

جایابی و تعیین ظرفیت بهینه هیبرید منابع تولید پراکنده جهت تامین بار، استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر، کاهش هزینه های خالص فعلی و بهبود پایداری ولتاژ شبکه

عرفان رجائیانی^۱ روح الامین زینلی داورانی^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته- کرمان- ایران

Erfanrajaeyan@yahoo.com

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته- کرمان- ایران
R.zeinali@kgut.ac.ir

چکیده: منابع تجدیدپذیر انرژی می توانند یک راه حل مناسب برای پاسخگویی به افزایش تقاضای بار مشترکین ارائه دهند. لذا باید بر مبنای اهداف بهره بردار و با توجه به ساختار شبکه توزیع و تنوع شدت تابش خورشید، دمای محیط و سرعت وزش باد در باسهای مختلف شبکه، جایابی و تعیین ظرفیت منابع تجدیدپذیر به صورت بهینه انجام گردد. با توجه به اینکه در شبکه توزیع معمولاً پایداری ولتاژ خطوط و پروفیل ولتاژ باسها در حالت مطلوبی قرار ندارد، بنابراین می توان بهبود پایداری ولتاژ را به عنوان یکی از اهداف اصلی در جایابی و تعیین ظرفیت منابع تجدیدپذیر در نظر گرفت. برای این منظور در این مقاله به تعیین مکان و ظرفیت بهینه هیبرید منابع تولید پراکنده شامل نیروگاه های فتوولتائیک، بادی، دیزل ژنراتور و سیستم ذخیره ساز انرژی پرداخته شده است. توابع هدف در نظر گرفته شده شامل کاهش احتمال از دست دادن بار و تولید منابع تجدیدپذیر، کمینه کردن مجموع هزینه های خالص فعلی و بهبود پایداری ولتاژ شبکه می باشد. به این منظور بر مبنای اطلاعات سالیانه شدت تابش، سرعت باد، میزان دما و پروفیل بارهای خانگی، تجاری و صنعتی، جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه در شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE صورت گرفته است.

واژه های کلیدی: منابع تولید پراکنده، تعیین مکان و ظرفیت بهینه، پایداری ولتاژ، هزینه خالص فعلی

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.2.19

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۴/۲۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۶/۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

نام نویسنده ی مسئول: دکتر روح الامین زینلی داورانی

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - کرمان - انتهای بزرگراه هفت باغ علوی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته - دانشکده برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

با توجه به افزایش هزینه احداث خطوط انتقال جهت انتقال نیرو از نیروگاه‌ها به مصرف‌کنندگان، امروزه کشورهای توسعه‌یافته به احداث منابع تولید پراکنده در کنار مصرف‌کننده روی آورده‌اند [۱]. از طرفی مسائلی مانند آلودگی‌های زیست‌محیطی باعث روی آوردن بشر به منابع تجدیدپذیر شده است [۲]. در صورتی که این منابع در مکان و ظرفیت مناسب مورد استفاده قرار گیرند دارای مزایای زیادی از جمله کاهش هزینه‌های سیستم، تقویت پایداری و ولتاژ و فرکانس، کاهش تلفات، افزایش قابلیت اطمینان و ارتقاء سطح زیرساخت‌های شبکه برق می‌باشند [۳-۴]. مکان‌یابی نامناسب ممکن است موجب بی‌ثباتی سیستم، از دست دادن انرژی به صورت تلفات و افزایش هزینه‌ها شود [۵]. امروزه مطالعات گسترده‌ای در زمینه جایابی و تعیین ظرفیت هیبرید منابع بر مبنای توابع هدف مختلف صورت گرفته است. در [۶] به تعیین ظرفیت بهینه یک سیستم ترکیبی شامل فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و باتری باهدف کاهش هزینه‌های سیستم در طول عمر پروژه پرداخته شده است. در [۷]، به بررسی تأمین برق یک مرکز بزرگ و پرتراکم در حالت مستقل از شبکه سراسری پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد سیستم فتوولتائیک، دیزل ژنراتور، باد و باتری بهترین سیستم ترکیبی برای تأمین برق این مراکز بوده و استفاده از آن باعث کاهش قابل توجه تولید آلایندگی می‌شود. در [۸] اندازه‌یایی بهینه یک سیستم ترکیبی شامل منابع فتوولتائیک، باد، دیزل ژنراتور و باتری در شهر یانبو عربستان انجام شده است. در [۹] یک چارچوب به‌منظور بهینه‌سازی چندهدفه سیستم ترکیبی شامل فتوولتائیک و دیزل ژنراتور برای یک منطقه مستقل از شبکه اصلی در حضور رزرو ارائه شده است. در [۱۰]، اندازه‌یایی و جایابی بهینه یک سیستم ترکیبی فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و باتری در حالت مستقل از شبکه سراسری به منظور بهبود کیفیت توان و تأمین تقاضای بار مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۱] به منظور تأمین بار در یک شبکه توزیع از ترکیب بهینه منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها استفاده شده است. در [۱۲] تعیین محل نصب منابع تجدیدپذیر باد و خورشید بر اساس عدم قطعیت تولید این نیروگاه‌ها صورت گرفته است.

پدیده ناپایداری ولتاژ از دهه‌های آغازین قرن بیستم و با رشد صنعت برق مورد توجه محققان و علاقه‌مندان در این زمینه قرار گرفته و در طول دهه‌های گذشته روش‌هایی برای تشخیص این پدیده و جلوگیری از فروپاشی ولتاژ ارائه شده است [۱۳]. در [۱۴] پایداری ولتاژ شبکه توزیع با حضور منابع تولید پراکنده مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۵] محل مطلوب DGها بر اساس شاخص پایداری توان و شاخص پایداری ولتاژ تعیین می‌شود. در [۱۶] جهت ارزیابی پایداری ولتاژ در حضور منابع تولید پراکنده، یک شاخص جدید ارائه شده است. در [۱۷] با بررسی مجموعه‌ای از معادلات پایداری ولتاژ و شاخص‌های فروپاشی آن دو مدل خطی جدید برای بهبود پایداری ولتاژ بر اساس

پخش بار بهینه در خطوط پیشنهاد شده است. در [۱۸] یک روش احتمالاتی برای ارزیابی پایداری ولتاژ شبکه توزیع در حضور توربین‌های بادی پیشنهاد شده است.

