

توزیع مشارکتی ذخیره انرژی پراکنده در شبکه توزیع با سیستم های تولید PV

سیستم ذخیره انرژی باتری (BESS) نقش مهمی در حل مسائلی ایفا می کند که در آنها باید تناوب در هنگام بهره برداری از شبکه توزیع (DN) که با انرژی تجدیدپذیر پوشش داده شده است، در نظر گرفته شود. با هدف این مشکل، این مقاله یک مدل توزیع متمرکز جهانی را پیشنهاد می کند که از فناوری BESS برای DN با منبع انرژی تجدیدپذیر (RES) استفاده می کند. روش پیشنهادی در این مقاله با هدف به حداقل رساندن هزینه خرید برق با در نظر گرفتن هزینه تلفات فعال شبکه و همچنین هزینه جریمه انحراف ولتاژ است. بعداً از روش برنامه نویسی مخروط مرتبه دوم (SOCP) و همچنین روش M بزرگ برای قابل حل کردن مسئله استفاده می شود. در نهایت، روش نشان داده شده در این مقاله بر روی یک سیستم معیار ۳۳ با سه اصلاح شده IEEE برای تأیید اثربخشی مدل زمان بندی پیشنهادی اعمال و تأیید می شود.

شرایط شاخص - ذخیره انرژی، تولید برق فتوولتائیک توزیع شده، پیک سایه، تنظیم ولتاژ، اثر اقتصادی.

۱. مقدمه

در سراسر جهان، نرخ نفوذ انرژی های تجدیدپذیر به سرعت در حال افزایش است، به ویژه، در مورد چین. تا پایان سال ۲۰۲۰، ظرفیت نصب شده انرژی های تجدیدپذیر چین به ۹۳۴۰۰۰ مگاوات رسیده است که نسبت به مدت مشابه سال قبل ۱۷,۵ درصد افزایش داشته است. با این حال، عدم قطعیت خروجی انرژی تجدیدپذیر چالش های خاصی را برای عملکرد DN به همراه آورده است [۱]. BESS به عنوان یک منبع منعطف، نقش مهمی در سیستم عاملی ایفا می کند که به شدت با انرژی های تجدیدپذیر متناوب نفوذ می کند [۲]، [۳]. با افزایش ظرفیت نصب شده BESS، بسیار ضروری است که یک روش عملیات متمرکز جهانی شبکه توزیع (DN) ارائه شود که بتواند از انعطاف پذیری BESS استفاده کند [۴]، [۵].

در حال حاضر، تحقیقات زیادی در مورد زمان بندی شبکه توزیع (DN) با در نظر گرفتن ESS انجام شده است [6]-[8]. با این حال، در برخی از تحقیقات، هدف زمان بندی ESS از سمت انرژی های تجدیدپذیر تک است، که انعکاس اثر برنامه ریزی مشارکتی BESS و سایر واحدها در DN را دشوار می کند. برخی از تحقیقات تلفات شبکه را در نظر نمی گیرند و یک مشکل رایج وجود دارد، یعنی هزینه تلفات شبکه و هزینه انحراف ولتاژ به طور همزمان در تابع هدف در نظر گرفته نمی شود. با بهبود تدریجی بازار خدمات کمکی برق، BESS همچنین نقش مهمی در مدیریت کیفیت توان ایفا خواهد کرد [۹]، [۱۰] که ارزش زیادی برای اکتشاف دارد.

در این مقاله، یک مدل توزیع متمرکز جهانی برای DN که با RES و BESS نفوذ کرده است، پیشنهاد شده است. با فرض در نظر گرفتن تلفات شبکه، مدل پیشنهادی به دنبال به حداقل رساندن مشترک هزینه خرید برق، تلفات خط فعال، و همچنین انحراف ولتاژ است. بعداً برای اطمینان از قابلیت ردیابی مدل پیشنهادی، تکنیک آرام سازی مخروطی مرتبه دوم و روش M big اعمال می شود و بعداً مدل توسط حل کننده Cplex حل می شود. در نهایت، نتیجه از سه منظر اصلی، پیک سایی، تنظیم ولتاژ و همچنین اثر اقتصادی ارزیابی می شود.

