

بررسی تاثیرات بکارگیری باتری ذخیره‌ساز توسط مشترکین خانگی بر روی کاهش اوج بار شبکه توزیع

نوع مطالعه: پژوهشی

مهدی ظریف^۱، محمد علیشاهی^۲، ابوالفضل قاسمی^۳

۱- گروه برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

zarif.mahdi.ir@ieee.org

۲- گروه کامپیوتر، مرکز فریمان، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

alishahi@ieee.org

۳- شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی

abolfazl.ghasemi@outlook.com

چکیده:

کاهش اوج بار و صاف نمودن الگوی بار مصرفی در شبکه همواره به عنوان یکی از مسایل مهم در شبکه‌های توزیع مطرح بوده است. بدین منظور راهکارهایی وجود دارد تا به کمک آن‌ها بتوان بار مصرفی در ساعات اوج مصرف را کاهش داد و یا بخشی از آن را به ساعات دیگر منتقل نمود. با گسترش مفهوم ریزشبکه و هوشمندسازی شبکه‌های الکتریکی، استفاده از منابع تولید پراکنده و ذخیره‌کننده‌ها به عنوان یک راه برای حل این مشکل مطرح شده است؛ بطوری که امروزه این قبیل تکنولوژی‌ها با سرعت بیشتری به سیستم قدرت اضافه می‌شوند. در همین راستا، این مطالعه قصد دارد تا تاثیر استفاده از منابع ذخیره‌ی انرژی (باتری) را بر روی مواردی همچون کاهش اوج بار بررسی نماید. ساختار مساله به صورت برنامه‌ریزی خطی مختلط با عدد صحیح می‌باشد که برای یک سیستم نمونه توسط نرم افزار GAMS شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با حضور منابع ذخیره ساز در شبکه و برنامه‌ریزی مناسب شارژ/دشارژ آن‌ها و همچنین وجود اهرم تشویقی قیمت، اوج بار شبکه کاهش یافته و الگوی بار صاف‌تر می‌شود.

واژه های کلیدی: شبکه توزیع، کاهش اوج بار، منابع ذخیره‌ساز، بهینه‌سازی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۹/۱۰/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول : مهدی ظریف

نشانی نویسنده‌ی مسئول : مشهد- شهرک غرب- مجتمع دانشگاه آزاد اسلامی- دانشکده مهندسی- گروه برق

۱- مقدمه

الگوی بار مصرفی مشترکان شبکه توزیع که در یک منطقه قرار دارند، معمولاً در ساعات مختلف شبانه‌روز شباهت‌هایی با یکدیگر دارد. این موضوع باعث می‌شود تا در برخی ساعات توان در یافتی از شبکه به حداکثر مقدار خود برسد که در اصطلاح، ساعات اوج بار شبکه شکل می‌گیرد. در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، زیاده بودن اختلاف بار مصرفی در ساعات اوج با دیگر زمان‌ها نامطلوب می‌باشد و به همین دلیل همواره کاهش اوج بار به عنوان یکی از مسائل مهم در شبکه‌های توزیع مطرح بوده است [۱]. در همین راستا، سازوکارهایی وجود دارد که به کمک آن‌ها می‌توان بار مصرفی در ساعات اوج تقاضا را کاهش داد و یا بخشی از آن را به ساعات دیگر منتقل کرد [۱]. در مساله‌ی کاهش اوج بار، می‌تواند انگیزه‌های اقتصادی ایجاد شود و تشویق‌های مالی تعیین گردد. از دیدگاه بهره‌بردار شبکه یکی از اهداف انجام این کار، جلوگیری از سرمایه‌گذاری اضافی بابت تامین بار در ساعات اوج مصرف می‌باشد [۲].

اجرای برنامه‌های مربوط به بحث کاهش اوج بار در شبکه‌های توزیع می‌تواند کمی چالش برانگیز باشد. بدین منظور لازم است سازوکاری اندیشیده شود تا مشترکین بخشی از بارهای مصرفی خود را به ساعات دیگر منتقل کنند و یا این که در تزریق توان به شبکه همکاری نمایند. تزریق توان به شبکه می‌تواند توسط منابع تولید ماند فتولتائیک یا مولدهای گازسوز صورت بگیرد و همچنین می‌تواند با دشارژ شدن باتری‌های ذخیره‌ساز انجام شود.

در حال حاضر برنامه‌های مختلفی برای کاهش اوج بار شبکه‌های توزیع در دنیا اجرا می‌شود که بخش مهمی از آن‌ها روش‌های مبتنی بر تعرفه می‌باشند [۳]. همچنین استفاده از برخی تکنولوژی‌ها توسط مصرف‌کنندگان نیز می‌تواند به حل مشکل اوج بار کمک زیادی کند. امروزه افزایش منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازها در شبکه‌های توزیع و همچنین افزایش سطح تبادل اطلاعات و ارتباطات مخابراتی بین بخش‌های مختلف، وضعیت شبکه‌های توزیع را از جنبه‌های مختلف بهبود داده است. با وجود زیرساخت‌های مناسب در شبکه‌ی توزیع می‌توان بستری را فراهم نمود تا فناوری‌های تولید و ذخیره با راندمان بالا و همچنین لوازم مصرفی هوشمند در سمت مشترکان گسترش پیدا کنند.

تجهیزات و سازوکارهای مربوط به کاهش اوج بار معمولاً توسط مصرف‌کنندگان نهایی مورد استفاده می‌گیرند. با توجه به نقش مهم مشترکان شبکه در موفقیت آمیز بودن طرح‌های مدیریت بار، در بیشتر موارد این راهکارها با سیاست‌های تشویقی و ایجاد انگیزه‌های اقتصادی برای مشترکان همراه می‌باشند. طی سالیان اخیر، در شبکه‌های توزیع ایران نیز شاهد افزایش ظرفیت منابع تولید پراکنده هستیم. یکی از دلایل مهم این امر، حمایت‌های صورت گرفته از این تکنولوژی‌ها بوده

که موجب ایجاد انگیزه در مشترکان شبکه‌های توزیع شده است؛ هرچند نوسانات ارزی اخیر تاثیر منفی روی این موضوع داشته است. البته لازم به ذکر است که این سیاست‌های تشویقی همواره بر روی نفوذ منابع تولید به ویژه فتولتائیک تاکید داشته و به کارگیری منابع ذخیره‌کننده مانند باتری‌ها توسط مشترکان کوچک مورد توجه نبوده است.

استفاده از ذخیره‌ساز انرژی، یک روش پاسخ سریع و بدون آلودگی بوده که استفاده از آن راه حلی مناسب برای کاهش اوج بار شبکه به شمار می‌رود. برخی فواید استفاده از ذخیره‌ساز عبارتست از:

- به دلیل صاف‌تر شدن الگوی مصرف و کاهش اوج بار، سرمایه‌گذاری در شبکه برق به تعویق می‌افتد.
- شرکت‌های برق قیمت فروش انرژی را در ساعات اوج بار می‌توانند کاهش دهند.
- مشترکانی که این قبیل تجهیزات را نصب می‌کنند می‌توانند از درآمدهای حاصل از فروش برق منتفع شوند.

