تعیین مکان، اندازه و بهره‌برداری بهینه باتری و فیلتر پسیو برای غلبه بر مشکلات اضافه ولتاژ و هارمونیک در یک شبکه توزیع برق با ضریب نفوذ بالای سامانه‌های فتوولتاییک

محمد رسول جان‌نثار[۱]، دکتری، علیرضا صدیقی[۱]، دانشیار، مهدی ثواقبی[۲]، دانشیار، فاطمه اعلم[۳]، کارشناسی ارشد، فریده بهداد[۳]، کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه یزد - یزد - ایران
mohammadrasol@gmail.com, sedighi@yazd.ac.ir
2- Electrical Engineering Section, Mads Clausen Institute, University of Southern Denmark, Odense, Denmark
mesa@mci.sdu.dk
۳- شرکت توزیع نیروی برق - یزد - ایران
faridebehdad@gmail.com, aalam.f@gmail.com

چکیده: سامانه‌های فتوولتاییک با وجود مزایای فراوان ممکن است آثار سوئی همانند مسائل کیفیت توان (افزایش ولتاژ و هارمونیک)، افزایش سطح اتصال کوتاه، مسائل حفاظت و گذرا برای شبکه به همراه داشته باشند. دسته‌ای از این آثار، ناشی از ضریب نفوذ بالای این سامانه‌ها است که شبکه را با پدیده افزایش ولتاژ و هارمونیک مواجه می‌سازد. در این مقاله مکان، اندازه و بهره‌برداری بهینه باتری و فیلتر پسیو به‌صورت جداگانه و هم‌زمان، به‌منظور ارائه اقدامات عملی برای غلبه بر مشکلات اضافه ولتاژ و هارمونیک تعیین شده است. در تابع هدف اقتصادی مسئله، هزینه ثابت و بهره‌برداری باتری و فیلتر پسیو در نظر گرفته شده و قیود به‌صورت محدود شدن هارمونیک کل ولتاژ و ولتاژ مؤثر باس‌های شبکه در بازه استاندارد تعریف گردیده‌اند. با در نظر گرفتن سود ناشی از خرید و فروش انرژی و کاهش تلفات شبکه در تابع هدف، این نتیجه حاصل شده است که استفاده از فیلتر به‌تنهایی، دارای کمترین هزینه به میزان ۷۳۶ دلار است (اما منجر به فراتر رفتن اندازه ولتاژ مؤثر از مقدار مجاز ۵٪ می‌شود). همچنین استفاده از باتری و فیلتر به‌صورت هم‌زمان، دارای بیشترین کاهش تلفات به میزان ۴/۱ *kWh* است که میزان هارمونیک کل ولتاژ و ولتاژ مؤثر باس‌ها نیز در محدوده مجاز ۵٪ قرار می‌گیرند. همچنین کابل‌ها، خطوط و ترانسفورماتور شبکه به‌صورت وابسته به فرکانس مدلسازی شده‌اند. شبکه مورد مطالعه، یک فیدر فشار ضعیف واقعی شامل دو سامانه فتوولتاییک می‌باشد که در شبیه‌سازی ضریب نفوذ آنها افزایش داده شده است. شبیه‌سازی‌ها، توسط نرم‌افزارهای *DIgSILENT* و *MATLAB* و با استفاده از ارتباط آنها به هم انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: فتوولتاییک، ضریب نفوذ بالا، اضافه ولتاژ و هارمونیک، بهینه‌سازی، باتری و فیلتر پسیو، تلفات و مزایای اقتصادی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۵/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول: علیرضا صدیقی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - یزد - بلوار دانشگاه - دانشگاه یزد - دانشکده مهندسی برق.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]

۱- مقدمه

با پیشرفت فناوری و صنایع و همچنین رشد جمعیت نیاز به انرژی الکتریکی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در حال حاضر بیشتر انرژی الکتریکی تولیدی از طریق تبدیل انرژی گرمایی ذخیره شده در سوخت‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ و گاز طبیعی حاصل می‌شود. امروزه گرایش به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر با توجه به مزایایی همچون کاهش تلفات شبکه، افزایش قابلیت اطمینان شبکه، آلایندگی سوخت‌های فسیلی، ملاحظات زیست‌محیطی و غیره افزایش یافته است [۱]. برای نیل به این هدف، اضافه شدن منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر به شبکه یکی از مهم‌ترین اقدامات می‌باشد. در بین فناوری‌های موجود منابع تولید پراکنده، سامانه‌های خورشیدی از نوع فتوولتاییک یکی از متداول‌ترین فناوری‌ها می‌باشد. با توجه به در دسترس بودن تابش خورشید در بیشتر زمان سال در ایران، استفاده از سامانه‌های فتوولتاییک توجیه زیادی پیدا می‌نماید، به‌طوری‌که امروزه کاربرد این سامانه‌ها به‌سرعت در حال افزایش است [۲].

در حال حاضر با توجه به مزایای فنی و اقتصادی این منابع و از طرفی واقعی شدن قیمت انرژی در آینده و اختصاص مشوق‌های دولتی [۳]، درخواست‌ها برای نصب این منابع رو به افزایش می‌باشد. با توجه به گسترش استفاده از سامانه‌های فتوولتاییک با نرخ تولید توان کمتر از $۱۰kW$ در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف ($۴۰۰V$)، در این مقاله هدف ارزیابی تأثیر این سامانه‌ها بر شبکه‌های توزیع و ارائه راهکارهایی برای رفع مشکلات ناشی از آنهاست.

سامانه‌های خورشیدی هم‌زمان با مزایای فراوانی که دارند، آثار سوئی همانند مسائل کیفیت توان (افزایش ولتاژ و هارمونیک)، افزایش سطح اتصال کوتاه، حفاظت و پایداری گذرا را نیز به همراه دارند [۴].

به‌منظور غلبه بر مشکلات اضافه ولتاژ راه‌حل‌های زیادی پیشنهاد شده است که می‌توان آنها را به دو دسته اقدامات سنتی (افزایش ظرفیت تجهیزات شبکه، ترانسفورماتورهای با قابلیت تغییر تپ زیر بار و خازن‌های ثابت و یا متغیر) و اقدامات جدید (کنترل توان راکتیو با استفاده از اینورتر، باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی، کنترل کننده استاتیک بار[1]، کنترل هماهنگ شده بین تجهیزات شبکه و اینورتر سامانه‌های فتوولتاییک و غیره) تقسیم‌بندی نمود [۱].

با افزایش ضریب نفوذ سامانه‌های فتوولتاییک، در ساعات اوج تولید این سامانه‌ها، احتمال بیشتر شدن تولید از مصرف وجود دارد. این پدیده منجر به برگشت توان و در نتیجه افزایش تلفات و ولتاژ می‌شود. به‌منظور غلبه بر این چالش‌ها، استفاده از روش آنالیز حساسیت ولتاژ و باتری‌های ذخیره‌ساز انرژیِ قابل کنترل کاربرد فراوانی دارند [۵]. همچنین استفاده از خودروهای برقی یکی دیگر از روش‌های مقابله با این چالش‌ها می‌باشد [۶]. در [۷] یک روش مناسب جهت بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع فعال در حضور منابع تولید توان بادی، باتری‌ها و خودروهای برقی ارائه شده است. در [۸] به‌منظور محاسبه اندازه و مکان مناسب باتری، مزیت‌هایی نظیر خرید و فروش انرژی، کاهش پیک و تلفات، تعویق توسعه شبکه و کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است. در تحقیق دیگری، با توجه به تعریف منحنی توان باقی‌مانده و با فرض تولید و مصرف محلی و غیرقابل‌پیش‌بینی بودن خروجی سامانه‌های فتوولتاییک، الگوریتم جایابی بهینه ذخیره‌ساز ارائه شده است [۹]. در [۱۰] روشی ارائه شده است که با مدیریت بهینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی پارامترهای الکتریکی شبکه شامل تلفات و پروفیل ولتاژ بهبود یابند. در [۱۱] الگوریتم محاسبه اندازه، مکان و نحوه شارژ و دشارژ باتری با در نظر گرفتن تلفات ارائه شده است. در مقاله دیگری از باتری ذخیره‌ساز انرژی به همراه کنترل‌کننده پله‌ای ولتاژ استفاده شده که علاوه بر کنترل ولتاژ اهدافی همچون کاهش پیک شبکه، کاهش استرس‌های ترانسفورماتورها و کاهش تلفات را هم در بر می‌گیرد [۱۲]. در [۱۳] با یک برنامه‌ریزی بلندمدت، نوع، مکان نصب، ظرفیت و توان نامی باتری-ها با هدف مقایسه انواع باتری‌ها تعیین شده و قیودی همچون سطح ولتاژ در نظر گرفته شده است. در [۱۴] روش بهینه استفاده از باتری‌ها برای کم کردن تلفات، قابلیت دنبال کردن بار و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه تعیین شده است. استفاده مناسب از باتری ذخیره‌ساز و آنالیز هزینه برای کنترل ولتاژ و کاهش پیک شبکه همراه با آنالیز اقتصادی در [۱۵] انجام شده است. در [۱۶] یک نقطه باز نرم[2] در شبکه توزیع، برای غلبه بر مشکلات اضافه ولتاژ سامانه‌های فتوولتاییک به کمک بهره‌برداری بهینه از باتری‌ها طراحی شده است. در مطالعه دیگری به منظور ارائه استراتژی بهینه مدیریت انرژی در شبکه توزیع هوشمند، مسئله بهینه‌سازی چند هدفه تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی بهینه‌سازی شده است [۱۷]. یک آنالیز مناسب از باتری، می‌تواند منجر به افزایش سود مصرف‌کننده و بهره‌بردار شبکه شود [۱۸]. در [۱۹] نویسندگان، مکان، اندازه و نحوه شارژ و دشارژ بهینه باتری را برای غلبه بر مشکلات اضافه ولتاژ محاسبه کرده‌اند ولی بهبود هارمونیک ولتاژ را مدنظر قرار نداده‌اند.

