطع بارهای موجود در شبکه را نشان می‌دهد. سطح ولتاژ پست اصلی برابر ۱۲/۶۶ کیلوولت و توان نامی آن ۱۰۰ مگاوات‌آمپر است. در این مسأله، مجموعه $C = \{10, 14, 24, 29, 32\}$ به عنوان مجموعه باس‌های کاندیدا برای نصب DG انتخاب شده‌اند [۱۱].

جدول ۴) اولویت قطع بارهای شبکه

اولویت	شماره باس
۱	۳، ۴، ۹، ۱۱، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۱، ۲۳، ۲۶، ۲۷
۲	۲، ۵، ۷، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۵، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۲، ۳۳
۳	۶، ۱۰، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۳۱

حالت پایه (پیش از نصب منابع انرژی)

به منظور بررسی اولیه شبکه و مقایسه میزان بهبود ایجادشده پس از نصب منابع انرژی ترکیبی، نیاز است تا شبکه در حالت پایه مورد ارزیابی قرار گیرد. مجموع بار اکتیو و راکتیو این شبکه به ترتیب ۳/۷۲ مگاوات و ۲/۳ مگاوار، توان تلف‌شده در این شبکه ۰/۱۸۸۴ مگاوات و انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار ۵۴/۹۶۹ مگاوات‌ساعت است. برای بررسی دقیق تاثیر منابع تولید پراکنده بر EENS، نیاز است محدودیت‌های فیدرها طی محاسبات شبکه در نظر گرفته شود. شکل (۳) توان مورد انتظار عبوری از خطوط شبکه را طی هر پیشامد مشخص می‌کند. نصب DG در شبکه لزوماً موجب کاهش بارگذاری خطوط در تمام پیشامدها نمی‌شود بلکه با تغییر جهت عبور توان می‌تواند منجر به افزایش بارگذاری در خطوط نزدیک خود شود، هرچند وجود قیود خطوط طی محاسبات EENS مانع از عبور این توان از حد مجاز می‌شود.



شکل ۳) توان عبوری خطوط طی هر پیشامد (حالت پایه)

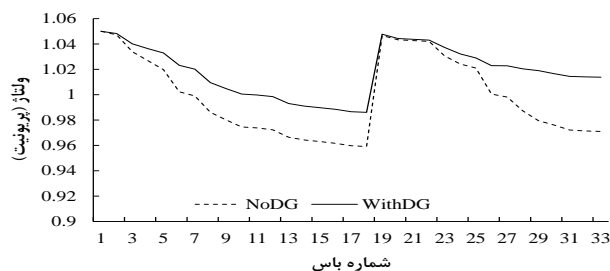
تخصیص بهینه منابع انرژی ترکیبی

پارامترهای فنی منابع انرژی در کنار ساختار شبکه، از مولفه‌های تأثیرگذار در طراحی و انتخاب ترکیب مناسب این منابع است. طبق جدول (۵)، تخصیص بهینه منابع انرژی ترکیبی نشان‌دهنده بهبود قابل توجه قابلیت اطمینان شبکه است.

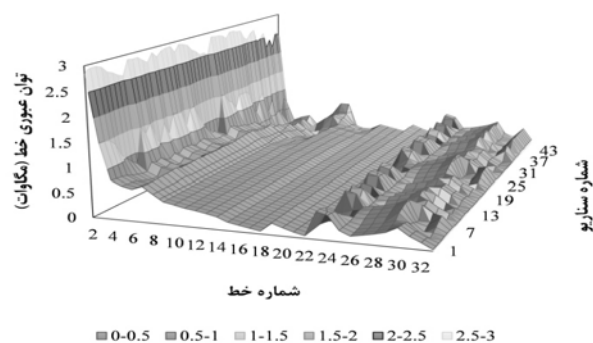
جدول ۵) ترکیب بهینه منابع انرژی

EENS (مگاوات ساعت)	محل نصب	توان (مگاوات)	نوع	منبع انرژی	
۵۴/۹۶۹	-	-	-		حالت پایه
۲۷/۵۸۰	۱۴	۱/۵	WT1	توربین بادی	ترکیب بهینه منابع انرژی
	۱۰	۲	WT3		
	۳۲	۲	WT3		
	۳۲	۰/۹۸	PV1	ماژول فتوولتائیک	
	۲۹	۰/۰۱۲	PV2		
	۲۴	۱/۳۵	PV3		
۲۹	۱	MT1	میکروتوربین		

شکل (۴) پروفیل ولتاژ مورد انتظار شبکه را با در نظر گرفتن طراحی بهینه منابع انرژی در مقایسه با حالت پایه نشان می‌دهد. حداقل ولتاژ شبکه قبل از نصب DGها برابر $0/۹۵۹$ p.u بوده است که در باس ۱۸ رخ داده است. با نصب DG، حداقل ولتاژ به $0/۹۸۶$ p.u افزایش پیدا کرده است که مربوط به باس ۱۸ است. کاهش بارگذاری خطوط از طریق افزایش طول عمر تجهیزات نیز می‌تواند منجر به افزایش قابلیت اطمینان تامین انرژی شود. شکل (۵) توان عبوری خطوط شبکه در حضور ترکیب بهینه منابع انرژی و برای سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد.