امروزه در بسیاری از کشورهای دنیا، ذخیره‌کننده‌ها به ویژه باتری‌ها با سرعت زیاد در حال اضافه شدن به شبکه‌های توزیع هستند. یکی از قابلیت‌های استفاده از باتری‌ها، موضوع کاهش اوج بار شبکه‌های توزیع می‌باشد. این موضوع همواره مورد توجه محققان بخش قدرت و انرژی بوده است. طی سالیان گذشته فعالیت‌های متعددی در این زمینه انجام شده است. به عنوان نمونه؛ مرجع [۴] بر روی کاهش اوج بار شبکه با استفاده از باتری‌ها پرداخته است. این مطالعه از طریق جمع‌آوری اطلاعات مربوط به بار شبکه و به کمک روش‌های بهینه‌سازی، بهترین سطح را برای کاهش اوج بار روز آینده تعیین کرده است. مرجع [۵] به مدل‌سازی، شبیه‌سازی و تعیین ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز باتری پرداخته است. هدف از برنامه‌ریزی پیشنهادی این بوده است که از دیدگاه شبکه، پیک بار مصرفی کاهش داده شود. طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، برای خانه‌های کم جمعیت تا پرجمعیت ظرفیت‌های ۵ تا ۲۲ کیلووات ساعتی پیشنهاد گردیده است. همچنین این ایده وجود داشته است که نیاز به نصب ظرفیت زیاد در خانه‌هایی با گرمايش برقی، ممکن است موجب شود تا مشارکت در کاهش پیک برای مشترکان خیلی جذاب نباشد. مرجع [۶] نیز به بحث تعیین ظرفیت باتری برای کاهش اوج بار پرداخته است. این موضوع بصورت برنامه‌ریزی روز آینده انجام شده است. در این مطالعات معمولاً فرض می‌شود که مقدار انرژی که باید کاهش یابد، از روز قبل معلوم است و بر اساس آن میزان ظرفیت بهینه‌ی باتری محاسبه می‌شود. افزایش ظرفیت منابع تجدیدپذیر به دلیل تغییرات تولید همواره با چالش‌هایی روبرو بوده است. مرجع [۷] بکارگیری باتری‌های ذخیره‌ساز در شبکه قدرت را بعنوان یک راه حل برای اصلاح عدم توازن میان توان تولیدی فتولتائیک و تقاضای مصرف‌کننده پیشنهاد داده است. این مطالعه، ظرفیت بهینه باتری‌ها را برای تامین بار مصرف‌کننده خانگی و همچنین کاهش پیک بار در سطح منطقه مورد بررسی قرار داده است.

نتایج نشان دادند که با ظرفیت بهینه‌ی باتری‌ها، حدود ۵.۷٪ اوج بار در همان منطقه کاهش یافت. همچنین پتانسیل کاهش بیش از ۲۰ درصدی اوج بار وجود داشته که نیازمند وجود پیش‌بینی دقیق‌تر از تولید تجدیدپذیرها و همچنین سیستم کنترل مورد استفاده می‌باشد. مرجع [۸] نیز با هدف ارزیابی عملکرد کاهش اوج بار شبکه، یک معیار معرفی نموده که در آن از شاخص‌های متعددی استفاده شده است. همچنین با در نظر گرفتن تعرفه‌های کاهش اوج بار، مبحث مربوط به بازگشت سرمایه نیز در آن بررسی شده است. بدین منظور، دو استراتژی مختلف کاهش اوج بار مقایسه شده‌اند و تاثیر ظرفیت باتری‌ها نیز مورد تحلیل قرار گرفته است. برای یک مشترک دارای فتوولتائیک، نتایج نشان دادند که با اجرای استراتژی‌های کاهش اوج بار، مقدار مصرف سالیانه به میزان ۱۵٪ کمتر شد. همچنین ۷۵٪ درصد از مقدار تزریق انرژی تولید شده توسط فتوولتائیک به شبکه کاهش یافت.

مرجع [۹] بحث کاهش اوج تقاضا را برای یک مشترک صنعتی انجام داده است. این مطالعه مبتنی بر زمان بوده است. به بیان دیگر، باتری فقط در بازه‌های زمانی از قبل تعیین شده، دشارژ می‌شود. هدف [۱۰] این بوده است که کاربرد های سیستم ذخیره انرژی را در محیط صنعتی نشان دهد و موارد مربوط به کاهش پیک که پتانسیل زیادی در بحث اقتصادی و فنی دارد. نتایج نشان دادند که با فعال شدن برنامه‌ی کاهش پیک بار مصرفی همراه با سیستم کنترل ولتاژ، استفاده از باتری‌های ذخیره‌ساز از جنبه‌ی اقتصادی بهبود می‌یابد.

مرجع [۱۱] یک برنامه پیشنهادی برای تعیین ظرفیت باتری ذخیره‌ساز برای استفاده در کاهش اوج بار ارائه نموده است. این تعیین ظرفیت، بر اساس بهینه‌سازی با هدف حداقل‌سازی هزینه انجام شده است که در آن از روش‌های بهینه‌سازی خطی استفاده شده است. نویسندگان مقاله‌ی [۱۲] نیز میزان تاثیر باتری‌های ذخیره‌ساز بر روی کاهش اوج بار شبکه و صاف کردن منحنی بار را مورد بررسی قرار داده‌اند. بخش زیادی از این مطالعه بر روی پیش‌بینی بار مصرفی مشترکان به کمک روش‌های ابتکاری متمرکز شده است. مقادیر پیش‌بینی شده برای برنامه‌ریزی انرژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ بطوری که یک مساله‌ی برنامه‌ریزی غیرخطی برای کاهش اوج بار شبکه پیشنهاد گردیده است. همچنین وجود منابع فتوولتائیک در پیش‌بینی‌ها در نظر گرفته شده تا برنامه‌ریزی بتواند تغییرات توان ناشی از تولید فتوولتائیک‌ها را نیز کاهش دهد.

همچنین [۱۳] برای یافتن بهترین باتری ذخیره‌ساز در یک ناحیه‌ی مسکونی، یک روش بهینه را پیشنهاد داده است. در این مطالعه اهداف مختلفی از جمله کاهش اوج بار و هزینه، برای بهینه‌سازی لحاظ شده است. مرجع [۱۴] نیز استفاده از باتری‌های ذخیره‌ساز را برای بخش تجاری در آلمان مورد بررسی قرار داده است. بررسی‌های فنی-اقتصادی در این مطالعه نشان داده است که تحت شرایط واقعی ممکن

است انگیزه کافی برای بکارگیری باتری‌ها برای برخی از مشترکان تجاری وجود نداشته باشد. همچنین مرجع [۱۵] بررسی و امکان‌سنجی استفاده از باتری‌های ذخیره‌ساز در کاهش پیک بار شبکه را انجام داده است. در این مطالعه به منظور کاهش هزینه‌های پرداختی بابت انرژی، سیستم ذخیره‌ساز به مجموعه‌ی بار افزوده شده است و با توجه به قیمت انرژی، شب‌ها شارژ و روزها دشارژ می‌شود. بررسی اقتصادی برای چهار نوع مختلف باتری انجام شده است. با توجه به شرایط قیمتی و همچنین شبکه‌ی مورد مطالعه، نتایج نشان داده است که فقط در صورت وجود مشوق‌های مالی و یا کاهش قیمت سیستم‌های ذخیره‌ساز، استفاده از این روش توجیه‌پذیر خواهد بود.

در ایران بخش عمده‌ی کاهش اوج بار در شبکه توزیع، توسط سیاست‌های تشویق و جریمه کنترل می‌شود. همچنین طی سالیان اخیر، بکارگیری منابع تولید پراکنده به ویژه فتوولتائیک، به طور جدی در شبکه‌های توزیع دنبال شده است. یکی از مواردی که بسیار می‌تواند به بحث مدیریت الگوی مصرف بار در شبکه‌های توزیع کمک نماید، استفاده از ذخیره‌کننده‌ها می‌باشد. پیش‌بینی می‌شود که در شبکه‌های مدرن و پیشرفته‌ی آینده، ذخیره‌کننده‌ها به ویژه باتری‌ها، نقش بسیار مهمی را در بهره‌برداری شبکه‌های توزیع برق ایفا نمایند. به همین دلیل، این مطالعه قصد دارد تا بحث استفاده از باتری‌های ذخیره‌ساز را در شبکه‌های توزیع مورد بررسی قرار دهد. در این شرایط، مشترکان می‌توانند به یک مقدار ظرفیت باتری مجهز شوند که قادر است در ساعات مختلف شبانه‌روز شارژ یا دشارژ گردد. این ظرفیت حتی می‌تواند مربوط به باتری یک خودروی الکتریکی باشد که به شبکه متصل است. با ورود باتری‌ها به شبکه، تعامل بیشتری بین مشترکان و شرکت‌های توزیع به وجود خواهد آمد. همچنین به دلیل نصب ساده‌تر باتری‌ها نسبت به مولدهایی همچون فتوولتائیک، انتظار می‌رود تا این تکنولوژی‌ها با استقبال زیادی از طرف مشترکان روبرو شوند. البته نیاز است تا شرکت‌های توزیع، انگیزه لازم برای مشترکان خانگی ایجاد نمایند.