به‌منظور غلبه بر مشکلات هارمونیکی سامانه‌های فتوولتاییک، یکی از راه‌حل‌های موجود استفاده از فیلتر می‌باشد [۲۰]. فیلترها به دو دسته پسیو و اکتیو تقسیم شده که فیلترهای پسیو خود از سه گروه فیلتر سری، موازی و سری موازی تشکیل می‌شوند. در فیلتر سری و موازی به‌وسیله ایجاد یک امپدانس به ترتیب بالا و کم، بعضی از مؤلفه‌های هارمونیکی حذف می‌شوند. فیلترهای اکتیو به‌صورت منبع تزریق جریان در شبکه قرار می‌گیرند که با کنترل‌های خاص منجر به بهبود هارمونیک شبکه می‌شوند. فیلترهای پسیو به دلیل قیمت کم و سادگی، کاربرد زیادی دارند که در این بین، فیلترهای شکافی میزان شده تکی[3] بسیار مشهورتر، کارآمدتر و پرکاربردتر هستند [۲۱,۲۲]. در [۲۵-۲۳] از روش‌های چندهدفه برای کاهش هزینه نصب فیلتر پسیو، کاهش هارمونیک کل ولتاژ و جریان استفاده شده است. در [۲۶] با

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]

استفاده از تابع هدف‌های گوناگون برنامه‌ریزی فیلتر انجام شده است. در [۲۷] کاهش هزینه‌ها، تلفات شبکه و میزان هارمونیک برای برنامه‌ریزی بهینه فیلتر لحاظ شده است. در [۲۸] برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید پراکنده به مقاله [۲۷] اضافه شده است که به‌صورت هم‌زمان انجام شده‌اند. در [۲۹] بهینه‌سازی کمترین مقدار ممکن فیلتر شکافی، با در نظر گرفتن افزایش ضریب توان و کاهش تلفات شبکه انجام شده اما قیمت فیلتر لحاظ نشده است. در یک مطالعه دیگر برنامه‌ریزی هم‌زمان فیلتر و خازن برای کاهش هزینه، تلفات، هارمونیک و انحراف ولتاژ محاسبه شده است [۳۰]. در [۳۱] برنامه‌ریزی چندهدفه طراحی انواع فیلترهای پسیو انجام شده است.

در گروهی دیگر از مقالات، از باتری در سمت *DC* فیلتر اکتیو برای بهبود کیفیت توان استفاده شده است. به‌عنوان نمونه در [۳۲] از فیلتر اکتیو برای کنترل خروجی باتری، غلبه بر مشکلات هارمونیکی و عدم تعادل در حضور بارهای غیرخطی و منابع تجدیدپذیر استفاده شده است. همچنین در [۳۳] از باتری و فیلتر اکتیو، به‌منظور کاهش نوسانات *DC* هارمونیک *AC* استفاده شده است. به‌علاوه در [۳۴] نیز با استفاده روش کنترلی مناسب، نوسانات توربین بادی و هارمونیک شبکه کاهش داده شده است. به طریق مشابه در [۳۵] از فیلتر انرژی برای کنترل نوسانات، دنبال کردن و پردازش توان استفاده شده است.

با توجه به مقالات مرور شده و پوشش داده نشدن برنامه‌ریزی و بهره‌برداری هم‌زمان از باتری و فیلتر، نوآوری‌های مقاله به این صورت است که برنامه‌ریزی (مکان و اندازه) و بهره‌برداری بهینه باتری و فیلتر پسیو برای غلبه بر مشکلات اضافه ولتاژ و هارمونیک شبکه به‌صورت هم‌زمان، با استفاده از تابع هدف اقتصادی انجام شده است. محدوده اضافه ولتاژ در تابع هدف اقتصادی، تجارت انرژی حاصل شده از باتری و کاهش تلفات به‌عنوان سود و قیمت باتری و فیلتر پسیو به‌عنوان هزینه، در نظر گرفته شده‌اند. همچنین کابل‌ها، خطوط و ترانسفورماتور شبکه به‌صورت وابسته به فرکانس مدلسازی شده‌اند تا دقت محاسبات افزایش یابد. بعلاوه در مدلسازی هارمونیکی بارها و سامانه‌های فتوولتاییک، علاوه بر دامنه جریان هارمونیک، زاویه فاز هارمونیک هم در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن زاویه هارمونیک ممکن است هارمونیک جریان بارها و سامانه‌های فتوولتاییک هم دیگر را حذف کنند که منجر به کمتر شدن هارمونیک کل ولتاژ شبکه می‌شود. همچنین با استفاده از ثبات داده‌های شبکه برداشت شده و شبکه مورد مطالعه نیز یک شبکه واقعی توزیع است. شبیه‌سازی‌ها، توسط نرم‌افزارهای *DIgSILENT* و *MATLAB* و با ارتباط آنها به هم انجام شده است.

در ادامه در بخش دوم مدلسازی سامانه‌های فتوولتاییک، بارها، باتری، فیلتر و شبکه مورد مطالعه بیان می‌شود. در بخش سوم به معرفی تابع هدف و الگوریتم پرداخته شده است. در بخش چهارم نتایج مسئله شرح داده می‌شود.

۲- مدلسازی‌ها و شبکه مورد مطالعه

در این بخش، ابتدا مدلسازی انجام شده برای هارمونیک سامانه‌های فتوولتاییک، بارها و باتری و همچنین روابط مربوط به توان اکتیو و راکتیو و قیود باتری و فیلتر شرح داده شده‌اند. در ادامه شبکه مورد مطالعه، بررسی خواهد شد. لازم به ذکر است مدلسازی‌های مقاله در حالت قطعی (و نه دارای عدم قطعیت) انجام شده است.

۲-۱- مدلسازی هارمونیکی سامانه‌های فتوولتاییک، بار و باتری

مطالعات هارمونیکی را می‌توان در حوزه فرکانس یا حوزه زمان پس از انجام تجزیه و تحلیل فوریه انجام داد. در *DIgSILENT* مطالعات هارمونیکی در حوزه فرکانس و بر اساس استاندارد *IEC 61000-3-6* انجام می‌شود. در مطالعات هارمونیکی *DIgSILENT*، شاخص‌های هارمونیک واقعی مربوط به اعوجاج ولتاژ یا جریان و تلفات هارمونیک ناشی از منابع هارمونیک (معمولاً بارهای غیرخطی همانند مبدل‌های فعلی الکترونیک) محاسبه می‌شود. منابع هارمونیک را می‌توان با طیف جریان هارمونیک یا طیف ولتاژ هارمونیکی تعریف کرد. در مطالعات هارمونیک *DIgSILENT*، تجزیه و تحلیل حالت دائم شبکه در هر فرکانس که در آن منابع هارمونیکی تعریف شده است، انجام می‌شود.

۲-۱-۱- سامانه‌های فتوولتاییک

سامانه‌های فتوولتاییک مورد استفاده در این مقاله، $5kW$ و تکفاز بوده که با توجه به اطلاعات ثبت شده از آنها دارای ضریب توان ۰/۹۹ می‌باشند. ماژول‌های فتوولتاییک مورد مطالعه که با سری و موازی کردن آنها پنل‌ها و آرایه‌های فتوولتاییک طراحی می‌شود، دارای توان نامی ۱۵۰ وات، ولتاژ نامی ۱۸/۶ ولت، جریان نامی ۸/۰۸ آمپر، ولتاژ مدار باز ۲۲/۸ ولت، جریان اتصال کوتاه ۸/۶۳ آمپر و ولتاژ حداکثر سیستم ۶۰۰ ولت می‌باشند. لازم به ذکر است که رنج توان، ولتاژ و جریان نامی در شرایط دمایی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و چگالی توان ۱۰۰۰ وات بر مترمربع حاصل می‌شود.

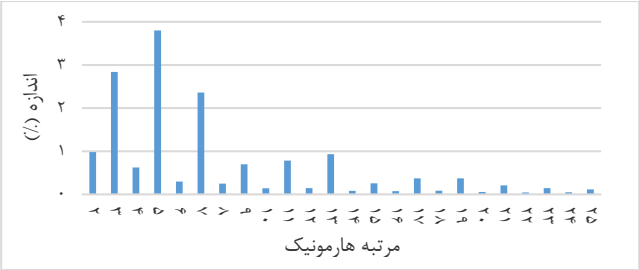
تحقیقات گذشته نشان می‌دهد عموماً از دو روش برای مدسازی هارمونیکی استفاده می‌شود که شامل مدلسازی به‌صورت منبع جریان و منبع ولتاژ می‌باشد [۳۶]. با توجه به [۳۷] در این مقاله از روش منبع جریان استفاده شده است.

برای این منظور، اطلاعات جریان خروجی سامانه‌های فتوولتاییک در بازه زمانی یک هفته ثبت و با توجه به پردازش آنها دامنه و فاز هارمونیک‌ها و بازه تغییرات آنها تعیین گردیده‌اند. شکل (۱) میانگین دامنه و فاز مؤلفه‌های جریان سامانه‌های فتوولتاییک را نشان می‌دهد.

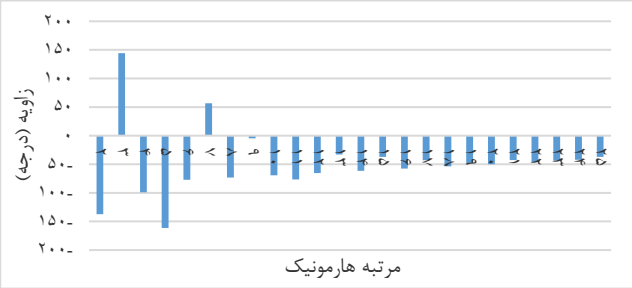
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]



(الف)



(ب)

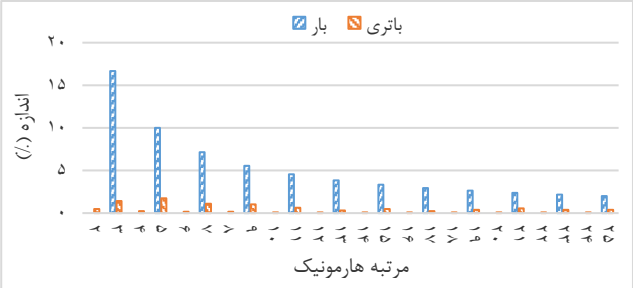
شکل (۱): (الف) میانگین اندازه و (ب) زاویه هارمونیک جریان سامانه‌های فتوولتاییک

علیرغم اینکه در اکثر مطالعات هارمونیکی زاویه مؤلفه‌های هارمونیکی در نظر گرفته نمی‌شود؛ در این مقاله به‌منظور واقعی‌تر شدن نتایج زاویه هارمونیک‌ها هم لحاظ شده است.