۲. مدل توزیع متمرکز جهانی

الف. تابع هدف

هدف مدل توزیع اقتصادی شبکه توزیع (DN) با ESS های توزیع شده و نیروگاه های فتوولتائیک (PV) به حداقل رساندن مجموع هزینه خرید شبکه اصلی، هزینه تلفات فعال شبکه و هزینه جریمه انحراف ولتاژ است، همانطور که در (۱) نشان داده شده است.

$$C_{\min} = \min \left(\sum_t C_{gt} P_{gt} + C_e \sum_{i=1}^{N_{bus}} \sum_{j \in c(i)} r_{ij} (I_{ij})^2 + C_a \sum_{i,t} |V_{it} - 1| \right) \quad (1)$$

که در آن $C_{\min}$ حداقل مقدار تابع هدف t است.

C_{gt} قیمت برق زمان واقعی برای شبکه اصلی برق است.

P_{gt} توان اکتیو ارائه شده توسط شبکه اصلی به DN است.

C_e ضریب جبران تلفات اکتیو شبکه است.

N_{bus} تعداد باس شبکه است.

i, j شماره باس های شبکه هستند.

$C(i)$ مجموعه ای از باس های متصل به i به عنوان نقطه شروع است.

r_{ij} مقاومت شاخه است.

I_{ij} جریان شاخه است.

Ca ضریب جریمه انحراف ولتاژ است.

V_{it} مقدار ولتاژ باس i است.

ب. شرط محدودیت

(۱) محدودیت تعادل توان

شکل ۱ بخشی از توپولوژی DN را نشان می دهد. توان تزریق یا جذب شده در هر باس و جریان برق در هر شاخه باید محدودیت‌های موازنه توان زیر را برآورده کند:

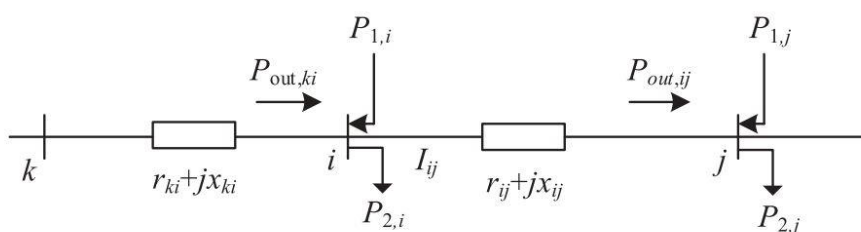


Fig. 1. Diagram for power flow direction of nodes and branches.

satisfy the following power balancing constraints:

$$\begin{cases} \sum_{ki \in N_{bus}} P_{kit} - \sum_{ij \in N_{bus}} P_{ijt} - P_{ijt}^{loss} + P_{it}^{bess} + P_{it}^{gf} = P_{it}^{bus} \\ \sum_{ki \in N_{bus}} Q_{kit} - \sum_{ij \in N_{bus}} Q_{ijt} - Q_{ijt}^{loss} + Q_{it}^{bess} + Q_{it}^{gf} = Q_{it}^{bus} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن

P_{kit} و Q_{kit} توان اکتیو و راکتیو ورودی به باس i از شاخه ki هستند؛

P_{ijt} و Q_{ijt} توان اکتیو و راکتیو خروجی از باس i از شاخه ij هستند؛

P_{ijt}^{loss} و Q_{ijt}^{loss} به ترتیب تلفات شاخه شبکه برای توان اکتیو و راکتیو هستند؛

P_{it}^{bess} و Q_{it}^{bess} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو خروجی از ESS i هستند؛

P_{it}^{gf} و Q_{it}^{gf} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو خروجی از نیروگاه فتوولتائیک i هستند؛

P_{it}^{bus} و Q_{it}^{bus} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو خروجی از باس i هستند.

(۲) قید افت ولتاژ به صورت (۳) است.

$$(V_{jt})^2 = (V_{it})^2 - 2(r_{ij}P_{ijt} + x_{ij}Q_{ijt}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I_{ijt}^2 \quad (3)$$

که در آن V_{jt} و V_{it} اندازه ولتاژ باس j و i هستند.

