

جایابی، تعیین اندازه و برنامه‌ریزی بهینه پست‌های فوق توزیع با استفاده از ذخیره‌سازهای باتری جریانی و انادایوم به منظور افزایش بهره‌وری شبکه توزیع برق

مجید حسینا^۱، دانشجوی دکتری و سید محمدتقی بطحائی^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران
majidhosseina@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران
bathae@kntu.ac.ir

چکیده: ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی یکی از مسائل مهم صنعت برق است که می‌تواند خدمات جانبی بسیاری همچون تسطیح منحنی بار، پیک‌سایی، ادغام با واحدهای تجدیدپذیر، رزرو چرخان و ... را عاید شبکه سازد. در این مقاله یک روش جدید و کاربردی به منظور جایابی، تعیین اندازه و برنامه‌ریزی بهینه ذخیره‌ساز باتری جریانی و انادایوم در پست‌های فوق توزیع ارائه می‌گردد. در این روش ابتکاری، با استفاده از پیش‌بینی بار، مقدار مصرف روز پیک محاسبه شده و براساس آن چندین شاخص برای اولویت‌بندی مکان نصب ذخیره‌ساز تعریف می‌شود. سپس با توجه به اطلاعات توان مصرفی در پست انتخاب شده، ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز برای تسطیح منحنی بار تعیین شده و در نهایت یک برنامه‌ریزی بهینه برای شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز ارائه می‌گردد. در این مقاله، برای شبیه‌سازی از داده‌های واقعی مصرف شبکه فوق توزیع شهرستان سمنان استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: باتری جریانی، پیک‌سایی، تسطیح منحنی بار، ذخیره‌سازی انرژی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۵/۰۷/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر سید محمدتقی بطحائی

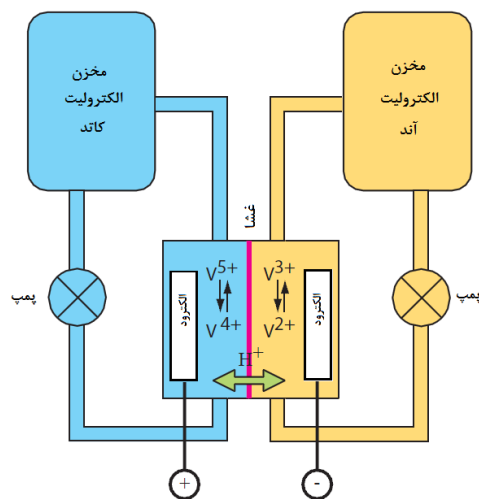
نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران - خیابان شریعتی - نرسیده به پل سید خندان- صندوق پستی ۱۳۵۵-۱۶۳۱۵ کدپستی ۱۶۳۱۴ تلفن:
۸۸۴۶۲۱۷ - داخلی ۴۲۰

۱- مقدمه

این مقاله برای شبکه‌های فوق توزیعی که می‌خواهند مطالعات مربوط به نصب ذخیره‌ساز و برنامه‌ریزی تولید آن را با هدف افزایش بهره‌وری انجام دهند، بسیار کاربردی خواهد بود و می‌تواند برای کلیه پست‌های فوق توزیع کشور مورد استفاده واقع شود. روش ارائه شده در این مقاله بر روی داده‌های واقعی مصرف پست‌های فوق توزیع شهرستان سمنان پیاده‌سازی شده است.

۲- باتری جریانی وانادیوم

در این مقاله هدف اصلی استفاده از ذخیره ساز تسطیح منحنی بار است. با توجه به این موضوع که مکان نصب ذخیره ساز پست‌های فوق توزیع ۶۳/۲۰ کیلوولت در نظر گرفته شده و توان نامی این پست‌ها معمولاً چند ده مگاوات آمپر است، لذا باید ذخیره‌ساز انتخابی توانایی ذخیره کردن بخشی از این انرژی را داشته باشد. در میان ذخیره‌سازها با توجه به ماهیت پست‌های فوق توزیع و فضای در اختیار، مناسب‌ترین گزینه، باتری جریانی وانادیوم است. در باتری‌های جریانی، الکترولیت در دو مخزن جداگانه وجود دارد و واکنش‌ها در یک سلول جداگانه که با یک غشا به دو بخش تقسیم شده انجام می‌شود. در این باتری‌ها الکترولیت از دو مخزن توسط پمپ به سلولی که واکنش شیمیایی در آن انجام می‌شود پمپاژ می‌گردد. نحوه کار این باتری‌ها شبیه پیل سوختی هیدروژنی است که از دو الکترولیتی که در دو مخزن جداگانه ذخیره می‌شود ساخته شده است. در شکل (۱) ساختار یک باتری جریانی نشان داده شده است. در میان باتری‌های جریانی باتری‌های وانادیوم بیشترین کاربرد را دارند. راندمان شارژ و دشارژ این باتری‌ها معمولاً بین ۸۰ تا ۸۵ درصد، چرخه عمر آنها معمولاً بالای ۱۰۰۰۰ سیکل، چگالی انرژی بین ۳۰ تا ۵۰ وات ساعت بر کیلوگرم و چگالی توان ۸۰ تا ۱۵۰ وات بر کیلوگرم است. مهمترین مزیت این باتری‌ها علاوه بر ظرفیت توان و انرژی بالا، عمر زیاد به واسطه جایگزینی آسان الکترولیت، قابلیت دشارژ شدن کامل، دشارژ خود به خودی کم و دمای کار پایین است. از اینرو استفاده از باتری‌های جریانی وانادیوم به سرعت در حال رشد و توسعه می‌باشد [۲۲-۲۰].



شکل (۱): ساختار باتری جریانی وانادیوم

در شبکه‌های برق همواره باید بین تولید انرژی و مصرف آن تعادل برقرار باشد. با توجه به ماهیت متغییر مصرف‌کنندگان، تولید انرژی نیز باید تابع این تغییرات باشد [۱]. از اینرو پیش‌بینی منحنی مصرف یکی از موضوعات مهم در شبکه‌های برق و به خصوص شبکه‌های توزیع تلقی می‌گردد [۴-۲]. در منحنی مصرف، نسبت مقدار متوسط مصرف به مقدار ماکزیمم مصرف، ضریب بار نامیده می‌شود. در صورت ثابت بودن مقدار انرژی، هر چه پیک شبکه افزایش یابد، ضریب بار کمتر می‌گردد [۵]. ضریب بار کوچک برای شبکه یک پارامتر منفی به حساب می‌آید. زیرا تمامی تجهیزات باید بر اساس مقدار پیک مصرف ارتقا یابند که این موضوع برای شبکه صرفه اقتصادی نخواهد داشت [۶]. همچنین از طرفی با توجه به تجدید ساختار شکل گرفته در سیستم قدرت، قیمت انرژی در ساعات پیک و هزینه دسترسی به سیستم‌های انتقال گرانتر از ساعات دیگر می‌باشد و این افزایش هزینه متناسب با مقدار پیک شبکه خواهد بود. از اینرو به جرات می‌توان گفت نداشتن پیک در منحنی مصرف و به عبارت دیگر مسطح شدن منحنی، یک مزیت مهم برای شبکه خواهد بود [۹-۷].