در این مطالعه چندین استراتژی برای مدیریت شارژ / دشارژ باتری‌ها در نظر گرفته می‌شود که به کمک نرم‌افزار GAMS شبیه‌سازی‌ها انجام شده و تاثیر مدیریت انرژی باتری‌ها بر روی کاهش اوج بار شبکه بررسی می‌گردد.

باتری‌های ذخیره‌ساز در سطح مصارف خانگی

با نفوذ منابع تولید پراکنده در سطح شبکه‌های توزیع، امروزه نصب و بهره‌برداری از باتری‌های ذخیره‌سازها در شبکه نیز بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ذخیره انرژی یکی از نیازهای مهم در شبکه‌های مدرن و هوشمند آینده خواهد بود. از آنجا که سیستم‌های قدرت در حال توسعه و هوشمندسازی در سطح انتقال و توزیع می‌باشند، مشترکان نیز ترغیب می‌شوند تا مصارفشان را مدیریت نمایند. با توجه

$$\Delta E_{i,t}^{dch} = \frac{1}{\eta_i^{dch}} P_{i,t}^{dch} \Delta t \quad (4)$$

$$\Delta E_{i,t}^{ch}, \Delta E_{i,t}^{dch} \geq 0 \quad (5)$$

$$P_{i,t}^{ch}, P_{i,t}^{dch} \geq 0 \quad (6)$$

که حروف و علائم استفاده شده در این معادلات طبق زیر می‌باشند:

$$P_{i,t}^{ch}: \text{توان شارژ باتری } i \text{ ام در دوره } t$$

$$P_{i,t}^{dch}: \text{توان دشارژ باتری } i \text{ ام در دوره } t$$

$$E_{i,t}: \text{انرژی ذخیره شده در باتری } i \text{ ام در دوره } t$$

$$\Delta E_{i,t}: \text{تغییرات سطح انرژی ذخیره شده در باتری } i \text{ ام در دوره } t$$

$$\Delta E_{i,t}^{ch}: \text{تغییرات سطح انرژی ذخیره شده مربوط به شارژ}$$

$$\Delta E_{i,t}^{dch}: \text{تغییرات سطح انرژی ذخیره شده مربوط به دشارژ}$$

$$\eta_i^{ch}, \eta_i^{dch}: \text{راندمان شارژ و راندمان دشارژ باتری } i \text{ ام}$$

$$\Delta t: \text{گام زمانی برنامه‌ریزی}$$

باید توجه داشت که مقدار انرژی ذخیره شده در باتری به دلایل فنی نمی‌تواند از حد مشخصی بیشتر و یا کمتر شود.

$$E_{i,\min} \leq E_{i,t} \leq E_{i,\max} \quad (7)$$

که در این روابط $E_{i,\min}, E_{i,\max}$: به ترتیب حداکثر و حداقل انرژی ذخیره شده‌ی مجاز در باتری i ام می‌باشند. البته انرژی موجود در باتری به دلایل فنی نمی‌تواند کاملاً تخلیه شود و همواره نباید از یک حداقل کمتر باشد. میزان توان شارژ و دشارژ باتری‌ها نیز دارای محدودیت است. همچنین باتری نمی‌تواند به طور همزمان در یک لحظه شارژ و دشارژ شود. بدین منظور از متغیرهای باینری r, s در مدلسازی استفاده می‌شود. بنابراین قیود شارژ و دشارژ باتری‌ها می‌توانند به صورت زیر بیان شوند.

$$P_{i,t}^{dch} \leq r_{i,t} \times P_{i,\max}^{dch} \quad (8)$$

$$P_{i,t}^{ch} \leq s_{i,t} \times P_{i,\max}^{ch} \quad (9)$$

$$P_{i,t}^{dch} \geq 0 \quad (10)$$

$$P_{i,t}^{ch} \geq 0 \quad (11)$$

$$r_{i,t} + s_{i,t} \leq 1 \quad (12)$$

$$s, r \in \{1, 0\} \quad (13)$$

که حروف و علائم استفاده شده در این روابط طبق زیر می‌باشند:

$$P_{i,\max}^{ch}: \text{حداکثر توان شارژ باتری } i \text{ ام}$$

$$P_{i,\max}^{dch}: \text{حداکثر توان دشارژ باتری } i \text{ ام}$$

$$r_{i,t}: \text{متغیرهای باینری مربوط به شارژ شدن باتری } i \text{ ام در زمان } t$$

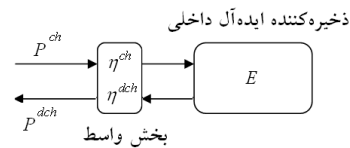
$$s_{i,t}: \text{متغیرهای باینری مربوط به دشارژ شدن باتری } i \text{ ام در زمان } t$$

به وجود تعرفه‌های متعدد در طول شبانه‌روز و همچنین حرکت به سمت هوشمندسازی شبکه، پاسخگویی بار که در سطح مصرف‌کنندگان به وجود می‌آید موجب خواهد شد تا هزینه‌ها کاهش یابد و همچنین از لحاظ اقتصادی وضعیت مشترکان را بهبود می‌بخشد. از دید بهره‌برداران و مالکان شبکه نیز این موضوع انعطاف‌پذیری بهره‌برداری توزیع را بیشتر کرده و توسعه‌ی شبکه‌های توزیع به تعویق می‌اندازد.

باتری‌های موجود در بازار از تکنولوژی‌های مختلفی بهره می‌گیرند که موجب می‌شود آن‌ها مشخصات فنی متفاوتی داشته باشند. برخی از تکنولوژی‌های مهم باتری‌ها عبارتند از سربی، سرب-اسیدی^۱، لیتیومی، نیکلی (نیکل-کادمیوم، نیکل-متال هیدراید، نیکل-هیدروژن و نیکل-روی) و سدیمی. وجود منابع ذخیره‌ساز مانند باتری‌ها در سطح شبکه توزیع می‌تواند سرویس‌های مختلفی را برای بهره‌برداران ایجاد نماید که از جمله می‌توان به مواردی همچون کاهش اوج بار، مسطح نمودن بار^۲، کمک به نفوذ منابع تجدیدپذیر به شبکه، و کنترل ولتاژ اشاره نمود [۱۱].

مدل شارژ/دشارژ باتری ذخیره‌ساز انرژی

بطور کلی یک تجهیز ذخیره‌کننده انرژی را می‌توان مانند شکل ۱ در نظر گرفت که از یک بخش ذخیره‌کننده ایده‌آل داخلی و یک بخش واسط تشکیل می‌شود [۱۶]. ممکن است نوع انرژی ورودی به مجموعه ذخیره‌ساز با انرژی ذخیره شده در بخش داخلی متفاوت باشد. به عبارت دیگر، بخش واسط می‌تواند انرژی را از یک فرم به فرم دیگری تبدیل کند؛ بنابراین مقدار توان ورودی پس از عبور از بخش واسط که دارای تلفات بوده در بخش داخلی ذخیره می‌شود.