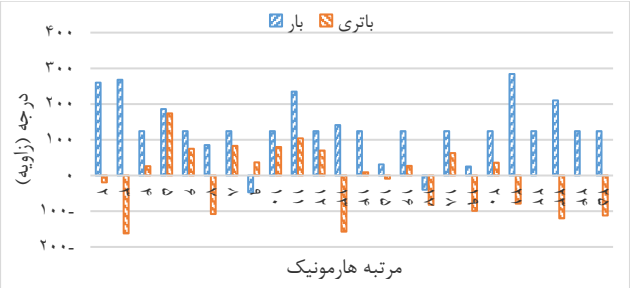
از آنجا که هارمونیک‌های جریان سامانه‌های فتوولتاییک به توان تولیدی و هارمونیک ولتاژ آن بستگی دارند؛ به‌منظور افزایش دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده و با توجه به اطلاعات هارمونیکی ثبت شده، هارمونیک‌های جریان تولیدی سامانه‌های فتوولتاییک با استفاده از روش تبدیل معکوس[۴] [۳۸] به‌صورت اتفاقی تولید شده‌اند.

۲-۱-۲- بارها

بارها در این مطالعه به‌صورت تکفاز و نامتعادل به فازها متصل شده است. شکل (۲) میانگین اندازه و زاویه هارمونیک بار را نشان می‌دهد [۳۹]. به‌منظور مدلسازی هارمونیکی بارها، از تابع چگالی احتمال نرمال استفاده شده، به این صورت که برای دامنه و زاویه هارمونیک، میانگین تابع نرمال برابر مقادیر نشان داده شده در شکل (۲) و انحراف معیار برابر با ۲۰٪ در نظر گرفته شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۲): (الف) میانگین اندازه و (ب) زاویه هارمونیک جریان بار و باتری

۲-۱-۳- باتری

باتری به دلیل داشتن ادوات الکترونیک قدرت، هارمونیک جریان در شبکه تولید می‌کند. شکل (۲) میانگین مؤلفه‌های هارمونیک جریان باتری را با توجه به برداشت اطلاعاتی که از یک اینورتر تکفاز انجام شده، نشان می‌دهد. مدلسازی هارمونیکی باتری مشابه بارها است.

۲-۲- مدلسازی باتری

یکی از کاربردهای باتری‌ها در شبکه برق، ذخیره مازاد انرژی و جبران کمبود انرژی در زمان‌های خاص می‌باشد. پارامترهای مهم در این زمینه، میزان حداقل شارژ باقیمانده در باتری (عمق دشارژ)، حداکثر تعداد دفعات شارژ و دشارژ و دشارژ خودبه‌خودی باتری است. با توجه به عوامل فوق، تحقیقات نشان می‌دهد باتری وانادیوم ریداکس برای استفاده در این کاربرد انتخاب مناسبی می‌باشد؛ زیرا در بین باتری‌های متداول دارای کمترین میزان دشارژ خود به خودی و عمق دشارژ می‌باشد؛ به‌طوری‌که می‌تواند تا ۱۰۰ درصد دشارژ شود و از نظر تعداد دفعات شارژ و دشارژ هم مناسب می‌باشد [۴۰].

در مدلسازی باتری، باید میزان توان حداقل و حداکثر شارژ و دشارژ باتری و همچنین حداکثر ظرفیت ذخیره انرژی باتری مشخص شود. این مشخصه‌ها با استفاده از روابط (۱) مدل شده است.

$$\begin{aligned} &0 \le P_i^{E,d} \le P_{max} \quad \forall i \\ &0 \le P_i^{E,c} \le P_{max} \quad \forall i \\ &\left(\sum_{i=1}^{24} P_i^{E,d}\right) \le C_{max} \end{aligned} \qquad (۱)$$

در این رابطه $P_i^{E,c}$ و $P_i^{E,d}$ به ترتیب توان باتری در دوره یک ساعت iام شارژ و دشارژ، P_{max} حداکثر توان و C_{max} حداکثر ظرفیت انرژی بهینه باتری است.

جهت عملکرد بهینه باتری، قید (۲) شرط مساوی بودن میزان شارژ و دشارژ باتری در انتهای یک روز را برآورده می‌کند.

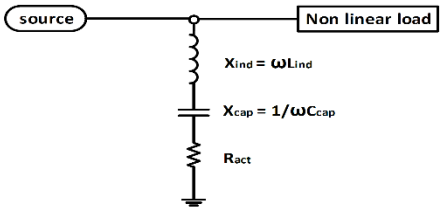
$$\sum_{i=1}^{24}\left(P_i^{E,d} - \left(P_i^{E,c} \times \eta_{ESS}\right)\right) = 0 \qquad (۲)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]

در سیستم ذخیره‌ساز تلفات مختلف از جمله تلفات ترانسفورماتور، تلفات مبدل الکترونیک قدرت و تلفات باتری در بازده ذخیره‌ساز انرژی نقش دارد. در رابطه (۲)، η_{ESS} بازده سیستم ذخیره‌ساز (شامل باتری و سیستم الکترونیک قدرت) را نشان می‌دهد.

۲-۳- مدلسازی فیلتر پسیو

همان‌طور که در بخش مقدمه عنوان شد؛ در این مقاله از فیلتر شکافی[۵] استفاده شده است. این فیلتر به‌صورت موازی با شبکه قرار می‌گیرد و با تنظیم در فرکانس مورد نظر، جریان این فرکانس را اتصال کوتاه کرده (با استفاده از تشدید سری ایجاد شده بین خازن و راکتور) و موجب کاهش هارمونیک ولتاژ شبکه می‌شود. در شکل (۳) شمایی از این نوع فیلتر نمایش داده شده است [۴۱].



شکل (۳): فیلتر شکافی

روابط مربوط به فرکانس تشدید و نسبت بین توان راکتیو کل با توان راکتیو خازنی و سلفی در (۳)، توان مؤثر راکتیو خازنی و سلفی در (۴) و همچنین نحوه محاسبه توان اکتیو مصرفی در (۵) آمده است.

$$Q_{cap} = Q_{tot} \times \left(1 - \frac{1}{n_{res}^{2}}\right) \quad , \quad n_{res} = \frac{f_{res}}{f_1} \qquad (۳)$$
$$Q_{rea} = Q_{tot} \times \left(n_{res}^{2} - 1\right)$$

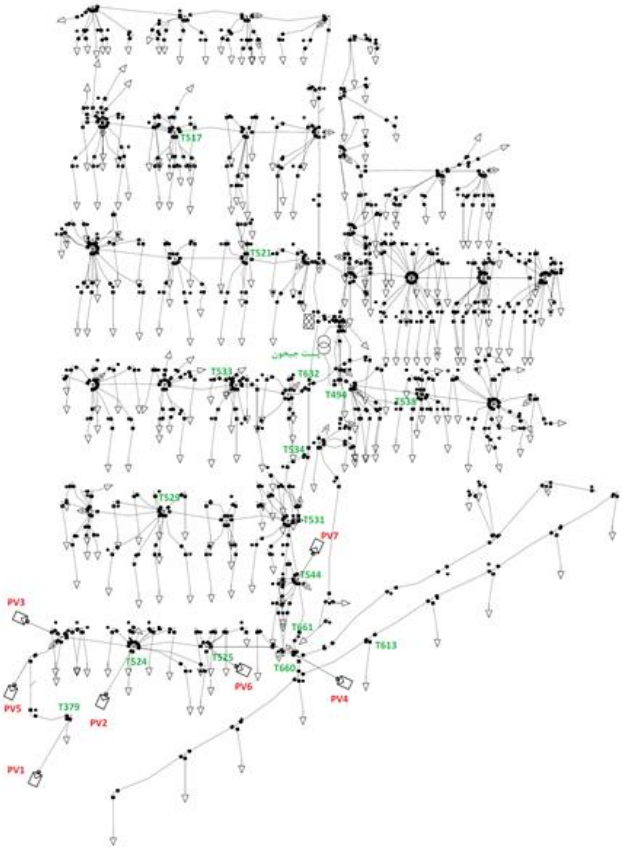
$$Q_{rms_{cap}} = 3 \times \sqrt{\sum_{i=1} \left(V_{i_{cap}}\right)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1} \left(I_i\right)^2}$$
$$Q_{rms_{ind}} = 3 \times \sqrt{\sum_{i=1} \left(V_{i_{ind}}\right)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1} \left(I_i\right)^2} \qquad (۴)$$

$$X_{ind} = \frac{U_1^{2}}{Q_{ind}} \rightarrow R_{act} = \frac{X_{ind}}{Q_f}$$
$$\rightarrow I_1 = \frac{Q_{tot}}{\sqrt{3} \times U_1} \rightarrow P_{act} = 3 \times R_{act} \times I_1^{2} \qquad (۵)$$

که در آن n_{res} مرتبه فیلتر شکافی، f_{res} فرکانس تشدید، Q_{tot} توان راکتیو کل فیلتر پسیو، Q_{cap} توان راکتیو خازنی و Q_{rea} توان راکتیو سلفی می‌باشد. $Q_{rms_{cap}}$ و $Q_{rms_{ind}}$ به ترتیب توان مؤثر راکتیو خازنی و سلفی هستند. $V_{i_{cap}}$، $V_{i_{ind}}$ و I_i به ترتیب ولتاژ خازن، ولتاژ سلف و جریان فیلتر در مرتبه iام می‌باشند. همچنین X_{ind} راکتانس سلفی، U_1 ولتاژ نامی، R_{act} مقاومت اهمی، Q_f ضریب کیفیت، I_1 جریان و P_{act} توان اکتیو مصرفی فیلتر می‌باشد. در مسائل بهینه‌سازی، پارامترهای n_{res} و Q_{tot} برای شرایط کار مسئله تعیین می‌گردند.

