# تعیین استراتژی عملکرد بهینه ذخیره‌ساز در سیستم قدرت

**محمدحسین رنجبری[۱] - رضوانه دلیلی[۱] - مجتبی پیشوایی[۲]**
(۱) مربی - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران
(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۰۳

**خلاصه:** تعیین ظرفیت بهینه ذخیره‌سازها در سیستم‌های قدرت امروزی مورد علاقه و توجه قرار گرفته است. یکی از کاربردهای منابع ذخیره‌ساز انرژی، تعویق افزایش ظرفیت تولید می‌باشد که استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی با بهبود وضعیت توان در ساعات پیک مصرف، سبب تاخیر در نیاز به نصب واحد نیروگاهی جدید می‌شود. در این مقاله ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، توسط برنامه‌ریزی غیرخطی مرتبه دوم تعیین می‌گردد. این روش، مسئله را با یک تابع هدف مرتبه دوم برحسب توان تولیدی واحدها و توان ذخیره‌ساز بیان می‌کند. قیود نیز به صورت معادلات برابری و نابرابری خطی مدل شده‌اند. در روش پیشنهادی محدودیت‌های توان تولیدی و نرخ افزایشی و کاهشی توان ژنراتورها در نظر گرفته شده‌اند.

**کلمات کلیدی:** ذخیره‌ساز انرژی، برنامه‌ریزی غیرخطی مرتبه دوم، ظرفیت بهینه، کاهش هزینه بهره‌برداری، کاهش پیک بار

# Determination of Optimum Performance Strategy of Energy Storage in Power System

**Mohammad Hossein Ranjbari[1] - Rezvaneh Dalili[1] - Mojtaba pishvaei[2]**
(1) Indicator - Department of Electrical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran
ranjbari4526@gmail.com
rezvaneh.dalili@gmail.com
(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran
mojtabapishvaei@yahoo.com

**D**etermination of optimal capacity for today energy storages has been specially noticed. The delay in increasing storage production capacity is one of the applications for energy storage supplies in which utilization from energy storage supplies along with improvement in the power status at peak hours of consumption may postpone the demand for installation of a new power plant module. In this essay, the optimal capacity of energy storage is determined in order to reduce exploitation costs by second-order nonlinear programming. This method expresses this problem with a target quadratic function based on the produced power of units and capacity of energy storage supply. The requirements have been modeled as linear equality and inequality equations. The related constraints for produced power and incremental and decremental power ratio in generators have been considered as well.

**Index Terms**: Energy storage, Second-order nonlinear programming, Optimal capacity, Reduction of exploitation cost, Reduced peak load

---

**نویسنده مسئول:** محمد حسین رنجبری، مربی - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، ranjbari4526@gmail.com

**۱- مقدمه**

در سیستم‌های قدرت واقعی، نیروگاه‌ها در فواصل یکسان از مراکز بار واقع نشده‌اند و هزینه سوخت آنها نیز متفاوت است. همچنین، تحت شرایط بهره‌برداری عادی، ظرفیت تولید بیش از مجموع تقاضای بار و تلفات است، بنابراین گزینه‌های مختلفی برای برنامه‌ریزی تولید وجود دارد. از طرفی در مواقع پیک بار که بازه زمانی کوتاهی از شبانه‌روز را شامل می‌شود، از حداکثر ظرفیت موجود استفاده می‌شود و در گاهی مواقع شرکت‌های برق نیازمند افزایش ظرفیت تولید برای تامین برق مشتریان در این ساعات می‌باشند. در نتیجه می‌توان گفت، یکی از دغدغه‌های پیش روی شرکت‌های برق، تولید برق مورد نیاز در ساعات پیک بار می‌باشد. روش‌های مختلفی به منظور کاهش پیک بار در شبکه‌های قدرت وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از سیستم‌های ذخیره کننده انرژی است.

