دریافت: ۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۲ تاریخ پذیرش: ۹ اسفند۱۴۰۲ صفحات ۱۱۷ الی ۱۳۳

تحلیل نیروگاه ۵۰ کیلووات متصل به شبکه مجتمع ورزشی نیکیان ابهر از لحاظ کیفیت توان، پروفیل بار و اثر اقتصادی بر شبکه توزیع نیرو

جواد طریقی
استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی
Tarighi@uma.ac.ir

محمد حسنی
دانشجوی دکتری انرژی های تجدید پذیر، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی
ایمیل مسئول مکاتبات:morvaridafaridcaspian@gmail.com

چکیده: سلول‌های خورشیدی فتوولتائیک (PV) پرتوهای خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. سلول های خورشیدی برخلاف سایر روش‌های تولید انرژی اعم از سوخت‌های فسیلی، نیروگاه‌های آبی و هسته‌ای آلودگی بر اکوسیستم تحمیل نمی کنند. سلول‌های خورشیدی باید بتواند هر زمانی که تابش خورشید باشد حتی در میزان تابش کم، تولید متناسب خود را حفظ نمایند. توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک متصل به شبکه به دلیل کاهش تلفات بدلیل نزدیکی محل تولید و مصرف و کاهش نیاز به شبکه انتقال از نیروگاه تا مصرف‌کننده توجه بیشتری را به خود را جلب کرده است. در این راستا این نیروگاه‌ها در شبکه توزیع مزایای متعدد از قبیل آزادسازی ظرفیت خطوط و ترانسفورماتورها، بهبود پروفیل ولتاژ، تسطیح نمودار بار فیدر، بهبود کیفیت توان را شامل می‌شوند. در این مقاله مطالعه یک نیروگاه ۵۰ کیلوواتی متصل به شبکه واقع در مجموعه فرهنگی و ورزشی نیکیان ابهر از لحاظ تأثیرات کمی و کیفی حاصل از بهره‌برداری از نیروگاه مورد بررسی قرارگرفته است . بهبود پروفیل ولتاژ تا میزان ۴/۲ درصد ، کاهش تلفات توان در ساعات اوج مصرف تا ۳۷درصد و کاهش تلفات انرژی تا سقف ۲۵/۲ کیلوواتساعت در شبانه روز از جمله نتایج حاصل از بررسی می باشد.

واژگان کلیدی: نیروگاه‌های فتوولتائیک، کیفیت توان، شبکه توزیع، افت توان، ابهر

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

۱. مقدمه

توسعه انرژی‌های تجدید پذیر، روش‌های تولید و افزایش کارایی انرژی، مبحث اقتصادی و بازارهای انرژی سبز و انتقال فنّاوری و سیاست‌گذاری انرژی توسط دولت‌ها و مؤسسات مورد توجه قرار داشته است [۱]. عمده‌ترین تولیدات انرژی‌های تجدید پذیر، مبتنی بر تبدیل فوتوولتائیک است. در کشور ایران ، تولید پراکندهٔ فوتوولتائیک به دلیل سطح بالای تابش خورشیدی و شرایط جغرافیایی مساعد و کاهش هزینه‌های صفحات فوتوولتائیک شبیه سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

امروزه سامانه‌های متصل به شبکه توزیع، بزرگ‌ترین و دارای سریع‌ترین رشد استفاده از فتوولتائیک هستند. چنین سامانه‌هایی برای تبدیل برق DC به AC از آرایه‌های فتوولتائیک از یک معکوس کننده استفاده می‌کنند. معکوس کننده‌های متصل به شبکه با معکوس کننده‌های مستقل از شبکه تفاوت دارند و آن‌ها از فرکانس ولتاژ خط غالب برخط همگانی به‌عنوان پارامتر کنترل استفاده می‌کنند تا اطمینان حاصل شود که خروجی سیستم فتوولتائیک کاملاً با شبکه هماهنگ است [۲].