موقعیت نامناسب منابع تولید پراکنده می‌تواند اثرات نامطلوبی بر پایداری و پروفیل ولتاژ شبکه داشته و لذا ایمنی و قابلیت اطمینان شبکه کاهش می‌یابد. در مقالات متعددی جایابی و تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن شاخص پایداری ولتاژ صورت گرفته است. در اکثر این مقالات منابع تولید پراکنده از نوع دیزل ژنراتور بوده است. همچنین در بیشتر مقالاتی که منابع تولید پراکنده از نوع باد و خورشید در نظر گرفته شده اند، تغییرات ساعتی متغیرهای اثرگذار بر منابع خورشیدی و بادی همچون تابش، دما و وزش باد در نظر گرفته نشده و برای یک مقدار مشخص تولید منابع خورشیدی و بادی پایداری ولتاژ مورد ارزیابی قرار گرفته است. لذا با توجه به اهمیت پایداری ولتاژ شبکه‌های برق و روند رو به رشد استفاده از منابع تجدیدپذیر باد و خورشید، در این مقاله بهبود پایداری ولتاژ شبکه به عنوان یکی از اهداف جایابی و تعیین ظرفیت هیبرید منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده است. برای این منظور با در نظر گرفتن انواع بارهای خانگی، صنعتی و تجاری و همچنین بر مبنای اطلاعات ساعتی سالیانه پروفیل بارها، شدت تابش و سرعت وزش باد در باس-های مختلف، تعیین مکان و ظرفیت بهینه منابع با هدف کاهش احتمال از دست دادن بار و منبع تغذیه، کمینه کردن مجموع هزینه‌ها و بهبود پایداری ولتاژ شبکه صورت گرفته است. این مطالعه بر روی شبکه ۳۳ باس IEEE صورت گرفته و جهت انجام پخش بار از برنامه Matpower و برای بهینه‌سازی محل نصب و ظرفیت منابع از الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده شده است. همچنین در کنار منابع فتوولتائیک، بادی و دیزل ژنراتورها از پیل سوختی، الکترولایزر و تانک هیدروژن به عنوان ذخیره‌ساز سیستم استفاده شده است.

در ادامه، در بخش ۲ فرمولاسیون مسئله بیان می‌گردد. در بخش ۳ روابط اقتصادی سیستم ارائه می‌شود. توابع هدف و قیدهای مسئله بهینه‌سازی در بخش ۴ معرفی شده‌اند. در بخش ۵ استراتژی کنترلی و راهبرد مدیریت انرژی بیان می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۶ ارائه می‌شود. در انتها در بخش ۷ نتیجه‌گیری مقاله ارائه می‌گردد.

۲- فرمولاسیون مسئله

۲-۱- نیروگاه فتوولتائیک

ماکزیمم توان نیروگاه فتوولتائیک از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد [۱۹].

$$P_{\max} = N_{pv} \times FF \times I_{sc}(G_{on}) \times V_{oc}(T_c) \quad (1)$$

که در آن P_{\max} حداکثر توان، N_{pv} تعداد پنل‌ها، $I_{sc}(G_{on})$ جریان اتصال کوتاه در تابش G_{on} و $V_{oc}(T_c)$ ولتاژ مدار باز سلول در دمای سلول (T_c) است. $I_{sc}(G_{on})$ بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$I_{sc}(G_{on}) = I_{sc}^b \times G_{on} \quad (2)$$

جدول (۱): هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه نیروگاه‌های فتوولتائیک و بادی در ظرفیت‌های مختلف

نیروگاه	هزینه تولید توان از نیروگاه‌های فتوولتائیک و بادی
Photovoltaic $P_{pv \text{ rated}} = 245/0.25$ (W)	$\alpha_{pv} = 2/0.3 \times P_{pv \text{ rated}} \quad 0 \leq N_{pv} \times P_{pv \text{ rated}} < 10^5$ $\alpha_{pv} = 1/0.4 \times P_{pv \text{ rated}} \quad 10^5 \leq N_{pv} \times P_{pv \text{ rated}} < 10^6$ $\alpha_{pv} = 1/0.3 \times P_{pv \text{ rated}} \quad 10^6 \leq N_{pv} \times P_{pv \text{ rated}} < 5 \times 10^6$ $\alpha_{pv} = 1/0.2 \times P_{pv \text{ rated}} \quad 5 \times 10^6 \leq N_{pv} \times P_{pv \text{ rated}} < 10^7$ $\alpha_{pv} = 1/0.1 \times P_{pv \text{ rated}} \quad 10^7 \leq N_{pv} \times P_{pv \text{ rated}} < 5 \times 10^7$ $\alpha_{pv} = 1/0.3 \times P_{pv \text{ rated}} \quad 5 \times 10^7 \leq N_{pv} \times P_{pv \text{ rated}} < 10^8$
Wind Turbine $P_{wt \text{ rated}} = 300$ (kW)	$\alpha_{wt} = 2/2 \times 10^3 \times P_{wt \text{ rated}} \quad 0 \leq N_{wt} \times P_{wt \text{ rated}} < 500$ $\alpha_{wt} = 1/8 \times 10^3 \times P_{wt \text{ rated}} \quad 500 \leq N_{wt} \times P_{wt \text{ rated}} < 1000$ $\alpha_{wt} = 1/5 \times 10^3 \times P_{wt \text{ rated}} \quad 1000 \leq N_{wt} \times P_{wt \text{ rated}} < 2000$ $\alpha_{wt} = 1/3 \times 10^3 \times P_{wt \text{ rated}} \quad N_{wt} \times P_{wt \text{ rated}} \geq 2000$

است [۲۱]. توان تولیدی توسط پیل سوختی از رابطه (۹) محاسبه می‌شود که در آن P_d کمبود توان و η_{inv} بازده اینورتر می‌باشد.

$$P_{fuel \text{ cell}}(t) = \frac{P_d(t)}{\eta_{inv}} \quad (9)$$

۲-۴- شاخص پایداری ولتاژ در شبکه توزیع

جهت بررسی پایداری ولتاژ خطوط شبکه هنگام نفوذ منابع تولید پراکنده از شاخص F_{vsi} استفاده شده که از (۱۰) محاسبه می‌گردد [۱۶].

$$F_{vsi} = \frac{4Q_j(R_i^2 + X_i^2)}{X_i U_i^2} \leq 1 \quad (10)$$

که در آن Q_j توان راکتیو خروجی از گره دوم، R_i و X_i امپدانس خط و U_i ولتاژ گره اول است.

جهت بررسی پایداری ولتاژ کل شبکه، مقدار شاخص F_{vsi} در کلیه خطوط محاسبه و با یکدیگر جمع می‌شوند. همچنین با توجه به اینکه جایابی بر مبنای تغییرات سالیانه بار و شرایط آب و هوایی باسهای مختلف صورت می‌گیرد، بنابراین مقدار شاخص F_{vsi} کلیه خطوط شبکه در طول یک سال محاسبه می‌شود.