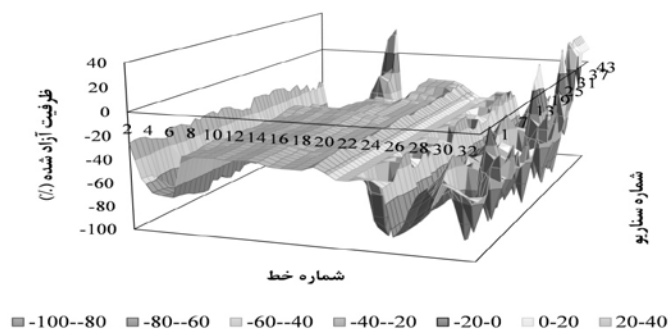


شکل ۴) پروفیل ولتاژ مورد انتظار شبکه (ترکیب بهینه منابع انرژی)



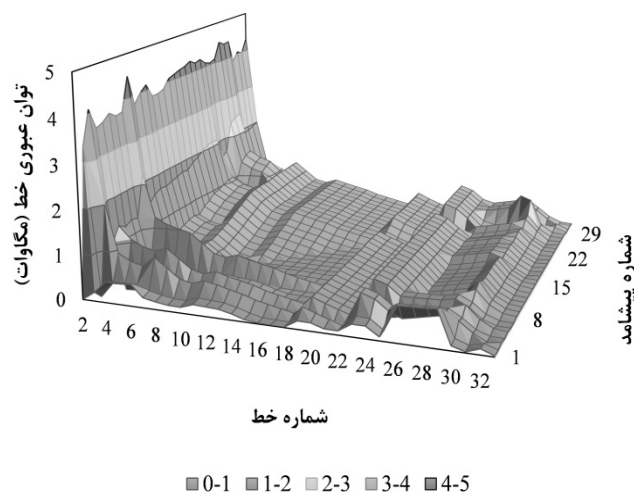
شکل ۵) توان عبوری خطوط طی هر سناریو (ترکیب بهینه منابع انرژی)

شکل (۶) ظرفیت آزاد شده خطوط برای سناریوهای مختلف را نشان می دهد و همانطور که مشخص است، بیشترین آزادسازی ظرفیت مربوط به خط ۲۴ و به میزان ۹۹/۴ درصد است که طی سناریو ۲۳ رخ داده است. به همین ترتیب، بیشترین افزایش توان عبوری در خط ۳۲ و به میزان ۲۵/۷ درصد است که برای سناریو ۴۷ رخ داده است. بیشترین میزان تغییرات در توان عبوری خطوط مربوط به خطوط اطراف محل نصب DG است.



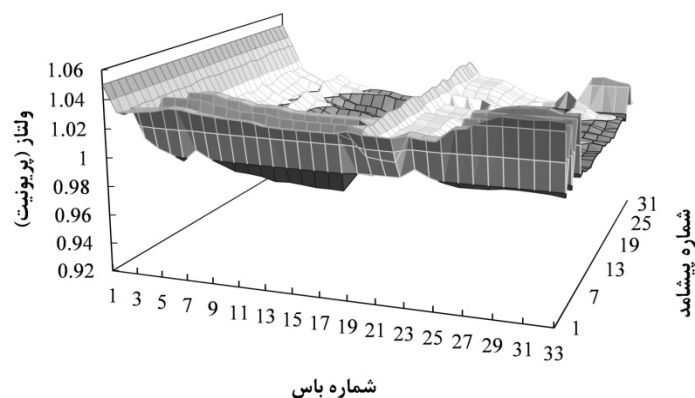
شکل ۶) ظرفیت آزاد شده خطوط (ترکیب بهینه منابع انرژی)

شکل (۷) توان عبوری مورد انتظار خطوط شبکه طی هر پیشامد را مشخص می‌کند. فرمول‌بندی دقیق و در نظر گرفتن قیود فنی در تمامی مراحل محاسبات موجب شده‌است تا در هیچ یک از پیشامدها، توان عبوری از حد مجاز خارج نشود.