(۳) قید حد انتقال به صورت (۴) است.

$$\left\| \begin{array}{c} P_{ijt} - I_{ijt}^2 r_{ij} \\ Q_{ijt} - I_{ijt}^2 x_{ij} \end{array} \right\| \leq S_{ij}^{cap} \quad (4)$$

که در آن S_{ij}^{cap} ظرفیت انتقال شاخه است.

(۴) قید افت ولتاژ به صورت (۵) است.

$$V_{it}^2 \leq \frac{P_{ijt}^2 + Q_{ijt}^2}{I_{ijt}^2} \quad (5)$$

(۵) قید ظرفیت بار ESS به صورت (۶) است.

$$\begin{aligned}
 & \left\| \begin{matrix} P_{it}^{bess} \\ Q_{it}^{bess} \end{matrix} \right\| \leq C_{i,max}^{bess} \\
 & P_{it}^{bess} = P_{it}^{Des} - P_{it}^{Ces} \\
 & 0 \leq P_{it}^{Des} \leq U_{it}^{bess} C_{max}^{bess} \\
 & 0 \leq P_{it}^{Ces} \leq U_{it}^{bess} C_{max}^{bess} \\
 & 0 \leq E_{it}^{bees} \leq C_{i,max}^{bess} \\
 & E_{it}^{bees} = E_{it-1}^{bees} + \eta_c P_{it}^{Ces} - P_{it}^{Des} / \eta_d \\
 & E_{iT}^{bees} = E_{i0}^{bees}
 \end{aligned} \tag{6}$$

که؛

$C_{i,max}^{bess}$ حداکثر مقدار ظرفیت i ام ESS است؛

P_{it}^{Des} توان اکتیو تخلیه شده توسط BESS i است؛

P_{it}^{Ces} توان اکتیو برای شارژ ESS i است؛

U_{it}^{bess} یک متغیر دودویی است؛

E_{it}^{bees} مقدار توان باقی مانده BESS i است؛

η_c و η_d راندمان شارژ و دشارژ BESS هستند.

(۶) محدودیت‌های توان شارژ و دشارژ نیروگاه فتوولتائیک (PV) به صورت (۷) هستند.

$$\begin{cases} 0 \leq P_{it}^{gf} \leq P_{pvs} \\ 0 \leq Q_{it}^{gf} \leq Q_{pvs} \end{cases} \tag{7}$$

که در آن P_{pvs} و Q_{pvs} حداکثر توان اکتیو و راکتیو ارائه شده توسط نیروگاه فتوولتائیک i هستند.

(۷) محدودیت‌های توان توسط شبکه اصلی به صورت (۸) هستند.

$$\begin{cases} 0 \leq P_{gt} \leq P_{h,max} \\ 0 \leq Q_{gt} \leq Q_{h,max} \end{cases} \quad (8)$$

که در آن $P_{h,max}$ و $Q_{h,max}$ حداکثر توان اکتیو و راکتیو ارائه شده توسط شبکه اصلی به شبکه توزیع (DN) هستند.

ث) شرط محدودیت

با استفاده از تکنیک آزادسازی مخروط مرتبه دوم [۲]، مربع جریان شاخه به صورت $i_{2,ij}$ و مربع دامنه ولتاژ گره به صورت $u_{2,ij}$ تعریف می‌شود، سپس تبدیل خطی شده را می‌توان به صورت (۹)-(۱۳) یافت.

$$\begin{cases} u_{2,i} = V_i^2 \\ i_{2,ij} = I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{u_{2,i}} \end{cases} \quad (9)$$

(1) It can be converted to

$$C_{\min} = \min \left(\sum_t C_{gt} P_{gt} + C_e \sum_{i=1}^{N_{bus}} \sum_{j \in c(i)} r_{ij} i_{2,ij} + C_a \sum_{i,t} |V_{it} - 1| \right) \quad (10)$$

(3) It can be converted to

$$u_{2,jt} = u_{2,it} - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) i_{2,ijt} \quad (11)$$

(4) It can be converted to

$$\left\| \begin{bmatrix} P_{ijt} - i_{2,ijt} r_{ij} \\ Q_{ijt} - i_{2,ijt} x_{ij} \end{bmatrix} \right\| \leq S_{ij}^{cap} \quad (12)$$

(5) It can be converted to

$$\left\| [2P_{ijt} 2Q_{ijt} i_{2,ijt} - u_{2,ijt}]^T \right\|_2 \leq i_{2,ijt} + u_{2,ijt} \quad (13)$$

