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

3- 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 بخ شی از آن را به ساعات دیگر منتقل نمود. با گسترش مفهوم ریزشبکه و هوشمندسازی شبکه‌های الکتریکی، ا ستفاده از م نابع تول ید پراک نده و ذخیره‌کننده‌ها به عنوان یک راه برای حل این مشکل مطرح شده است؛ بطوری که امروزه این قبیل تکنولوژی‌ها با سرعت بی شتری 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 ذخ یره 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، معمولا در ساعات مختلف شبانه‌روز شباهت‌هایی با یکدیگر دارد. این موضوع باعث می‌شود تا در برخی ساعات توان دریافتی از شبکه به حداکثر مقدار خود برسد که در اصطلاح، ساعات اوج بار شبکه شکل می‌گیرد. در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، زیاد 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 تشویق های 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 شبکه های 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 مانند فتوولتائیک یا مولدهای گازسوز صورت بگیرد و همچنین می‌توانند 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 مصرف-کنندگان نیز می‌تواند به حل مشکل اوج بار کمک زیادی کند. امروزه افزایش منابع تولید پراکنده و ذخیره سازها در شبکه‌های توزیع و همچنین افزایش سطح تبادل اطلاعات و ارتباط مخابراتی بین بخش‌های مختلف، وضعیت شبکه‌های توزیع را از جنبه های مختلف بهبود داده است. با وجود زیرساخت‌های مناسب در شبکه‌ی توزیع می-توان 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 معمولا توسط مصرف‌کنندگان نهایی مورد استفاده می‌گیرند. با توجه به نقش مهم مشترکان شبکه در موفقیت‌آمیز 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 شبکه های توزیع شده است؛ هرچند نوسانات ارزی اخیر تاثیر منفی روی این موضوع داشته است. البته لازم به ذکر است که این سیاست های تشویقی همواره بر روی نفوذ منابع تولید به ویژه فتوولتائیک تاکید داشته و بکارگیری 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 ذخیره ساز 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 خانه هایی با گرمایش 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 برنامه-ریزی روز آینده انجام شده است. در این مطالعات معمولا فرض می‌شود که مقدار انرژی که باید کاهش یابد، از روز قبل معلوم است و بر اساس آن میزان ظرفیت بهینه‌ی باتری محاسبه می شود. افزایش ظرفیت منابع تجدیدپذیر به دلیل تغییرات تولید همواره با چالش هایی روبرو بوده است. مرجع [۷] بکارگیری باتری‌های ذخیره‌ساز در شبکه قدرت را بعنوان یک راه حل برای اصلاح عدم توازن میان توان تولیدی فتوولتائیک و تقاضای مصرف‌کننده پیشنهاد داده است. این مطالعه، ظرفیت بهینه باتری ها 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 استراتژی های 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 بهینه سازی 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 ذخیره ساز 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. بررسی های فنی-اقتصادی در این مطالعه نشان داده است که تحت شرایط واقعی ممکن است انگیزه کافی برای بکارگیری باتری ها 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 روز ها دشارژ می شود. 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 می شود. 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 باتری ها 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 باتری ها در نظر گرفته می‌شود که به کمک نرم‌افزار GAMS شبیه سازی ها انجام شده و تاثیر مدیریت انرژی باتری‌ها بر روی کاهش اوج بار شبکه بررسی می‌گردد.

باتری‌های ذخیره‌ساز در سطح مصارف خانگی

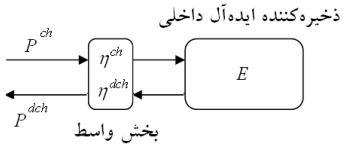
با نفوذ منابع تولید پراکنده در سطح شبکه‌های توزیع، امروزه نصب و بهره‌برداری از باتری‌های ذخیره‌سازها در شبکه نیز بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ذخیره انرژی یکی از نیاز های مهم در شبکه های مدرن و هوشمند آینده خواهد بود. از آنجا که سیستم های قدرت در حال توسعه و هوشمند سازی در سطح انتقال و توزیع می‌باشند،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

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[1]، 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[2]، کمک به نفوذ منابع تجدیدپذیر به شبکه، و کنترل ولتاژ اشاره نمود [۱۱].