۳- آنالیز اقتصادی اجزای سیستم

هزینه خالص فعلی (NPC_x)^۳، شامل مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (IC_x)^۴، هزینه تعمیر و نگهداری ($OMC_{x,npv}$)^۵ و هزینه تعویض ($RC_{x,npv}$)^۶ می‌باشد که از روابط (۱۱) تا (۱۴) محاسبه می‌شوند [۲۲].

$$NPC_x = IC_x + OMC_{x,npv} + RC_{x,npv} \quad (11)$$

$$IC_x = \alpha_x \times N_x \quad (12)$$

$$OMC_{x,npv} = OMC_x \times N_x \times \sum_{z=1}^k \left(\frac{1+\beta}{1+r} \right)^z \quad (13)$$

که در آن I_{sc}^b جریان اتصال کوتاه استاندارد بوده و G_{on} تشعشع خورشید در سطح پنل است که از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360(n+81)}{365} \right) \right] \quad (3)$$

که در آن n ، روز سال به تاریخ هجری شمسی است و G_{sc} برابر با 1367 w/m^2 است. $V_{oc}(T_c)$ بر اساس رابطه (۴) محاسبه می‌گردد.

$$V_{oc}(T_c) = V_{oc}^b - 0.0023 \times n \times (T_c - 25) \quad (4)$$

که در آن V_{oc}^b ولتاژ مدار باز استاندارد و n تعداد سلول‌های پنل است. T_c دمای سلول است و از رابطه (۵) حاصل می‌شود.

$$T_c = T_A + [(NOCT - 20)/0.8] \times G_{on} \quad (5)$$

که T_A دمای محیط و $NOCT$ دمای استاندارد سلول می‌باشد. ضریب FF دارای مقدار ثابتی برای هر سلول مشخص بوده و طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc}^b \times I_{sc}^b} \quad (6)$$

که در آن V_{mp} و I_{mp} به ترتیب ماکزیمم ولتاژ و ماکزیمم جریان در نقطه ماکزیمم توان خروجی هستند. در صورتی که زاویه تابش خورشید بر پنل عمود نباشد، میزان دریافت تشعشع (G') بر اساس معادله (۷) محاسبه می‌شود که در آن θ زاویه تابش است.

$$G' = G_{on} \times \cos(\theta) \quad (7)$$

۲-۲- نیروگاه بادی

توان حاصل از توربین‌های بادی مطابق با رابطه (۸) محاسبه می‌گردد.

$$P_{wt}(t) = \begin{cases} N_{wt} \times P_R \times \frac{V - V_c}{V_R - V_c} & V_c \leq V \leq V_R \\ N_{wt} \times P_R & V_R \leq V \leq V_F \\ 0 & V \leq V_c, V \geq V_F \end{cases} \quad (8)$$

که N_{wt} تعداد توربین‌های بادی، V سرعت باد در ارتفاع هاب، V_c سرعت قطع پایین، V_F سرعت قطع بالا، V_R سرعت نامی توربین و P_R توان نامی توربین می‌باشد [۲۰].

۳-۲- پیل سوختی، الکترولایزر و تانک هیدروژن

انرژی تولیدی اضافی توسط نیروگاه‌های تجدیدپذیر همراه با آب به‌عنوان ورودی‌های الکترولایزر می‌باشند. طی فرایندی آب به هیدروژن تبدیل شده و در تانک هیدروژن ذخیره می‌گردد. زمانی که منابع تجدیدپذیر قادر به تأمین کامل بار نباشند، پیل سوختی به جبران کمبود توان می‌پردازد. ارزش حرارتی هیدروژن 33 kWh/m^3 و مقدار چگالی آن 0.09 kg/m^3 در شرایط جو است. با در نظر گرفتن بازدهی ۹۰٪ برای الکترولایزر، جهت تولید هیدروژن انرژی معادل با 41.97 kWh/kg توسط الکترولایزر مصرف می‌شود. مقدار انرژی به دست آمده از هیدروژن توسط پیل سوختی معادل با $37/8 \text{ kWh/kg}$

$$TNPC = NPC_{PV} + NPC_{wt} + NPC_{fc} + NPC_{el} + NPC_{ht} + NPC_{diesel} + PC_{CO2} \quad (18)$$

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^{8760} (P_{Load}(t) + P_{Loss}(t) \cdot P_{pv}(t) - P_{wt}(t) - P_{fc}(t) - P_{diesel}(t))}{\sum_{t=1}^{8760} P_{Load}(t)} \quad (19)$$

$$VSI_{ij} = \sum_{t=1}^{8760} \sum_{i=1, j=1+1}^{33} (F_{vsi_{ij}}(t))^2 \quad (20)$$

PC_{CO2} جریمه تولید CO_2 توسط دیزل است که به ازای یک تن تولید CO_2 برابر با ۸۳/۵ دلار می‌باشد و P_{Loss} تلفات سیستم است. همچنین P_{Load} معرف میزان تقاضای بار بوده و با بار تأمین شده متفاوت است. قیدهای مربوط به تعیین ظرفیت، تعداد هر یک از اجزا می‌باشند و به نحوی انتخاب می‌شوند که یک منبع با توان نامی خود بتواند بار پیک سال را تأمین کند. قیدهای مسئله جایابی و برنامه پخش بار مربوط به حدود مجاز ولتاژ باس‌ها، توان عبوری از خطوط و توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتورها می‌باشند که از روابط (۲۱) تا (۲۳) محاسبه می‌شوند.

$$V_{min}^i \leq V^i \leq V_{max}^i \quad (21)$$

$$P_{DG,min}^j \leq P_{DG}^j \leq P_{DG,max}^j \quad (22)$$

$$Q_{DG,min}^j \leq Q_{DG}^j \leq Q_{DG,max}^j \quad (23)$$

که در آن V_{min}^i و V_{max}^i حداقل و حداکثر ولتاژ قابل قبول برای باس i ام شبکه بوده که برای شبکه توزیع در حدود ۰/۹ و ۱/۱ پریونیت در نظر گرفته می‌شوند. $P_{DG,min}^j$ و $P_{DG,max}^j$ حداقل و حداکثر ظرفیت تولید توان اکتیو برای منبع j ام بوده که توسط الگوریتم بهینه‌سازی انتخاب‌شده و جهت تعیین ظرفیت منابع به کار می‌رود. همچنین $Q_{DG,min}^j$ و $Q_{DG,max}^j$ محدودیت جذب و تولید توان راکتیو برای منبع j ام می‌باشد.