شکل ۱. مدل ذخیره‌ساز انرژی

در مدیریت انرژی مرتبط با شارژ/دشارژ ذخیره‌کننده‌های انرژی، انرژی ذخیره شده را می‌توان طبق روابط زیر محاسبه نمود [۱۷].

$$E_{i,t} - E_{i,t-1} = \Delta E_{i,t} \quad (1)$$

$$\Delta E_{i,t} = \Delta E_{i,t}^{ch} - \Delta E_{i,t}^{dch} \quad (2)$$

$$\Delta E_{i,t}^{ch} = \eta_i^{ch} P_{i,t}^{ch} \Delta t \quad (3)$$

¹ Lead-acid battery

² Load leveling

معیارهای مختلفی را می‌توان به عنوان تابع هدف برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ باتری‌های ذخیره‌ساز در نظر گرفت. یکی از معمول‌ترین توابع هدف، حداقل‌سازی هزینه بابت خرید انرژی از شبکه می‌باشد. در این بخش نیز هدف از مدیریت شارژ و دشارژ باتری‌ها، رسیدن به حداقل هزینه در نظر گرفته شده است بطوری که مشترکان به دنبال حداقل‌سازی هزینه انرژی خود می‌باشند. به منظور بررسی تاثیر برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ ظرفیت باتری‌های موجود در مسیر فیدر بر روی کل بار فیدر، در اینجا فرض می‌شود که شرایط بار مصرفی و همچنین باتری‌ها برای همه‌ی مشترکان یکسان است. بنابراین تابع هدف بصورت حداقل‌سازی کل هزینه‌ی انرژی خواهد بود. این هزینه از اختلاف انرژی خریداری شده و فروخته شده به شبکه حاصل می‌گردد

$$\text{Min } F = \sum_t f_t \quad (21)$$

$$f_t = (\pi_t^{fg} P_t^{fg} - \pi_t^{tg} P_t^{tg}) \times \Delta t \quad \forall t \quad (22)$$

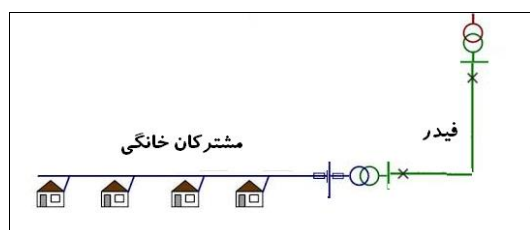
$$P_t^{grid} = P_t^{fg} - P_t^{tg} \quad ; \quad P_t^{fg}, P_t^{tg} \geq 0 \quad (23)$$

که π_t^{fg}, π_t^{tg} به ترتیب قیمت خرید و فروش انرژی و P_t^{fg}, P_t^{tg} نیز توان خریداری شده و فروخته شده در زمان t می‌باشند.

۲- شبیه‌سازی

۲-۱- سیستم مورد مطالعه

در این بخش، قسمتی از یک فیدر شبکه توزیع شعاعی در نظر گرفته می‌شود که پس از کاهش ولتاژ توسط ترانس‌سفرماتور، یک سری مشترکان خانگی توسط آن تغذیه می‌شوند. با فرض متعادل و مشابه بودن سه فاز با یکدیگر، دیاگرام تک خطی این سیستم در شکل زیر برای یک فاز نمایش داده شده است.



شکل ۲. شماتیک سیستم مورد مطالعه

بار مصرفی این بخش از فیدر برای یک روز نمونه از تابستان (رخداد اوج بار در ساعات میانی روز و ابتدای شب) و یک روز نمونه از زمستان (رخداد اوج بار در ساعات ابتدای شب) مطابق شکل‌های ۳ و ۴ در نظر گرفته شده است.

در مسائلی که تلفات حالت آماده به کار (استندبای) باتری و همچنین تعداد تغییر حالت از وضعیت شارژ به شارژ مدنظر نباشد، رابطه (۱۲) را می‌توان بصورت رابطه‌ی تساوی نوشت. بطور کلی، شارژ و دشارژ شدن باتری‌ها بر روی طول عمر آن‌ها تاثیر می‌گذارد. بنابراین در بسیاری از مواقع برای مدیریت انرژی باتری‌ها، مقدار انرژی تبدلی میان باتری و شبکه و یا تعداد تغییر وضعیت بین حالت شارژ و دشارژ در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی محدود می‌شود. برای بکارگیری قید تغییر وضعیت شارژ/دشارژ، باید از رابطه‌ی بین متغیرهای S و T استفاده نمود که می‌تواند مساله را از حالت خطی خارج کند. به همین دلیل برای محدود نمودن میزان شارژ/دشارژ باتری در طول دوره، در اینجا از قید مقدار انرژی تبدلی مجاز باتری در طول دوره استفاده شده است که در زیر آورده شده است.

$$N_{\max} \times E_{i,\max} \geq \sum_t \Delta E_{i,t}^{ch} + \sum_t \Delta E_{i,t}^{dch} \quad (14)$$

در این رابطه، N_{\max} حداکثر تعداد دفعاتی است که باتری می‌تواند به اندازه‌ی کل ظرفیت خود با شبکه تبادل انرژی داشته باشد. البته از جایی که باتری همواره دارای حداقل سطح شار مجاز می‌باشد، می‌توان به جای $E_{i,\max}$ در این رابطه از $(E_{i,\max} - E_{i,\min})$ استفاده نمود. اگر تعدادی باتری در یک ناحیه مانند یک فیدر متصل به بارهای مسکونی وجود داشته باشد، در هر لحظه توان دریافتی از شبکه باید با میزان بار مصرفی برابری نماید.

$$D_t + P_t^{Bat} - P_t^{grid} = 0 \quad (15)$$

$$P_t^{Bat} = \sum_i P_{i,t}^{ch} - \sum_i P_{i,t}^{dch} \quad (16)$$

$$D_t = \sum_i d_{i,t} \quad (17)$$

$$P_t^{grid} = \sum_i P_{i,t} \quad (18)$$

که $d_{i,t}$ و $P_{i,t}$ به ترتیب مقدار توان دریافتی و بار مصرفی مشترک i ام، D_t میزان بار مصرفی فیدر و P_t^{Bat} برآیند توان کل باتری‌های موجود در مسیر فیدر هستند و P_t^{grid} نیز توان دریافتی از شبکه در لحظه‌ی t بوده که دارای محدودیت حداکثر توان تبدلی P_{\max}^{grid} می‌باشد. در شبکه‌های توزیع مدرن، تبادل توان بین مصرف‌کنندگان و شبکه ($P_{i,t}$) به صورت دوطرفه می‌باشد و امکان تزریق توان توسط مشترکان به شبکه وجود دارد. همچنین در صورتی که تبادل توان فقط یکطرفه باشد، حد پایین توان دریافتی از شبکه صفر خواهد بود.

$$-P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (19)$$

$$-P_{\max}^{grid} \leq P_t^{grid} \leq P_{\max}^{grid} \quad (20)$$

جدول ۱. مشخصات باتري ذخيره‌ساز

مقادير	پارامتر
$\eta^{ch} = 0.93, \eta^{dch} = 0.93$	راندمان
$P_{max}^{ch} = 1kW, P_{max}^{dch} = 1kW$	حداکثر توان شارژ/دشارژ
$E_{max} = 3kWh, E_{min} = 0.3kWh$	حداقل و حداکثر انرژي

همچنين براي باتري‌ها محدوديت شارژ/دشارژ روزانه تعيين شده است، اينگونه که حداکثر انرژي تبديلي آن‌ها در روز نبايد از ۳ برابر ظرفيت آن‌ها عبور نمايد. سطح شارژ اوليه‌ي باتري‌ها نيز مقدار حداقل انرژي، يعني ۰.۳ کيلووات ساعت لحاظ گرديده است.

در شرايط فعلي، تعرفه‌هاي بخش خانگي بصورت پلکاني تعريف مي‌شود. در اين جا فرض مي‌شود براي باتري‌ها یک کنترولر مجزا نصب مي‌شود تا مقدار مصرف و توليد آن‌ها در ساعات مختلف ثبت شده و براي آن قبض صادر گردد.