به منظور ارزیابی فنی نصب نیروگاه‌های خورشیدی در شبکهٔ توزیع، باید تأثیر آن روی شاخص‌های عملکردی مربوط به تلفات مقاومتی، بارگذاری فیدر و کیفیت توان را در نظر گرفت. اغتشاشات کیفیت توان ممکن است موجب قطع یا عملکرد ناکافی تجهیزات مصرف‌کنندگان شود. در نتیجه، مطالعات متعددی صورت گرفته است تا تأثیر نیروگاه‌های خورشیدی روی شاخص‌های کفیت توان از قبیل نامتعادلی ولتاژ [۳] و هارمونیک‌ها [۵-۴] بررسی شود. دیگر اغتشاش مهم کیفیت توان تغییرات بلند مدت ولتاژ است. به عبارتی، انحراف از مقدار RMS ولتاژ، در فرکانس نامی شبکه، با مدت زمان‌هایی بیشتر از ۶۰ ثانیه مد نظر قرار گرفته است . در ایران ، مسائل کیفیت توان مربوط به تغییرات بلندمدت ولتاژ به عنوان مسائل انطباق ولتاژ شناخته می‌شوند [۶]. استانداردهای بین‌المللی این شاخص‌های انطباق ولتاژ را بر اساس مدت زمان تجمعی مربوط به یک ولتاژ نقطه‌ای تعریف می‌کنند. یعنی کل مدت زمان برحسب درصد دورهٔ پایش شده، که در آن یک ولتاژ نقطه‌ای خارج از یک محدودهٔ مشخص قرار گرفته است[۷].

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

حضور نیروگاه‌های خورشیدی در شبکه توزیع می‌تواند به‌صورت قابل ملاحظه‌ای فاکتورهای کیفیت توان مخصوصاً کیفیت ولتاژ را تحت تأثیر قرار دهد [۹-۸]. باید در نظر گرفته شود که علی‌رغم اینکه اضافه شدن سامانه‌های فتوولتائیک به شبکه کار چندان پیچیده‌ای نیست، اما همواره شرکت‌های توزیع را با چالشی جدید و غیر سنتی مواجه می‌کند و درواقع ماهیت غیر پیوسته خورشید به‌عنوان تأمین‌کننده اصلی انرژی ورودی این سیستم می‌باشد [۱۱-۱۰]. هرچه نیروگاه‌ها در مقیاس بزرگ‌تر طراحی گردند طبیعتاً قطع توان آن‌ها در زمان قطع تابش خورشید بسیار شدید خواهد بود به همین دلیل تبعات نامطلوب قطع یک نیروگاه خورشیدی مقیاس بزرگ به‌مراتب از قطع چندین نیروگاه کوچک مقیاس با توزیع پراکنده شدیدتر خواهد بود [۱۲].

دیگر مسئله‌ی مهم مربوط به تأثیر فنی اتصال ، تعداد تغییرات تپ چنجرهای ترانس ولتاژ است. ترانس‌های ولتاژ در شبکه‌های توزیع معمولی نصب می‌شوند تا ولتاژ گره را در یک محدودهٔ مشخص از طریق تغییرات تپ چنجر کنترل کنند. وقتی یک نیروگاه (فوتوولتائیک یا معمولی) به شبکهٔ توزیع متصل می‌شود تعداد تغییرات تپ چنجر می‌تواند به دلایل ذیل افزایش یا کاهش یابد: مود عملکرد نیروگاه معمول (بار پایه)، نوسان منبع انرژی اصلی (سرعت باد یا تابش خورشید) و خرابی‌های نیروگاه. تعداد بیش از حد تغییرات تپ چنجر می‌تواند موجب اتلاف طول عمر ترانس ولتاژ به دلیل حضور ناخالصی‌های ناشی از جرقه‌ها و ساییدگی در اثر حرکت بخش‌های مکانیکی شود [۱۳]. علاوه، آثار ترکیب نیروگاه‌های خورشیدی روی عملکرد تجهیزات کنترل وار/ ولت در حال حاضر به عنوان یک چالش بزرگ به دلیل نفوذ بالای نیروگاه‌های خورشیدی در شبکه‌های توزیع، در نظر گرفته می‌شوند [۱۴-۱۵]. بنابراین، بهتر است تعداد تغییرات تپ چنجر در تحلیل فنی اتصال نیروگاه در نظر گرفته شود. به منظور داشتن نتایج مفیدتر و واقع‌گرایانه‌تر، لازم است مدل پیش‌بین شامل عدم قطعیت‌های مربوط به تابش خورشیدی، دما و نوسانات بار باشد. تأمین برق مطمئن به شبکه توزیع از جنبه اقتصاد ملی مهم است [۱۶]. با افزایش تولید برق فتوولتائیک، عملیات شبکه توزیع، چالش برانگیزتر می شود [۱۷]. در مقایسه با منابع انرژی متداول، خروجی فتوولتائیک غیرقطعی است که این امر بر تأمین توان پایدار تأثیر می‌گذارد. علاوه بر آن، عملکرد جزیره‌ای با سیستم فتوولتائیک را می‌توان هنگامی انجام داد که

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

شبکه اصلی خارج از سرویس باشد و عملکرد جزیره‌ای صحیح‌تر، قابلیت اطمینان شبکه توزیع را بهبود می‌بخشد.