۲-۴- معرفی و مدلسازی شبکه مورد مطالعه

به‌منظور انجام شبیه‌سازی‌ها، با همکاری شرکت توزیع نیروی برق یزد پست $۲۰kV/۰/۴kV$ جیحون در امور ۳ یزد انتخاب گردید (شکل (۴)).



شکل (۴): شبکه مورد مطالعه و مکان نصب سامانه‌های فتوولتاییک

این پست در سمت ثانویه دارای سه فیدر فشار ضعیف است که یکی از آنها شامل دو سامانه فتوولتاییک ۵kW تکفاز با نام‌های PV1 و PV2 می‌باشد. به‌منظور افزایش ضریب نفوذ، سامانه‌های فتوولتاییک PV3 تا PV7 در شبیه‌سازی به شبکه افزوده شده‌اند. مقادیر بارها بر اساس ظرفیت کنتور نصب شده در منازل تعیین شده‌اند. برای برداشت اطلاعات، از سه دستگاه ثبات CHAUVIN ARNOUX مدل ۸۳۳۵ استفاده شده است. این دستگاه‌ها در سمت فشار ضعیف پست توزیع جیحون و در خروجی متناوب دو سامانه فتوولتاییک ۵kW نصب گردیده و مدت برداشت اطلاعات یک هفته در نظر گرفته شده است. همچنین هر دو سامانه بر روی یک فاز قرار گرفته و پارامترهایی نظیر ولتاژ مؤثر، دامنه جریان، توان، ضریب توان و دامنه و زاویه هارمونیک‌های جریان و ولتاژ تا مرتبه ۲۵ ثبت گردیده‌اند.

در شبیه‌سازی، مقاومت و راکتانس مربوط به کابل‌ها و ترانسفورماتور توزیع شبکه مورد مطالعه با استفاده از رابطه (۶) به‌صورت وابسته به فرکانس مدل شده‌اند [۴۲].

$$x\left(f_h\right) = \left(1-a\right) + a \times \left(\frac{f_h}{f_1}\right)^{b} \times x\left(f_1\right) \qquad (۶)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]

در این رابطه $x(f_h)$ و $x(f_1)$ مقاومت یا راکتانس وابسته به فرکانس در مرتبه hام و مرتبه اول می‌باشد. همچنین f_h و f_1 به ترتیب فرکانس هارمونیک مرتبه hام و فرکانس اصلی شبکه می‌باشد. همچنین a و b پارامترهایی هستند که میزان وابستگی به فرکانس را نشان می‌دهند. با استفاده از مدل‌های نرم‌افزار *DIgSILENT*، پارامترهای a و b با توجه به ولتاژ کابل‌ها و ولتاژ و توان ترانسفورماتور شبکه انتخاب شده‌اند.

از طرفی در نرم‌افزار *DIgSILENT*، برای محاسبه مدل وابسته به فرکانس خطوط هوایی، روش مدلسازی بر حسب آرایش دکل انتخاب شده است. در این روش از پارامترهای یک تیر برق فشار ضعیف شامل فاصله خطوط از هم و از سیم زمین، اندازه سطح مقطع و نوع سیم برای محاسبات استفاده می‌شود.

۳- تابع هدف و روش حل مسئله

در این مقاله، با استفاده از تابع هدف اقتصادی که با رابطه (۷) تعریف شده است، مکان و اندازه بهینه باتری و فیلتر پسیو و همچنین منحنی شارژ و دشارژ باتری برای غلبه بر مشکلات اضافه ولتاژ و افزایش هارمونیک شبکه در حضور سامانه‌های فتوولتاییک، محاسبه شده است.

Maximize:

$$\sum_{l=1}^{N}\left(\left((B_{ARB}+B_{Loss})\times L-C_{O\&M}\right)\times\left(\frac{1+ir}{1+dr}\right)^{l}\right)-C_{ESS}-C_{PHF} \quad (۷)$$

که در آن N تعداد سال‌های مورد مطالعه و L تعداد روزهای مورد استفاده از ذخیره‌ساز (در اینجا ۳۶۵) در طول سال l را نشان می‌دهد. همچنین B_{ARB} سود ناشی از تجارت انرژی، B_{Loss} سود ناشی از کاهش تلفات و $C_{O\&M}$ هزینه تعمیر و نگهداری باتری است. همچنین ir نرخ تورم و dr نرخ بهره سالانه، C_{ESS} هزینه سرمایه‌گذاری ذخیره‌ساز و C_{PHF} هزینه سرمایه‌گذاری فیلتر پسیو است. قیود مسئله با رابطه (۸) بیان شده‌اند.

$$\begin{aligned}&0.95<V_i^k<1.05\\&THD_{V_i^k}<5\%\end{aligned}\quad,\quad \forall i,\forall k\in N_b \quad (۸)$$

که در آن V_i^k و $THD_{V_i^k}$ به ترتیب ولتاژ مؤثر و هارمونیک کل ولتاژ باس kام در زمان iام می‌باشد. همچنین N_b تعداد کل باس‌های شبکه می‌باشد. با توجه به استاندارد ملی ایران در سطح ولتاژ ۰/۴ kV، ولتاژ مؤثر باید در محدوده مجاز ۵٪ ± ولتاژ نامی‌باشد و با توجه به استاندارد *IEEE 519*، دامنه هارمونیک کل ولتاژ باید کمتر از ۵٪ باشد.

سود ناشی از خرید و فروش انرژی به‌وسیله باتری با رابطه (۹) بیان شده است.

$$B_{ARB}=\sum_{i=1}^{24}\left(\left(P_i^{E,d}-P_i^{E,c}\right)\times p_{r_{EN,i}}\right) \quad (۹)$$

که در آن $p_{r_{EN,i}}$ نشان‌دهنده میانگین سالانه قیمت ساعتی انرژی است.

سود ناشی از کم شدن تلفات شبکه با رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۱۹].

$$B_{LOSS}=\sum_{i=1}^{24}\left(P_{LOSS_LESS\,i}\times p_{r_{EN,i}}\right) \quad (۱۰)$$

که در آن $P_{LOSS_LESS\,i}$ میزان کاهش تلفات ناشی از نصب باتری و فیلتر پسیو در ساعت iام می‌باشد.

هزینه سرمایه‌گذاری برای نصب سیستم ذخیره‌ساز انرژی، وابسته به حداکثر توان (P_{max}) و حداکثر انرژی (C_{max}) قابل ذخیره در آن است؛ بنابراین هزینه سرمایه‌گذاری با رابطه (۱۱) بیان می‌شود.

$$C_{ESS}=C_P\times P_{max}+C_w\times C_{max} \quad (۱۱)$$

که در آن C_P هزینه مربوط به حداکثر توان و C_w هزینه مربوط به حداکثر انرژی ذخیره‌ساز می‌باشد.

هزینه سالانه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری نیز به حداکثر توان و انرژی باتری وابسته است [۴۳] که با رابطه (۱۲) نشان داده شده است.

$$C_{O\&M}=\left(C_{Mf}\times P_{max}+C_{Mv}\times C_{max}\right) \quad (۱۲)$$

که در آن C_{Mf} هزینه ثابت و C_{Mv} هزینه متغیر بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری می‌باشد.

هزینه نصب فیلتر پسیو [۴۴] در رابطه (۱۳) آمده است.

$$C_{PHF}=\left(C_{act}\times P_{act}\right)+\left(C_{fix_{cap}}+C_{CAP}\times Q_{rms_{cap}}\right)+\left(C_{REA}\times Q_{rms_{ind}}\right) \quad (۱۳)$$

که در آن C_{act} هزینه تلفات توان اکتیو، C_{CAP} هزینه نصب هر کیلووار خازن، C_{REA} هزینه نصب هر کیلووار راکتور و $C_{fix_{cap}}$ هزینه ثابت خازن می‌باشد.

در جدول (۱) میزان پارامترهای اقتصادی مورد استفاده در مدلسازی مسئله آمده است [۴۴-۴۶].

جدول (۱): پارامترهای اقتصادی

C_{CAP} (\$/kVAr)	$C_{fix_{cap}}$ (\$)	C_{act} (\$/kW)	Ir (%)	dr (%)	N (Years)
۱۵	۱۰۰	۱۰۰	۱/۵	۹	۲۰
η_{ESS} (%)	C_{Mv} (\$/kWh)	C_{Mf} (\$/kW)	C_w (\$/kWh)	C_P (\$/kW)	C_{REA} (\$/kVAr)
۷۵	۰	۹	۱۰۰	۴۲۶	۳۰۰

لازم به ذکر است ضریب کیفیت برابر با ۳۰ در نظر گرفته شده است [۴۷]. با توجه به اینکه مطالعات اقتصادی شبکه باید در شرایطی انجام شود که قیمت انرژی واقعی باشد، از قیمت انرژی یکی از بازارهای رقابتی [۴۶] استفاده شده است. در نتیجه با توجه به هزینه انرژی که به دلار در نظر گرفته شده، سایر هزینه‌ها نیز بر حسب دلار

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]

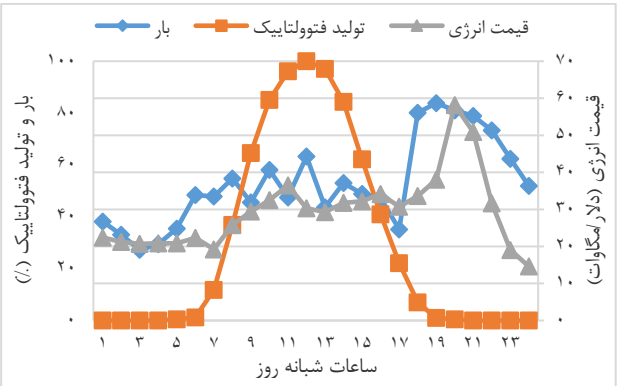
محاسبه شده است. همچنین به‌منظور انجام یک مطالعه اقتصادی معتبر نیاز است دو پارامتر نرخ تورم و بهره نیز بر اساس مقادیر نرمال جهانی و مقالات در نظر گرفته شود.