علامت قدر مطلق در (۱) را می‌توان با معرفی متغیرهای دودویی حذف کرد، و وقتی $(V_{it} - 1)$ غیرمنفی باشد، برابر با ۱ است؛ وقتی $(V_{it} - 1)$ منفی باشد، برابر با ۰ است. (۱۴) را می‌توان به صورت خطی با روش M بزرگ به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} (2\alpha_{it} - 1)(V_{it} - 1) &= 2v_{it}^p - (V_{it} - 1) \\ 0 \leq v_{it}^p - (V_{it} - 1) &\leq M(1 - \alpha_{it}) \\ 0 \leq v_{it}^p &\leq M\alpha_{it} \end{aligned} \quad (14)$$

متغیرهای پیوسته $\alpha_{it}(V_{it} - 1)$ به جای v_{it}^p استفاده شدند. وقتی α_{it} برابر با ۰ است، v_{it}^p برابر با ۰ است و $(V_{it} - 1)$ منفی است؛ وقتی α_{it} برابر با ۱ است، $v_{it}^p = (V_{it} - 1)$ است و $(V_{it} - 1)$ منفی نیست.

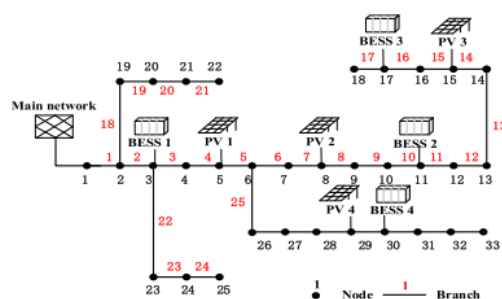


Fig. 2. The topology of the modified IEEE 33-node system.

TABLE I
THE PARAMETERS OF BESSs AND PV STATIONS

Station	Installed node	Installed capacity (MW)
BESS 1	3	2
BESS 2	11	1
BESS 3	17	1
BESS 4	30	2
PV 1	5	2
PV 2	8	1
PV 3	15	1
PV 4	29	2

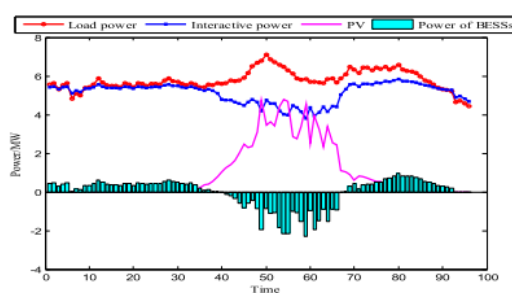


Fig. 4. Output of units with BESSs.

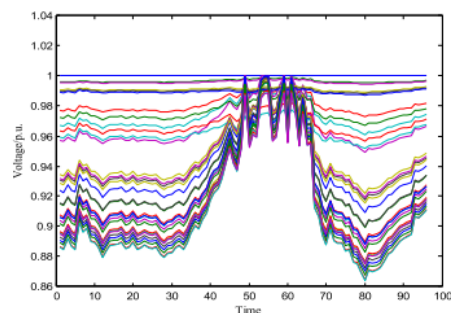


Fig. 5. Voltage profiles of nodes without BESSs.

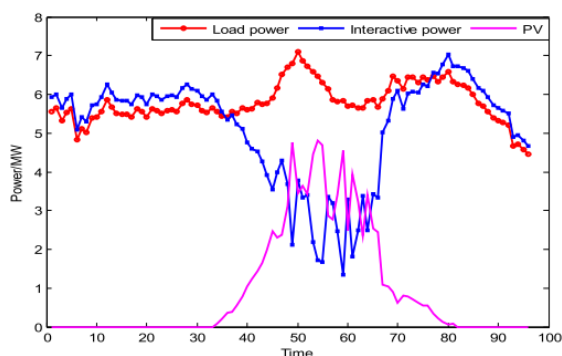


Fig. 3. Output of units without BESSs.