اتصال نیروگاه‌های خورشیدی به شبکه از دید عوامل کنترلی (شرکت‌های توزیع – دیسپاچینگ[1] ملی) و مشترکین قابلیت کنترلی را دارد. هنگامی که نیروگاه‌های غیر تجدید پذیر و تجدید پذیر در یک شبکه توزیع وجود داشته باشند امکان ایجاد توان برگشتی به طرف اولین پست توزیع یا فوق توزیع وجود دارد که عامل مورد بحث سبب بروز ولتاژ سطح بالا در نقطه مشترک اتصال نیروگاه به شبکه در هنگام کم باری شبکه می‌شود و لازم است شرکت‌های توزیع استانداردهای ویژه را در خصوص اتصال به شبکه نیروگاه‌های مورد بحث اتخاذ نماید [۱۸].

با اضافه شدن تولید پراکنده به شبکه توزیع، پیکربندی شبکه از حالت شعاعی تک سو تغذیه به چند سو تغذیه تغییر پیدا می‌کند. با این حال، دانستن حاشیه مورد نیاز برای حفظ هماهنگی حفاظت زمانی که یک منبع تولید پراکنده به سیستم قدرت اضافه می‌شود بسیار مهم است [۱۹].

در این بررسی مرور جامع از انواع مختلف DG ارائه کرده و چالش‌های تازه نوظهور ناشی از حضور DG در شبکه‌های الکتریکی را بررسی می‌کند. بر اساس نتایج حاصله از یک ابزار محاسباتی که با هدف تنظیم خودکار دستگاه‌های حفاظتی در شبکه‌های توزیع که برای به دست آوردن بهترین کاربرد فنی، عملکرد بهینه و مطالعات حفاظتی ساده‌تر ارائه شده است. برای خاموشی در شبکه اصلی، میکروگریدی[2] که یک شبکه تفکیک شده را تشکیل می‌دهد، لازم است فقط از بار محلی پشتیبانی کند. بنابراین، دقت ارزیابی قابلیت اطمینان تأمین توان در ریز شبکه بعد از قطع از سیستم، با حساسیت کافی شاخص‌های قابلیت اطمینان، مهم‌تر می‌شود [۲۱].

[1] Dispatching

[2] Microgrid

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

۲. بررسی مشخصات فنی و شبکه مورد مطالعه

شبکه موردمطالعه یک شبکه اختصاصی از خط ۲۰ کیلوولت فشار متوسط به ۴۰۰ ولت فشار ضعیف سه فاز منشعب شده از پست توزیع هوایی ۳۱۵ کاوا است. بر روی پست توزیع مذکور فیدر فشار ضعیف به ظرفیت ۴۵۰ آمپر موجود است که در قسمتی از طول شبکه فشار ضعیف نیروگاه خورشیدی ۵۰ کیلووات به شبکه اتصال یافته است. مختصات قرارگیری و موقعیت مکانی پست هوایی توزیع و شبکه فشار ضعیف در شکل ۱ آمده است.

شکل۱ : مختصات مکانی نیروگاه فتوولتائیک در شبکه توزیع مورد مطالعه

نیروگاه خورشیدی مجتمع ورزشی نیکیان ابهر شامل ۱۲۴ عدد پنل خورشیدی ۴۰۵ وات که در مجموع توان نامی نیروگاه برابر ۵۰۲۲۰ وات و اینورتر ۳ فاز متصل به شبکه مدل کاکو[1] ۵۰ کیلوواتی است.. منطقه مورد مطالعه (شکل ۲) یک منطقه فرهنگی و ورزشی بوده که مشخصات نیروگاه به شرح ذیل است. (جدول ۱و۲و۳)

[1] Kaco blueplanet 50.0 TL3

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

شکل ۲ : نمای کلی نیروگاه موردمطالعه

جدول شماره ۱: مشخصات فنی و توصیفی نیروگاه

مشخصه / پارامتر	واحد	مقدار
ظرفیت تجمعی پنل ها	وات	۵۰۲۲۰
ظرفیت نامی اینورتر	کیلووات	۵۰
ولتاژ خروجی نامی	ولت	۴۰۰
تعداد فاز	فاز	۳
فرکانس نامی	هرتز	۵۰
سازنده	-	کاکو آلمان

جدول ۲: مشخصات فنی ترانسفورماتور شبکه موردمطالعه

مشخصه / پارامتر	واحد	مقدار
ظرفیت	کاوا	۳۱۵
نسبت ولتاژ	کیلوولت	۰-۲۰/۴
کلاس تلفات	-	AB/
تغییرات ولتاژ (اولیه)	درصد	۲/۵
امپدانس اتصال کوتاه	درصد	۶
تلفات بی‌باری	وات	۶۲۵
تلفات بار کامل	وات	۳۸۵۰