مدل شارژ/دشارژ باتري ذخيره‌ساز انرژي

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].

$$E_{i,t} - E_{i,t-1} = \Delta E_{i,t} \quad (۱)$$

$$\Delta E_{i,t} = \Delta E_{i,t}^{ch} - \Delta E_{i,t}^{dch} \quad (۲)$$

$$\Delta E_{i,t}^{ch} = \eta_i^{ch} P_{i,t}^{ch} \Delta t \quad (۳)$$

$$\Delta E_{i,t}^{dch} = \frac{1}{\eta_i^{dch}} P_{i,t}^{dch} \Delta t \quad (۴)$$

$$\Delta E_{i,t}^{ch}, \Delta E_{i,t}^{dch} \geq 0 \quad (۵)$$

$$P_{i,t}^{ch}, P_{i,t}^{dch} \geq 0 \quad (۶)$$

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

$P_{i,t}^{ch}$: توان شارژ باتری iام در دوره t

$P_{i,t}^{dch}$: توان دشارژ باتری iام در دوره t

$E_{i,t}$: انرژی ذخیره شده در باتری iام در دوره t

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

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

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

$\eta_i^{dch}, \eta_i^{ch}$: راندمان شارژ و راندمان دشارژ باتری iام

Δt : 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.

$$E_{\mathrm{i,min}} \leq E_{i,t} \leq E_{\mathrm{i,max}} \quad (۷)$$

که در این روابط $E_{i,\min}, E_{i,\max}$: به ترتیب حداکثر و حداقل انرژی ذخیره شده‌ی مجاز در باتری iام می‌باشند. البته انرژی موجود در باتری به دلایل فنی نمی‌تواند کاملا 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 متغیر های باینری r,s در مدلسازی استفاده می شود. بنابراین قیود شارژ و دشارژ باتری ها می‌توانند به صورت زیر بیان شوند.

$$P_{i,t}^{dch} \leq r_{i,t} \times P_{i,\max}^{dch} \quad (۸)$$

$$P_{i,t}^{ch} \leq s_{i,t} \times P_{i,\max}^{ch} \quad (۹)$$

$$P_{i,t}^{dch} \geq 0 \quad (۱۰)$$

$$P_{i,t}^{ch} \geq 0 \quad (۱۱)$$

$$r_{i,t} + s_{i,t} \leq 1 \quad (۱۲)$$

$$s, r \in \{1,0\} \quad (۱۳)$$

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

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

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

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

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

[1] Lead–acid battery
[2] Load leveling

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 تبادلی 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 r و s 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 تبادلی مجاز باتری در طول دوره استفاده شده است که در زیر آورده شده است.

$$N_{\max} \times E_{i,\max} \geq \sum_t \Delta E_{i,t}^{ch} + \sum_t \Delta E_{i,t}^{dch} \qquad (۱۴)$$

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 شارژ 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.

$$D_t + P_t^{Bat} - P_t^{grid} = 0 \qquad (۱۵)$$

$$P_t^{Bat} = \sum_i P_{i,t}^{ch} - \sum_i P_{i,t}^{dch} \qquad (۱۶)$$

$$D_t = \sum_i d_{i,t} \qquad (۱۷)$$

$$P_t^{grid} = \sum_i p_{i,t} \qquad (۱۸)$$

که $p_{i,t}$ و $d_{i,t}$ به ترتیب مقدار توان دریافتی و بار مصرفی مشترک iام، D_t میزان بار مصرفی فیدر و P_t^{Bat} برایند توان کل باتری های موجود در مسیر فیدر هستند و P_t^{grid} نیز توان دریافتی از شبکه در لحظه‌ی t بوده که دارای محدودیت حداکثر توان تبادلی $P_{\max}^{grid}$ 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.