امروزه استفاده از ذخیره‌سازها تا حدودی این مشکل را حل نموده است. با ذخیره‌سازی انرژی در ساعات غیرپیک و استفاده از انرژی ذخیره شده در این ساعات، پیک مصرف از دیدگاه تولیدکننده کاهش می‌یابد [۱۰]. استفاده از ذخیره‌سازها در شبکه علاوه بر صرفه عملکردی، صرفه اقتصادی نیز خواهد داشت. زیرا قیمت انرژی در ساعات پیک چندین برابر قیمت آن در ساعات غیرپیک است و با ذخیره انرژی ارزان قیمت، می‌توان در ساعاتی که انرژی گرانتر است آن را تحویل شبکه داد و منفعت اقتصادی کسب کرد [۱۱-۱۳]. اگرچه تکنولوژی برخی ذخیره‌سازها هنوز به تکامل نرسیده است و هزینه ساخت برخی دیگر هنوز بالاست؛ اما مزایای فراوانی همچون تسطیح منحنی بار، پیک سایه، کنترل بار فرکانس، کنترل ولتاژ، ادغام با برخی واحدهای تولید انرژی با عدم قطعیت، رزرو چرخان و ... که از این ذخیره سازها عاید شبکه می‌شود؛ استفاده از آنها را توجیه می‌نماید [۱۴]. در مقالات گوناگون روش‌های بسیاری برای جایابی ذخیره سازها و تعیین اندازه آنها ارائه گردیده است [۱۵-۱۹]. عموماً روش‌های ارائه شده بر مبنای معادلات پیچیده ریاضی و اطلاعات ساختاری شبکه می‌باشد که در عمل پیاده‌سازی آن مشکل خواهد بود. در این مقاله یک روش جدید و کاربردی که بر اساس اطلاعات مصرف پست‌های فوق توزیع می‌باشد و نیازی به تحلیل ساختار شبکه و معادلات پیچیده ندارد ارائه گردیده است. در این روش ابتکاری، ابتدا بار مصرفی پیک پیش‌بینی شده و با توجه به این بار محاسبه شده، چندین شاخص برای اولویت بندی مکان نصب ذخیره‌ساز تعریف می‌گردد. نوآوری این مقاله علاوه بر تعریف شاخص‌هایی جدید برای تعیین مکان ذخیره‌ساز، تعیین اندازه و برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز نیز می‌باشد.

۳- اصلاح منحنی مصرف روزانه

منحنی مصرف روزانه، نشان دهنده مقدار دیماند مصرفی در هر ساعت از شبانه‌روز می‌باشد. منحنی تداوم مصرف، منحنی مرتب شده مصرف روزانه از بیشترین ساعت مصرف به کمترین ساعت مصرف است و بیانگر میزان تداوم بار بر اساس زمان است. هرچه منحنی مصرف مسطح‌تر باشد، از دید شبکه مصرف مطلوب‌تر خواهد بود. معمولاً در شبکه‌های برق، اصلاح پروفیل بار مصرفی یک موضوع حائز اهمیت می‌باشد که توسط پیک‌سایبی و تسطیح منحنی بار انجام می‌پذیرد.

پیک‌سایبی حذف کردن مقدار پیک مصرف از دیدگاه تولید کننده و تسطیح منحنی بار کم کردن اختلاف بین مقدار بیشینه و کمینه در منحنی مصرف است. با استفاده از ذخیره‌ساز می‌توان در ساعات‌های غیرپیک انرژی را ذخیره نمود و در ساعات پیک، آن را تحویل شبکه داد. این کار سبب کاهش پیک شبکه می‌شود که از دو جهت می‌تواند مفید باشد؛ اول آنکه وجود یک پیک قابل توجه در شبکه صرفه اقتصادی ندارد، زیرا تمامی تجهیزات شبکه باید نسبت به توان پیک ارتقا داده شوند. از اینرو نصب یک ذخیره ساز می‌تواند توسعه شبکه را به تعویق بیندازد [۲۳] و دوم آنکه مصرف کنندگانی که در ساعت پیک تغذیه می‌گردند، باید هزینه بیشتری را متحمل شوند و انرژی را گرانتر خریداری کنند. از اینرو نصب یک ذخیره‌ساز برای پیک‌سایبی و تسطیح منحنی بار، هم به نفع صاحبان شبکه و هم به نفع مصرف کنندگان انرژی است. به عنوان مثال اگر قیمت انرژی در ساعت i برابر Pr_i باشد مقدار سود حاصله از ذخیره انرژی در ساعات ارزان و فروش آن در ساعات گران توسط رابطه (۱) بدست می‌آید [۲۴].

$$Pr Ben = \sum_{i=1}^{24} (Pi^+ - Pi^-) * Pr_i \quad (1)$$

در رابطه (۱) اگر ذخیره‌ساز در حالت شارژ باشد، مقدار Pi^+ صفر و اگر در حالت دشارژ باشد مقدار Pi^- برابر صفر در نظر گرفته خواهد شد. با توجه به متفاوت بودن تعرفه برق در ساعات متفاوت، $Pr Ben$ مقداری قابل توجه خواهد بود.

در بحث به تعویق انداختن توسعه شبکه، اگر تقاضای بار مصرفی سالیانه با نرخ τ % رشد کند و ذخیره‌ساز بتواند پیک شبکه را به مقدار α % کاهش دهد، آنگاه مدت زمان بر حسب سال که ذخیره‌ساز باعث تعویق توسعه شبکه می‌شود مطابق با رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۴].

$$\Delta t = \frac{\log(1 + \alpha)}{\log(1 + \tau)} \quad (2)$$

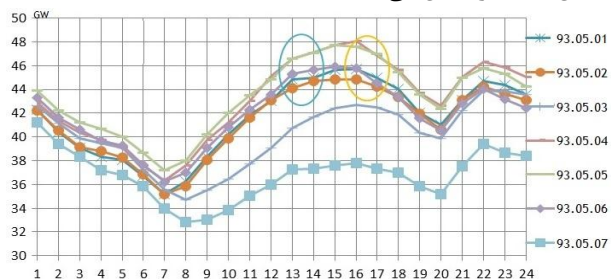
با توجه به سود سپرده‌گذاری و نرخ تورم، با تعویق توسعه شبکه و تعویق سرمایه‌گذاری به مقدار Δt سال، سود قابل توجهی را می‌توان کسب کرد. سود حاصله ناشی از این به تعویق افتادن توسط رابطه (۳) محاسبه خواهد شد [۲۴]. در رابطه (۳)، C_{inv} هزینه مربوط به توسعه شبکه، ir نرخ تورم و dr نرخ سود سپرده‌گذاری می‌باشد.

$$DefBen = C_{inv} * \left(1 - \left(\frac{1+ir}{1+dr} \right)^{\Delta t} \right) \quad (3)$$

۴- انتخاب بهترین پست برای نصب ذخیره ساز

در پست‌های ۶۳/۲۰ کیلوولت، با توجه به مستقل بودن پست‌ها از هم، می‌توان یک برنامه ریزی مناسب برای انتخاب مکان نصب باتری و برنامه ریزی شارژ و دشارژ آن داشت.

از لحاظ شاخص‌های مربوط به پیک‌سایبی و تسطیح منحنی بار، بهترین مکان برای نصب ذخیره‌ساز پستی است که بیشترین تغییرات را در دوره مصرف دارد و یا در آینده‌ای نزدیک نیاز به ارتقا ظرفیت داشته باشد؛ تا ذخیره ساز بتواند این تغییرات را کاهش و یا توسعه آن را به تعویق بیندازد. معمولاً پیک مصرف در کشور ایران در فصل تابستان است. در چند سال اخیر معمولاً پیک شبکه در اواسط تابستان و در ساعات ۱۴ الی ۱۶ روزهای غیر تعطیل رخ می‌دهد [۲۵]. شکل (۲) منحنی مصرف توان کل کشور در هفته پیک (۱ الی ۷ مرداد) مربوط به سال ۱۳۹۳ را نشان می‌دهد.



شکل (۲): منحنی مصرف برق کشور (هفته پیک) در سال ۱۳۹۳ [۲۵]

با پیش‌بینی بار در فصل تابستان و یافتن مقدار پیک مصرف، می‌توان یک برنامه‌ریزی بهینه برای پیک‌سایبی و تسطیح منحنی بار انجام داد. همچنین برای تعیین مکان نصب ذخیره‌ساز، سه شاخص در نظر گرفته شده است. شاخص اول مربوط به پیک‌سایبی، شاخص دوم مربوط به تسطیح منحنی بار و شاخص سوم مربوط به کاهش هزینه و افزایش سود است که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

۴-۱- شاخص‌های مربوط به پیک‌سایبی

با توجه ظرفیت‌های مختلف پست‌ها و برای سادگی بیشتر، مقادیر مصرف هر پست، بر مقدار مصرف ماکزیمم در آن روز تقسیم می‌شود تا همه منحنی‌های تداوم مصرف به صورت پریونیت شوند. برای به دست آوردن این شاخص، ابتدا میانگین و انحراف معیار منحنی تداوم مصرف پریونیت شده محاسبه می‌گردد. سپس با توجه به منحنی تداوم مصرف، شاخص‌هایی به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۶]:

- K_{up} : تعداد ساعاتی که مصرف بیشتر از میانگین است.