در اين مطالعه، قيمت هر کيلووات ساعت برق مصرفي در ساعات کم-باري ۲۵، ميان باري ۵۰ و اوج بار ۱۰۰ تومان لحاظ شده است. همچنين فرض مي‌شود که قيمت فروش انرژي به شبکه (دشارژ هر کيلووات ساعت انرژي) ۵۰ درصد بيشتري از قيمت خريد (شارژ هر کيلووات ساعت انرژي) خواهد بود.

به منظور انجام شبیه‌سازي، استراتژي‌هاي مختلفي براي شارژ/دشارژ باتري‌ها در نظر گرفته شده است از جمله:

سناريو ۱- قيمت فروش انرژي به شبکه (دشارژ باتري) در تمام ساعات شبانه روز، بيشتري از قيمت خريد (شارژ باتري) باشد.

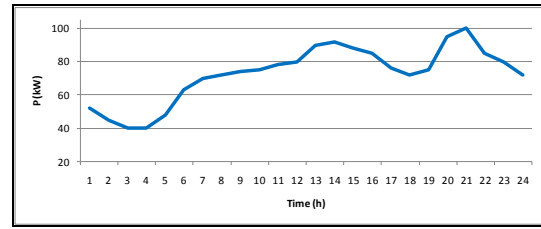
سناريو ۲- به جز ساعات کم‌باري، قيمت فروش انرژي به شبکه (دشارژ باتري) در بقيه ساعات بيشتري از قيمت خريد (شارژ باتري) باشد. همچنين باتري‌ها نمي‌توانند در ساعات اوج بار شارژ شوند.

سناريو ۳- باتري‌ها فقط در ساعات اوج بار مي‌توانند دشارژ شوند و در اين زمان‌ها نمي‌توانند شارژ شوند.

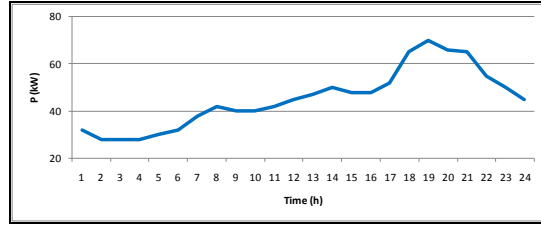
بررسی نتایج شبیه‌سازی:

سناريو ۱:

در اين حالت فرض مي‌شود که در تمام ساعات شبانه روز باتري‌ها مي‌توانند شارژ/دشارژ شوند و قيمت فروش انرژي به شبکه توسط باتري‌ها بيشتري از قيمت خريد از شبکه مي‌باشد. طبق نتايج شبیه‌سازي، تحت اين شرايط الگوي شارژ و دشارژ باتري‌ها موجود در سيستم مورد مطالعه براي شرايط بار مصرفي تابستاني و زمستاني مطابق شکل‌هاي زير خواهد بود.



شکل ۳. بار مصرفي فيدر مورد مطالعه در یک روز تابستاني



شکل ۴. بار مصرفي فيدر مورد مطالعه در یک روز زمستاني

در سيستم‌هاي قدرت، شاخص ضريب بار^۱ به عنوان نسبت متوسط بار مصرفي به حداکثر بار مصرفي در طول دوره برنامه‌ريزي تعريف مي‌شود. اين ضريب هر چقدر به مقدار واحد نزديکتر باشد بيانگر آن است که الگوي مصرف صاف‌تر بوده و از زير ساخت‌هاي شبکه به صورت موثرتر استفاده مي‌شود. ضريب بار طبق رابطه زير تعريف مي‌شود:

$$LF = \frac{L_{ave}}{L_{max}} \quad (23)$$

که LF ضريب بار، L_{ave} ميزان بار متوسط و L_{max} حداکثر بار مصرفي در طول دوره برنامه‌ريزي مي‌باشد. به عنوان نمونه ضريب بار براي الگوي بار مصرفي نشان داده شده در شکل‌هاي ۳ و ۴ به ترتيب ۰.۷۳ و ۰.۷ مي‌باشد.

در فيدر مورد مطالعه فرض مي‌شود باتري‌ها از قبل بصورت نصب شده موجود هستند و بنا بر اين فقط هزينه‌ي مربوط به تبديل انرژي در برنامه‌ريزي مدنظر قرار مي‌گيرد. قيمت‌هاي خريد و فروش اعلا مي‌تواند طرف فروشنده‌هاي برق تاثير بسيار زيادي در انگيزه مشترکان بابت شارژ و دشارژ باتري‌ها خواهد داشت. لازم به ذکر است که بابت و جود تلفات در باتري‌ها، مقدار انرژي که باتري بابت شارژ از شبکه دريافت مي‌کند با مقدار انرژي که طی سیکل دشارژ به شبکه تزریق می‌گردد، متفاوت خواهد بود. در باتري‌ها، حاصل ضرب راندمان شارژ و دشارژ باتري را راندمان سیکل باتري (η^{cycle}) مي‌نامند.

$$\eta^{cycle} = \eta^{ch} \times \eta^{dch} \quad (24)$$

با فرض يکسان بودن مشخصات باتري‌ها، در جدول زير اطلاعات مربوط به آن‌ها آورده شده است.

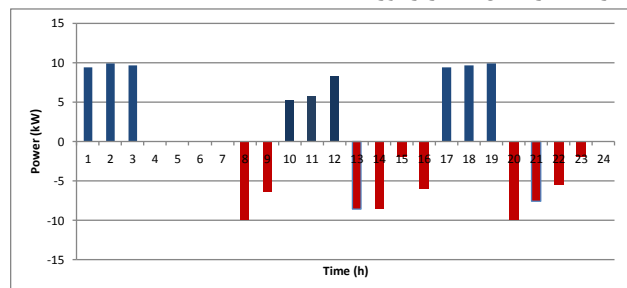
¹ Load factor

شکل ۶. الگوی بار فیدر مورد مطالعه در شرایط الگوی بار الف) تابستانی و ب) زمستانی - خط توپر جدید و خط چین قدیم

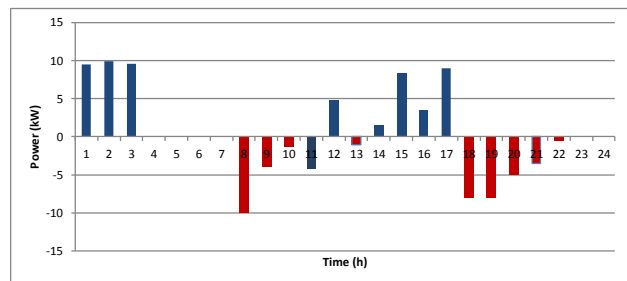
با توجه به این شکل‌ها می‌توان دریافت که برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ باتری‌ها خیلی نتوانسته است به صاف شدن کرمک نماید. همچنان مشخص است که در وضعیت بار تابستان اوج بار شبکه تغییر چندانی نکرده و در الگوی زمستانی حتی با اندک افزایش اوج بار نیز مواجه بوده‌ایم. با الگوی بار مصرفی جدید، ضریب بار برای پروفیل بار مصرفی تابستان و زمستان به ترتیب چیزی در حدود ۰/۷۶ و ۰/۶۴ می‌باشد که می‌توان گفت ضریب بار نسبت به حالت پایه در تابستان افزایش یافته است؛ در حالی که در زمستان با کاهش اندکی همراه شده است. با فرض اینکه هزینه انرژی مشترکان بر اساس تعرفه‌های اعلام شده محاسبه می‌گردد، هزینه انرژی برای بار تابستانی و زمستانی در این سناریو به ترتیب ۱۰۸۱۱۰ و ۵۸۳۹۸ تومان خواهد بود.