در سال‌های اخیر سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند. برخی از کاربردهای آنها عبارتند از: رزرو گردان، تعویق ظرفیت تولید، تنظیم ولتاژ، حفظ پایداری خطوط انتقال، حفظ قابلیت اطمینان سیستم، بهبود کیفیت توان، سهولت کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر، تعقیب بار، کاهش پرشدگی خطوط و تسطیح منحنی بار [۱].

همانطور که گفته شد، یکی از کاربردهای منابع ذخیره‌ساز انرژی تعویق ظرفیت تولید می‌باشد. استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی سبب کاهش نیاز به تولیدات نیروگاهی در ساعات اوج مصرف می‌شود. هم اکنون درصدی از ظرفیت نیروگاهی نصب شده تنها در اوج بار مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی با بهبود وضعیت تولید توان در ساعات اوج مصرف، سبب تاخیر در نیاز به نصب واحد نیروگاهی جدید می‌شود [۲].

یکی از مهمترین اهداف شرکت‌های برق تولید انرژی الکتریکی و انتقال و توزیع آن بین مصرف‌کنندگان با قابلیت اطمینان بالا و کمترین هزینه بهره برداری می‌باشد. قبل از معرفی مفهوم امنیت سیستم قدرت، مسئله پخش بار به طور معمول بر مسائل اقتصادی بهره‌برداری متمرکز بود تا بر امنیت سیستم [۳]. امروزه با گستردگی شبکه‌های قدرت و افزایش بار سیستم‌ها ترکیب قیود امنیت با مفهوم پخش بار بهینه یک مسئله مهم شده است. برای حل مسائل پخش بار روشهای بسیاری ارائه شده است که اکثر آنها بر اساس روش لاگرانژ، برنامه‌ریزی خطی و روش نیوتن - رافسون می‌باشد. یک مزیت مهم این روش‌ها سازگاری آنها با برنامه‌های توزیع اقتصادی موجود است. علاوه بر این نیز روشهای دیگری بر اساس برنامه‌ریزی خطی ارائه شده است [۵-۴]. روشهای بر اساس برنامه‌ریزی خطی، توابع غیر خطی هزینه را خطی می‌کنند و با حل متوالی مسئله اصلاح شده در هر تکرار جواب بهینه را پیدا می‌کنند. با این حال اشکالی که به روشهای ذکر شده وارد است این است که روشهای تکراری اغلب از نظر محاسباتی وقت‌گیر و در برخی اوقات نامطمئن هستند. در حقیقت روشهای تکراری در برخی موارد به حل زیگزاگی منتهی می‌شوند که در این حالت ممکن است مسئله همگرا نشود یا جوابی به دست نیاید. تا کنون مطالعات مختلفی در زمینه به کارگیری ذخیره‌سازهای انرژی انجام شده است. در برخی از این مطالعات ذخیره‌ساز به همراه منابع تولید پراکنده استفاده شده و با استفاده از پخش بار اقتصادی ظرفیت آن تعیین شده است. مرجع [۶] ذخیره‌ساز مناسب را با وجود نیروگاه بادی تعیین می‌کند.