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

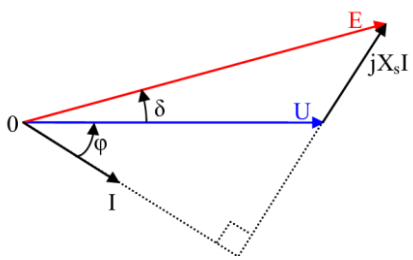
جدول ۳: مشخصات فنی خط فشار ضعیف

مشخصه / پارامتر	واحد	مقدار
طول خط	متر	۵۶
جنس هادی	-	آلومینیوم
سطح مقطع هادی	میلی‌متر مربع	۳*۳۵+۷۵
مقاومت اهمی	اهم	۰/۵

۳. مزایای فنی

اینورترها عنصر کلیدی برای اتصال سامانه‌های فتوولتائیک به شبکه است. عملکرد اصلی اینورترها، تبدیل توان DC توسط پنل‌های خورشیدی به توان AC سنکرون با شبکه می‌باشد. اصولاً برای تنظیمات اتصال اینورتر به شبکه و استانداردهای مربوط به آن باید دو دسته مسائل عملکرد و طراحی را مدن ظر قرارداد. در راستای توسعه تکنولوژی اینورترهای فتوولتائیک، می‌توان اینورترهای فتوولتائیک را در دو خانواده بزرگ دسته‌بندی کرد که عبارت‌اند از:

- H-bridge
- نقطه خنثی نگه داشته شده(NPC[1])



شکل ۳: دیاگرام ولتاژ شبکه (U) و زاویه بار (δ)

در شکل (۳)φ معرف زاویه توان بین ولتاژ شبکه و جریان خروجی اینورتر است و δ معرف زاویه بین ولتاژ شبکه و ولتاژ خروجی اینورتر است.

[1] Neutral point clamp

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

با توجه به دیاگرام برداری شکل ۳ می‌توان روابط ۱ تا ۵ را به دست آورد:

$$E = U + jX_S I \quad (۱)$$

$$E = |E|e^{j\delta} = |E|\cos\delta + J\ \sin\delta \quad (۲)$$

$$U = |U| < 0 \quad (۳)$$

$$I = I < \varphi = |I|\cos\varphi + j\sin\varphi \quad (۴)$$

$$jX_S I = -X_S|I|\sin\varphi + jX_S|I|\cos\varphi \quad (۵)$$

با توجه به روابط داریم:

$$|E|\sin\delta = X_S|I|\cos\varphi \quad (۶)$$

توان اکتیو (P) را می‌توان از رابطه‌های ۷ به دست آورد:

$$P = |U||I|\cos\varphi = \frac{|U||E|}{X_S}\sin\delta \quad (۷)$$

با توجه به روابط، کنترل توان با کنترل اندازه ولتاژ خروجی اینورتر $|E|$ و زاویه بین ولتاژ خروجی اینورتر و ولتاژ شبکه (δ) انجام می‌گیرد. به‌عبارت دیگر برای تزریق توان به شبکه، مقدار ولتاژ DC باید حد مطلوب برسد تا ولتاژ خروجی (E) بتواند مقداری برابر یا بزرگ‌تر از مقدار ولتاژ اوج شبکه داشته باشد. توان اکتیو و توان راکتیو به ترتیب با اندازه‌ی ولتاژ خروجی اینورتر $|E|$ و زاویه بار (δ) وابسته است. در نتیجه توان فعال تزریقی به شبکه می‌تواند با اختلاف فاز بین ولتاژ شبکه و ولتاژ خروجی اینورتر کنترل شود.

با توجه به مشخصات شبکه توزیع و نیروگاه خورشیدی مذکور، تغییرات حاصل از بهره‌برداری نیروگاه ۵۰ کیلوواتی در فیدر فشار ضعیف پست هوایی بر ۳ بخش تقسیم‌بندی می‌گردد. تحلیل انجام گردیده بر روی اطلاعات اندازه‌گیری شده از مبادی فیدر فشار متوسط و اطلاعات کنتور هوشمند (فهام) در خروجی نیروگاه به سمت قسمت فشار ضعیف ترانس ۳۱۵کاوا است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