سناریو ۲:

در این حالت فرض می‌شود که باتری‌ها فقط در ساعات غیر کم‌باری می‌توانند دشارژ شوند و بهره‌بردار شبکه قیمت تشویقی برای فروش در این ساعات در نظر نگرفته است. به بیان دیگر در این مدل، برای مالکان انگیزه‌ای وجود ندارد تا باتری‌ها در ساعات کم‌باری دشارژ شوند. همچنین در این حالت باتری‌ها نمی‌توانند در ساعات اوج بار شارژ شوند. تحت این شرایط، نتایج شبیه‌سازی برای الگوی شارژ/دشارژ باتری‌ها در شکل‌های زیر آورده شده است.



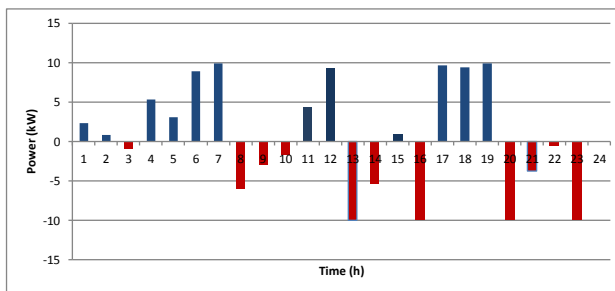
(الف)



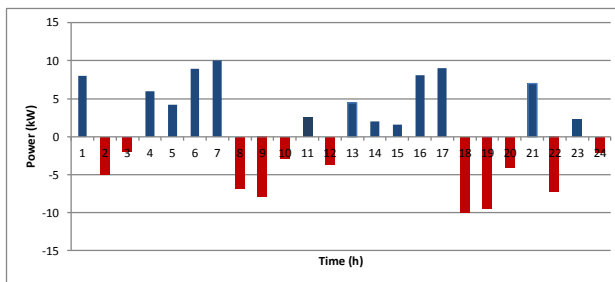
(ب)

شکل ۷. الگوی شارژ/دشارژ باتری در طول شبانه‌روز در شرایط الگوی بار الف) تابستانی و ب) زمستانی

همانگونه که مشاهده می‌شود، باتری‌ها در ساعات کم‌باری دشارژ نخواهند شد. در هر دو شکل مشخص است که باتری‌ها تمایل دارند تا



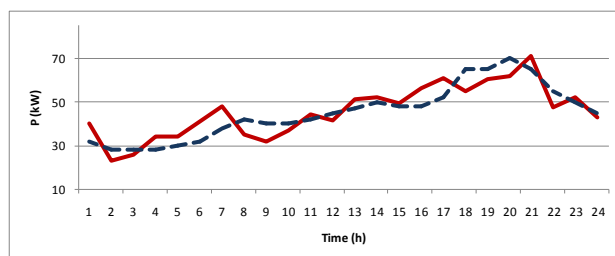
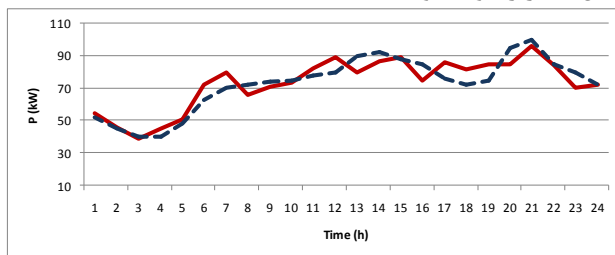
(الف)

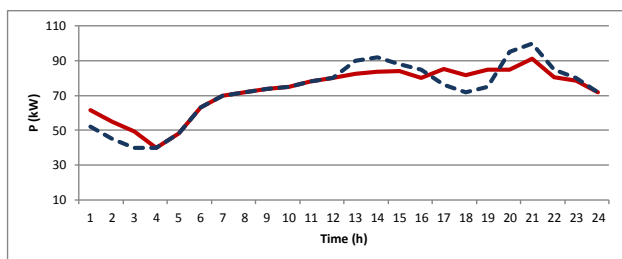


(ب)

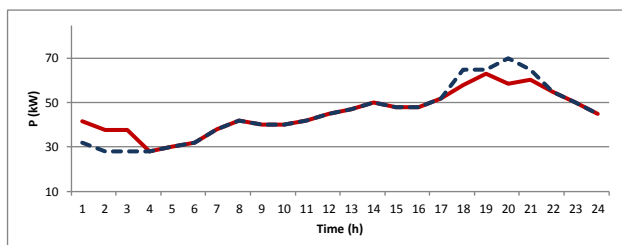
شکل ۵. الگوی شارژ/دشارژ باتری در طول شبانه‌روز در شرایط الگوی بار الف) تابستانی و ب) زمستانی

همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود در ساعات گرانی برق به دلیل انگیزه مالی، باتری‌ها تمایل به دشارژ شدن دارند. اما با بررسی بیشتر در ساعات مختلف، می‌توان به این موضوع پی برد که در هر دو نمودار در برخی ساعات کم‌باری نیز (مانند ساعت ۳) عمل دشارژ صورت گرفته است. دلیل این موضوع انگیزه سود بوده است چون مالکان با قیمت بالاتر انرژی را فروخته و همچنین در ساعات بعد فرصت دارند تا مجدداً باتری‌ها را شارژ نمایند. اما دشارژ شدن باتری در ساعات کم‌باری نمی‌تواند برای بهره‌بردار شبکه مفید باشد، بلکه بهره‌بردار به دنبال ترغیب مشترکان به مصرف بیشتر در این ساعات است. به همین دلیل این استراتژی برای شارژ/دشارژ باتری‌ها خیلی مفید نخواهد بود. با انجام برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ باتری‌ها، توان دریافتی از فیدر مطابق شکل‌های زیر خواهد بود.





(الف)



(ب)

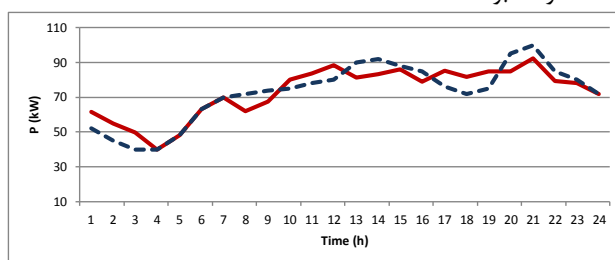
شکل ۹. الگوی بار فیدر مورد مطالعه در شرایط الگوی بار (الف) تابستانی و (ب) زمستانی - خط توپر جدید و خط چین قدیم

همانطور که مشاهده می‌شود، میزان توان دریافتی از شبکه در ساعت اوج بار با کاهش روبرو بوده است و موجب صاف تر شدن الگوی بار شبکه می‌گردد. با الگوی بار مصرفی جدید، ضریب بار برای پروفیل بار مصرفی تابستان و زمستان به ترتیب چیزی در حدود 0.72 و 0.80 می‌باشد که می‌توان گفت ضریب بار نسبت به سناریوی قبل تغییر چندانی نداشته است؛ هرچند در تابستان کمی به بود و در زمستان کمی کاهش یافته است. همچنین هزینه انرژی برای بار تابستانی و زمستانی در این سناریو به ترتیب 108794 و 59434 تومان خواهد بود.