$$-p_{i\min} \leq p_{i,t} \leq p_{i\max} \qquad (۱۹)$$

$$-P_{\max}^{grid} \leq P_t^{grid} \leq P_{\max}^{grid} \qquad (۲۰)$$

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 باتری ها، 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 می شود 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

$$Min \quad F = \sum_t f_t \qquad (۲۱)$$

$$f_t = (\pi_t^{fg} P_t^{fg} - \pi_t^{tg} P_t^{tg}) \times \Delta t \qquad \forall t \qquad (۲۲)$$

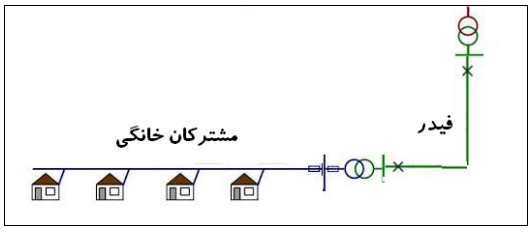
$$P_t^{grid} = P_t^{fg} - P_t^{tg} \quad ; \quad P_t^{fg}, P_t^{tg} \geq 0 \qquad (۲۳)$$

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

۲- شبیه‌سازی

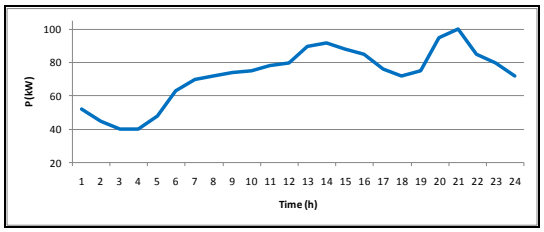
۲-۱- سیستم مورد مطالعه

در این بخش، قسمتی از یک فیدر شبکه توزیع شعاعی در نظر گرفته می‌شود که پس از کاهش ولتاژ توسط ترانسفورماتور، 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.

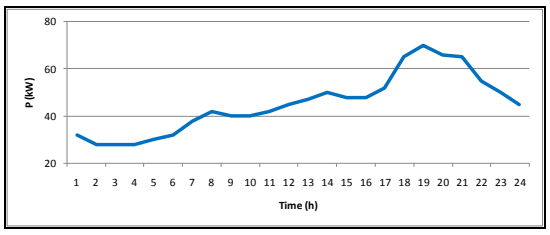


شکل ۲. شماتیک سیستم مورد مطالعه

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



شکل ۳. بار مصرفی فیدر مورد مطالعه در یک روز تابستانی



شکل ۴. بار مصرفی فیدر مورد مطالعه در یک روز زمستانی

در سیستم‌های قدرت، شاخص ضریب بار[1] به عنوان نسبت متوسط بار مصرفی به حداکثر بار مصرفی در طول دوره برنامه‌ریزی تعریف می‌شود. این ضریب هر چقدر به مقدار واحد نزدیکتر باشد بیانگر آن است که الگوی مصرف صاف‌تر بوده و از زیر ساخت های شبکه به صورت موثرتری استفاده می‌شود. ضریب بار طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$LF = \frac{L_{ave}}{L_{\max}} \qquad (۲۳)$$

که LF ضریب بار، L_{ave} میزان بار متوسط و $L_{\max}$ حداکثر بار مصرفی در طول دوره برنامه‌ریزی می‌باشد. به عنوان نمونه ضریب بار برای الگوی بار مصرفی نشان داده شده در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۷ می‌باشد.