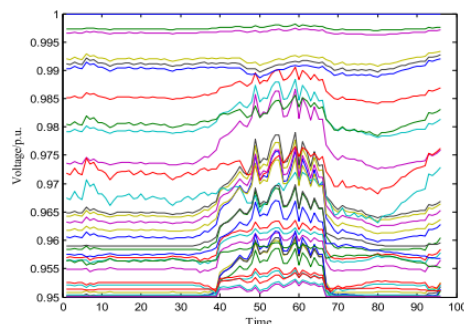


Fig. 6. Voltage profiles of nodes with BESSs.

۳. مطالعه موردی

یک سیستم ۳۳ گره‌ای IEEE اصلاح‌شده برای شبیه‌سازی و تأیید مدل پیشنهادی استفاده شده است. توپولوژی سیستم ۳۳ گره‌ای IEEE اصلاح‌شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

همانطور که از شکل ۲ مشاهده می‌شود، سیستم تست ۳۳ گره‌ای IEEE شامل ۳۳ باس و ۳۲ شاخه است. چهار BESS و چهار ایستگاه PV به DN متصل شده‌اند. به منظور پیروی از اصل تولید برق و استفاده از آن در نزدیکی، BESSها و ایستگاه‌های PV توزیع شده‌اند، پارامترهای DN در جدول ۱ نشان داده شده است. فاصله زمانی ۱۵ دقیقه تنظیم شده و یک روز به ۹۶ دوره زمانی تقسیم شده است.

الف. تحلیل اثر پیک سایه BESS

BESS می‌تواند تناوب PV را از طریق توان عملیاتی انرژی و اصلاح اوج توان کمکی کاهش دهد. در این مقاله، نرخ رد PV توسط BESS قبل و بعد از مشارکت در دیسپاچینگ مقایسه شده و اثربخشی فناوری ESS در بهبود توانایی سیستم در پذیرش PV و مشارکت در اصلاح اوج توان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. خروجی واحدهای بدون BESS در شکل ۳ نشان داده شده است. خروجی واحدهای دارای BESS در شکل ۴ نشان داده شده است.

با مقایسه شکل ۳ و شکل ۴، می‌توانیم ببینیم که در دوره‌های زمانی ۰-۳۹ و ۶۸-۹۲، توان تعاملی بین سیستم و شبکه انتقال به دلیل توان آزاد شده توسط BESSها به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در دوره زمانی ۶۸-۹۲، دستگاه ذخیره انرژی توان آزاد می‌کند که باعث می‌شود منحنی خروجی توان تعاملی هموارتر شود. در عین حال، پس از اعمال BESSها، نرخ رد PV به طور قابل توجهی از ۲۸٫۷٪ به ۸٫۴٪ کاهش یافت.

ب. تحلیل اثر تنظیم ولتاژ BESS

پروفیل ولتاژ گره‌های بدون BESS در شکل ۵ و پروفیل ولتاژ گره‌های دارای BESS در شکل ۶ نشان داده شده است.

با مقایسه شکل ۵ و شکل ۶، می‌توانیم ببینیم که تحت تنظیم BESSها، مشکل ولتاژ پایین سیستم در طول دوره اوج بار شبانه حل می‌شود. در عین حال، می‌توانیم ببینیم که ولتاژ گره در ساعت ۸:۰۰ شب در روز به کمترین مقدار خود می‌رسد، بنابراین ساعت ۸:۰۰ شب به عنوان زمان معمول انتخاب می‌شود که سیستم به ذخیره‌سازی انرژی دسترسی ندارد تا بهبود ولتاژ گره سیستم با و بدون BESS بررسی شود. نمودار توزیع ولتاژ گره در زمان معمول در شکل ۷ نشان داده شده است.

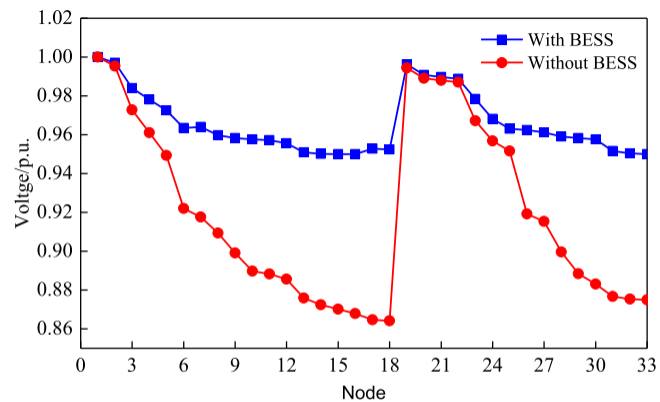


Fig. 7. Node voltage distribution at typical time.