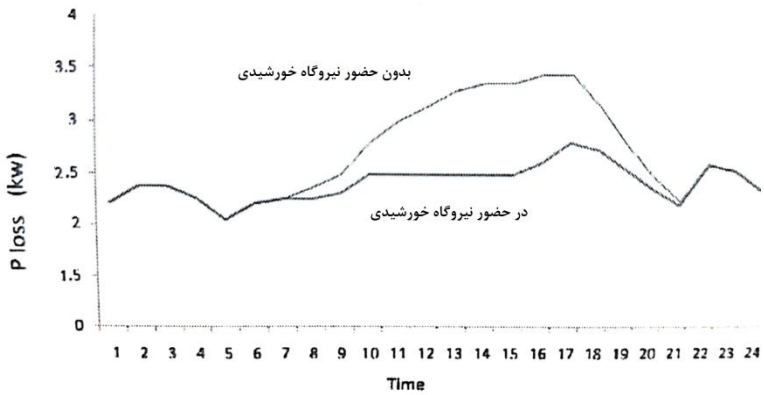
۱-۳. پروفیل بار فیدر

نمودار روزانه بار در فیدر فشار ضعیف در شکل ۴ نمایش داده شده است. با توجه به نوسانات دمایی خصوصاً در فصول گرم سال، بار مصرفی در نیمه ظهر به حداکثر مقدار خود می‌رسد. تفاوت بین مقدار بار در قله و مقدار بار در کمترین مقدار شبانه روز از ۵۲٪ متجاوز می گردد.

حال‌آنکه تفاوت بار حداکثری از بار متوسط فیدر در طول شبانه روز دارای اختلاف ۱۹٪ است. با توجه به اینکه میزان تلفات خط با مجذور جریان عبوری از هادی‌ها متناسب است، میزان تلفات خط فشار ضعیف در ساعات اوج به‌صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. تغییرات تلفات توان در هر دو حالت با حضور نیروگاه فتوولتائیک و بدون حضور نیروگاه فتوولتائیک در شکل ۶ نمایش داده شده است. بر مبنای این شکل، تفاوت بین دو منحنی میزان کاهش تلفات انرژی ناشی از بهره‌برداری از نیروگاه را نمایش می‌دهد. میزان کاهش تلفات ناشی از احداث نیروگاه مطابق نمودارهای شکل ۵ برابر ۲۵/۲ کیلووات در شبانه روز محاسبه شده است. این میزان کاهش تلفات در طول سال بالغ بر ۷۵۶۰ کیلووات خواهد بود.

شکل ۴: نمودار روزانه بار مصرفی فیدر

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]



شکل ۵: نمودار تلفات توان فیدر

۲-۳. پروفیل ولتاژ انتها خط

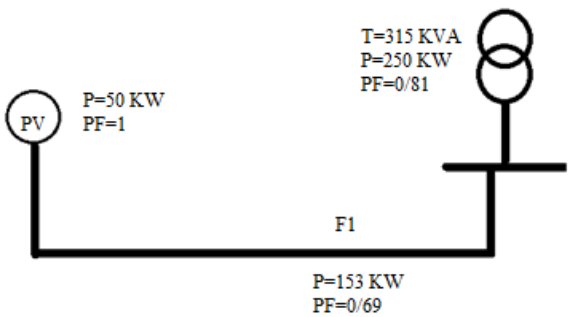
به دلیل متغیر بودن بار فیدر در طول شبانه‌روز، میزان ولتاژ در طول خط فشار ضعیف متغیر است. میزان افت ولتاژ هر قسمت از شبکه متناسب با فاصله آن نقطه تا پست توزیع و همچنین بار فیدر متفاوت خواهد بود. در شبکه توزیع مورد نظر، نمودار پروفیل ولتاژ (L-N) در نقطه اتصال نیروگاه در شکل ۶ نمایش داده شده است. در نقاط قله بار مصرفی فیدر (شکل ۴)، افت ولتاژ خط بیشترین مقدار را داشته و در نتیجه بیشترین کاهش ولتاژ در این ساعات ایجاد شده است. با تزریق تدریجی توان توسط نیروگاه خورشیدی به نقطه انتهایی فیدر فشار ضعیف، از بار فیدر به‌صورت تدریجی کاسته می‌شود. بیشترین توان تزریق شده از سمت نیروگاه در ظهر اتفاق افتاده و این امر باعث بهبود قابل توجه پروفیل ولتاژ بارهای انتهای خط می‌گردند. این موضوع به‌وضوح در شکل ۶ نمایان شده است.