در فیدر مورد مطالعه فرض می‌شود باتری‌ها از قبل بصورت نصب شده موجود هستند و بنابراین فقط هزینه‌ی مربوط به تبادل انرژی در برنامه‌ریزی مدنظر قرار می‌گیرد. قیمت‌های خرید و فروش اعلامی از طرف فروشنده‌های برق تاثیر بسیار زیادی در انگیزه مشترکان با بت شارژ و شارژ باتری‌ها خواهد داشت. لازم به ذکر است که با بت وجود تلفات در باتری‌ها، مقدار انرژی که باتری بابت شارژ از شبکه دریافت می‌کند با مقدار انرژی که طی سیکل دشارژ به شبکه تزریق می گردد، متفاوت خواهد بود. در باتری ها، حاصلضرب راندمان شارژ و دشارژ باتری را راندمان سیکل باتری (η^{cycle}) می‌نامند.

$$\eta^{cycle} = \eta^{ch} \times \eta^{dch} \qquad (۲۴)$$

با فرض یکسان بودن مشخصات باتری‌ها، در جدول زیر اطلاعات مربوط به آن‌ها آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات باتری ذخیره‌ساز

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

همچنین برای باتری‌ها محدودیت شارژ/دشارژ روزانه تعیین شده است، اینگونه که حداکثر انرژی تبادلی آن‌ها در روز نباید از ۳ برابر ظرفیت آن‌ها عبور نماید. سطح شارژ اولیه‌ی باتری‌ها نیز مقدار حداقل انرژی، یعنی ۰.۳ کیلووات ساعت لحاظ گردیده است.

در شرایط فعلی، تعرفه‌های بخش خانگی بصورت پلکانی تعریف می‌شود. در این جا فرض می‌شود برای باتری‌ها یک کنتور مجزا نصب می‌شود تا مقدار مصرف و تولید آن‌ها در ساعات مختلف ثبت شده و برای آن قبض صادر گردد.

در این مطالعه، قیمت هر کیلووات ساعت برق مصرفی در ساعات کم‌باری ۲۵، میان باری ۵۰ و اوج بار ۱۰۰ تومان لحاظ شده است. همچنین فرض می‌شود که قیمت فروش انرژی به شبکه (دشارژ هر کیلووات ساعت انرژی) ۵۰ درصد بیشتر از قیمت خرید (شارژ هر کیلووات ساعت انرژی) خواهد بود.

به منظور انجام شبیه‌سازی، استراتژی‌های مختلفی برای شارژ/دشارژ باتری‌ها در نظر گرفته شده است از جمله:

سناریو ۱- قیمت فروش انرژی به شبکه (دشارژ باتری) در تمام ساعات شبانه روز، بیشتر از قیمت خرید (شارژ باتری) باشد..

سناریو ۲- به جز ساعات کم‌باری، قیمت فروش انرژی به شبکه (دشارژ باتری) در بقیه ساعات بیشتر از قیمت خرید (شارژ باتری) باشد. همچنین باتری‌ها نمی‌توانند در ساعات اوج بار شارژ شوند.

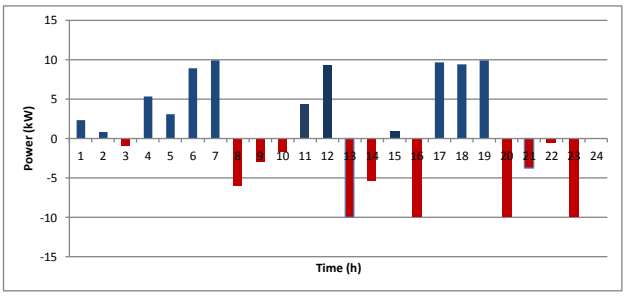
سناریو ۳- باتری‌ها فقط در ساعات اوج بار می‌توانند دشارژ شوند و در این زمان‌ها نمی‌توانند شارژ شوند.