۵- استراتژی کنترلی و راهبرد مدیریت انرژی

اولویت تأمین بار در ابتدا توسط منابع تجدیدپذیر می‌باشد. در صورتی که توان این منابع بیشتر از توان مصرفی باشد، مازاد آن با در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم ذخیره‌ساز ذخیره می‌گردد و اگر از توان مصرفی کمتر باشد، این کمبود توسط پیل سوختی تأمین می‌شود. اگر پیل سوختی نیز نتواند کاملاً کمبود توان را جبران کند، دیزل ژنراتورها وارد مدار می‌شوند. اگر دیزل‌ها نیز جوابگوی این کمبود نباشند مقداری از بار با خاموشی مواجه خواهد شد. با توجه به تعدد اهداف مد نظر و همچنین ساختار غیرخطی مسئله بهینه‌سازی، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری یک راه حل جهت پیدا کردن مکان بهینه و ظرفیت مناسب واحدهای تولید پراکنده می‌باشد. الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی با کارکرد قابل قبول در حل مسائل مختلف می‌باشد [۲۶]. لذا در این مقاله جهت حل مسئله بهینه‌سازی مورد نظر از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در

$$RC_{X,npv} = RC_X \times N_X \times \sum_{z=1}^{S_x} \left(\frac{1+\beta}{1+r} \right)^z \quad (14)$$

که N_X تعداد اجزا بوده و RC_X ، α_X و OMC_X به ترتیب هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، تعمیر و نگهداری و تعویض هر یک از اجزای سیستم می‌باشد. k طول عمر پروژه بوده که ۲۰ سال می‌باشد و S_x طول عمر هر یک از تجهیزات است. زیرنویس npv به معنی ارزش خالص فعلی است و زیرنویس x معرف اجزای تشکیل‌دهنده سیستم شامل پنل فتوولتائیک، توربین بادی، اینورتر، دیزل ژنراتور، پیل سوختی، الکترولایزر و تانک هیدروژن می‌باشد. طول عمر پیل، توربین و تانک هیدروژن برابر با طول عمر پروژه می‌باشد و طول عمر اینورتر، پیل سوختی و الکترولایزر به ترتیب برابر با ۱۰، ۵ و ۱۰ سال است. دیزل ژنراتور نیز به ازای هر ۱۵۰۰ ساعت کارکرد باید تعویض شود. β و r به ترتیب نرخ رشد تدریجی و نرخ بهره بوده که برابر با ۰/۰۴ و ۰/۱ می‌باشند. توان نامی اینورتر، دیزل ژنراتور، پیل سوختی و الکترولایزر به ترتیب برابر با ۲/۵، ۶۲، ۲ و ۲ کیلووات بوده و ظرفیت نامی تانک هیدروژن برابر با ۶ kg است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه این تجهیزات نیز به ترتیب برابر با ۱۰۰ (\$/kw)، ۱۹۰۲۸ (\$/diesel)، ۲۵۰۰ (\$/kw)، ۲۰۰۰ (\$/kw) و ۵۰۰ (\$/kg) می‌باشد. در جدول (۱) هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه نیروگاه‌های فتوولتائیک و بادی در ظرفیت‌های مختلف بیان شده است [۲۴، ۲۳]. هزینه‌های تعمیر و نگهداری پیل سوختی، تانک هیدروژن و نیروگاه‌های بادی و خورشیدی برابر با ۰/۰۲ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه‌شان می‌باشد و برای دیزل ژنراتور و الکترولایزر نیز به ترتیب برابر با ۰/۰۸ و ۰/۰۱ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه‌شان است.

۳-۱- هزینه‌های مصرف سوخت

مصرف سوخت دیزل ژنراتور (FC) تابعی از توان خروجی (P_{dg}) و توان نامی آن (P_{dgn}) است و همچنین هزینه سوخت (C_f) ضریبی از قیمت سوخت (P_f) و مصرف می‌باشد که از روابط (۱۵) و (۱۶) بیان می‌شوند. هزینه سوخت سالیانه (FC_{dg}) نیز از رابطه (۱۷) قابل محاسبه می‌باشد.

$$f_c(t) = A_{dg} \times P_{dgn} + B_{dg} \times P_{dg}(t) \quad (15)$$

$$C_f(t) = P_f \times f_c(t) \quad (16)$$

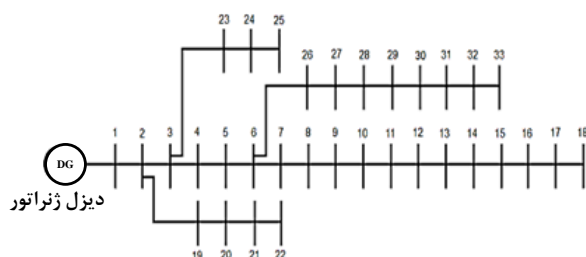
$$FC_{dg} = \sum_{t=1}^{8760} C_f(t) \quad (17)$$

که A_{dg} و B_{dg} ضرایب منحنی سوخت بوده و مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۲۴۶۱ و ۰/۰۸۴۱ لیتر بر کیلووات ساعت می‌باشد [25].

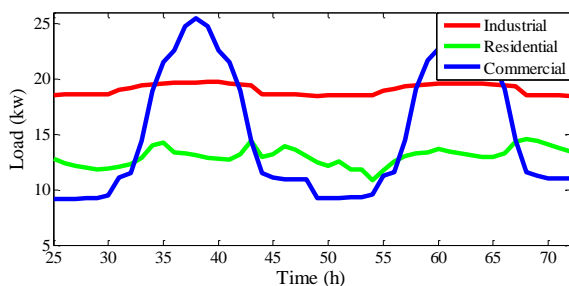
۴- توابع هدف و قیدهای مسئله

توابع هدف شامل کمینه کردن مجموع هزینه‌های خالص فعلی ($TNPC$)^۷، کاهش احتمال از دست دادن بار و تولید منابع تجدیدپذیر ($LPSP$)^۸ و کاهش شاخص VSI ^۹ جهت بهبود پایداری ولتاژ می‌باشند که بصورت روابط (۱۸) تا (۲۰) بیان می‌شوند.