- H_{up} : اختلاف بین ماکزیمم مصرف (۱ پریونیت) و مقدار میانگین

- S_{up} : مجموع اختلاف بین منحنی تداوم مصرف و میانگین تا ساعت K_{up} ام

- std_{up} : انحراف معیار اختلاف بین منحنی تداوم مصرف و میانگین تا ساعت K_{up} ام

مفید برای پیک سایه معرفی می‌گردد. این شاخص در واقع نشان دهنده وجود یک پیک قابل توجه نسبت به بقیه ساعات مصرف است که در رابطه (۵) نشان داده شده است. هر چه اختلاف بین میانگین این دو ساعت بیشتر باشد، منحنی برای پیک سایه مناسب‌تر خواهد بود.

$$K_{2-PSH} = \frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^2 P_{ldc}(n) - \sum_{n=3}^4 P_{ldc}(n) \right) \quad (5)$$

در نهایت باید گفت علاوه بر دو شاخص تعریف گشته، ضریب استفاده هر پست $UF = \frac{P_{max}}{P_n}$ نیز در تعیین اولویت تاثیرگذار است. به عبارت

ساده‌تر هر چه بارگیری نسبی از یک پست بیشتر باشد و میزان مصرف به مقدار نامی نزدیک‌تر شده باشد؛ پیک‌سایه و تسطیح منحنی بار در آن پست اولویت پیدا می‌کند. زیرا یکی از اثرات مهم نصب یک ذخیره در یک پست، به تعویق انداختن توسعه در آن پست می‌باشد که از لحاظ اقتصادی بسیار مهم و حائز اهمیت است. در نهایت شاخص مربوط به پیک‌سایه توسط رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$K_{PSH} = (w_1 * K_{1-PSH} + w_2 * K_{2-PSH}) * UF \quad (6)$$

پارامترهای w_1 و w_2 ضریب‌های وزنی هستند که با توجه به تاثیر و اهمیت شاخص‌ها انتخاب می‌شوند.

۴-۲- شاخص‌های مربوط به تسطیح منحنی بار

برخلاف پیک‌سایه که معمولاً در یک دوره کوتاه اعمال می‌شود، تسطیح منحنی بار برای مدت زمان طولانی‌تر قابل اجراست. در حالت کلی می‌توان در ساعاتی که مصرف کمتر از مقدار میانگین است توان را در باتری ذخیره و در ساعاتی که مصرف بیشتر از مقدار میانگین است، توان ذخیره شده را تحویل شبکه داد. این کار در واقع مشابه آن است که از قله‌های منحنی، توان را به داخل دره‌ها منتقل کرد. این کار مزایای بسیار برای شبکه دارد که مهمترین آنها عبارتند از تعویق توسعه پست، کسب سود از خرید و فروش انرژی، بارگیری کمتر از ترانس و کاهش تلفات. برای تسطیح منحنی بار نیز می‌توان همانند پیک‌سایه یک شاخص جهت اولویت بندی پست‌ها تعریف نمود. برای این منظور چندین متغیر به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۶]:

m_1 - دوره ۸ ساعت ابتدایی منحنی تداوم مصرف دوره پرباری

است و میانگین این بازه ۸ ساعته، m_1 تعریف می‌گردد.

m_2 - دوره ۸ ساعت میانی منحنی تداوم مصرف دوره میان باری

نامیده شده و میانگین آن m_2 تعریف می‌شود.

m_3 - دوره ۸ ساعت پایانی منحنی تداوم مصرف دوره کم باری

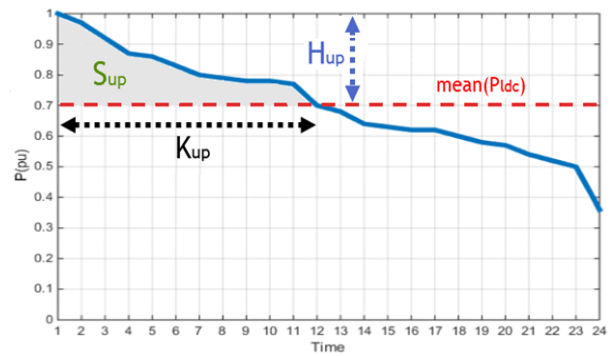
نامیده شده و میانگین آن را m_3 در نظر می‌گیریم.

در این صورت منحنی تداوم مصرف یک شبانه روز می‌تواند به صورت خلاصه توسط سه عدد m_1 تا m_3 بیان گردد.

شاخص اول تسطیح منحنی توسط رابطه (۷) تعریف می‌گردد.

$$K_{1-LL} = \frac{m_1 - m_3}{\sqrt{m_2}} \quad (7)$$

در شکل (۳)، پارامترهای تعریف شده در روابط نشان داده شده است.



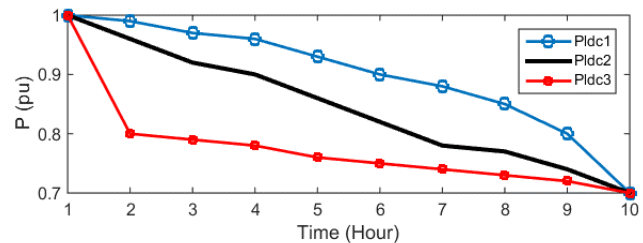
شکل (۳): نشان داده شاخص‌ها بر روی منحنی تداوم مصرف

با توجه به پارامترهای فوق، اولین شاخص پیک‌سایه به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$K_{1-PSH} = \left(\frac{H_{up}}{K_{up}} \right) * \left(\frac{Std_{up}}{S_{up}} \right) \quad (4)$$

در رابطه فوق $\left(\frac{H_{up}}{K_{up}} \right)$ بیانگر شیب متوسط کاهش منحنی تداوم

مصرف می‌باشد که هرچه مقدار این شیب بیشتر باشد نشان دهنده آن است که منحنی برای پیک‌سایه مناسب‌تر است. زیرا هرچه این شیب بیشتر باشد به گونه‌ای بیانگر این موضوع است که ساعات پیک اختلاف بیشتری با بقیه ساعات مصرف داشته و از اینرو با پیک‌سایه در ساعات اوج مصرف، می‌توان ظرفیت شبکه در ساعات پیک را آزاد نمود. رابطه $\left(\frac{Std_{up}}{S_{up}} \right)$ در واقع اصلاح کننده رابطه $\left(\frac{H_{up}}{K_{up}} \right)$ خواهد بود. تصور کنید دو منحنی دارای شیب متوسط کاهش یکسانی باشند. این موضوع در شکل (۴) نشان داده شده است. آنگاه عبارت S_{up} در واقع بیانگر تقریر و تحذب منحنی خواهد بود. یعنی هرچه مقدار S_{up} کمتر باشد، تقریر منحنی بیشتر شده و برای پیک‌سایه مناسب‌تر خواهد بود. همچنین عبارت std_{up} نشان دهنده پراکندگی ساعات مصرف تا ساعت K_{up} می‌باشد که این پارامتر برخلاف S_{up} هرچه بزرگتر باشد منحنی برای پیک سایه مناسب‌تر است.