بررسی نتایج شبیه‌سازی:

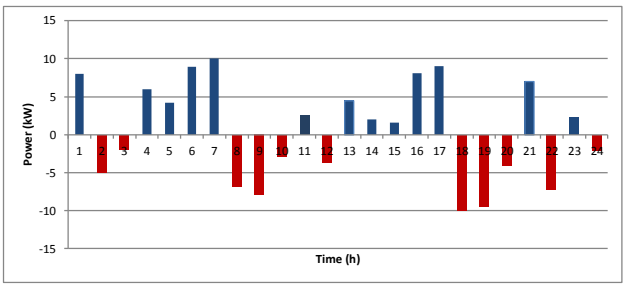
- **سناریو ۱:**

در این حالت فرض می‌شود که در تمام ساعات شبانه روز باتری‌ها می‌توانند شارژ / دشارژ شوند و قیمت فروش انرژی به شبکه توسط باتری‌ها بیشتر از قیمت خرید از شبکه می‌باشد. طبق نتایج شبیه سازی، تحت این شرایط الگوی شارژ و دشارژ باتری های موجود در سیستم مورد مطالعه برای شرایط بار مصرفی تابستانی و زمستانی مطابق شکل‌های زیر خواهد بود.

[1] Load factor



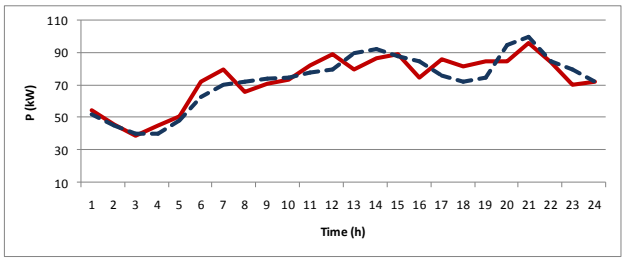
(الف)

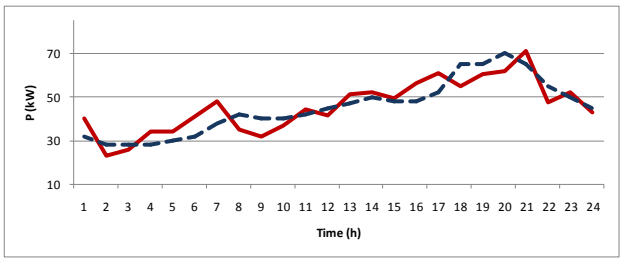


(ب)

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 برر سی بی شتر در ساعات مختلف، می‌توان به این موضوع پی برد که در هر دو ن مودار در برخی ساعات کم باری نیز (مانند ساعت ۳) ع مل د شارژ صورت گرفته است. دلیل این موضوع انگیزه سود بوده است چون مال کان با قیمت بالاتر انرژی را فروخته و همچنین در ساعات بعد فرصت دارند تا مجددا باتری‌ها را شارژ نمایند. اما دشارژ شدن باتری در ساعات کم-باری نمی‌تواند برای بهره‌بردار شبکه مفید باشد، بلکه بهره‌بردار به دنبال ترغیب مشترکان به مصرف بیشتر در این ساعات است. به همین دل یل این استراتژی برای شارژ/دشارژ باتری‌ها خیلی مفید نخوا هد بود. . با انجام برنامه‌ریزی شارژ/ دشارژ باتری‌ها، توان در یافتی از ف یدر م طابق شکل‌های زیر خواهد بود.



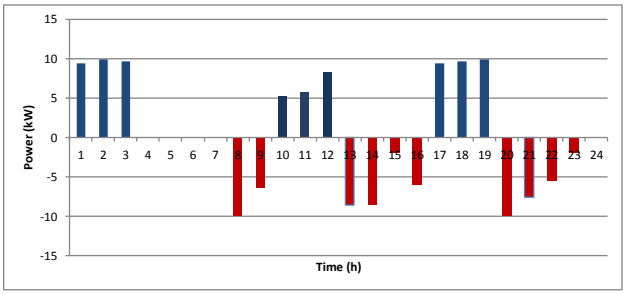


شکل ۶. الگوی بار فیدر موردمطالعه در شرایط الگوی بار الف) تابستانی و ب) زمستانی - خط توپر جدید و خط چین قدیم