شکل ۶: نمودار پروفیل ولتاژ شبکه در نقطه اتصال نیروگاه خورشیدی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

۳-۳. تغییرات ضریب توان شبکه

نیروگاه‌های خورشیدی متصل به شبکه قادر به تأمین توان و تزریق هم‌زمان توان اکتیو و راکتیو به شبکه می‌باشند. به دلیل اینکه پرداخت بهای انرژی تولیدی این‌گونه نیروگاه‌ها صرفاً به توان اکتیو محدود می‌گردد، جهت افزایش میزان تزریق توان به شبکه و دریافت بهای بیشتر، ضریب قدرت (PF) این نیروگاه در عدد ۱ تنظیم گردیده. در نتیجه نیروگاه صرفاً توان ~~اکتیو~~ فعال به شبکه تزریق نموده و توان ~~راکتیو~~ غیر فعال مورد نیاز از پست توزیع دریافت می‌گردد. گردش توان اکتیو و راکتیو در شبکه توزیع در زمان اوج تولید نیروگاه خورشیدی مذکور در شکل ۷ نمایش داده شده است.

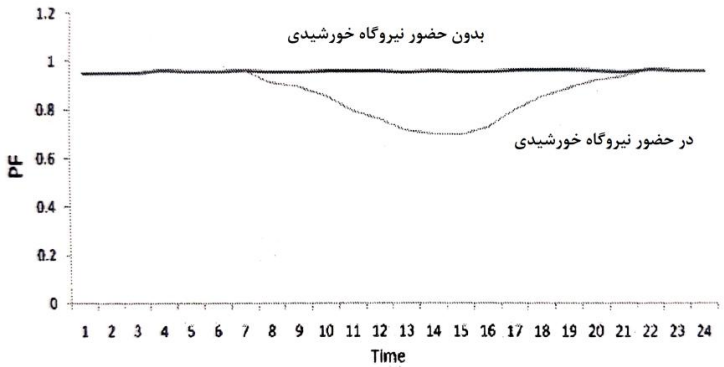


شکل ۷: گردش توان در شبکه توزیع با حضور نیروگاه خورشیدی

قبل از اتصال نیروگاه به فیدر، ضریب توان برابر ۰/۹۵ بوده است. با توجه به ماهیت یکسان بار مورد تغذیه، ضریب توان کل شبکه توزیع نیز به همان مقدار اندازه‌گیری شده است. در زمان تولید توان حداکثری توسط نیروگاه، ضریب قدرت فیدر تا ۰/۶۹ نیز افت کرده است که همین موضوع نهایتاً منجر به کاهش ضریب قدرت پست هوایی از ۰/۹۵ به ۰/۸۱ شده است. افت ضریب قدرت شبکه قطعاً باعث خواهد شد حداکثر منافع ناشی از بهره‌برداری نیروگاه فتوولتائیک حاصل نگردد. شکل ۹ تغییرات شبانه‌روزی ضریب قدرت فیدر در حضور و بدون

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

حضور نیروگاه خورشیدی را نمایش می‌دهد. افت ضریب قدرت فیدر در حضور نیروگاه مشهود است.



شکل ۸: نمودار روزانه ضریب قدرت فیدر فشار ضعیف

جهت حصول حداکثری منافع بهره‌برداری از سیستم فتوولتائیک، ارتقا ضریب توان شبکه توزیع ضروری است. در صورت عدم اصلاح ضریب توان شبکه در حین بهره‌برداری از نیروگاه صرفاً مؤلفه توان اکتیو در طول شبکه کاهش یافته و مؤلفه توان راکتیو همچنین از سمت پست به محل مصرف جاری خواهد بود. برای رفع این نقصان، نصب خازن اتوماتیک در محل اتصال نیروگاه ضروری می‌باشد. این خازن‌ها به‌گونه‌ای تنظیم می‌گردند که بتوانند ظرفیت خود را متناظر با ظرفیت تولید لحظه‌ای نیروگاه تغییر دهند. ظرفیت خازن مورد نیاز جهت حفظ ضریب قدرت نیروگاه در مقدار ۰/۹۰ برای سطح ولتاژ ۴۰۰-۳۸۰ ولت از رابطه ۸ تعیین می‌گردد.

$$C = \frac{0}{00963} * P \qquad (۸)$$

که C ظرفیت بانک خازنی برحسب میکرو فاراد و P توان لحظه‌ای نیروگاه خورشیدی برحسب وات است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

۴-۳. مزایای اقتصادی

در کنار مزایای فنی متعدد حاصل از احداث نیروگاه‌های خورشیدی، منافع قابل‌توجه اقتصادی ناشی از کاهش هزینه سرمایه‌گذاری در بخش توزیع نیرو به دلیل احداث این نیروگاه‌ها در شبکه توزیع حاصل می‌گردد [۱۱].

میزان تأسیسات توزیع از قبیل خط فشار متوسط، خط فشار ضعیف و پست توزیع، هزینه‌های احداث هر واحد تأسیسات بر اساس جدول ۴ و در جهت تأمین هر کیلووات برق مورد نیاز مشترکین برابر جدول ۵ است.