در این مقاله، به‌منظور محاسبه منحنی شارژ و دشارژ باتری برای دو هدف حداکثر شدن سود اقتصادی و کم شدن اضافه ولتاژ، از یک تابع هدف کمکی استفاده شده است [۱۹]. برای حداکثر شدن سود اقتصادی، باتری باید در زمان‌هایی که قیمت انرژی پایین است مانند نیمه‌شب شارژ شده و در زمان‌های اوج قیمت همانند غروب و اوایل شب دشارژ شود. از طرفی برای غلبه بر برگشت توان و مشکل اضافه ولتاژ، باتری باید در ظهر که اوج تولید سامانه‌های فتوولتاییک است شارژ شود (شکل (۵)). در نتیجه برای راهبرد شارژ و دشارژ باتری دو طرح متناقض وجود دارد. به همین منظور با بهره‌گیری از تابع هدف کمکی، رابطه (۱۴)، نحوه شارژ باتری به‌گونه‌ای محاسبه می‌شود که هم مشکلات اضافه ولتاژ مرتفع و هم سود اقتصادی ناشی از شارژ و دشارژ باتری حداکثر شود.

$$\sum_{i=1}^{24}\left(\left(P_i^{E,d}-P_i^{E,c}\right)\times\left[-\alpha\times P_{PV,i}{}^{pu}+(1-\alpha)\times p_{r_{EN,i}}{}^{pu}\right]\right) \quad (۱۴)$$

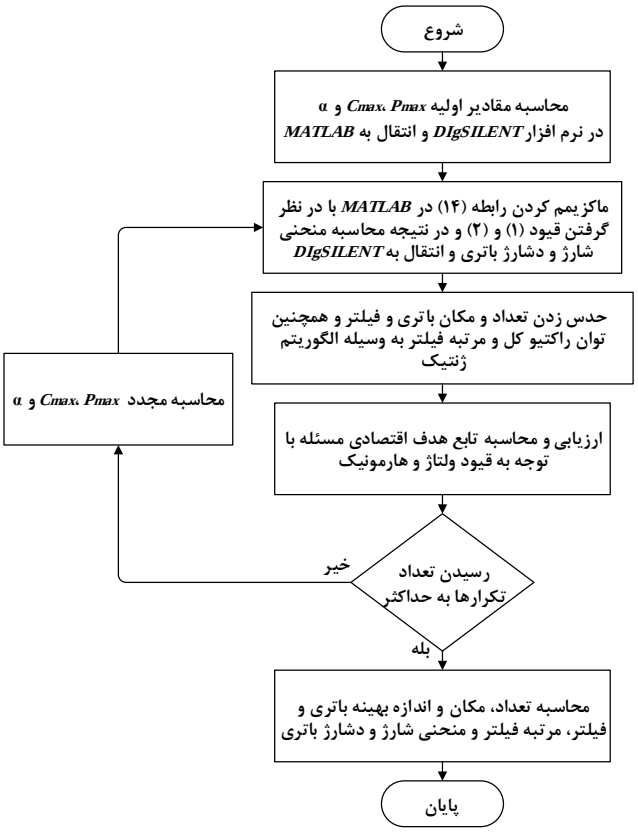
که در آن α ضریب تضمین کننده برآورده شدن هدف کاهش ولتاژ و افزایش سود ناشی از خرید و فروش باتری است، به این صورت که اگر صفر باشد شارژ و دشارژ باتری تنها با توجه به قیمت روزانه برق و اگر یک باشد با توجه به منحنی تولید سامانه‌های فتوولتاییک انجام می‌شود. در این مقاله با توجه به بهینه‌سازی انجام شده، عدد بهینه α که عددی در بازه صفر و یک می‌باشد محاسبه شده است. همچنین در رابطه (۱۴)، $P_{PV,i}{}^{pu}$ میانگین سالانه تولید سامانه‌های فتوولتاییک و $p_{r_{EN,i}}{}^{pu}$ میانگین سالانه قیمت ساعتی انرژی هر دو به ازای زمان iام بر مبنای واحد می‌باشند.

در شکل (۵) میانگین سالانه منحنی‌های تولید سامانه‌های فتوولتاییک و بار که با استفاده از اطلاعات ثبت شده استخراج شده و همچنین میانگین سالانه قیمت ساعتی انرژی [۴۸] ارائه شده است.



شکل (۵): میانگین سالانه تولید سامانه‌های فتوولتاییک، بار و قیمت روزانه انرژی

در شکل (۶) روند نمای روش حل مسئله نشان داده شده است.



شکل (۶): روند نمای حل مسئله

برای حل مسئله مراحل زیر در نظر گرفته شده است.

در مرحله اول، مقادیر اولیه حداکثر توان و انرژی باتری و همچنین ضریب α در نرم‌افزار *DIgSILENT* و به‌وسیله الگوریتم ژنتیک حدس زده و به نرم‌افزار *MATLAB* وارد می‌شود (با ارتباط ایجاد شده بین نرم‌افزار *DIgSILENT* و *MATLAB*).

در مرحله دوم با تابع هدف کمکی، منحنی بهینه شارژ و شارژ باتری (با لحاظ کردن قیود باتری) با استفاده از بهینه‌سازی خطی، در نرم‌افزار *MATLAB* محاسبه و وارد نرم‌افزار *DIgSILENT* می‌شود.

در مرحله سوم، تعداد و مکان باتری و فیلتر پسیو و همچنین توان راکتیو کل و مرتبه فیلتر به‌وسیله الگوریتم ژنتیک مشخص می‌شود.

در مرحله چهارم، با توجه به مقادیر به دست آمده از مراحل قبل و همچنین در نظر گرفتن قید محدوده مجاز ولتاژ (۵٪ ±) و حداکثر هارمونیک کل ولتاژ (۵٪)، تابع هدف اقتصادی با انجام پخش بار هارمونیکی محاسبه می‌شود.

در مرحله پنجم، اگر تعداد تکرارهای الگوریتم ژنتیک به مقدار حداکثر خود نرسیده باشد؛ مقادیر جدیدی برای حداکثر توان و انرژی باتری و همچنین ضریب α تعیین شده و شبیه‌سازی به مرحله دوم بازگردانده می‌شود.

در مرحله ششم، در صورت اتمام تعداد تکرارها مقادیر بهینه تعداد، توان و انرژی باتری، توان راکتیو کل و فرکانس تشدید فیلتر پسیو و همچنین منحنی شارژ و دشارژ بهینه باتری محاسبه می‌شود،

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]

به‌طوری که در جواب به دست آمده قیود مربوط به اضافه ولتاژ و هارمونیک رعایت شده و بعلاوه از نظر اقتصادی نیز بهینه باشد.

در شکل (۷) روند نمای ارتباط ایجاد شده بین نرم‌افزار *DIgSILENT* و *MATLAB* نشان داده شده است.

شکل (۷): روند نمای ارتباط بین دو نرم‌افزار

در مرحله اول مقادیر اولیه محاسبه شده توسط الگوریتم ژنتیک به‌وسیله نرم‌افزار *DIgSILENT* در یک فایل متنی (*Notepad*) ذخیره می‌شود. در ادامه به‌منظور عدم اختلال در چاپ مقادیر اولیه و خواندن آنها یک تأخیر مناسب ایجاد می‌شود. سپس مقادیر اولیه از فایل متنی توسط نرم‌افزار *MATLAB* خوانده شده و مقادیر شارژ و دشارژ باتری محاسبه می‌شود. در ادامه مقادیر شارژ و دشارژ باتری به‌وسیله نرم‌افزار *MATLAB* در یک فایل متنی (*Notepad*) ذخیره می‌شود. سپس با یک تأخیر مناسب این مقادیر توسط نرم‌افزار *DIgSILENT* خوانده می‌شود. این روند نما در حقیقت جزئیات ارتباط دو نرم‌افزار در مرحله‌های یک و دو روند نمای شکل (۶) را نشان می‌دهد.

۴- نتایج

در این بخش، در ابتدا با توجه به ضریب نفوذهای مختلف سامانه‌های فتوولتاییک، اثرگذاری این سامانه‌ها بر ولتاژ مؤثر و هارمونیک کل ولتاژ ارزیابی می‌شود. در ادامه حالت‌هایی بررسی می‌شود که باتری و فیلتر پسیو به‌طور همزمان برای رفع مشکلات اضافه ولتاژ و هارمونیک مورد استفاده قرار نگیرد. بدین منظور، در ابتدا فقط از باتری و در ادامه منحصراً از فیلتر پسیو استفاده می‌شود و تأثیر این دو حالت بر مشکلات اضافه ولتاژ و هارمونیک تحلیل می‌شود. سرانجام در حالت نهایی، استفاده همزمان از باتری و فیلتر ارزیابی می‌شود.

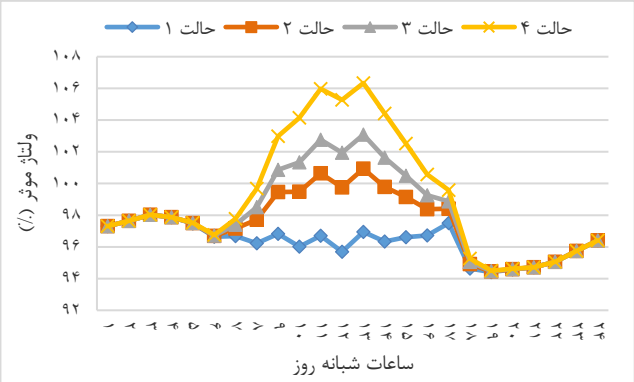
در جدول (۲) حالت‌های مختلف تحلیل مسئله آمده است.