شکل (۷) توان عبوری خطوط طی هر پیشامد (ترکیب بهینه منابع انرژی)

شکل (۸) نمودار مشابهی را برای پروفیل ولتاژ مورد انتظار شبکه طی هر پیشامد نشان می‌دهد. طبق این شکل، ولتاژ باس‌ها در تمامی پیشامدها در محدوده مجاز قرار گرفته است. این شکل بیانگر دقت محاسبات مسأله است به طوری که در این مسأله، قطع بار نه تنها به دلیل جدا ماندن یک باس پس از خرابی چند خط، بلکه به دلیل اضافه بار خطوط یا خارج شدن ولتاژ از محدوده پس از یک پیشامد خرابی ارزیابی شده است.



شکل (۸) پروفیل ولتاژ شبکه طی هر پیشامد (ترکیب بهینه منابع انرژی)

نتیجه گیری

در این مطالعه، ترکیب بهینه منابع انرژی جهت افزایش قابلیت اطمینان شبکه و کاهش میزان خاموشی بارهای حساس به دست آمده است. با توجه به حضور منابع تولید پراکنده در این مسأله، روش‌های متداول محاسبه قابلیت اطمینان به طور مستقیم قابل اعمال نیستند. روش استفاده شده در این مقاله مبتنی بر پخش بار بهینه AC است. در نهایت، یک فرمول‌بندی احتمالاتی به منظور تخصیص ترکیب بهینه DGها در شبکه ارائه شده است. کاهش بارگذاری خطوط در کنار تخصیص بهینه منابع تولید توان، از طریق تعددسازی، متنوع‌سازی و پراکنده‌سازی تامین توان منجر به افزایش امنیت تامین انرژی شده است. انتخاب منابع انرژی مناسب باید با در نظر گرفتن شرایط فنی شبکه در کنار عدم قطعیت این منابع و شرایط محیطی صورت گیرد و ضریب ظرفیت نمی‌تواند به تنهایی ملاکی برای انتخاب این منابع باشد. محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان با استفاده از پخش بار بهینه، تمامی قیود فنی سیستم را مد نظر قرار می‌دهد درحالی که روش‌های متداول فاقد این مزیت هستند.

منابع

- [1] H. Aalami, H. Ramezani, (2012) Presentation of a New Algorithm for the Operation of DG Resources in Electrical Interconnection Grids over the Critical Conditions, Passive Defence Sci. & Tech. (In Persian).
- [2] S. Abdi, K. Afshar, (2013) Application of IPSO-Monte Carlo for optimal distributed generation allocation and sizing, International Journal of Electrical Power & Energy Systems 44 786.
- [3] R. Arya, S. Choube, L. Arya, (2012) Reliability evaluation and enhancement of distribution systems in the presence of distributed generation based on standby mode, International Journal of Electrical Power & Energy Systems 43 607.
- [4] E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, (2007), Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2007. . IEEE, p. 4661.
- [5] Y. Atwa, E. El-Saadany, A.-C. Guise, (2010) Supply adequacy assessment of distribution system including wind-based DG during different modes of operation, IEEE Transactions on Power Systems 25 78.
- [6] Y. Atwa, E. El-Saadany, M. Salama, R. Seethapathy, (2009), Distribution system loss minimization using optimal DG mix, IEEE Power & Energy Society General Meeting, PES'09. . IEEE, p. 1.
- [7] Y.M. Atwa, E.F. El-Saadany, (2011) Probabilistic approach for optimal allocation of wind-based distributed generation in distribution systems, IET Renewable Power Generation 5 79.
- [8] B. Banerjee, S.M. Islam, (2011) Reliability based optimum location of distributed generation, International Journal of Electrical Power & Energy Systems 33 1470.