جدول ۴: هزینه‌های متناظر با احداث تأسیسات توزیع نیرو برق

شرح عملیات	نماد	واحد	مقدار
خط فشار متوسط	P_{HV}	هزار ریال به ازای هر متر	۹۰۰
خط فشار ضعیف	P_{LV}	هزار ریال به ازای هر متر	۱۲۰۰
پست توزیع	P_{KVA}	هزار ریال به ازای هر کاوا	۴۰۰۰

جدول ۵: تأسیسات جهت تأمین هر کیلووات برق موردنیاز مشترکین

شرح عملیات	نماد	واحد	مقدار
خط فشار متوسط	N_{HV}	متر به ازای هر کیلووات	۹
خط فشار ضعیف	N_{LV}	متر به ازای هر کیلووات	۱۴/۵
پست توزیع	KVA	کاوا به ازای هر کیلووات	۲/۵

بر اساس مقادیر فوق، میزان صرفه‌جویی ناشی از عدم احداث خطوط شبکه توزیع به دلیل بهره‌برداری از نیروگاه‌های خورشیدی که به‌صورت جزیره‌ای در سطح شبکه توزیع قرار دارند از رابطه ریز بصورت:

$$E = PLV * NLV + PHV * NHV + PKVA * KVA \qquad (۹)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

که در این رابطه E برابر با میزان نرخ صرفه‌جویی است.

بر اساس رابطه فوق و جایگذاری اعداد نرخ صرفه‌جویی شده و عدم توسعه پست‌ها برابر با ۳۵۵۰۰ هزار ریال به ازای هر کیلووات محاسبه شده است.

با دقت در منحنی بار شبکه و اختلاف قابل توجه مقادیر اوج و متوسط بار شبکه در ۲۴ ساعت شبانه روز، همواره مدیریت شبکه با چالش اساسی روبرو است. به همین دلیل نیروگاه‌های موجود شبکه در ساعت اوج دچار اضافه بار می‌شوند و در برخی ساعات با ظرفیت بسیار کمتر از ظرفیت نامی خود تولید می‌کنند که همین امر باعث افزایش هزینه‌های تولید، هزینه‌های سرمایه‌گذاری جهت احداث نیروگاه‌های جدید می‌شود.

مدیریت مصرف در کنار راه‌کارهای خود جهت حذف قله‌ها و تسطیح کردن منحنی بار شبکه توزیع، استفاده از نیروگاه‌هایی که بتواند در ساعت اوج بار در شبکه بوده و در ساعات غیر اوج از مدار خارج گردند راهکار مناسب، مطمئن و مقرون‌به‌صرفه اقتصادی است. نیروگاه‌های فتوولتائیک به دلیل ماهیتی که دارند صرفاً تولید برق را در روز و مخصوصاً در اوج مصرف شبکه انجام می‌دهند و با غروب خورشید این تولید متوقف می‌شود. استفاده از نیروگاه فتوولتائیک متصل به شبکه (کمتر از ۲۰۰ کیلووات) که اتصال آن‌ها به شبکه توزیع فشار ضعیف صورت می‌پذیرد با داشتن تأمین مزایای فوق، مواردی از قبیل تسطیح منحنی بار فیدر، بهبود مشخصه‌های کیفیت توان مخصوصاً پروفیل ولتاژ باز در ابتدا و انتها،کاهش تلفات اهمی را به همراه دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک نیروگاه ۵۰ کیلووات فتوولتائیک متصل به شبکه فشار ضعیف (۴۰۰ ولت) موردبررسی قرار گرفت و نتایج تحلیل زیر حاصل شد:

- بهبود پروفیل ولتاژ تا میزان ۴/۲ درصد

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

- کاهش جریان شبکه به میزان ۲۴ درصد
- هم‌چنین کاهش تلفات توان در ساعت اوج مصرف تا میزان ۳۷ درصد به ثبت رسید. این میزان کاهش تلفات همواره کاهش تلفات انرژی تا سقف ۲۵/۲ کیلووات در شبانه‌روز و در طول سال ۷۵۶۰ کیلووات را به همراه دارد.
- افت ضریب قدرت شبکه پس از بهره‌برداری از نیروگاه‌های فتوولتائیک یکی از معایب بهره‌برداری از آن‌ها است به دلیل اینکه توان تزریقی به شبکه توزیع صرفاً توان اکتیو بوده و توان راکتیو مورد نیاز از شبکه تأمین می‌گردد.
- نصب خازن اتوماتیک در نقطه اتصال نیروگاه به شبکه توزیع جهت رفع این نقصان توصیه می‌شود.
- با توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک در شبکه فشار ضعیف به دلیل هم‌مکانی محل مصرف و تولید و بیشترین تولید نیروگاه‌های فتوولتائیک در ساعات ۱۵-۱۱ در زمان اوج بار شبکه به وقوع می‌پیوندد به همان میزان شرکت‌های توزیع می‌توانند از ایجاد تأسیسات تولید و انتقال خود بکاهند.
- با احداث هر کیلووات نیروگاه فتوولتائیک در سطوح فشار ضعیف شبکه توزیع، ۳۵۵۰۰ هزار ریال در سرمایه‌گذاری احداث خطوط و تأسیسات انتقالی توزیع کاهش پیدا می‌کند که در مقیاس‌های بزرگ‌تر این صرفه‌جویی نمایان‌تر و محسوس‌تر می‌شود.