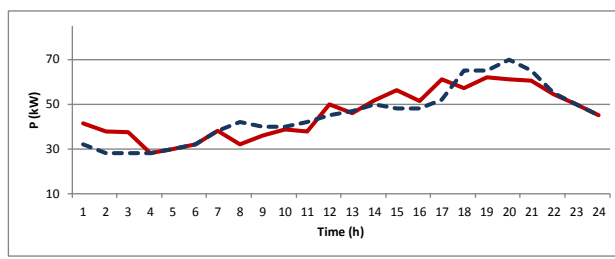
بطور کلی، شکل‌های ۱۰ (الف) و (ب) وضعیت ضریب بار را به ترتیب برای بار تابستان و زمستان در هر سناریو نشان می‌دهند. برای الگوی بار تابستانی، وضعیت ضریب بار در همه سناریوها نسبت به حالت پایه بهتر شده است؛ بگونه‌ای که به جز سناریوی اول، در بقیه حالات ضریب بار حدود 0.8 خواهد بود. به عبارت دیگر، سناریوی اول تاثیر چندانی بر روی بهبود وضعیت پروفیل بار مصرفی نداشته است و سناریوهای دوم و سوم نیز بیشترین تاثیر را روی بار فیدر خواهند داشت. برای الگوی بار زمستانی نیز سناریوی ۱ تاثیر منفی بر روی وضعیت پروفیل بار مصرفی داشته است. به عبارت دیگر حضور باتری روی فیدر اگر همراه با برنامه ریزی شارژ/دشارژ به صورت سناریوی ۱ شود، وضعیت ضریب بار فیدر را بدتر خواهد کرد. طبق نتایج حاصل شده، اجرای سناریوی ۱ در زمستان موجب افزایش 1 کیلوواتی اوج بار می‌گردد. از طرف دیگر بقیه سناریوها می‌توانند این وضعیت را بهبود دهد طوری که در سناریوهای ۲ و ۳ ضریب بار فیدر بیش از 0.7 خواهد بود.

در برخی ساعات میان باری دشارژ شوند که این موضوع به دلیل انگیزه سود از محل فروش برق به شبکه می‌باشد. همچنین در این برنامه ریزی، باتری‌ها در زمان‌های کم‌باری و میان باری شارژ شده‌اند و بیشترین سهم دشارژ باتری‌ها مربوط به ساعات اوج بار بوده است.

حال اگر طبق این برنامه ریزی عمل شود و الگوی شارژ/دشارژ باتری‌ها طبق شکل‌های زیر باشد، آنگاه میزان توان دریافتی از شبکه نیز تغییر می‌کند. تحت این شرایط توان دریافتی فیدر مطابق شکل‌های زیر خواهد بود. همانطور که قابل مشاهده است، مقدار مصرف در ساعات اوج بار کمی کاهش داشته است. لازم به ذکر است در این شرایط ضریب بار جدید برای الگوی بار تابستانی و زمستانی به ترتیب 0.79 و 0.74 خواهد بود.



(الف)



(ب)

شکل ۸. الگوی بار فیدر مورد مطالعه در شرایط الگوی بار (الف) تابستانی و (ب) زمستانی - خط توپر جدید و خط چین قدیم

همچنین هزینه انرژی برای بار تابستانی و زمستانی در این سناریو به ترتیب 108470 و 58723 تومان خواهد بود.

- سناریو ۳:

به منظور بررسی بیشتر، یک استراتژی دیگر نیز در نظر گرفته شده است که در آن فرض می‌شود باتری‌ها فقط در زمان اوج بار می‌توانند دشارژ شوند. با انجام برنامه ریزی شارژ/دشارژ باتری‌ها، توان دریافتی از فیدر مطابق شکل‌های زیر خواهد بود.

عمر پروژه است. همچنین $CRF(.)$ ضریب بازگشت سرمایه است و بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$CRF(i, R_p) = \frac{i(i+1)^N}{(i+1)^N - 1}$$

که N تعداد سال می‌باشد. نرخ بهره واقعی سالانه i یکی از پارامترهای مهم اقتصادی بوده و برابر است با:

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (26)$$

که f نرخ تورم و i' نرخ بهره نامی (نرخ است که می‌توان وام بانکی دریافت کرد) می‌باشند. به طور خلاصه، اطلاعات در نظر گرفته شده برای تحلیل اقتصادی به شرح زیر می‌باشد:

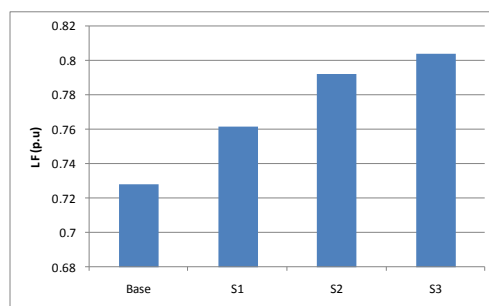
- ظرفیت باتری‌های قابل نصب در مسیر فیدر: ۳۰ کیلووات ساعت
- حداکثر توان شارژ/دشارژ باتری‌های موجود در مسیر فیدر: ۱۰ کیلووات
- قیمت خرید برق تضمینی هر کیلووات ساعت: بر روی قیمت‌های ۲۰۰ تومان تا ۲۰۰۰ تومان
- هزینه نصب باتری ۱ کیلووات ساعتی متصل به شبکه: ۲۰۰ دلار معادل با ۲ میلیون تومان
- نرخ بهره واقعی: ۵ درصد.

در این قسمت قیمت هر کیلووات ساعت برق خریداری شده از شبکه ۱۰۰ تومان و نرخ بهره واقعی ۵ درصد در نظر گرفته شده است. البته با توجه به وضعیت کنونی اقتصاد، نمی‌توان برای نرخ بهره واقعی عدد مشخص و ثابتی متصور بود.

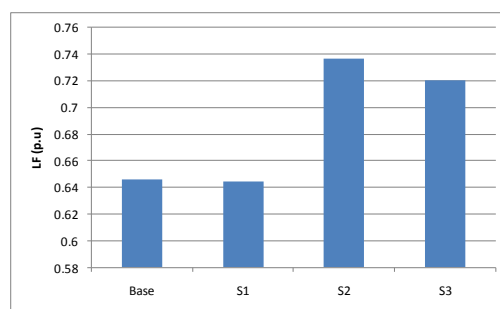
با توجه به این که طول عمر مفید باتری محدود است و هر روز شارژ/دشارژ انجام می‌شود، بطور تقریبی عمر مفید باتری برای بهره‌برداری در این سیستم ۲.۵ سال می‌باشد و پس از آن باید مجدداً با باتری جدید تعویض گردد. لازم به ذکر است که در این مطالعه هر دلار معادل با ۱۰ هزار تومان در نظر گرفته شده است. تحت این شرایط، شبیه‌سازی‌های متعدد برای قیمت‌های تضمینی مختلف انجام شده که نتایج به صورت جدول زیر بوده است.

جدول ۲. وضعیت بازگشت سرمایه برای نرخ بهره ۵٪ و نرخ‌های مختلف خرید تضمینی

نرخ بازگشت سرمایه (%)	قیمت خرید تضمینی هر کیلووات ساعت برق (تومان)
-	۶۰۰
-	۸۰۰
۱۰	۱۰۰۰
۱۸.۵	۱۲۰۰
۲۸	۱۵۰۰
۴۴	۱۸۰۰
۵۳	۲۰۰۰



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. ضریب بار تحت شرایط وجود باتری و برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ در شرایط الگوی بار (الف) تابستانی و (ب) زمستانی

۳- بررسی اقتصادی

در قسمت قبلی فرض شد که باتری‌های ذخیره‌ساز در شبکه وجود دارند و تاثیر وجود این باتری‌ها بر روی الگوی بار فیدر بررسی گردید. نتایج حاکی از آن بودند که با حضور باتری‌ها در شبکه و همچنین وجود اهرم قیمتی مناسب برای برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ، باتری‌ها می‌توانند موجب کاهش اوج بار و صاف‌تر شدن الگوی مصرف گردند. حال در این بخش، هزینه نصب اولیه و قیمت فروش برق به شبکه نیز مطرح شده و انگیزه بکارگیری باتری‌های ذخیره‌ساز توسط مشترکان خانگی از لحاظ اقتصادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. یکی از نرم‌افزارهای مهم و معتبر در زمینه‌ی بررسی فنی و اقتصادی سیستم‌های تولید پراکنده، نرم‌افزار Homer می‌باشد. این نرم‌افزار قادر است تا تمام هزینه‌ها و درآمدها را در نظر گرفته و همه را به ارزش پول امروز در بیاورد؛ سپس با مقایسه بین سیستم‌ها مختلف می‌توان تصمیم اقتصادی را اتخاذ نمود.