شکل (۴): منحنی‌های شاخص $\left(\frac{H_{up}}{K_{up}} \right)$ برابر و $\left(\frac{Std_{up}}{S_{up}} \right)$ متفاوت

در پیک‌سایه با توجه به اینکه مدت زمان پیک مصرف معمولاً محدود به چندین ساعت (معمولاً تا ۲ ساعت) می‌باشد از اینرو یک شاخص دیگر برای نشان دادن اختلاف توان در ساعات اوج مصرف تعریف گردیده است. بدین منظور میانگین ۲ ساعت ابتدایی از منحنی تداوم مصرف از ۲ ساعت دوم منحنی کم می‌شود و به صورت یک شاخص

این شاخص به منظور دخالت دادن تعرفه های مختلف فروش برق در پست ارائه گردیده است. به عنوان نمونه تعرفه فروش برق صنعتی بیش از تعرفه فروش برق کشاورزی می‌باشد. تعرفه‌های مربوط به فروش انرژی بر حسب پریونیت در سال ۹۳ در جدول (۱) نشان داده شده است [۲۳].

در رابطه (۱۲)، P_{pi} ، P_{ai} ، P_{ii} ، P_{ri} ، d_{pi} ، d_{ai} ، d_{ii} ، d_{ri} به ترتیب میانگین تعرفه‌های برق خانگی، صنعتی، تجاری، کشاورزی و عمومی و ضریب های خانگی، صنعتی، تجاری، کشاورزی و عمومی در هر پست در ساعت اوج مصرف (ساعت مورد مطالعه) می‌باشد.

جدول (۱): قیمت پریونیت انواع تعرفه های فروش انرژی

نوع تعرفه	خانگی	عمومی	کشاورزی	صنعتی	تجاری
قیمت	1	0.8	0.35	1.05	3

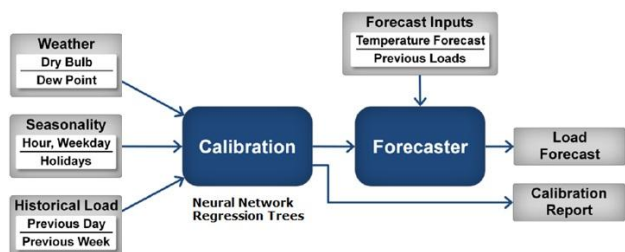
در نهایت شاخص مربوط به هزینه را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود.

$$K_{Cost} = w_5 * K_{1-Cost} + w_6 * K_{2-cost} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، همچون روابط (۶) و (۹)، w_5 و w_6 ضرایب وزنی هستند. در این مقاله تمامی ضرایب وزنی برابر با هم فرض شده‌است.

۵- پیش بینی بار

با توجه به اینکه نصب ذخیره‌ساز ممکن است یک یا چند سال به طول انجامد، بهتر است یک پیش‌بینی بار میان مدت برای پست‌های فوق توزیع انجام شود تا محاسبات از دقت بالاتری برخوردار گردند. برای پیش‌بینی بار روش‌های بسیاری در مقالات ارائه گردیده است. در این مقاله برای پیش‌بینی از روش شبکه عصبی به همراه درخت تصمیم نمونه استفاده شده است [۲۷-۲۹]. مطابق با شکل (۵) اطلاعات ورودی به تعدادی دسته اصلی همچون مقدار متوسط دما، مقدار متوسط مصرف در روز و هفته گذشته، شاخص تعطیل بودن یا نبودن و روزهای مختلف هفته تقسیم‌بندی شده است. برای آموزش شبکه عصبی از اطلاعات مصرفی پست‌های فوق توزیع شهرستان سمنان در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ استفاده شده است.



شکل (۵): ساختار پیش بینی بار کوتاه مدت

شاخص دوم که به نوعی بیانگر انحراف معیار اصلاح شده است توسط رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$K_{2-LL} = \frac{1}{3} \sqrt{(m_1 - m_2)^2 + (m_2 - m_3)^2 + (m_1 - m_3)^2} \quad (8)$$

و در نهایت شاخص کلی مربوط به تسطیح منحنی بار به صورت رابطه (۹) نوشته می‌شود.

$$K_{LL} = (w_3 * K_{1-LL} + w_4 * K_{2-LL}) * UF \quad (9)$$

پارمترهای w_3 و w_4 ضریب‌های وزنی می‌باشند.

پارامتر بعدی در که در مسئله تسطیح منحنی بار می‌توان مطرح کرد ماکزیمم ظرفیت ذخیره‌ساز برای تسطیح منحنی بار به صورت کامل است. اگر فرض کنیم راندمان ذخیره ساز ۱۰۰ درصد در نظر گرفته‌شود و نصب ذخیره‌ساز سبب افزایش میانگین مصرف نشود؛ در این صورت اگر ذخیره ساز توانایی ذخیره انرژی به اندازه S_{up} را داشته باشد، منحنی را می‌توان به صورت کامل مسطح کرد. بنابراین ماکزیمم انرژی ذخیره‌ساز برای تسطیح منحنی برابر با مساحت S_{up} می‌باشد ($E_{max-pu} = S_{up}$). از اینرو می‌توان یک شاخص به نام شاخص درصد تسطیح منحنی بار را به صورت زیر تعریف نمود:

$$LLPI = \frac{E_{bat-pu}}{E_{max-pu}} \quad (10)$$

رابطه (۱۰) در واقع نشان‌دهنده آن است که باتری چند درصد ناحیه قابل شارژ را در خود ذخیره می‌کند. بدیهی است اگر $LLPI=100\%$ باشد منحنی کاملاً مسطح خواهد شد. شاخص $LLPI$ می‌تواند هم برای پیک‌سایی و هم برای تسطیح منحنی بار در نظر گرفته شود. مقادیر کوچک $LLPI$ (معمولاً کوچکتر از ۰.۳) مربوط به پیک‌سایی و مقادیر بزرگ آن مربوط به تسطیح منحنی است.

۴-۳- شاخص هزینه

در کلی‌ترین حالت می‌توان یک تابع هدف چند قسمتی در مورد هزینه تعریف نمود که مهمترین آنها هزینه ذخیره‌ساز، هزینه تعمیرات و نگهداری و هزینه مکان نصب می‌باشد. در بحث جایابی بهینه مکان نصب ذخیره‌ساز، با توجه به یکسان بودن هزینه‌های مربوط به تاسیسات و تعمیرات و نگهداری، هزینه مربوط به مکان اختصاص یافته به ذخیره‌ساز اهمیت بیشتری می‌یابد. از اینرو یک شاخص هزینه در تابع هدف به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

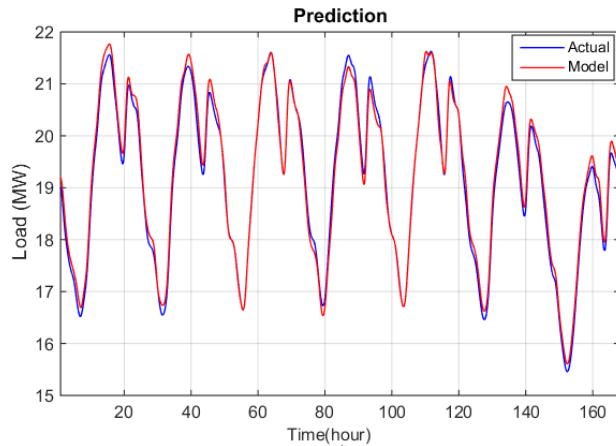
$$K_{1-Cost} = \frac{C_{ES}}{LP_i} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، C_{ES} هزینه ساخت ذخیره‌ساز بر حسب پریونیت و LP_i قیمت متوسط هر مترمربع زمین در پست i ام می‌باشد. همچنین در شاخص مربوط به هزینه، می‌توان شاخص متوسط تعرفه فروش برق در هر پست را نیز به صورت زیر تعریف نمود.