۵. منابع

1. **Aswathan arayana, T. Harikrishnan, K, M. Thayy ib Sahini (2010),**Green Energy: Technology, Economies.
2. **John Twidell, tony weir. (2001),** Renewable Energy Resources. 3rd Edition.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

3. **F.J. Ruiz-Rodriguez, J.C. Hernández, F. Jurado(2015),** Voltage unbalance assessmentin secondary radial distribution networks with single-phase photovoltaic sys-tems, Int. J. Electr. Power Energy Syst. 64 646–654.
4. **F.J. Ruiz-Rodriguez, J.C. Hernandez, F. Jurado(2015),** Harmonic modelling of PV sys-tems for probabilistic harmonic load flow studies, Int. J. Circuit Theory Appl. 43(11) 1541–1565.
5. **J.C. Hernández, M.J. Ortega, A. Medina(2014),** Statistical characterisation of harmoniccurrent emission for large photovoltaic plants, Int. Trans. Electr. Energy Syst.24 (8) 1134–1150.
6. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Procedimentos de Distribuic¸ ãode Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Quali-dade da Energia Elétrica, ANEEL, 2018.
7. **EN 5016(1999),** Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public DistributionSystems,.
8. **M.Karimi, H.Mokhlis, K.Naidu, S.Uddin, A.H.A.Bakar (2016),** " Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network – A review" Renewableand Sustainable Energy Reviews53pp 594-65.
9. **S.J.Lewis (2011)**, "Analysis and management of the impacts of a high penetration of photovoltaic systems in an electricity distribution network", 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 13-16 Nov
10. **Davoud Mostafa Tobnaghi (2016),** "A review on Impacts of Grid-connected PV system on distribution networks", International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol:10,No1,pp 137-142.
11. **Hamidreza Sadeghian, Mir Hadi Athari, Zhifang Wang (2017)**, " Optimized Solar Photovoltaic Generation in a Real Local Distribution Network", IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 23-26 April
12. **Jukka V. Paatero and Peter D. Lund(2020),** "Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity Distribution Networks", Renewable Energy Vol. 33:2,pp 216-234.
13. **J. Faiz, B. Siahkolah(2012),** Electronic Tap-changer for Distribution Transformers,Springer-Verlag, New York.
14. **F. Katiraei, J.R. Agüero(2011, May/June),** Solar PV integration challenges, IEEE Power Energy Mag. 62–71.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]

15. F. Katiraei, C. Sun, B. Enayati **(2015, March/April)**, No inverter left behind: protection, controls,and testing for high penetrations of PV inverters on distribution systems, IEEEPower Energy Mag43–49.
16. **F. Wang, H. Xu, T. Xu, K. Li, M. Sha_e-Khah, and J. P. Catalão (2017),** "The values of market-based demand response on improving power system reliability under extreme circumstances", Appl. Energy, vol. 193,pp. 220_231, May.
17. **S. Su et al (2018),** "Research on an electric vehicle owner-friendly charging strategy using photovoltaic generation at of_ce sites in major Chinese cities", Energies, vol. 11, no. 2, p. 421, Feb.
18. standard EN 50160
19. **Morteza Nojavan, H. S., Arash Mahari, Kazem Zare. (2014).** Optimization of Fuse-Recloser Coordination and Dispersed Generation Capacity in Distribution Systems. Majlesi Journal of Electrical Engineering**.**
20. **Razavi, S.-E., Rahimi, E., Javadi, M. S., Nezhad, A. E., Lotfi, M., Shafie-khah, M & ,.Catalão, J. P. S. (2019).** Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 105, 157-167.
21. **Comassetto, L., Bernardon, D. P., Canha, L. N., & Abaide, A. R. (2008).** Automatic coordination of protection devices in distribution system. Electric Power Systems Research, 78(7), 1210-1216

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-08-10]