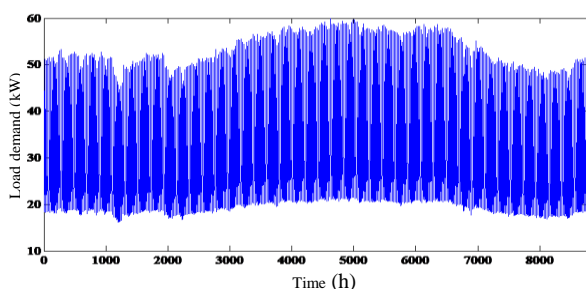
همچنین فرض شده است بارهای در نظر گرفته شده در باس های ۵، ۱۹، ۲۱، ۲۴ و ۲۹ از نوع تجاری، مدل بار در باس های ۲، ۴، ۱۷ و ۱۸ از نوع صنعتی و بار باس های باقی مانده از نوع خانگی باشند. تغییرات ساعتی توان اکتیو در مدت دو روز برای باس های ۵، ۱۷ و ۲۸ در شکل (۳) نشان داده شده است. تغییرات سالیانه یکی از بارهای صنعتی، تجاری و خانگی به ترتیب در شکل های (۴) تا (۶) نشان داده شده است. میزان متوسط شدت تابش، دما و سرعت باد در نظر گرفته شده در ۳۳ باس شبکه در شکل های (۷) تا (۹) نشان داده شده است.



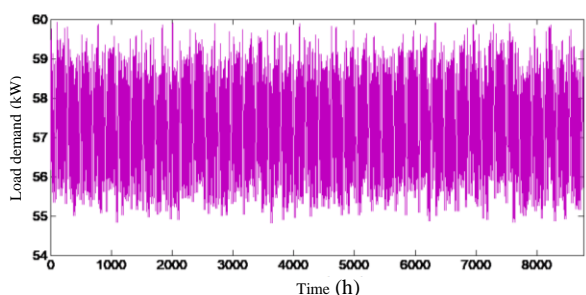
شکل (۲): دیاگرام تک خطی شبکه ۳۳ باس IEEE



شکل (۳): تغییرات ساعتی بارهای صنعتی، خانگی و تجاری در دو روز نمونه از سال

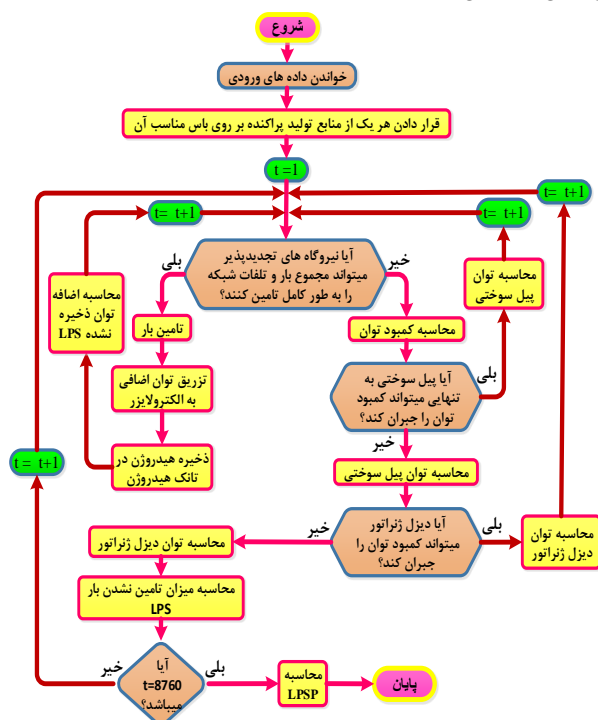


شکل (۴): بار تجاری در نظر گرفته شده در باس ۵ به مدت یک سال



شکل (۵): بار صنعتی در نظر گرفته شده در باس ۱۷ به مدت یک سال

هر مرحله از اجرای الگوریتم ژنتیک با توجه به شدت تابش خورشید، متوسط سرعت وزش باد و دما در هر باس یک محل و یک ظرفیت به هر منبع اختصاص داده می شود و بر مبنای مقدار توابع هدف برازندگی هر انتخاب مشخص می گردد. در صورتی که قیود مسئله پخش بار رعایت نشود برنامه پخش بار همگرا نشده و با در نظر گرفتن یک مقدار پناالتی، جواب به دست آمده از الگوریتم در آن مرحله جریمه می شود. این موضوع سبب می گردد که الگوریتم به سمت جواب هایی که اهداف مسئله را برآورده می کنند همگرا شود. مراحل مدیریت انرژی سیستم در شکل (۱) قابل مشاهده است.



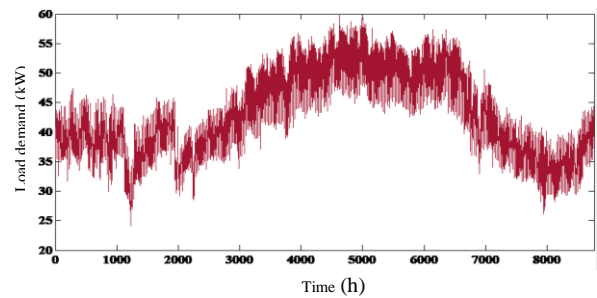
شکل (۱): مراحل مدیریت انرژی سیستم ترکیبی

۶- نتایج شبیه سازی

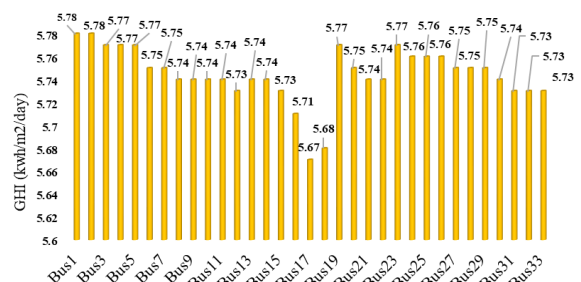
در این مقاله به تعیین مکان و ظرفیت بهینه هیبرید منابع تولید پراکنده شامل نیروگاه های فتوولتائیک، بادی، دیزل ژنراتورها و سیستم ذخیره ساز انرژی در یک شبکه توزیع مستقل از شبکه سراسری با اهداف کمینه کردن TNPC، کاهش LPSP و بهبود پایداری ولتاژ شبکه پرداخته شده است. به این منظور بر مبنای اطلاعات ساعتی میانگین ماهانه شدت تابش خورشید، سرعت وزش باد، میزان دمای محیط و پروفیل بارهای خانگی، تجاری و صنعتی به مدت یک سال در باس های مختلف، جایابی و تعیین ظرفیت بهینه هیبرید منابع تولید پراکنده در شبکه استاندارد ۳۳ باس IEEE صورت گرفته است. دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است.

تغییرات ساعتی بار بر مبنای پروفیل بار یک فیدر واقعی انتخاب شده و بر اساس اطلاعات حداقل و حداکثر بار مصرفی باسهای شبکه ۳۳ باس IEEE، برای کلیه باسها پروفیل بار ساعتی بدست آمده است.