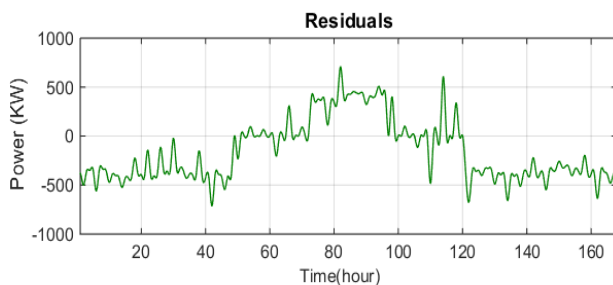
$$K_{2-Cost} = P_{ri}d_{ri} + P_{ii}d_{ii} + P_{ai}d_{ai} + P_{pi}d_{pi} \quad (12)$$

۶- شبیه سازی

تابستان ۱۳۹۴ به عنوان ورودی و آموزش شبکه عصبی و آخرین هفته تابستان (۱۶۸ ساعت) به عنوان خروجی مورد تست قرار گرفت. نتایج پیش‌بینی بار در شکل‌های (۶) و (۷) مشخص می‌باشد. همانگونه که در شکل (۶) مشخص می‌باشد، بار پیش‌بینی شده با دقت خوبی معادل مصرف واقعی است. مقدار خطای پیش‌بینی شده در شکل (۷) نشان داده شده است و شاخص میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAPE) برابر با 1.41% شده است که با توجه به نتایج سایر مقالات، این مقدار خطا، بیانگر دقت بسیار خوب روش اجرا شده می‌باشد.



شکل (۶): بار پیش‌بینی شده و بار واقعی در مدت یک هفته



شکل (۷): مقدار خطای پیش‌بینی بار

برای برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز، پیش‌بینی بار برای هر ده پست تحت مطالعه برای تابستان سال ۱۳۹۵ انجام شده است و مقدار مصرف روز ماکزیمم هر پست استخراج شده است. به عنوان نمونه، در شکل (۸) بار پیش‌بینی شده پست شماره ۶ (جنوب سمنان) نشان داده شده است و مقدار مصرف روز پیک آن استخراج گردیده است. همانگونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود بار مصرفی در این سه ماه، به سادگی قابل تقسیم به سه گروه (روزهای کاری، روزهای نیمه تعطیل و تعطیل) است که معمولاً پیک مصرف در روزهای کاری و روزهایی که دما در بالاترین مقدار خود قرار دارد، رخ می‌دهد. با پیش‌بینی بار هر ده پست تحت مطالعه و استخراج اطلاعات مربوط به روز پیک، اطلاعات برنامه‌ریزی کامل می‌شود. در شکل (۹) منحنی‌های تداوم مصرف (پریونیت شده) پست‌های تحت مطالعه در روزهای پیک مصرف، نشان داده شده است. شاخص‌های توضیح داده شده در قبل براساس اطلاعات شکل (۹) محاسبه می‌شود.

سیستم تحت مطالعه در این مقاله، شبکه فوق توزیع شهرستان سمنان می‌باشد. این شبکه دارای ۱۰ پست ۶۳ به ۲۰ کیلوولت است که ظرفیت‌های هر کدام بین ۱۵ تا ۴۰ مگاوات آمپر می‌باشد. اطلاعات مربوط به ظرفیت پست‌ها، ماکزیمم مصرف هر پست، ضریب استفاده و رشد متوسط سالیانه بار در جدول (۲) آورده شده است. در جدول (۳) اطلاعات مربوط به درصد هر یک از انواع بار در هر پست و قیمت پریونیت زمین هر پست نشان داده شده است.

جدول (۲): اطلاعات مربوط به ظرفیت ترانس های موجود در هر پست

شماره پست	نام پست	توان نامی (MVA)	توان ماکزیمم (MW)	ضریب بهره	ضریب بار	درصد رشد بار
#1	شرق ۱	2*30	23.46	0.391	0.712	2
#2	شرق ۲	3*40	24.47	0.203	0.783	2
#3	فولاد فجر	2*15	8.82	0.294	0.505	1.5
#4	کلران	2*30	19.51	0.325	0.779	1.5
#5	میرحاج	2*40	37.2	0.465	0.841	2
#6	جنوب	2*30	31.04	0.517	0.858	2
#7	سرخه	2*30	25.3	0.421	0.777	2
#8	مهدیشهر	2*30	16.98	0.283	0.653	3
#9	چاشم	2*15	3.86	0.128	0.564	1.5
#10	شهمیرزاد	1*15	6	0.4	0.685	3

با توجه به پریونیت شدن مقادیر مصرف، ضریب بار در جدول (۲) بیانگر مقدار متوسط مصرف پست می‌باشد.

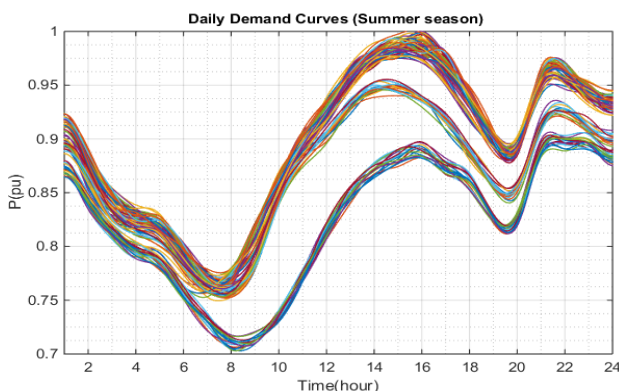
جدول (۳): اطلاعات مربوط درصد بارهای هر پست و قیمت زمین

شماره پست	درصد بار عمومی	درصد بار تجاری	درصد بار کشاورزی	درصد بار خانگی	درصد بار صنعتی	قیمت زمین (PU)
#1	15	0	35	10	40	1.2
#2	10	0	40	0	50	1
#3	0	0	0	0	100	1.4
#4	0	0	0	0	100	1.1
#5	10	30	10	50	0	2.1
#6	10	10	40	20	20	1.8
#7	5	10	50	25	10	0.8
#8	5	15	40	30	10	1.2
#9	0	0	0	0	100	1.2
#10	5	15	40	30	10	1

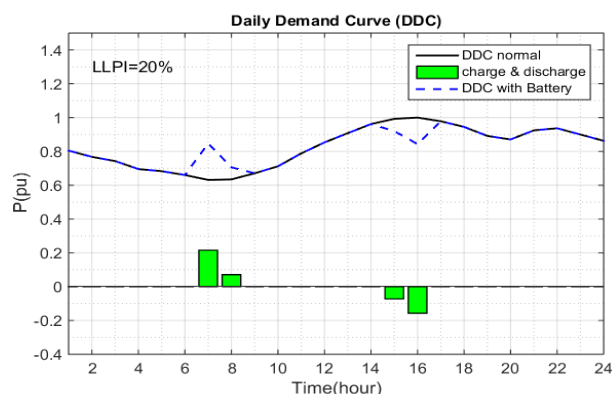
همانگونه که در قبل گفته شد برای آموزش شبکه عصبی از اطلاعات آماری مصرف سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ استفاده شده است. برای صحت روش ارائه شده، اطلاعات مربوط به این دو سال تا آخرین هفته

این صورت شاخص $LLPI=100\%$ خواهد بود. برای مقادیر کوچکتر $LLPI$ میزان ظرفیت ذخیره‌ساز مطابق با رابطه (۱۰) محاسبه خواهد شد. با توجه به عدم افزایش مقدار میانگین مصرف پست، مقدار توان ماکزیمم ذخیره ساز برابر با ماکزیمم اختلاف بین منحنی مصرف و مقدار میانگین است.

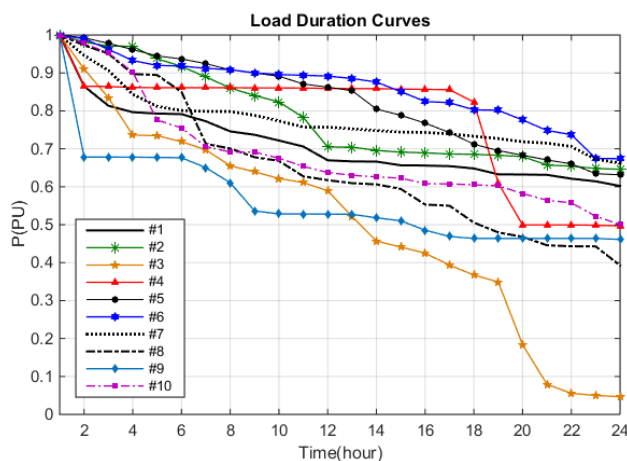
نتایج برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ پست شماره ۵ (شهید میرحاج) در شکل‌های (۱۰) تا (۱۹) برای مقادیر مختلف $LLPI$ نشان داده شده است.