در این مقاله از یک پخش بار اقتصادی برای این منظور استفاده شده است. هدف از انجام مطالعات ماکزیمم کردن سود ناشی از نصب منبع تولید پراکنده و ذخیره‌ساز برای صاحبان منابع و سپس به کارگیری آنها در سیستم قدرت به منظور کاهش هزینه‌های سالیانه برق می‌باشد. مرجع [۷] جایابی بهینه ذخیره‌ساز را با در نظر گرفتن نیروگاه بادی انجام می‌دهد. روش بهینه‌سازی الگوریتم PSO چندهدفه است. در [۸] هدف از به کارگیری ذخیره‌ساز بهبود تعادل توان تولید و مصرف و تعقیب منحنی مصرف در یک ریزشبکه است. در این مقاله ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز با استفاده از پخش بار اقتصادی تعیین شده است. در بعضی دیگر از مطالعات، نصب ذخیره‌ساز در بخش تولید مورد توجه قرار گرفته است. مرجع [۹] به بررسی استفاده از ذخیره‌ساز در بخش تولید با هدف کاهش پیک بار و تسطیح منحنی بار می‌پردازد. از آنجایی که هم اکنون از نیروگاه‌های گازی در شرایط پیک بار استفاده می‌شود، این مقاله ذخیره‌ساز انرژی را به عنوان راه حلی جایگزین برای این نوع نیروگاه‌ها پیشنهاد می‌نماید. سپس با استفاده از برنامه‌ریزی پویا، ظرفیت و برنامه‌ریزی بهینه ذخیره‌ساز را با هدف کاهش هزینه سوخت نیروگاه‌ها تعیین می‌کند. در این مقاله هدف تعیین ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز در بخش تولید با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها می‌باشد. از آنجایی که منحنی هزینه یک واحد معمولاً به صورت یک تابع درجه دوم بیان می‌شود بهتر است که از تکنیک‌های برنامه‌ریزی درجه دوم برای حل مسائل پخش بار بهینه استفاده شود. از این‌رو در این مقاله یک استراتژی بر اساس برنامه‌ریزی درجه دوم ارائه می‌شود. از این روش برای توزیع بار اقتصادی نیروگاه‌ها استفاده شده است، اما به دلیل اینکه بار در ساعات مختلف شبانه‌روز متغیر می‌باشد، برای تعیین ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز می‌بایست توزیع اقتصادی بار بطور همزمان برای تمام ساعات شبانه‌روز انجام پذیرد. در روش پیشنهادی محدودیت‌های توان تولیدی و نرخ افزایشی و کاهشی توان ژنراتورها در نظر گرفته شده‌اند. ساختار مقاله به این صورت می‌باشد که در قسمت دوم هزینه بهره‌برداری نیروگاه حرارتی شرح داده شده است. در بخش سوم فرمول‌بندی مسئله بیان شده است. در بخش چهارم نتایج و شبیه‌سازی‌ها آورده شده‌اند و بخش پنجم نتیجه‌گیری می‌باشد.

**۲- هزینه بهره‌برداری نیروگاه حرارتی**

از مهمترین عوامل موثر بر تولید توان با کمترین هزینه عبارتند از: بازده کار ژنراتورها، هزینه سوخت و تلفات انتقال.

ژنراتور با بهترین بازده در سیستم، کمترین هزینه را تضمین نمی‌کند زیرا امکان دارد که این ژنراتور با بهترین بازده در منطقه‌ای قرار گرفته باشد که هزینه سوخت زیاد است. همچنین اگر فاصله نیروگاه از مرکز

بار زیاد باشد، تلفات انتقال می‌تواند به طور چشمگیری زیاد شود و از اینرو امکان دارد که تولید نیروگاه غیر اقتصادی گردد. بنابراین مساله مورد نظر تعیین تولید نیروگاه‌های مختلف به نحوی است که هزینه بهره‌برداری کل حداقل گردد. هزینه بهره‌برداری نقش مهمی در برنامه‌ریزی اقتصادی ایفا می‌کند که در اینجا بررسی می‌گردد.

معمولاً ورودی نیروگاه حرارتی بر حسب Btu/h و خروجی آن بر حسب MW بیان می‌شود. منحنی ساده شده ورودی - خروجی یک واحد حرارتی منحنی نرخ حرارتی نامیده می‌شود که به وسیله آزمایش میدانی واحدهای تولید تعیین می‌شود. با تبدیل منحنی نرخ حرارتی از Btu/h به $/h، منحنی هزینه سوخت به دست می‌آید.

می‌توان هزینه سوخت ژنراتور i را به صورت زیر با تابع درجه دوم بر حسب توان حقیقی تولید شده آن ژنراتور نمایش داد:

$$C_i=\alpha_i+\beta_i P_i+\gamma_i P_i^2 \quad (۱)$$

که $P_i$ توان حقیقی تولیدی نیروگاه i ام است و $\alpha$ و $\beta$ و $\gamma$ ضرایب ثابت هستند. با رسم مشتق منحنی هزینه سوخت بر حسب توان حقیقی، مشخصه‌ای به دست می‌آید که منحنی هزینه سوخت افزایشی نامیده می‌شود. منحنی هزینه سوخت افزایشی نشان‌دهنده این است که افزایش بعدی تولید توان چقدر هزینه خواهد داشت.