جدول (۲): حالت‌های مختلف

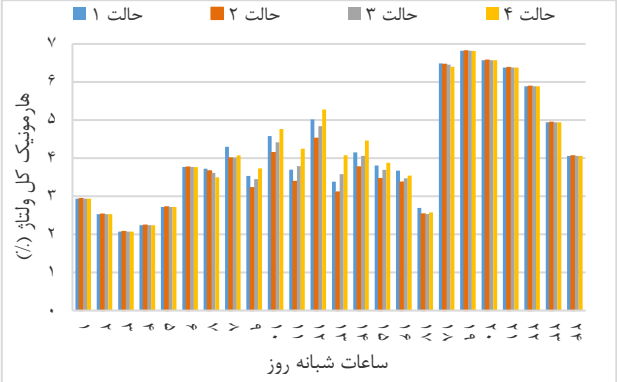
حالت ۱	بدون سامانه‌های فتوولتاییک
حالت ۲	با ۲ سامانه فتوولتاییک $5kW$ (*PV1* و *PV2*)
حالت ۳	با ۴ سامانه فتوولتاییک $5kW$ (*PV1* تا *PV4*)
حالت ۴	با ۷ سامانه فتوولتاییک $5kW$ (*PV1* تا *PV7*)
حالت ۵	با ۷ سامانه فتوولتاییک $5kW$ و باتری بهینه
حالت ۶	با ۷ سامانه فتوولتاییک $5kW$ و فیلتر بهینه
حالت ۷	با ۷ سامانه فتوولتاییک $5kW$ و باتری و فیلتر بهینه

۴-۱- حالت‌های ۱ تا ۴

ولتاژ مؤثر و هارمونیک کل ولتاژ برای باس *T379* که دورترین باس از ترانسفورماتور توزیع می‌باشد، برای حالت‌های ۱ تا ۴ در شکل (۸) نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

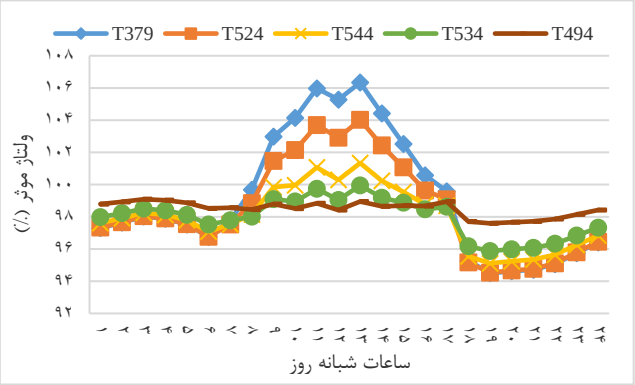
شکل (۸): (الف) ولتاژ مؤثر و (ب) هارمونیک کل ولتاژ باس *T379* با افزایش ضریب نفوذ

همان‌طور که در شکل (۸- الف) مشاهده می‌شود با افزایش ضریب نفوذ، ولتاژ مؤثر در زمان‌های تولید سامانه‌های فتوولتاییک افزایش می‌یابد (به دلیل برگشت توان) و در حالت ۴، ولتاژ از حد مجاز ۵٪ ولتاژ نامی فراتر می‌رود. همچنین با توجه به شکل (۸- ب)، در

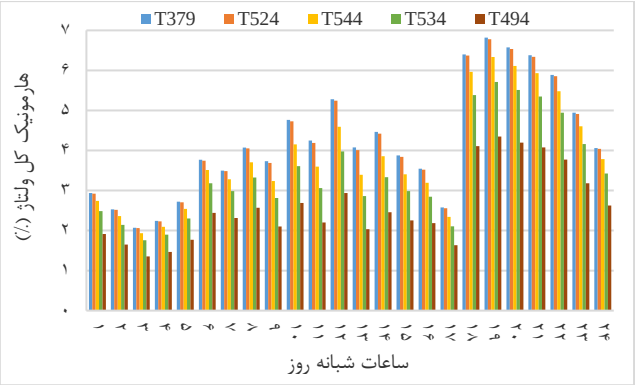
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]

حالت ۱ مشاهده می‌شود در ساعات پایانی روز و با تاریک شدن هوا، با توجه به ورود بارهای روشنایی که اغلب از نوع لامپ‌های کم‌مصرف هستند، میزان هارمونیک افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضریب نفوذ سامانه‌های فتوولتاییک، در بازه زمانی تولید این سامانه‌ها، در ابتدا هارمونیک کل ولتاژ کاهش یافته (حالت‌های ۲ و ۳ و به دلیل لحاظ کردن زاویه هارمونیک) ولی در حالت ۴ در بعضی ساعات هارمونیک کل ولتاژ افزایش یافته و از حد مجاز ۵٪ فراتر می‌رود (به دلیل افزایش ضریب نفوذ)؛ لذا برای حالت ۴ باید با استفاده از باتری و فیلتر پسیو مشکلات افزایش ولتاژ و هارمونیک برطرف شود.

با توجه به انجام بهینه‌سازی برای رفع مشکلات حالت ۴، در شکل (۹) ولتاژ مؤثر و اندازه هارمونیک کل ولتاژ بعضی از باس‌های شبکه برای این حالت آمده است.



(الف)



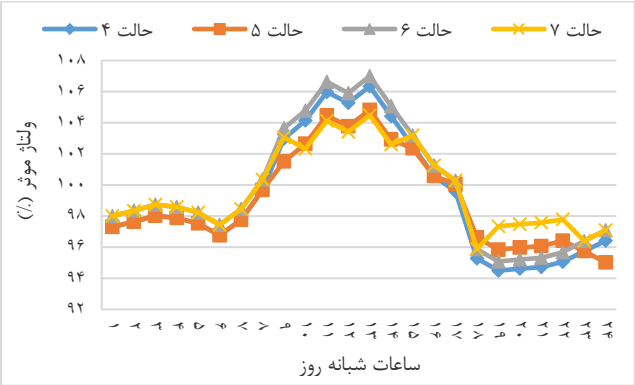
(ب)

شکل (۹): (الف) ولتاژ مؤثر و (ب) هارمونیک کل ولتاژ در حالت ۴ برای باس‌های مختلف

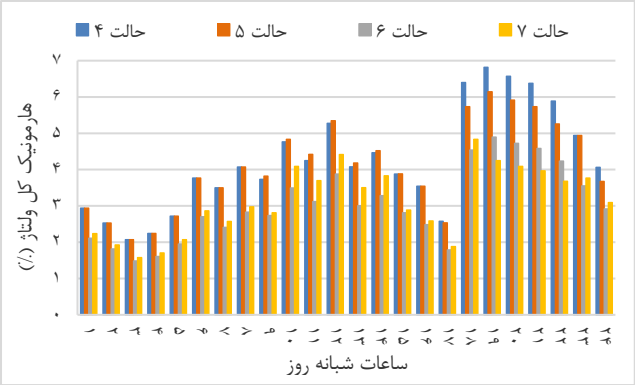
همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل اینکه مؤلفه‌های جریان هارمونیکی در مرتبه‌های مختلف، اکثراً به‌صورت تزریق جریان (و نه مصرف) به شبکه می‌باشند؛ باس‌هایی که از ترانسفورماتور توزیع دورتر هستند دارای ولتاژ مؤثر و هارمونیک بالاتری هستند.

۴-۲- حالت‌های ۵ تا ۷

در این بخش، تأثیر استفاده از باتری یا فیلتر (به‌صورت جداگانه) و همچنین استفاده همزمان از این دو تجهیز بررسی می‌شود. در شکل (۱۰) منحنی‌های ولتاژ مؤثر و هارمونیک کل ولتاژ برای باس *T379* برای حالت‌های ۴ تا ۷ نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۱۰): (الف) ولتاژ مؤثر و (ب) هارمونیک کل ولتاژ در حالت ۴ تا ۷

همان‌طور که مشاهده می‌شود اگر تنها رفع مشکلات اضافه ولتاژ با باتری در نظر گرفته شود (حالت ۵)؛ اضافه ولتاژ در محدوده مجاز قرار می‌گیرد. به این صورت که در زمان‌هایی که شبکه با اضافه تولید سامانه‌های فتوولتاییک همراه است (بین ساعات ۹ تا ۱۵) باتری شارژ شده و در زمان‌های که شبکه با اضافه‌بار مواجه است و منجر به افت ولتاژ از محدوده مجاز می‌شود (بین ساعت ۱۸ تا ۲۲)، باتری دشارژ می‌شود. ولی به دلیل تولید هارمونیک توسط باتری، هارمونیک شبکه در زمان‌های شارژ شدن باتری افزایش می‌یابد. این در حالی است که هارمونیک کل ولتاژ در زمان‌هایی که باتری دشارژ می‌شود کاهش می‌یابد. هرچند که این کاهش هارمونیک از حالتی که تنها از فیلتر استفاده شود کمتر است. این افزایش و کاهش هارمونیک وابسته به دامنه و زاویه هارمونیک تزریقی توسط باتری می‌باشد.

از طرف دیگر، اگر تنها فیلتر و مشکلات هارمونیک در نظر گرفته شود؛ هرچند هارمونیک در بازه مناسب قرار می‌گیرد ولی ولتاژ از مقدار مجاز فراتر می‌رود. با توجه به اینکه مصرف توان راکتیو در مؤلفه اصلی فیلتر، توان راکتیو تولیدی باس‌ها را افزایش و توان اکتیو مصرفی آنها را کم می‌کند، لذا ولتاژ مؤلفه اصلی باس‌ها زیاد شده و در نتیجه هارمونیک کل ولتاژ مؤثر افزایش می‌یابد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]

درنهایت، با در نظر گرفتن باتری و فیلتر مشاهده می‌شود که ولتاژ و هارمونیک، هر دو در محدوده مجاز قرار می‌گیرد؛ هرچند که هارمونیک ولتاژ بیشتر از حالتی است که فیلتر به‌تنهایی و کمتر از حالتی است که باتری به‌تنهایی استفاده شود. همین نتیجه‌گیری را می‌توان برای ولتاژ مؤثر در جهت عکس داشت.

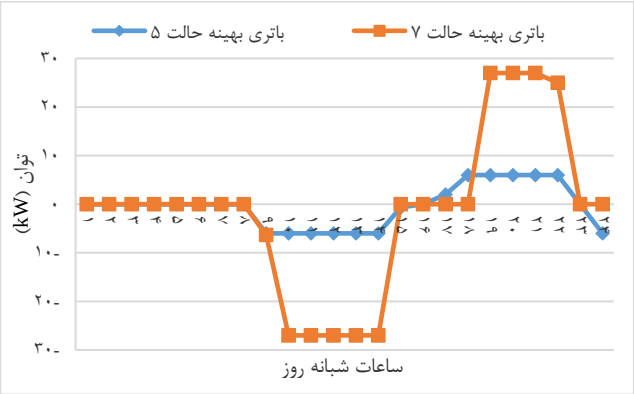
در جدول (۳) مقدار بهینه توان، انرژی و α برای باتری، اندازه توان راکتیو کل فیلتر و مرتبه فیلتر، مکان مناسب برای نصب این دو تجهیز و هزینه کل در حالت‌های ۵ تا ۷ آمده است.