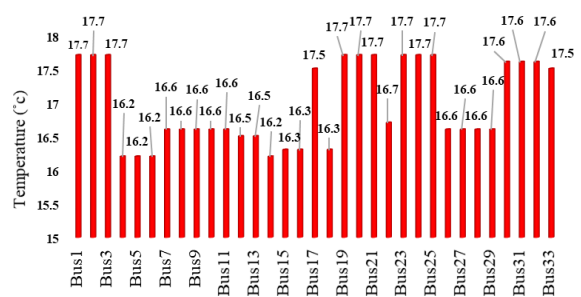
با توجه به حجم بالای جواب‌های بدست آمده از بهینه‌سازی چند هدفه، از مجموع جواب‌های نشان داده شده در شکل (۱۰)، بر اساس حالت‌های قابل قبول برای LPSP شش جواب انتخاب شده و در آن‌ها TNPC و VSI مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در جدول (۲) نشان داده شده است. در جدول (۲) احتمال خاموشی بار و از دست دادن تولید منبع تجدیدپذیر (LPSP)، مجموع هزینه‌های خالص فعلی سیستم (TNPC)، شاخص پایداری ولتاژ (VSI)، شماره باس قرارگیری و ظرفیت نامی نیروگاه فتوولتائیک، ظرفیت نامی دیزل ژنراتورها و شماره باس و ظرفیت نامی نیروگاه بادی نشان داده شده است. در این بررسی مکان دیزل ژنراتور ثابت بوده و همیشه بر روی باس شماره ۱ می‌باشد. همان‌طور که از جدول (۲) مشاهده می‌شود، در LPSP های یکسان با افزایش هزینه‌های سیستم مقدار شاخص VSI کاهش می‌یابد. با مقایسه جواب ۱ و ۴ مشاهده می‌شود که LPSP از صفر به 0.203×10^8 افزایش یافته و هزینه‌های سیستم از 2.716×10^8 به 2.325×10^8 کاهش یافته است. در این حالت مقدار شاخص VSI نیز از $1/49801$ به $1/5996$ تغییر کرده است. مجموع ظرفیت نامی تولید توان، توسط منابع تولید پراکنده در جواب ۱ برابر با $10037/229$ کیلووات است که این مقدار برای جواب ۴ برابر با $8815/779$ کیلووات می‌باشد. همچنین با مقایسه جواب‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که هزینه‌های سیستم در جواب ۶ نسبت به جواب ۵ به میزان $11/28$ درصد کاهش یافته است. همچنین مجموع ظرفیت نامی تولید توان در جواب ۶ نسبت به جواب ۵ به میزان $19/7$ درصد کمتر می‌باشد. نتیجه می‌شود که در صورت جایابی و تعیین ظرفیت صحیح منابع تجدیدپذیر در شبکه، افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه موجب کاهش شاخص VSI و بهبود پایداری ولتاژ سیستم قدرت می‌گردد. توجه به این نکته لازم است که در مسائل بهینه‌سازی با اهدافی با ساختار متفاوت، انتخاب جواب نهایی به نظر بهره‌بردار سیستم بستگی دارد. بطور مثال چنانچه بهره‌بردار سیستم ترجیح دهد در هر شرایطی بار بطور کامل تامین گردد و پایداری ولتاژ شبکه در بهترین وضعیت قرار داشته باشد، جواب ۱ می‌تواند به عنوان پاسخ نهایی انتخاب گردد. ولی چنانچه هزینه تامین برق برای بهره‌بردار از اهمیت زیادی برخوردار باشد و ترجیح دهد با قبول ریسک خاموشی اندک بار و انتخاب وضعیت مناسب پایداری ولتاژ، با یک هزینه کمتر بار را تامین نماید، جواب ۶ به عنوان پاسخ نهایی انتخاب می‌گردد. میانگین ساعتی ماهانه مجموع بارهای شبکه، توان تولیدی توسط نیروگاه‌های تجدیدپذیر، دیزل ژنراتور و سیستم ذخیره‌ساز انرژی برای جواب ۲ جدول (۲)، در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



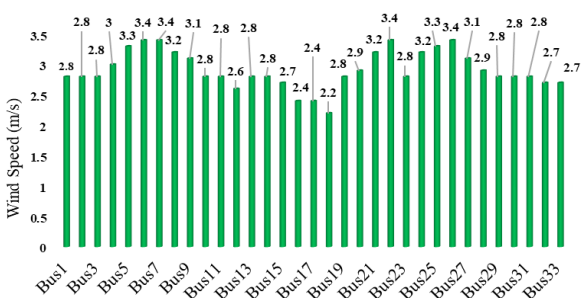
شکل (۶): بار خانگی در نظر گرفته شده در باس ۲۸ به مدت یک سال



شکل (۷): میزان متوسط شدت تابش در باس‌های مختلف

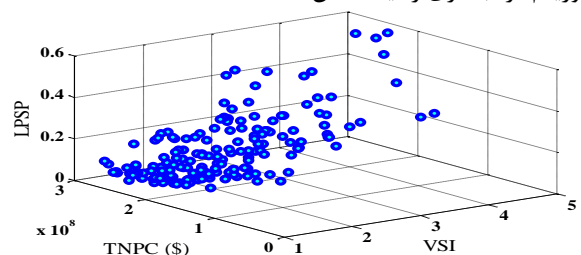


شکل (۸): میزان متوسط دمای محیط در باس‌های مختلف



شکل (۹): میزان متوسط سرعت وزش باد در باس‌های مختلف

در شکل (۱۰)، مرز جبهه پارتو حاصل از بهینه‌سازی سه هدفه توسط الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک نشان داده شده است.