## ۳- فرمول‌بندی مسئله

از آنجایی که هزینه بهره‌برداری از نیروگاه یک تابع مرتبه دوم برحسب توان خروجی آن می‌باشد و کلیه محدودیت‌ها خطی می‌باشند و همچنین هدف از مطالعات انجام شده کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌باشد، در نتیجه می‌توان توان ذخیره‌ساز و همچنین توزیع اقتصادی بار بین نیروگاه‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز را توسط برنامه‌ریزی غیرخطی مرتبه دوم انجام داد. مسئله به صورت یک تابع هدف درجه دوم و قیود خطی بهره‌برداری مدل می‌شود.

### ۳-۱- هزینه ذخیره‌ساز

نصب ذخیره‌ساز شامل دو جزء هزینه مربوط به تجهیزات الکترونیک قدرت و هزینه واحد ذخیره‌ساز می‌باشد. هزینه مربوط به تجهیزات الکترونیک قدرت متناسب با توان ذخیره‌ساز و هزینه مربوط به واحد ذخیره‌ساز متناسب با انرژی ذخیره‌ساز می‌باشد. روش محاسبه هزینه سیستم ذخیره‌ساز به صورت زیر است [۱۰]:

هزینه سالیانه شامل هزینه سالیانه سرمایه‌گذاری، هزینه سالیانه تعویض و هزینه سالیانه تعمیر و نگهداری می‌باشد. هزینه سالیانه تعمیر و نگهداری برابر است با:

$$OMC=OM_F\times P_M \quad (۲)$$

که $OM_F$ هزینه تعمیر و نگهداری به ازای هر کیلووات ($/KW) و $P_M$ توان ذخیره‌ساز (KW) می‌باشد.

هزینه سرمایه‌گذاری شامل سه قسمت می‌باشد، هزینه ادوات الکترونیک قدرت، هزینه واحد ذخیره‌ساز و هزینه بالانس نیروگاه.

هزینه تجهیزات الکترونیک قدرت برابر است با:

$$PCS=PCSU\times P_M \quad (۳)$$

که PCSU هزینه تجهیزات الکترونیک قدرت به ازای هر کیلووات می‌باشد ($/KW).

هزینه واحد ذخیره‌ساز را می‌توان توسط رابطه زیر به دست آورد:

$$SUC=\frac{SUCU\times P_M\times H}{eff} \quad (۴)$$

که SUCU هزینه واحد ذخیره‌ساز به ازای هر کیلووات ساعت ($/KWh) می‌باشد، H مدت زمان شارژ و یا دشارژ و eff بازده سیستم است:

$$eff=\frac{energy_(kwh)_out_during_discharge}{energy_(kwh)_in_during_charge} \quad (۵)$$

هزینه بالانس (اتصال به شبکه) برابر است با:

$$BOP=BOPU\times H\times P_M \quad (۶)$$

در حالی که BOPU هزینه بالانس به ازای هر کیلووات ساعت است ($/KWH).

هزینه سرمایه‌گذاری کل از جمع هزینه‌های تجهیزات الکترونیک قدرت، واحد ذخیره‌ساز و بالانس سیستم به دست می‌آید:

$$TCC=PCS+SUC+BOP \quad (۷)$$

هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$AC=TCC\times CRF \quad (۸)$$

CRF ضریب بازگشت سرمایه می‌باشد:

$$CRF=\frac{(i_r(1+i_r)^y)}{((1+i_r)^y-1)} \quad (۹)$$

$i_r$ نرخ بهره سالیانه و y طول عمر مجموعه می‌باشد.