طبق اطلاعات ارائه شده توسط توسعه‌دهندگان، نرم‌افزار مورد استفاده، پروژه‌های مختلف را بر اساس هزینه‌ی فعلی کل پروژه دسته‌بندی می‌نماید؛ بدین منظور از معادله زیر برای محاسبه ارزش فعلی پول استفاده می‌کند [۱۸].

$$NPC = \frac{C_{tot}^{ann}}{CRF(i, R_p)} \quad (25)$$

در این رابطه، NPC همان هزینه کل سیستم با ارزش امروزی، C_{tot}^{ann} هزینه کل سالیانه، i مربوط به نرخ بهره واقعی سالیانه و R_p بیانگر طول

شود. البته تغییرات نرخ ارز و همچنین در نظر گرفتن تسهیلات مناسب برای نصب باتری‌ها، این قیمت را تغییر خواهد داد.

مراجع

- [1]. Uddin, M. et. al., "A review on peak load shaving strategies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 3323–3332, 2018.
- [2]. "Battery energy storage for smart grid applications", Eurobat report, 2013; available at: www.eurobat.org
- [3]. Torriti, J., "Price-based demand side management: Assessing the impacts of time-of-use tariffs on residential electricity demand and peak shifting in Northern Italy", *Energy*, Vol. 44, pp. 576–583, 2012
- [4]. Karmiris, G., Tengner, T., "Peak shaving control method for energy storage", *Corporate Research Center Vasterås Sweden*, 2013.
- [5]. Leadbetter, J., Swan, L., "Battery storage system for residential electricity peak demand shaving", *Energy and Buildings*, Vol. 55, pp. 685–692, 2012.
- [6]. Venu, C., Riffonneau Y., et al., "Battery storage system sizing in distribution feeders with distributed photovoltaic systems", *PowerTech, IEEE Bucharest*, pp.1-5, 2009.
- [7]. Schram, W. L., et al., 'Photovoltaic systems coupled with batteries that are optimally sized for household self-consumption: Assessment of peak shaving potential' *Applied Energy*, Vol. 223, pp. 69–81, 2018.
- [8]. Jankowiak, C., et. al, "Assessing the benefits of decentralised residential batteries for load peak Shaving" *Journal of Energy Storage*, Vol. 32, 101779, 2020.
- [9]. Mattern, K., et al., "Application of inverter-based systems for peak shaving and reactive power management", *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2008.
- [10]. Berezki, B., Hartmann, B., Kertész, S. "Industrial application of battery energy storage systems: peak shaving", *International Youth Conference on Energy (IYCE), Bled, Slovenia*, 2019.
- [11]. Rodrigo M., et al., "Optimal component sizing for peak shaving in battery energy storage system for industrial applications", *Energies*, Vol. 11, pp. 1-22, 2018.
- [12]. Reihani, E., et. al., "Load peak shaving and power smoothing of a distribution grid with high renewable energy penetration" *Renewable Energy*, Vol. 86, pp. 1372-1379, 2016.
- [13]. Tant, J., et al., "Multiobjective battery storage to improve PV integration in residential distribution grids", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol.4, pp. 182–191, 2013.
- [14]. Merei, G., et. al, "Optimization of self-consumption and techno-economic analysis of PV-battery systems in commercial applications", *Applied Energy*, Vol. 168, pp. 171–178, 2016.
- [15]. Telaretti, E., Dusonchet, L., "Battery storage systems for peak load shaving applications: Part 1: Operating strategy and modification of the power diagram", *International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence*, pp. 1-6, 2016,
- [16]. Zarif, M., Khaleghi, S., Javidi, M.H.: 'Assessment of electricity price uncertainty impact on the operation of multi-carrier energy systems', *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 9, pp. 2586–2592, 2015.
- [17]. Ghasemi, A., Banejad, M., Rahimiyan, M., "Integrated energy scheduling under uncertainty in a micro energy grid", *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol.12, pp. 2887 – 2896, 2018.
- [18]. HOMER Pro 3.14 user manual, 2020; available at: www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/index.html

همانطور که نتایج نشان می‌دهند، نصب باتری برای قیمت‌های کمتر از ۱۲۰۰ تومان توجیه اقتصادی نخواهد داشت. به عبارت دیگر برای آن که مشترکان در شبکه توزیع برای نصب و بهره‌برداری از باتری‌های ذخیره‌ساز انگیزه داشته باشند، نیاز است تا قیمت خرید تضمینی برق از باتری‌ها چیزی بالاتر از ۱۲۰۰ تومان تعیین گردد. البته با توجه به شرایط اقتصادی ایران باید به این نکته توجه داشت که با افزایش نرخ ارز، حداقل قیمت خرید تضمینی مورد نیاز نیز بیشتر می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر استفاده از باتری‌های ذخیره‌ساز بر روی کاهش اوج بار شبکه توزیع مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور پس از بررسی لزوم بکارگیری ذخیره‌سازها در سیستم قدرت و همچنین تکنولوژی‌های مختلف باتری‌های موجود در بازار، بحث مدیریت انرژی باتری‌ها به صورت یک مساله‌ی بهینه‌سازی مطرح گردید. با در نظر گرفتن یک سیستم نمونه، تاثیر مدیریت انرژی باتری‌ها بر روی کاهش اوج بار شبکه توزیع شبیه‌سازی شد و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان دادند که اهم‌ت‌ت‌شویقی قیمت می‌تواند صرف-کنندگان را ترغیب نماید تا در ساعات اوج بار، با دشارژ نمودن انرژی موجب کاهش اوج بار شبکه توزیع شوند. دشارژ شدن باتری در ساعات کم‌باری می‌تواند وضعیت ضریب بار (LF) را بدتر نماید که این موضوع باید در مدیریت انرژی باتری‌ها لحاظ گردد. شارژ شدن باتری در ساعات اوج بار موجب بدتر شدن وضعیت بار شبکه و در نتیجه موجب کوچکتر شدن ضریب بار خواهد شد که این موضوع نیز باید در مدیریت انرژی باتری‌ها لحاظ گردد. از طرف دیگر، در نظر گرفتن تعرفه تشویقی و مقید نمودن سیستم مدیریت انرژی به عدم شارژ در ساعات اوج بار و عدم دشارژ در ساعات کم‌باری (که این موضوع نیز می‌تواند توسط تعرفه خرید و فروش برق اعمال گردد)، کاهش اوج بار فیدر و همچنین بهبود ضریب بار نسبت به حالت پایه را به همراه خواهد داشت. شبیه‌سازی‌ها علاوه بر در نظر گرفتن بار نمونه در تابستان، برای الگوی بار زمستانی نیز انجام شدند که نتایج نشان دادند استفاده از باتری‌های ذخیره‌ساز توسط مشترکان در هر دو حالت می‌تواند تاثیرات مثبتی بر روی بهبود وضعیت اوج بار شبکه و ضریب بار داشته باشد. اگر تعرفه تشویقی بصورت هدفدار اعمال شود (عدم استفاده از سناریوی اول) تاثیرگذاری باتری‌ها قابل توجه‌تر خواهد بود. در ادامه نیز برای حالتی که باتری‌ها در شبکه وجود نداشته باشند، بررسی اقتصادی استفاده از باتری‌های ذخیره‌ساز انجام شد. با در نظر گرفتن هزینه ۲ میلیون تومانی به ازای هر کیلووات ساعت ظرفیت باتری و همچنین نرخ بهره ۵ درصدی، نتایج نشان دادند که برای جذاب بودن پروژه نصب باتری توسط مشترکان بخش خانگی، قیمت خرید تضمینی برق در ساعات اوج بار باید بالای ۱۲۰۰ تومان تعیین