جدول (۳): مقادیر بهینه باتری و فیلتر

		توان باتری یا توان راکتیو کل فیلتر	انرژی باتری یا مرتبه فیلتر	مکان مناسب	α	هزینه ($)
حالت ۵	باتری	۶ (kW)	۳۲ (kWh)	T524	٪۳۲	۵۵۲۰
حالت ۶	فیلتر	۱۲ (kVAr)	۵	T660	-	۷۳۶
		۶ (kVAr)	۱۱	T521	-	
حالت ۷	باتری	۲۷ (kW)	۱۰۶ (kWh)	T531	٪۴۹	۲۴۶۷۵
	فیلتر	۱۶ (kVAr)	۵	T534	-	
		۱۱ (kVAr)	۷	T517	-	

همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده هم‌زمان از باتری و فیلتر، هرچند منجر به بهبود اضافه ولتاژ و هارمونیک نسبت به حالتی می‌شود که از هر یک به‌تنهایی استفاده شود؛ اما مستلزم صرف هزینه بالاتری نیز است.

در شکل (۱۱) نحوه شارژ و دشارژ باتری در ساعات شبانه‌روز برای حالت‌های ۵ و ۷ آمده است.



شکل (۱۱): منحنی شارژ و دشارژ بهینه باتری

همان‌طور که مشاهده می‌شود و قبلاً اشاره شد، باتری در زمان‌های اضافه تولید شارژ و در مواقع کمبود بار دشارژ می‌شود.

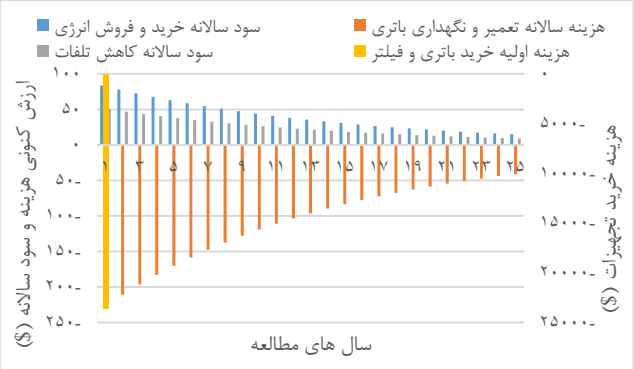
در جدول (۴) میزان تلفات یک شبانه‌روز به ازای حالت‌های مختلف مسئله نشان داده شده است.

جدول (۴): تلفات به ازای حالت‌های مختلف

حالت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
تلفات (kWh)	۳۰/۷	۳۰/۳	۳۱/۳	۳۵/۸	۳۲/۶	۳۳/۵	۳۱/۷

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب نفوذ سامانه‌های فتوولتاییک، در ابتدا تلفات کاهش (به دلیل کم شدن هارمونیک ولتاژ) و سپس افزایش می‌یابد (به دلیل برگشت توان). همچنین در صورت استفاده از باتری به‌تنهایی تلفات کم می‌شود؛ زیرا باتری با شارژ و دشارژ بهینه برگشت توان را کاهش می‌دهد. همچنین در صورت استفاده از فیلتر به‌تنهایی مشاهده می‌شود تلفات کاهش می‌یابد، اما این تلفات از حالتی که باتری به‌تنهایی استفاده شود بیشتر است. از طرفی مشاهده می‌شود با استفاده از باتری و فیلتر بهینه مقدار تلفات نسبت به کل حالت‌ها کمتر می‌شود و به میزان ۴/۱ kWh نسبت به حالت ۴ کمتر می‌شود.

نمودار جریان نقدی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



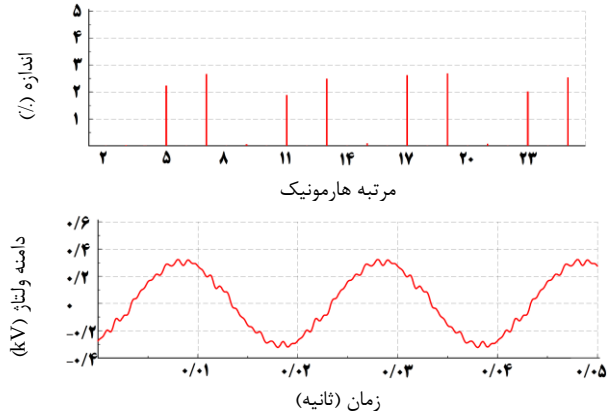
شکل (۱۲): جریان نقدی

همان‌طور که مشاهده می‌شود هزینه اولیه نصب باتری و فیلترها برابر ۲۳۵۹۹ دلار می‌باشد. همچنین ارزش کنونی هزینه و سود سالانه نیز برای سال‌های مطالعه نشان داده شده است. با استفاده از روش ارزش کنونی میزان هزینه نهایی روش پیشنهادی ۲۴۶۷۵ دلار می‌باشد.

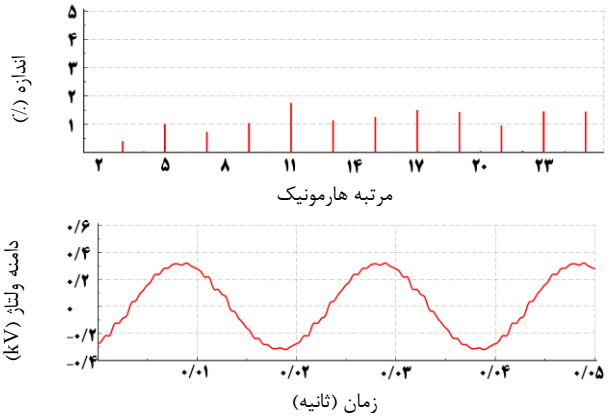
در شکل (۱۳) هارمونیک کل ولتاژ باس T379 در دو حالت زمانی و فرکانسی قبل (حالت ۴) و بعد از بهینه‌سازی (حالت ۷) آورده شده است (در ساعت ۱۹).

همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از بهینه‌سازی بعضی از مؤلفه‌های هارمونیک بهبود و بعضی بدتر می‌شود اما در مجموع هارمونیک کل ولتاژ بهبود می‌یابد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]



(الف)



(ب)

شکل (۱۳): هارمونیک ولتاژ باس *T379* (الف) قبل از بهینه‌سازی و (ب) بعد از بهینه‌سازی

با استفاده از فیلتر، از طرفی میزان تلفات شبکه کاهش پیدا می‌کند که این صرفه‌جویی را می‌توان همانند رابطه (۱۰) به سود اقتصادی تبدیل کرد. از طرف دیگر با کاهش هارمونیک شبکه، مشکلاتی که در اثر افزایش هارمونیک برای تجهیزات شبکه و مصرف‌کننده‌ها ایجاد و منجر به قطعی برق و ایجاد خسارت می‌شود، کاهش می‌یابد. از دیگر سو صنایعی که به دلیل زیاد بودن میزان تولید هارمونیک (همانند کوره‌های قوس) مجبور به کاهش میزان تولید هارمونیک به‌وسیله کاهش میزان مصرف انرژی هستند، می‌توانند تا ارتقای تجهیزات خود به تولید نامی خود ادامه دهند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مکان، اندازه و نحوه شارژ و دشارژ بهینه همزمان باتری و فیلتر برای غلبه بر مشکلات ناشی از افزایش ضریب نفوذ سامانه‌های فتوولتاییک مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور مدل کردن منطبق با واقعیت، علاوه بر اندازه هارمونیک، زاویه نیز در نظر گرفته شد. همچنین خطوط شبکه به‌صورت وابسته به فرکانس مدلسازی شدند. مشاهده شد که با افزایش ضریب نفوذ سامانه‌های فتوولتاییک میزان ولتاژ مؤثر و هارمونیک در ساعات تولید این سامانه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد، اگر باتری به‌تنهایی جهت اضافه ولتاژ استفاده شود؛ به دلیل تولید هارمونیک، منجر به افزایش سطح هارمونیک شبکه در بعضی از ساعت‌ها می‌شود. همچنین اگر از فیلتر پسیو به‌منظور کاهش هارمونیک استفاده شود؛ ولتاژ مؤثر باس‌ها افزایش می‌یابد که این خود بر مشکلات اضافه ولتاژ می‌افزاید. درنهایت، با بهینه‌سازی همزمان باتری و فیلتر، ولتاژ در محدوده مجاز قرار گرفته و هارمونیک کل کنترل شده و همچنین تلفات نسبت به تمام حالت‌ها کمتر می‌شود؛ هرچند که مستلزم هزینه بالاتری نیز می‌باشد. به‌منظور پیشنهاد برای کارهای آینده، با توجه به ماهیت سامانه‌های فتوولتاییک نیاز است مطالعاتی به روش‌های احتمالاتی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت انجام شود.

مراجع

[1] M. M. Hague and P. Wolfs, "*A review of high PV penetrations in LV distribution networks: Present status, impacts and mitigation measures*," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 62, pp. 1195-1208, Sep. 2016.

[2] N. D. Laws, B. P. Epps, S. O. Peterson, M. S. Laser and G. K. Wanjiru, "*On the utility death spiral and the impact of utility rate structures on the adoption of residential solar photovoltaics and energy storage*," Applied Energy, vol. 185, Part 1, pp. 627-641, Jan. 2017.

[3] R. Bakhshi and J. Sadeh, "*Evaluation of grid–connected photovoltaic systems viability under a new dynamic feed–in tariff scheme: A case study in Iran*," Renewable Energy, vol. 119, pp. 354-364, April 2018.

[4] M. Karimi, H. Mokhlis, K. Naidu, S. Uddin and A.H.A. Bakar, "*Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network – A review*," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 53, pp. 594-605, Jan. 2016.

[5] F. Marra, Y. Guangya, C. Traeholt, J. Ostergaard and E. Larsen, "*A Decentralized Storage Strategy for Residential Feeders With Photovoltaics*," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 2, pp. 974-981, March 2014.