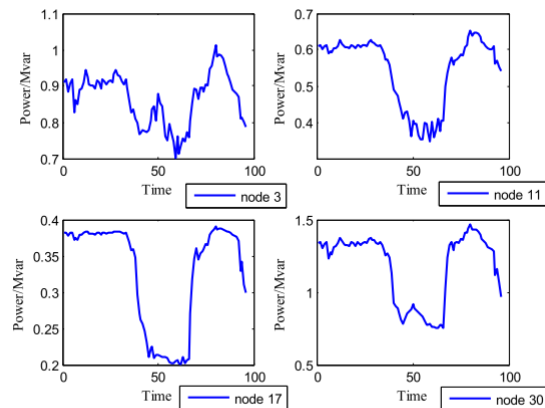


Fig. 8. The reactive power variations of BESSs.

TABLE II
THE COMPARISON OF SYSTEM SCHEDULING COSTS

Cost/Yuan	Without BESSs	With BESSs
Power purchase by main network	132436	129656
Network active loss	2665.8	2374
Voltage deviation penalty	3286.3	2118.5
Total cost	138388.1	134148.5

همانطور که مشاهده می‌شود، پس از اتصال BESS ها، ولتاژ هر گره به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و انحراف ولتاژ در محدوده مجاز کنترل می‌شود. حداقل ولتاژ از ۰,۸۶۴ به ۰,۹۵، پریونیت افزایش می‌یابد و نرخ صلاحیت ولتاژ سیستم از ۳۳,۳٪ به ۱۰۰٪ افزایش می‌یابد.

شکل ۸ تغییرات توان راکتیو هر BESS را در یک روز نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که جذب توان راکتیو بیشتر در صبح و عصر و کمتر در بعد از ظهر رخ می‌دهد. این نشان می‌دهد که افزونگی مشخصی از توان راکتیو در نزدیکی گره‌ای که BESS ها در طول روز به آن متصل هستند، وجود دارد، بنابراین ولتاژ گره بالا است.

ث. تحلیل اثر اقتصادی BESS

جدول II مقایسه هزینه‌های زمان‌بندی سیستم را با یا بدون BESS ها نشان می‌دهد، فرمول محاسبه هزینه در فرمول ۱ نشان داده شده است.

همانطور که می‌بینیم، از طریق توزیع هماهنگ BESS ها، هزینه کل از ۱۳۸۳۸۸,۱ یوان به ۱۳۴۱۴۸,۵ یوان کاهش یافته و اقتصاد کلی ۳,۱٪ بهبود یافته است.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش توزیع مشارکتی برای ذخیره‌سازی انرژی توزیع شده در شبکه‌های توزیع شده (DN) با سیستم‌های تولید توان فتوولتائیک (PV) ارائه شده است. از تکنیک آزادسازی مخروط مرتبه دوم و روش M بزرگ برای خطی‌سازی مدل استفاده شده است. مدل و تکنیک حل پیشنهادی با استفاده از سیستم ۳۳ گره‌ای اصلاح شده IEEE اعتبارسنجی شده‌اند. نتایج به شرح زیر است.

ویژگی‌های توان خروجی هر نقطه زمانی با استفاده از راه حل Cplex بدست می‌آید. این راه حل ساده و سریع است و برای حل مسائل بهینه‌سازی و کنترل چندهدفه مناسب است. BESS می‌تواند ظرفیت اصلاح پیک سیستم را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. برای سیستم ۳۳ گره‌ای IEEE، می‌تواند نرخ ترک PV سیستم را از ۲۸,۷٪ به ۸,۴٪ کاهش دهد. BESS می‌تواند ظرفیت تنظیم ولتاژ سیستم را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. حداقل ولتاژ از ۰,۸۶۴ به ۰,۹۵، پریونیت افزایش می‌یابد. BESS می‌تواند اقتصاد عملکرد سیستم را بهبود بخشد. اقتصاد کلی ۳,۱٪ بهبود می‌یابد.