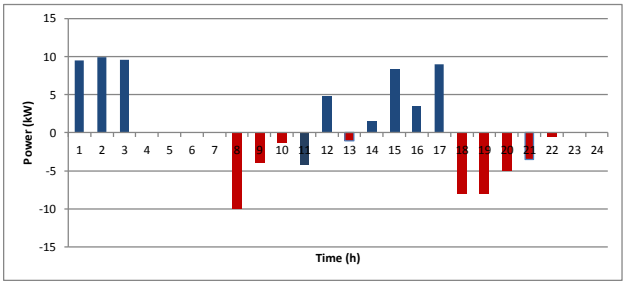
با توجه به این شکل‌ها می‌توان دریافت که برنامه‌ریزی شارژ و د شارژ باتری‌ها خیلی نتوانسته است به صاف شدن ک مک نما ید. همچ نین مشخص است که در وضعیت بار تابستان اوج بار شبکه تغی یر چ ندانی نکرده و در الگوی زمستانی حتی با اندک ا فزایش اوج بار ن یز موا جه بوده‌ایم. با الگوی بار مصرفی جدید، ضریب بار برای پروفیل بار مصرفی تابستان و زمستان به ترتیب چیزی در حدود ۰/۷۶ و ۰/۶۴ می‌با شد شده که می‌توان گفت ضریب بار ن سبت به حا لت پا یه در تاب ستان افزایش یافته است؛ در حالی که در زمستان با کاهش ا ندکی ه مراه شده است. با فرض اینکه هزینه انرژی مشترکان بر ا ساس تعر فه‌های اعلام شده محا سبه می گردد، هزی نه‌ی ا نرژی برای بار تاب ستانی و زمستانی در این سناریو به ترت یب ۱۰۸۱۱۰ و ۵۸۳۹۸ تو مان خوا هد بود.

- **سناریو۲:**

در این حالت فرض می‌شود که باتری‌ها فقط در ساعات غ یر کم باری می‌توانند دشارژ شوند و بهره‌بردار شبکه قیمت تشویقی برای فروش در این ساعات در نظر نگرفته است. به ب یان دی گر در ا ین مدل، برای مالکان انگیزه‌ای وجود ندارد تا باتری‌ها در ساعات کم‌باری دشارژ شوند. همچنین در این حالت باتری‌ها ن می‌توان ند در ساعات اوج بار شارژ شوند. تحت این شرایط، نتایج شبیه سازی برای الگوی شارژ/د شارژ باتری‌ها در شکل‌های زیر آورده شده است.



(الف)



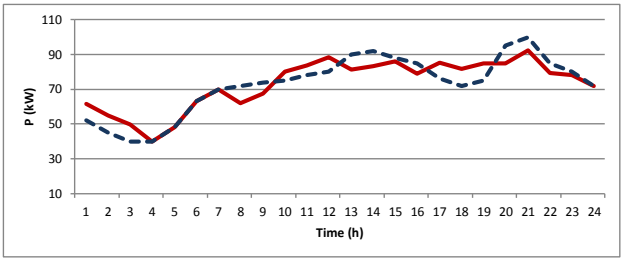
(ب)

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

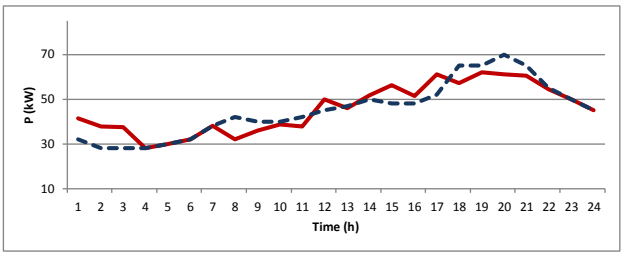
همانگونه که مشاهده می‌شود، باتری ها در ساعات کم باری د شارژ نخواهند شد. در هر دو شکل مشخص است که باتری‌ها تمایل دارند تا

در برخی ساعات میان‌باری دشارژ شوند که این موضوع به دلیل انگ یزه سود از م حل فروش برق به شبکه می‌با شد. همچ نین در ا ین برنامه‌ریزی، باتری‌ها در زمان‌های کم‌باری و میان‌باری شارژ شده‌ا ند و بیشترین سهم دشارژ باتری‌ها مربوط به ساعات اوج بار بار بوده است.