- [9] R. Billinton, A. Chowdhury, (1992), Incorporation of wind energy conversion systems in conventional generating capacity adequacy assessment, IEE Proceedings Conference (Generation, Transmission and Distribution). IET, p. 47.
- [10] A.J. Conejo, M. Carri on, J.M. Morales, (2010), Decision making under uncertainty in electricity markets, Springer.
- [11] M.H. Golshan, S. Arefifar, (2006) Distributed generation, reactive sources and network-configuration planning for power and energy-loss reduction, IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution 153 127.
- [12] S. Gopiya Naik, D. Khatod, M. Sharma, (2013) Optimal allocation of combined DG and capacitor for real power loss minimization in distribution networks, International Journal of Electrical Power & Energy Systems 53 967.
- [13] U.S.D.o.t. Interior, (2012), U.S. Department of the Interior. U.S. Department of the Interior, Washington DC, p. U.S. Department of the Interior.
- [14] X. Kaigui, R. Billinton, (2011) Determination of the Optimum Capacity and Type of Wind Turbine Generators in a Power System Considering Reliability and Cost, IEEE Transactions on Energy Conversion 26 227.
- [15] P. Karimyan, G. Gharehpetian, M. Abedi, A. Gavili, (2014) Long term scheduling for optimal allocation and sizing of DG unit considering load variations and DG type, International Journal of Electrical Power & Energy Systems 54 277.
- [16] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis, K. Kalaitzakis, (2006) Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms, Solar energy 80 1072.
- [17] X. Liu, S. Islam, (2006), Reliability evaluation of a wind-diesel hybrid power system with battery bank using discrete wind speed frame analysis, International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2006. . IEEE, p. 1.
- [18] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, W. D'haeseleer, (2005) Distributed generation: definition, benefits and issues, Energy policy 33 787.
- [19] M. Raoofat, (2011) Simultaneous allocation of DGs and remote controllable switches in distribution networks considering multilevel load model, International Journal of Electrical Power & Energy Systems 33 1429.
- [20] R.E. Rosenthal, (2013) GAMS--a user's guide.
- [21] M.F. Shaaban, Y.M. Atwa, E.F. El-Saadany, (2012) DG allocation for benefit maximization in distribution networks.
- [22] M.F. Shaaban, Y.M. Atwa, E.F. El-Saadany, (2011), A multi-objective approach for optimal DG allocation, 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), p. 1.
- [23] F. Ugranlı, E. Karatepe, (2013) Multiple-distributed generation planning under load uncertainty and different penetration levels, International Journal of Electrical Power & Energy Systems 46 132.
- [24] I. Ziari, G. Ledwich, A. Ghosh, D. Cornforth, M. Wishart, (2010), Optimal allocation and sizing of DGs in distribution networks, Power and Energy Society General Meeting. IEEE, p. 1.

ضمیمه

توان نامی توربین بادی w	P_{tw}	بار قطع شده طی سناریو s در باس i (MW)	$C_{s,i}$
توان راکتیو مصرفی بار i (MVar)	Q_{D_i}	ضریب ظرفیت واحدهای تولیدی	CF
توان عبوری از خط $i - j$ (MVA)	S_{ij}	توان تولیدی مازاد منابع انرژی طی سناریو s در باس i (MW)	$E_{s,i}$
دمای محیطی سلول فتوولتائیک ($^{\circ}C$)	T^A	ضریب تامین ماژول فتوولتائیک	FF
دمای سلول فتوولتائیک طی سناریو s ($^{\circ}C$)	T^s	تابش خورشید بر سطح ماژول فتوولتائیک (W/m^2)	G^s
سرعت باد (m/s)	v	جریان در نقطه حداکثر توان سلول فتوولتائیک (A)	I_{MPP}
اندازه ولتاژ (V)	V	جریان اتصال کوتاه سلول فتوولتائیک (A)	I_{SC}
سرعت قطع، نامی و وصل توربین (m/s)	V_{ci}, V_r, V_{co}	ضریب اولویت قطع بار موجود در باس i	LP_i
ولتاژ در نقطه حداکثر توان سلول فتوولتائیک (V)	V_{MPP}	تعداد میکروتوربین m در باس i	$N_{i,m}$
ولتاژ مدار باز سلول فتوولتائیک (V)	V_{OC}	تعداد آرایه‌ی فتوولتائیک p در باس i	$N_{i,p}$
حداکثر نفوذ مجاز DG (%)	x	تعداد توربین بادی w در باس i	$N_{i,w}$
اندازه المان $i - j$ ماتریس ادمیتانس	Y_{ij}	دمای عملکرد نامی سلول فتوولتائیک ($^{\circ}C$)	N_{OT}
زاویه ولتاژ (rad)	δ	توان اکتیو مصرفی بار i (MW)	P_{D_i}
زاویه المان $i - j$ ماتریس ادمیتانس (rad)	θ_{ij}	حداکثر ظرفیت قابل نصب در هر باس (MW)	P_{Max}
احتمال رخداد سناریو s	ρ_s	توان تولیدی میکروتوربین m در باس i (MW)	$P_{MT_{i,m}}$
اندیس باس شبکه	i	توان تولیدی ماژول فتوولتائیک p در باس i طی سناریو s (MW)	$P_{M_p}^s$
اندیس سناریو	s	توان تولیدی توربین بادی w در باس i طی سناریو s (MW)	$P_{WTG_{i,w}}^s$
اندیس نوع میکروتوربین	m	توان نامی میکروتوربین m	P_m
اندیس نوع ماژول فتوولتائیک	p	توان نامی سلول فتوولتائیک p	P_p
اندیس نوع توربین بادی	w		
ماتریس قطع بارها	C		
مجموعه باس‌های شبکه	I		
مجموعه پیشامدها	L		
مجموعه سناریوها	S		