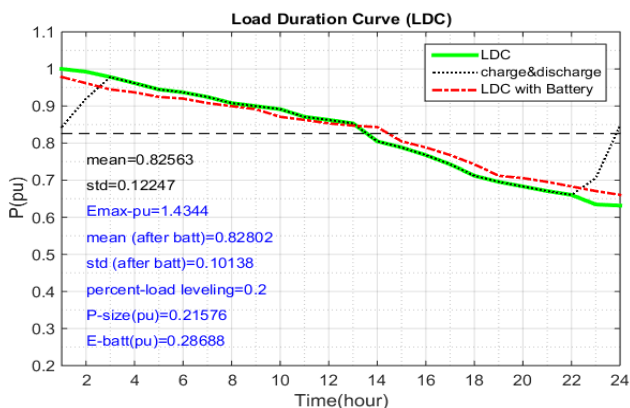
شکل (۸): منحنی‌های پیش‌بینی بار فصل تابستان برای پست جنوب



شکل (۱۰): منحنی مصرف روزانه قبل و بعد از نصب باتری به ازای $LLPI=0.2$



شکل (۹): منحنی‌های تداوم مصرف پست تحت مطالعه

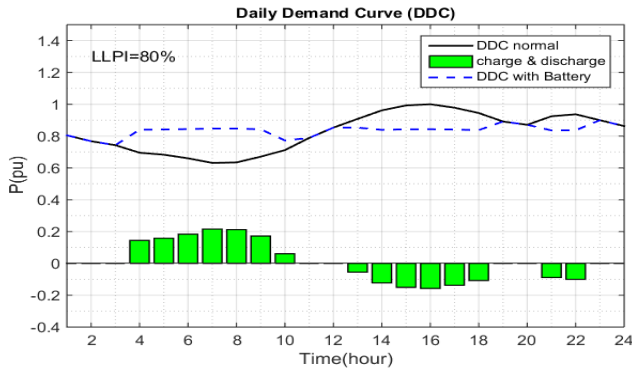


شکل (۱۱): منحنی تداوم مصرف قبل و بعد از نصب باتری به ازای $LLPI=0.2$

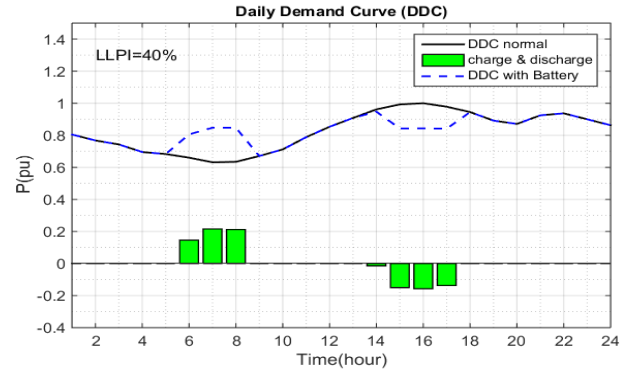
در شکل (۱۰) منحنی پر رنگ منحنی روزانه مصرف قبل از نصب ذخیره ساز و منحنی خط‌چین منحنی مصرف پست پس از نصب ذخیره‌ساز می‌باشد. نمودار نیز نشان دهنده میزان شارژ و دشارژ باتری است. در واقع مقادیر مثبت نمودار بیانگر مقدار توان شارژ شده در باتری و مقادیر منفی نمودار بیانگر مقدار توان دشارژ شده از باتری است. در شکل (۱۱) نیز منحنی پر رنگ، منحنی تداوم مصرف قبل از نصب و منحنی نقطه چین منحنی تداوم مصرف با اعمال شارژ و دشارژ ذخیره ساز و منحنی نقطه خط‌چین منحنی تداوم مصرف بعد از نصب ذخیره ساز می‌باشد. معمولاً راندمان کل مجموعه ذخیره‌سازهای باتری جریانی در حدود ۷۵ الی ۸۵ درصد است. در این مقاله راندمان باتری ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است.

در جدول (۴) شاخص‌های تعریف شده در مقاله به صورت منفرد و در نهایت به صورت یک شاخص کل برای هر ده پست تحت مطالعه محاسبه گردیده است. اگر به این نکته توجه کنیم که هنگام تسطیح منحنی بار به صورت کامل، پیک سایبی نیز خود به خود انجام می‌شود، از اینرو می‌توان در محاسبه شاخص نهایی، وزن شاخص‌های تسطیح منحنی بار و هزینه را بیشتر از وزن شاخص پیک‌سایبی در نظر گرفت. در این مقاله برای محاسبه شاخص نهایی، این ضریب‌ها به ترتیب ۰.۴، ۰.۲ و ۰.۴٪ در نظر گرفته شده اند. با توجه به شاخص‌های محاسبه شده، مناسب‌ترین پست جهت فقط پیک‌سایبی پست شماره ۷ (پست سرخه)، مناسب‌ترین پست جهت فقط تسطیح منحنی بار پست شماره ۸ (پست مهدی شهر) و مناسب‌ترین پست از لحاظ فقط کاهش هزینه پست شماره ۵ (پست شهید میرحاج) می‌باشد.

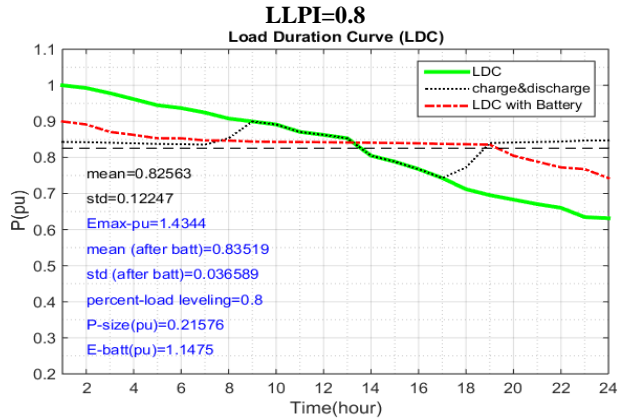
با توجه به شاخص نهایی محاسبه شده، مناسب‌ترین پست برای نصب ذخیره‌ساز با در نظر گرفتن هر سه شاخص، پست شماره ۵ (پست شهید میرحاج) می‌باشد. برای برنامه‌ریزی بهینه ذخیره‌ساز باید دو شرط را مورد توجه قرار داد. اولاً نصب ذخیره ساز نباید سبب افزایش میانگین مصرف در پست شود و ثانیاً اولویت دشارژ در ساعات پیک مصرف باشد. اولین قدم برای برنامه‌ریزی تعیین ظرفیت ماکزیمم ذخیره‌ساز و تعیین ماکزیمم توان خروجی آن است. همانگونه که گفته شد ماکزیمم ظرفیت ذخیره ساز برابر با شاخص S_{up} می‌باشد که در



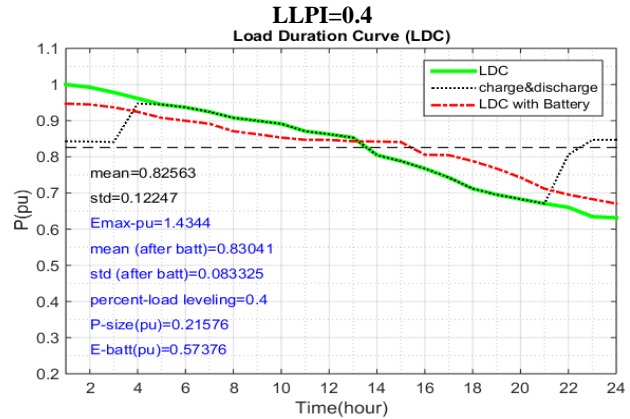
شکل (۱۶): منحنی مصرف روزانه قبل و بعد از نصب باتری به ازای