حال اگر طبق این برنامه‌ریزی عمل شود و الگوی شارژ/دشارژ باتری ها طبق شکل‌های زیر باشد، آنگاه میزان توان دریافتی از شبکه نیز تغی یر می‌کند. تحت این شرایط توان دریافتی ف یدر م طابق شکل های ز یر خواهد بود. همانطور که قابل مشاهده است، مقدار م صرف در ساعات اوج بار کمی کاهش داشته است. لازم به ذ کر ا ست در ا ین شرایط ضریب بار جدید برای الگوی بار تابستانی و زمستانی به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۷۴ خواهد بود.



(الف)



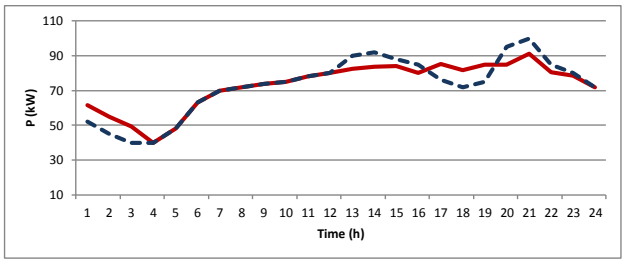
(ب)

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

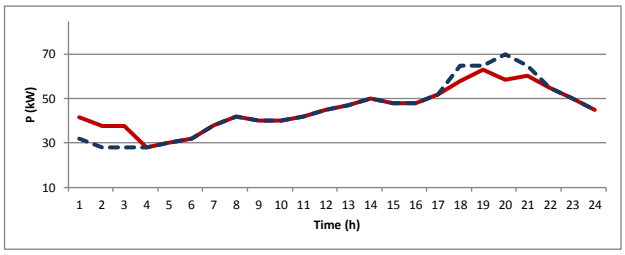
همچنین هزینه‌ی انرژی برای بار تابستانی و زمستانی در این سناریو به ترتیب ۱۰۸۴۷۰ و ۵۸۷۲۳ تومان خواهد بود.

- **سناریو ۳:**

به منظور بررسی بیشتر، یک استراتژی دیگر نیز در ن ظر گرف ته شده است که در آن فرض می‌شود باتری‌ها فقط در زمان اوج بار می‌توان ند دشارژ شوند. با انجام برنامه‌ریزی شارژ/ دشارژ باتری‌ها، توان دریافتی از فیدر مطابق شکل‌های زیر خواهد بود.



(الف)

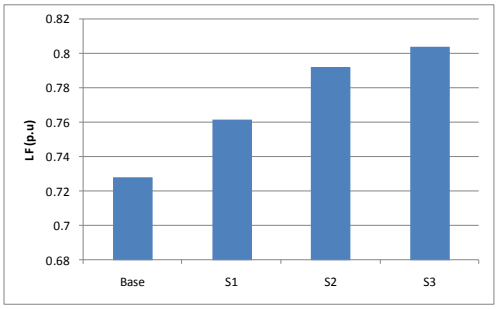


(ب)

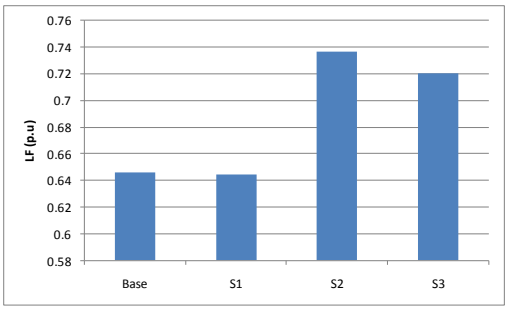
شکل ۹. الگوی بار فیدر موردمطالعه در شرایط الگوی بار الف) تابستانی و ب) زمستانی - خط توپر جدید و خط چین قدیم