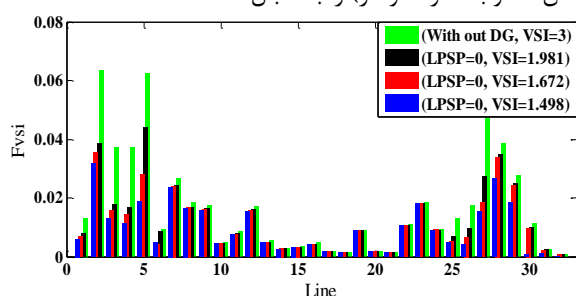


شکل (۱۰): مرز جبهه پارتو حاصل از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک

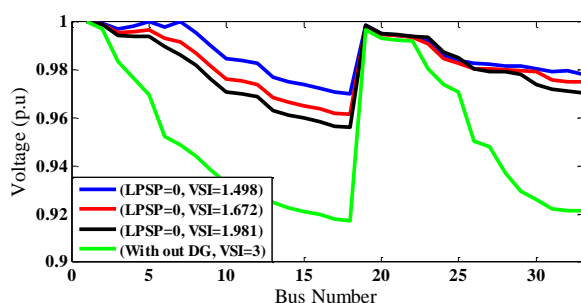
جدول (۲): نتایج چند جواب بدست آمده از بهینه‌سازی

توابع هدف و مقدار متغیرها	LPSP = 0						عدم استفاده از منابع تجدیدپذیر
	جواب ۱	جواب ۲	جواب ۳	جواب ۴	جواب ۵	جواب ۶	
LPSP	۰	۰	۰	۰/۰۲۰۳	۰/۰۲۵۳	۰/۰۲۶۳	۰
VSI	۱/۴۹۸	۱/۶۷۲	۱/۹۸۱	۱/۶۰۰	۱/۶۸۸	۱/۸۰۸	۳
TNPC (\$)	۲/۷۱×۱۰ ^۸	۲/۵۱×۱۰ ^۸	۲/۳۶×۱۰ ^۸	۲/۳۲×۱۰ ^۸	۲/۰۸×۱۰ ^۸	۱/۸۴×۱۰ ^۸	۳/۴۶×۱۰ ^۸
Photovoltaic power plant bus number	۳۳	۷	۲۸	۷	۱۹	۱۹	---
P _{pv-rated} (kw)	۸۷۵/۲۲	۱۰۶۹/۷۷	۱۵۵۵/۹۰	۱۰۶۹/۷۷	۳۵۰۰/۴۲	۱۹۴۴/۷۶	---
P _{diesel generator-rated} (kw)	۳۱۶۲	۲۷۹۰	۲۸۵۲	۲۰۴۶	۲۱۰۸	۱۷۳۶	۳۸۴۴
Wind farm bus number	۷	۲۸	۵	۲۹	۲۹	۷	---
P _{wind-rated} (kw)	۶۰۰۰	۵۱۰۰	۵۷۰۰	۵۷۰۰	۵۷۰۰	۵۴۰۰	---

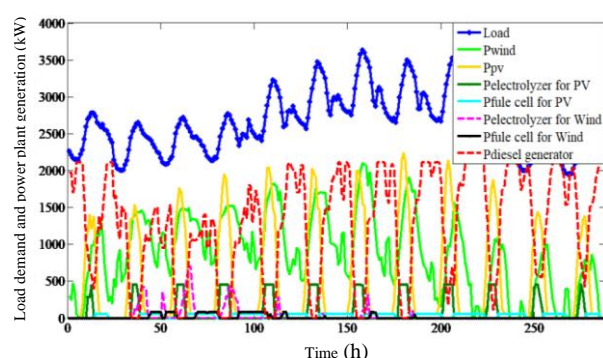
با توجه به اینکه در حالت عدم استفاده از منابع تجدیدپذیر باسهای ۱۸ و ۳۳ دارای کمترین مقدار ولتاژ هستند، یک نیروگاه خورشیدی با ظرفیت ۶۰۰۰ کیلو وات در باس ۱۸ و یک نیروگاه بادی با ظرفیت ۹۰۰ کیلووات در باس ۳۳ نصب گردد. ظرفیت انتخابی به گونه‌ای بوده که مجموع ظرفیت منابع تجدیدپذیر با جواب ۱ برابر باشد. در شکل (۱۴) پروفیل ولتاژ در حالت جایابی بهینه (جواب ۱) و عدم جایابی بهینه نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۱۴) مشاهده می‌شود جایابی بهینه منابع تجدیدپذیر بهبود مطلوب پروفیل ولتاژ (کاهش مطلوب انحراف ولتاژ) را به دنبال داشته است.



شکل (۱۲): مقایسه شاخص F_{vsi} خطوط شبکه در LPSP=0 در ساعت پیک بار



شکل (۱۳): مقایسه ولتاژ باس‌ها در LPSP=0 در ساعت پیک بار

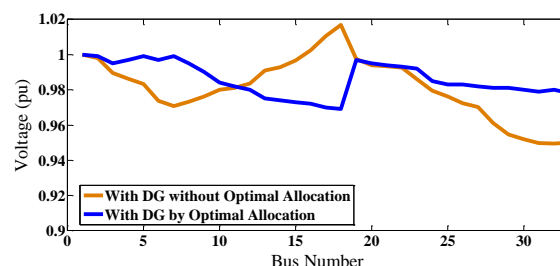


شکل (۱۱): میانگین ساعتی ماهانه مجموع بارهای شبکه، توان منابع تولید پراکنده و ذخیره سازها

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، در ساعتی که مجموع تولید منابع فتوولتائیک و بادی جوابگوی بار نبوده، دیزل ژنراتور و پیل‌های سوختی تامین بار را بر عهده داشته اند. همچنین در زمانی که مجموع تولید نیروگاه فتوولتائیک و بادی بیشتر از تقاضای بار بوده، اضافه توان به الکترولایزرها تزریق شده است.

مقدار F_{vsi} برای همه خطوط شبکه و پروفیل ولتاژ باس‌ها در LPSP=0 و در شاخص VSI‌های متفاوت، در ساعت پیک بار به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد که خطوط ۲ به ۳ و ۵ به ۶ به ترتیب بیشترین مقدار شاخص F_{vsi} را به خود اختصاص داده‌اند و بیشتر از سایر خطوط مستعد فروپاشی می‌باشند. جایابی و تعیین ظرفیت مناسب منابع تولید پراکنده در شبکه توانسته است به خوبی مقدار شاخص F_{vsi} را برای خطوط مذکور کاهش دهد و موجب بهبود پایداری ولتاژ در خطوط و باس‌های شبکه گردد. همچنین همانطور که از شکل (۱۳) مشاهده می‌شود با لحاظ کردن تابع هدف بهبود پایداری ولتاژ در جایابی و تعیین ظرفیت منابع تجدیدپذیر، پروفیل ولتاژ باسهای شبکه نیز به خوبی بهبود یافته است. این درحالیست که چنانچه تخصیص محل احداث و ظرفیت منابع تجدیدپذیر بصورت بهینه صورت نگیرد، بهبود پروفیل ولتاژ به خوبی صورت نخواهد گرفت. برای این منظور فرض شده است