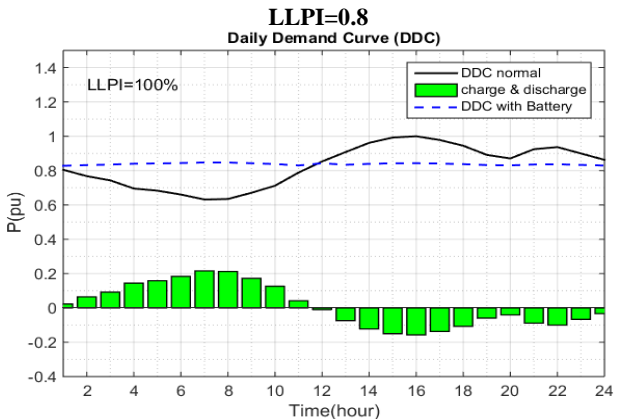
شکل (۱۲): منحنی مصرف روزانه قبل و بعد از نصب باتری به ازای



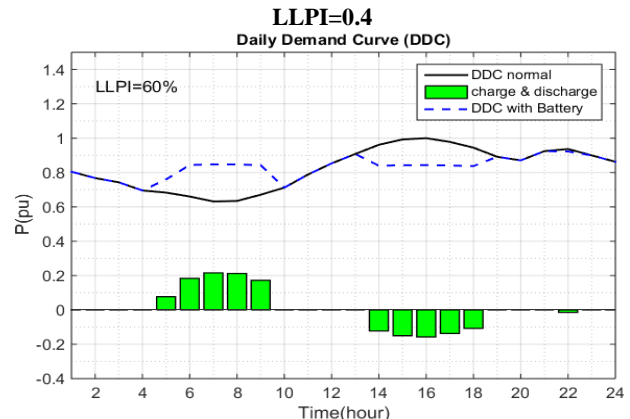
شکل (۱۷): منحنی تداوم مصرف قبل و بعد از نصب باتری به ازای



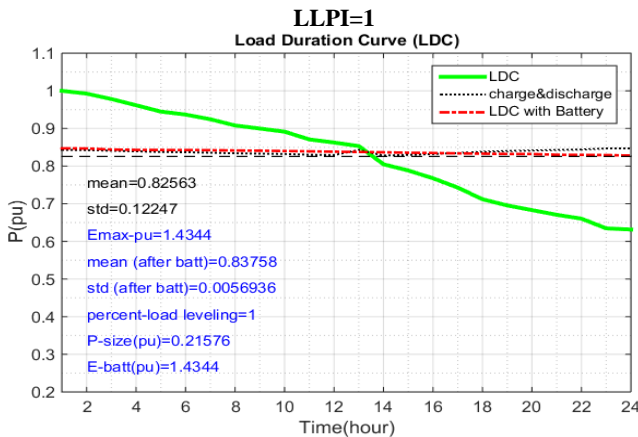
شکل (۱۳): منحنی تداوم مصرف قبل و بعد از نصب باتری به ازای



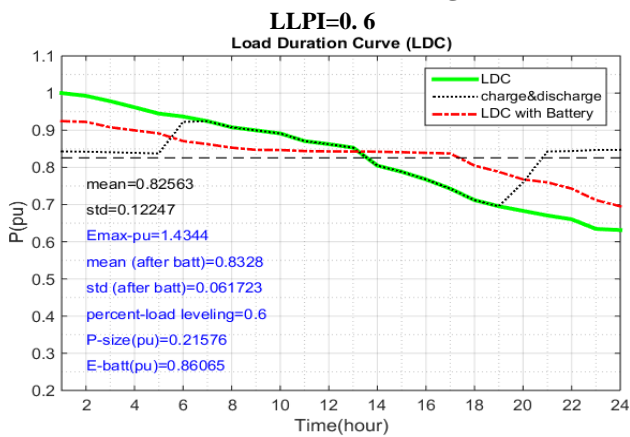
شکل (۱۸): منحنی مصرف روزانه قبل و بعد از نصب باتری به ازای



شکل (۱۴): منحنی مصرف روزانه قبل و بعد از نصب باتری به ازای



شکل (۱۹): منحنی تداوم مصرف قبل و بعد از نصب باتری به ازای



شکل (۱۵): منحنی تداوم مصرف قبل و بعد از نصب باتری به ازای

جدول (۴): نتایج بدست آمده برای جایابی پست‌های تحت مطالعه با توجه به تعریف شاخص‌ها

Substation Number	K_{1-PSH}	K_{2-PSH}	K_{PSH}	K_{1-LL}	K_{2-LL}	K_{LL}	K_{1-Cost}	K_{2-Cost}	K_{Cost}	PSH ranking	LL ranking	Cost ranking	Total ranking
#1	0.253	0.127	0.297	0.157	0.242	0.313	0.2	0.15	0.35	2	6	8	7
#2	0.100	0.020	0.049	0.281	0.346	0.256	0.16	0.14	0.3	10	9	9	10
#3	0.189	0.169	0.169	0.501	0.732	0.584	0.14	0.21	0.35	5	2	7	4
#4	0.027	0.069	0.050	0.235	0.384	0.324	0.18	0.21	0.39	9	5	4	6
#5	0.057	0.029	0.081	0.205	0.265	0.440	0.18	0.3	0.48	8	3	1	1
#6	0.044	0.047	0.095	0.178	0.234	0.427	0.11	0.18	0.29	7	4	10	8
#7	0.272	0.098	0.314	0.131	0.192	0.275	0.25	0.17	0.42	1	8	2	3
#8	0.251	0.062	0.214	0.393	0.502	0.612	0.16	0.2	0.36	3	1	6	2
#9	0.579	0.161	0.153	0.167	0.310	0.099	0.16	0.21	0.37	6	10	5	9
#10	0.351	0.061	0.203	0.247	0.351	0.294	0.2	0.2	0.4	4	7	3	5

جدول (۵): زمان به تعویق افتادن توسعه پست تحت مطالعه

ظرفیت (مگاوات ساعت)	10.6	21.3	32	42.4	53.3
کاهش پیک شبکه (درصد)	2	5	8	10	15
زمان تقریبی تعویق (سال)	1	2.5	4	5	7
سود بر حسب قیمت توسعه	0.05	0.12	0.19	0.23	0.3

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید، ابتکاری و کاربردی برای جایابی، تعیین اندازه و برنامه‌ریزی واحدهای ذخیره‌ساز باتری و انادایوم در شبکه‌های فوق توزیع ارائه گردید. با استفاده از روش پیشنهادی می‌توان در شبکه‌های فوق توزیعی که نیاز به نصب ذخیره‌ساز دارند، با تعریف سه شاخص برای پیک‌سای، تسطیح منحنی بار و کاهش هزینه، نقاط نصب ذخیره‌ساز را اولویت بندی کرد. پس از تعیین مکان نصب، ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز و همچنین برنامه ریزی بهینه شارژ و دشارژ با توجه به داده‌های مصرف و اطلاعات آماری پیش‌بینی شده مشخص می‌شود. در روش ارائه شده در این مقاله، نیازی به اطلاعات ساختار شبکه و معادلات پیچیده برای شبیه سازی نیست و سادگی و کاربردی بودن روش پیشنهادی مهمترین مزیت آن می‌باشد. برای پیش‌بینی بار از روش شبکه عصبی به همراه روش درخت تصمیم نمونه استفاده شد. نتایج حاصل از این مقاله می‌تواند به صورت کاربردی مورد استفاده برنامه‌ریزان و بهره‌برداران شبکه‌های فوق توزیع برق قرار گیرد تا با نصب ذخیره‌ساز، علاوه بر افزایش بهره‌وری تجهیزات مورد استفاده، صرفه‌های اقتصادی بسیاری را عاید شبکه سازند. در این مقاله پست‌های ۶۳ به ۲۰ کیلوولت در شبکه فوق توزیع شهرستان سمنان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند و از داده‌های واقعی برای شبیه‌سازی استفاده شد.