همانطور که مشاهده می‌شود، میزان توان دریافتی از شبکه در ساعت اوج بار با کاهش روبرو بوده است و موجب صاف تر شدن ال گوی بار شبکه می‌گردد. با الگوی بار مصرفی جدید، ضریب بار برای پروفیل بار مصرفی تابستان و زمستان به ترت یب چ یزی در حدود ۰/۸۰ و ۰/۷۲ می‌باشد شده که می‌توان گفت ضریب بار نسبت به سناریوی قبل تغییر چندانی نداشته است؛ هرچند در تاب ستان ک می به بود و در زم ستان کمی کاهش یافته است. همچنین هزینه‌ی انرژی برای بار تاب ستانی و زمستانی در این سناریو به ترت یب ۱۰۸۷۹۴ و ۵۹۴۳۴ تو مان خوا هد بود.

بطور کلی، شکل‌های ۱۰ (الف) و (ب) وضعیت ضریب بار را به ترت یب برای بار تابستان و زمستان در هر سناریو نشان می‌دهند. برای ال گوی بار تابستانی، وضعیت ضریب بار در همه‌ی سناریوها ن سبت به حا لت پایه بهتر شده است؛ بگونه‌ای که به جز سناریوی اول، در بقیه‌ی حالات ضریب بار حدود ۰.۸ خواهد بود. به عبارت دی گر، سناریوی اول ت اثیر چندانی بر روی بهبود و ضعیت پروف یل بار م صرفی ندا شته ا ست و سناریوهای دوم و سوم نیز بی شترین ت اثیر را روی بار ف یدر خواه ند داشت. برای الگوی بار زمستانی نیز سناریوی ۱ ت اثیر من فی بر روی وضعیت پروفیل بار مصرفی داشته است. به عبارت دیگر ح ضور باتری روی فیدر اگر همراه با برنامه‌ر یزی شارژ/د شارژ ب صورت سناریوی ۱ شود، وضعیت ضریب بار فیدر را بدتر خواهد کرد. ط بق ن تایج حا صل شده، اجرای سناریوی ۱ در زمستان مو جب ا فزایش ۱ کی لوواتی اوج بار می‌گردد. از طرف دیگر بقیه‌ی سناریوها می‌توان ند ا ین و ضعیت را بهبود دهد طوری که در سناریوهای ۲ و ۳ ضریب بار فیدر بیش از ۰.۷ خواهد بود.



(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 ذخیره ساز در شبکه وجود دارند و تاثیر وجود این باتری‌ها بر روی الگوی بار فیدر بررسی گردید. نتایج حاکی از آن بودند که با حضور باتری ها در شبکه و همچنین وجود اهرم قیمتی مناسب برای برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ، باتری‌ها می‌تواند 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 هزینه ها و درآمدها را در نظر گرفته و همه را به ارزش پول امروزی در بیاورد؛ سپس با مقایسه بین سیستم‌ها مختلف می‌توان تصمیم اقتصادی را اتخاذ نمود.

طبق اطلاعات ارائه شده توسط توسعه‌دهنگان، نرم افزار 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].

$$NPC = \frac{C_{tot}^{ann}}{CRF(i,R_p)} \qquad (۲۵)$$

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 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 :

$$i = \frac{i' - f}{1+f} \qquad (۲۶)$$

که f نرخ تورم و i' نرخ بهره نامی (نرخی 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: بررسی 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 ان باید مجددا 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

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

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 باتری های 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 باتری ها بر روی کاهش اوج بار شبکه توزیع شبیه‌سازی شد و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان دادند که اهرم تشویقی قیمت می‌تواند مصرف‌کنندگان 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 کردد. 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 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 forhousehold 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] Bereczki. 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*