- Battery: Application to the case of Djanet city of Algeria,” *Solar Energy*, vol. 158, pp. 941-951, 2017.
- [7] Hossain M, Mekhilef S, Olatomiwa L, “Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 28, pp. 358-366, 2017.
- [8] Ramli MAM, et al, “Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm,” *Renewable Energy*, vol. 121, pp. 400-411, 2018.
- [9] Movahediyani Z, Askarzadeh A, “Multi-objective optimization framework of a photovoltaic - diesel generator hybrid energy system considering operating reserve,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 41, pp. 1-12, 2018.
- [10] Rodriguez-Gallegos CD, Gandhi O, Yang D, Alvarez-Alvarado MS, Zhang W, Reindl T, et al, “A Siting and Sizing Optimization Approach for PV-Battery-Diesel Hybrid Systems,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, pp. 2637-2645, 2018.
- [11] A. A. A. El-Ela, S. M. Allam, R. M. Rizk-Allah and N. K. Shehata, “Optimal Allocation of a Hybrid Renewable Energy-Storage System for Supplying Egyptian Distribution Networks Using Discrete Jaya Algorithm,” 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), pp. 533-539, 2019.
- [12] J. Wan et al., “Multi-energy Complementarity Evaluation and Its Interaction with Wind and Photovoltaic Capacity optimization,” 2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), pp. 262-267, 2020.
- [۱۳] حامد، اسدی، محمد، صنایع پسند، “معرفی یک روش جدید برای تخمین به هنگام ناپایداری ولتاژ در شبکه‌های قدرت بر مبنای حفاظت گسترده شبکه”، *مجله انجمن مهندسين برق و الكترونیک ایران*، دوره چهارم، شماره دوم، ص ۳-۱۳، پائیز و زمستان ۱۳۸۶.
- [14] Xu M, et al, “Influence of distributed generation on distribution system voltage stability,” In 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), pp. 2352-2355, 2015.
- [15] Jubran MK, Favuzza S, & Massaro F, “Reassessment of voltage stability for distribution networks in presence of DG,” In 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 1-5, 2016.
- [16] T. Jing-jing and Y. Zhong-dong, “An evaluation index of voltage stability of distribution network considering DG,” 2017 2nd International Conference Sustainable and Renewable Energy Engineering (ICSREE), pp. 125-128, 2017.
- [17] Mohamed AA, Venkatesh B, “Linearized voltage stability incorporation with line-wise optimal power flow,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 108, pp. 232 - 239, 2019.
- [18] Kenari MT, Sepasian MS, & Nazar MS, “Probabilistic assessment of static voltage stability in distribution systems considering wind generation using catastrophe theory,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, pp. 2856 - 2865, 2019.
- [19] Goswami, Kreith and Kreider, “Principles of Solar Engineering,” Taylor & Francis, 2000.
- [20] Sawle, Y, Gupta, S.C, Bohre, A.K, “Socio-techno-economic design of hybrid renewable energy system using optimization techniques,” *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 459-472, 2018.



شکل (۱۴): مقایسه ولتاژ باس‌ها در حالت جایابی بهینه (جواب ۱) و عدم جایابی بهینه در ساعت پیک بار

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهبود پایداری ولتاژ شبکه در حضور منابع تولید پراکنده بررسی گردید. برای این منظور با در نظر گرفتن پروفیل بار سالیانه برای انواع بارهای خانگی، تجاری و صنعتی و همچنین با در نظر گرفتن تغییرات بلند مدت تابش، سرعت باد و دما برای باسهای مختلف جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده صورت گرفته است. جایابی و تعیین ظرفیت با هدف کاهش هزینه خالص فعلی، کاهش خاموشی، استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر و همچنین بهبود پایداری ولتاژ خطوط شبکه صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تجدیدپذیر می‌تواند باعث بهبود پایداری ولتاژ خطوط شبکه شود و احتمال فروپاشی ولتاژ را کاهش و بهبود پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه را نیز به دنبال داشته باشد.

مراجع

- [۱] جلال‌آبادی، اسماعیل، رحیمی کیان، اشکان، “بهره‌برداری بهینه و مدیریت ریسک یک ریز شبکه متصل به شبکه”، *مجله انجمن مهندسين برق و الكترونیک ایران*، سال یازدهم، شماره اول، ص ۹-۱۸، تابستان ۱۳۹۳.
- [2] Goel, S., Sharma, R., “Performance evaluation of stand alone, grid connected and hybrid renewable energy systems for rural application: A comparative review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 1378-1389, 2017.
- [3] P. Fortenbacher, A. Ulbig, and G. Andersson, “Optimal Placement and Sizing of Distributed Battery Storage in Low Voltage Grids using Receding Horizon Control Strategies,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, pp. 2383-2394, 2017.
- [4] T. M. Masaud, G. Nannapaneni, and R. Challoor, “Optimal placement and sizing of distributed generation-based wind energy considering optimal self VAR control,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, pp. 281-288, 2017.
- [5] D. Pitt and G. Michaud, “Analyzing the costs and benefits of distributed solar generation in Virginia,” 2014. [Online]. Available: <http://mdvseia.org/wp-content/uploads/2014/12/SSG-Value-of-Solar-Study-Final-10-31-14.pdf>
- [6] Yahiaoui A, Fodhil F, Benmansour K, Tadjine M, Cheggaga N, “Grey wolf optimizer for optimal design of hybrid renewable energy system PV-Diesel Generator-

- [21] S.C., Kumar, Y., Agnihotri, G., "Reast: Renewable energy analysis and sizing tool," Journal of Electrical Systems, vol. 7, pp. 206–224, 2011.
- [22] Jamshidi, M., Askarzadeh A., "Techno-economic analysis and size optimization of an off-grid hybrid photovoltaic, fuel cell and diesel generator system," Sustainable Cities and Society, vol. 44, pp. 310–320, 2019.
- [23] Fu R, Margolis RM, Feldman DJ, US Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018. No. NREL/TP-6A20-72399. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2018.
- [24] Stehly T, Beiter Ph, Heimiller D, and Scott G., 2017 Cost of Wind Energy Review. No. NREL/TP-6A20-72167. National Renewable Energy Lab. (NREL), September 2018.
- [25] Rodríguez-Gallegos C.D., et al, "A multi-objective and robust optimization approach for sizing and placement of PV and batteries in off-grid systems fully operated by diesel generators: An Indonesian case study," Energy, vol. 160, pp. 410-429, 2018.
- [26] Muñoz A and Rubio F, "Evaluating genetic algorithms through the approximability hierarchy," Journal of Computational Science, vol. 53, pp. 101388-101394, 2021.

زیر نویس ها

- ¹ Nominal Operating Cell Temperature
- ² Fill Factor
- ³ Net Present Cost
- ⁴ Investment Cost
- ⁵ Operation & Maintenance Cost
- ⁶ Replacement Cost
- ⁷ Total Net Present Cost
- ⁸ Loss of Power Supply Probability
- ⁹ Voltage Stability Index