قبل از نصب ذخیره‌ساز در پست تحت مطالعه (پست شماره ۵) میانگین، انحراف معیار و ماکزیمم ظرفیت نصب ذخیره‌ساز بر حسب پریونیت به ترتیب 0.8256، 0.1224 و 1.434 است که با توجه به توان ماکزیمم 37.2MW این مقادیر به ترتیب 30.7MW، 4.55MW و 53.34MWh خواهد شد.

مقدار توان ماکزیمم ذخیره‌ساز برابر با ماکزیمم اختلاف بین منحنی مصرف و مقدار میانگین است. با توجه به منحنی مصرف بیشترین اختلاف با مقدار میانگین در ساعت ۱۶ که ساعت پیک مصرف است وجود دارد که این مقدار برابر با 0.2157 پریونیت است که بر حسب مگاوات تقریباً 8MW باید انتخاب گردد. باتری‌های جریان‌ی معمولاً برای مدت زمان ۲ تا ۸ ساعت شارژ و دشارژ نامی ساخته می‌شوند. از اینرو با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده، مناسب‌ترین اندازه ذخیره‌ساز برای نصب یک واحد 8MW/55MWh خواهد بود.

برای پیاده‌سازی این حجم از ذخیره‌سازی، می‌باید چندین ماژول را به صورت موازی در کنار هم قرار داد. با نصب این ذخیره‌ساز در پست، پیک‌سای و تسطیح منحنی بار به صورت کامل انجام خواهد شد و با توجه به رشد بار، تا ۷ سال آینده نیازی به توسعه پست نخواهد بود که این می‌تواند یک صرفه اقتصادی چشمگیری را عاید شبکه سازد. در جدول (۵) زمان تقریبی به تعویق افتادن توسعه بر حسب ظرفیت‌های مختلف انتخابی نشان داده شده است.

با توجه به رابطه (۳) و در نظر گرفتن نرخ تورم ۱۲٪ و نرخ بهره بانکی ۱۸٪ در سال ۹۴ و تعویق توسعه به مدت ۷ سال، عددی نزدیک به $0.3C_{inv}$ (۳۰ درصد قیمت توسعه یا احداث) سود عاید شبکه خواهد شد. همچنین با توجه به شارژ ذخیره‌ساز در ساعات ارزان انرژی و دشارژ آن در ساعات پیک که معمولاً قیمت انرژی چند برابر گرانتر است، سود دیگری را عاید شبکه ساخت.

- network." *IEEE Transactions on Power Systems* 30.5 (2015): 2288-2300.
- [19] Schneider, Maximilian, et al. "Optimal sizing of electrical energy storage systems using inventory models." *Energy Procedia* 73 (2015): 48-58.
- [20] Alotto, Piergiorgio, Massimo Guarnieri, and Federico Moro. "Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (2014): 325-335.
- [21] Kear, Gareth, Akeel A. Shah, and Frank C. Walsh. "Development of the all-vanadium redox flow battery for energy storage: a review of technological, financial and policy aspects." *International journal of energy research* 36.11 (2012): 1105-1120.
- [22] Turker, Burak, et al. "Modeling a vanadium redox flow battery system for large scale applications." *Energy Conversion and Management* 66 (2013): 26-32.
- [۲۳] محسن کلانتر، "گزارش پروژه: تدوین دانش فنی و طراحی مراحل ساخت ذخیره ساز هوشمند انرژی الکتریکی پرفریت جهت تسطیح بار و کاهش پیک شبکه"، شرکت توزیع نیروی برق نواحی استان تهران. (۱۳۹۲)
- [24] Leou, Rong-Ceng. "An economic analysis model for the energy storage system applied to a distribution substation." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 34.1 (2012): 132-137.
- [25] <http://masirmama.ir/new/index.php/2014-10-28-22-32-52/639-1245>.
- [26] Hosseina, Majid, and Seyed Mohammad Taghi Bathaee. "Optimal scheduling for distribution network with redox flow battery storage." *Energy Conversion and Management* 121 (2016): 145-151.
- [27] Tiwari, Amit, Adarsh Dhar Dubey, and Devesh Patel. "Comparative Study Of Short Term Load Forecasting Using Multilayer Feed Forward Neural Network With Back Propagation Learning And Radial Basis Functional Neural Network." *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology* 7.1 (2015).
- [28] Tiwari, Amit, Adarsh Dhar Dubey, and Devesh Patel. "Comparative Study Of Short Term Load Forecasting Using Multilayer Feed Forward Neural Network With Back Propagation Learning And Radial Basis Functional Neural Network." *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology* 7.1 (2015).
- [29] Khwaja, A. S., et al. "Improved short-term load forecasting using bagged neural networks." *Electric Power Systems Research* 125 (2015): 109-115.
- [1] Vazquez, Sergio, et al. "Energy storage systems for transport and grid applications." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 57.12 (2010): 3881-3895.
- [2] ZHANG, Wen-liang, Ming Qiu, and Xiao-kang LAI. "Application of Energy Storage Technologies in Power Grids [J]." *Power System Technology* 7 (2008): 004.
- [3] Zalba, Belen, et al. "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications." *Applied thermal engineering* 23.3 (2003): 251-283.
- [4] Jang, Dongsik, et al. "Variability of electricity load patterns and its effect on demand response: A critical peak pricing experiment on Korean commercial and industrial customers." *Energy Policy* 88 (2016): 11-26.
- [5] Rodrigues, Filipe, Carlos Cardeira, and João Manuel Ferreira Calado. "The daily and hourly energy consumption and load forecasting using artificial neural network method: a case study using a set of 93 households in Portugal." *Energy Procedia* 62 (2014): 220-229.
- [6] Lahouar, A., and J. Ben Hadj Slama. "Day-ahead load forecast using random forest and expert input selection." *Energy Conversion and Management* 103 (2015): 1040-1051.
- [7] Feijoo, Felipe, Walter Silva, and Tapas K. Das. "A computationally efficient electricity price forecasting model for real time energy markets." *Energy Conversion and Management* 113 (2016): 27-35.
- [8] Barton, John P., and David G. Infield. "Energy storage and its use with intermittent renewable energy." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 19.2 (2004): 441-448.
- [9] Dunn, Bruce, Haresh Kamath, and Jean-Marie Tarascon. "Electrical energy storage for the grid: a battery of choices." *Science* 334.6058 (2011): 928-935.
- [10] Tan, Xingguo, Qingmin Li, and Hui Wang. "Advances and trends of energy storage technology in microgrid." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 44.1 (2013): 179-191.
- [11] Divya, K. C., and Jacob Østergaard. "Battery energy storage technology for power systems—An overview." *Electric Power Systems Research* 79.4 (2009): 511-520.
- [12] Zhao, Haoran, et al. "Review of energy storage system for wind power integration support." *Applied Energy* 137 (2015): 545-553.
- [13] Hall, Peter J., and Euan J. Bain. "Energy-storage technologies and electricity generation." *Energy policy* 36.12 (2008): 4352-4355.
- [14] Swierczynski, M., et al. "Overview of the energy storage systems for wind power integration enhancement." *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on. IEEE, 2010*.
- [15] Zhang, Yongxi, et al. "Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration." *IET Renewable Power Generation* (2016).
- [16] Krishnan, Venkat, and Trishna Das. "Optimal allocation of energy storage in a co-optimized electricity market: Benefits assessment and deriving indicators for economic storage ventures." *Energy* 81 (2015): 175-188.
- [17] Awad, Ahmed SA, Tarek HM El-Fouly, and Magdy MA Salama. "Optimal ESS allocation for load management application." *IEEE Transactions on Power Systems* 30.1 (2015): 327-336.
- [18] Pandžić, Hrvoje, et al. "Near-optimal method for siting and sizing of distributed storage in a transmission