[6] F. Marra, G. Y. Yang, C. Traeholt, E. Larsen, J. Ostergaard, B. Blazic and W. Deprez, "*EV Charging Facilities and Their Application in LV Feeders With Photovoltaics*," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 3, pp. 1533-1540, Sep. 2013.

[۷] علی احمدیان، مهدی صدقی و مسعود علی‌اکبر گلکار، "**بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع فعال با قابلیت جزیره‌ای شدن در حضور منابع تولید توان بادی، ذخیره‌سازها و خودروهای برقی**"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال سوم، شماره ششم، صفحات ۳۲-۲۰، ۱۳۹۳.

[8] J. Sardi, N. Mithulananthan, M. Gallagher and D. Q. Hung, "*Multiple community energy storage planning in distribution networks using a cost-benefit analysis*," Applied Energy, vol. 190, pp. 453-463, March 2017.

[9] S. Hashemi, J. Ostergaard and Y. Guangya, "*A Scenario-Based Approach for Energy Storage Capacity Determination in LV Grids With High PV Penetration*,"

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]

IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 3, pp. 1514-1522, May 2014.

[۱۰] رضا اسلامی، حامد نفیسی و سید امیر حسینی، " **ارائه روشی جدید به منظور بهینه‌سازی مدیریت شارژ و دشارژ PHEVها با هدف بهبود پارامترهای الکتریکی شبکه"**، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال هشتم، شماره پانزدهم، صفحات ۵۲-۴۱، ۱۳۹۸.

[11] E. Reihani and R. Ghorbani, "*Load commitment of distribution grid with high penetration of photovoltaics (PV) using hybrid series-parallel prediction algorithm and storage*," Electric Power Systems Research, vol. 131, pp. 224-230, Feb. 2016.

[12] L. Xiaohu, A. Aichhorn and L. Liming, L. Hui, "*Coordinated Control of Distributed Energy Storage System With Tap Changer Transformers for Voltage Rise Mitigation Under High Photovoltaic Penetration*," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 897-906, June 2012.

[۱۳] مجید داغی، مهدی صدقی و مسعود علی‌اکبر گلکار، "**برنامه‌ریزی بهینه‌ی باتری‌ها در شبکه توزیع فعال با در نظر گرفتن تکنولوژی‌های مختلف در شرایط فنی و اقتصادی غیرقطعی"**، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال پنجم، شماره دهم، صفحات ۲۴-۱۴، ۱۳۹۵.

[14] J. Sardi, N. Mithulananthan and D. Q. Hung, "*Strategic allocation of community energy storage in a residential system with rooftop PV units*," Applied Energy, vol. 206, pp. 159-171, Nov. 2017.

[15] Y. Yang, H. Li, A. Aichhorn, J. Zheng and M. Greenleaf, "S*izing Strategy of Distributed Battery Storage System With High Penetration of Photovoltaic for Voltage Regulation and Peak Load Shaving*," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 2, pp. 982-991, March 2014.

[16] H. Jia, Ch. Wanga, P. Lia, J. Zhaoa, G. Songa and J. Wub, "*Quantified flexibility evaluation of soft open points to improve distributed generator penetration in active distribution networks based on difference-of-convex programming*," Applied Energy, vol. 218, pp. 338-348, May 2018.

[۱۷] حسین لطفی، رضا قاضی و محمد باقر نقیبی سیستانی، " **استراتژی بهینه مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع هوشمند با در نظر گرفتن اثر منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی"**، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال هشتم، شماره هفدهم، صفحات ۲۹-۲۲، ۱۳۹۸.

[18] H. Sugihara, K. Yokoyama, O. Saeki, K. Tsuji and T. Funaki, "*Economic and Efficient Voltage Management Using Customer-Owned Energy Storage Systems in a Distribution Network With High Penetration of Photovoltaic Systems*," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 1, pp. 102-111, Feb 2013.

[19] M. R. Jannesar, A. Sedighi, M. Savaghebi and J. M. Guerrero, "*Optimal placement, sizing, and daily charge/discharge of battery energy storage in low voltage distribution network with high photovoltaic penetration*," Applied Energy, vol. 226, pp. 957-966, Sep. 2018.

[20] S. Sakar, M. E. Balci, Sh. H. E. A. Aleem and A. F. Zobaa, "*Increasing PV hosting capacity in distorted distribution systems using passive harmonic filtering*," Electric Power Systems Research, vol. 148, pp. 74-86, July 2017.

[21] Y. Y. Hong, Ch. Sh. Chiu and Sh. W. Huang, "*Multi-scenario passive filter planning in factory distribution system by using Markov model and probabilistic Sugeno fuzzy reasoning*," Applied Soft Computing, vol. 41, pp. 352-361, April 2016.

[22] S. Sakar, M. E. Balci, Sh. H. E. A. Aleem and A. F. Zobaa, "*Integration of large- scale PV plants in non-sinusoidal environments: Considerations on hosting capacity and harmonic distortion limits*," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, Part 1, pp. 176-186, Feb. 2018.

[23] Y. L. Chen, "*Optimal multi-objective single-tuned harmonic filter planning*," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1191-1197, April 2005.

[24] Y. P. Chang and Ch. Low, "*Optimization of a passive harmonic filter based on the neural-genetic algorithm with fuzzy logic for a steel manufacturing plant*," Expert Systems with Applications, vol. 34, no. 3, pp. 2059-2070, April 2008.

[25] Y. P. Chang, "*Integration of SQP and PSO for optimal planning of harmonic filters*," Expert Systems with Applications, vol. 37, no. 3, pp. 2522-2530, March 2010.

[26] G. W. Chang, S. Y. Chu and H. L. Wang, "*A new method of passive harmonic filter planning for controlling voltage distortion in a power system*," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 1, pp. 305-312, Jan. 2006.

[27] M. Mohammadi, "*Bacterial foraging optimization and adaptive version for economically optimum sitting, sizing and harmonic tuning orders setting of LC harmonic passive power filters in radial distribution systems with linear and nonlinear loads*," Applied Soft Computing, vol. 29, pp. 345-356, April 2015.

[28] M. Mohammadi, A. M. Rozbahani and M. Montazeri, "*Multi criteria simultaneous planning of passive filters and distributed generation simultaneously in distribution system considering nonlinear loads with adaptive bacterial foraging optimization approach*," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 79, pp. 253-262, July 2016.

[29] N. H. B. A. Kahar and A. F.Zobaa, "*Application of mixed integer distributed ant colony optimization to the design of undamped single-tuned passive filters based harmonics mitigation*," Swarm and Evolutionary Computation, to be published. doi: 10.1016/j.swevo.2018.03.004.

[30] J. C. Leite, I. P. Abril and M. S. S. Azevedo, "*Capacitor and passive filter placement in distribution systems by nondominated sorting genetic algorithm-II*," Electric Power Systems Research, vol. 143, pp. 482-489, Feb. 2017.

[31] N. Yang and M. Le, "*Optimal design of passive power filters based on multi-objective bat algorithm and pareto front*," Applied Soft Computing, vol. 35, pp. 257-266, Oct. 2015.

[32] A. Salimbeni, M. Boi, I. Marongiu, M. Porru and A. Damiano,, "*Integration of active filter and energy storage system for power quality improvement in microgrids*," in 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Anacapri, 2016.

[33] S. Bai and S. M. Lukic, "*Unified Active Filter and Energy Storage System for an MW Electric Vehicle Charging*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]

Station," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 12, pp. 5793-5803, Dec. 2013.

[34] M. Ding, Zh. Chen, Bo Wang, Z. Chen, Y. Luo and G. Zheng, "*Unified control of smoothing out wind power fluctuations and active power filtering by an energy storage system*," in IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Tianjin, 2012.

[35] Z. Yan and X. Zhang, "*General Energy Filters for Power Smoothing, Tracking and Processing Using Energy Storage*," IEEE Access, vol. 5, pp. 19373-19382, 2017.

[36] A. Kalair, N. Abas, A. R. Kalair, Z. Saleem and N. Khan, "*Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques," Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 1152-1187, Oct. 2017.

[37] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill Education, 2012.

[38] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese, *Simulation and the Monte Carlo Method*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

[39] "*IEEE Draft Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems*," IEEE P519.1/D12, Feb. 2015.

[40] A. Oudalov, D. Chartouni, C. Ohler and G. Linhofer, "*Value Analysis of Battery Energy Storage Applications in Power Systems*," in Power Systems Conference and Exposition, Oct. 29 2006 - Nov. 1 2006.

[41] "*Technical Reference Documentation: Filter/Shunt*," power factory Company, Germany, 2018.

[42] J. Wasilewski, W. Wiechowski and C. L. Bak, "*Harmonic domain modeling of a distribution system using the DIgSILENT PowerFactory software*," in 2005 International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, 2005.

[43] "*EPRI-DOE Handbook Supplement of Energy Storage for Grid Connected Wind Generation Applications*," Technical Update, Dec. 2004.

[44] C. Kawann and A. E. Emanuel, "*Passive shunt harmonic filters for low and medium voltage: a cost comparison study*," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 4, pp. 1825-1831, Nov. 1996.

[45] M. M. Elkholy, M. A. El-Hameed, and A. A. El-Fergany, "*Harmonic analysis of hybrid renewable microgrids comprising optimal design of passive filters and uncertainties*," Electric Power Systems Research, vol. 163, Part A, pp. 491-501, Oct. 2018.

[46] R. C. Leou, "*An economic analysis model for the energy storage system applied to a distribution substation*," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 34, no. 1, pp. 132-137, Jan. 2012.

[47] Y. P. Chang, Ch. Low, and Sh. Y. Hung, "*Integrated feasible direction method and genetic algorithm for optimal planning of harmonic filters with uncertainty conditions*," Expert Systems with Applications, vol. 36, no. 2, pp. 3946-3955, March 2009.

[48] M. Alamaniotis, Ni. Gatsis, L. H. Tsoukalas, "*Virtual Budget: Integration of electricity load and price anticipation for load morphing in price-directed energy utilization*," Electric Power Systems Research, vol. 158, pp. 284-296, May 2018.

زیرنویس‌ها

۱ DSTATCOM
۲ Soft Open Point
۳ Single-Tuned Passive Filter (Notch)
٤ Inverse Transform Method
٥ Notch

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.3.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.26]