زمانیکه از باتری در واحد ذخیره‌ساز استفاده می‌کنیم، ممکن است در طول عمر مجموعه مجبور به تعویض آن باشیم. هزینه سالیانه تعویض به ازای هر کیلووات ساعت برابر است با:

$$A=F\times[(1+i_r)^{-r}+[(1+i_r)^{-2r}+\ldots]\times CRF \quad (۱۰)$$

F هزینه جایگزینی در آینده بر حسب $/KW می‌باشد. تعداد جملات در بسط بالا برابر با تعداد دفعات تعویض باتری در زمان عمر مجموعه می‌باشد. R دوره جایگزینی (تعویض) است:

$$r=\frac{C}{n\times D} \quad (۱۱)$$

که C تعداد سیکل‌های شارژ/دشارژ در بازه زمانی عمر باتری، n تعداد دفعات شارژ و دشارژ در روز و D تعداد روزهایی از سال که از ذخیره‌ساز استفاده می‌کنیم، می‌باشند.

هزینه سالیانه تعویض برابر است با:

$$ARC=\frac{A\times P_M\times H}{eff} \quad (۱۲)$$

در نتیجه هزینه سرمایه‌گذاری به ازای هر KWh انرژی برابر است با:

$$COE=\frac{(AC+OMC+ARC)}{(P_M\times n\times H\times D)} \quad (۱۳)$$

### ۳-۲- معادله غیرخطی مرتبه دوم

هزینه‌ها عبارتند از هزینه بهره‌برداری از نیروگاه‌ها و هزینه ذخیره‌ساز. برای تعیین هزینه ذخیره‌ساز، ابتدا از روش آنالیز هزینه، قیمت اضافه شده به هر کیلووات ساعت انرژی ذخیره شده را محاسبه می‌کنیم. از آنجایی که ذخیره‌ساز در طول شبانه‌روز یک بار شارژ و دشارژ می‌شود،

در نتیجه می‌توان قیمت ذخیره‌ساز به ازای هر کیلووات ساعت را نصف کنیم و آن را به عنوان بخشی از تابع هدف در نظر بگیریم. در نتیجه تابع هدف برابر است با:

$$\text{تابع هدف} = \sum_{k=1}^{24} (\sum_{i=1}^{n} C_{i_k} + C_{ess}) \quad (۱۴)$$

$C_{ik}$ هزینه بهره‌برداری از نیروگاه $i$ ام در ساعت $k$ ام است و $C_{ess}$ هزینه ذخیره‌ساز است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_{ess} = \frac{1}{2} COE \quad (۱۵)$$

قیود بهره‌برداری عبارتند از:

۱- محدودیت قدرت خروجی ژنراتور:

$$P_{i(\min)} \le P_i \le P_{i(\max)} \quad (۱۶)$$

۲- نرخ‌های افزایشی و کاهشی: به دلایل فنی نیروگاه‌های حرارتی نمی‌توانند به صورت آنی توان خود را افزایش یا کاهش دهند و این افزایش و کاهش با آهنگی همراه است. بدین شکل که هر نیروگاه دارای محدودیت‌هایی در شیب افزایش یا کاهش توان تولیدی خود است، که تجاوز از این محدودیت‌ها منجر به خسارت به روتور شده و باعث افزایش هزینه عملکرد می‌گردد. این محدودیت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$|P_i(k) - P_i(k-1)| \le P_r \quad (۱۷)$$

که $P_r$ نرخ مجاز افزایش یا کاهش است.

۳- محدودیت تولید در ساعات کم باری: در ساعات کم باری ذخیره‌ساز شارژ می‌شود و در نتیجه به عنوان بار برای شبکه محسوب می‌شود. در این ساعات می‌بایست نیروگاه‌ها علاوه بر بار شبکه، توان ذخیره‌ساز را نیز تامین نمایند. این محدودیت به صورت زیر اعمال می‌گردد:

$$\sum_{i=1}^{n} P_i = P_D + P_{ess} \quad (۱۸)$$

که PD توان بار و Pess توان ذخیره‌ساز است.

۴- محدودیت تولید در ساعات پرباری: در این ساعات ذخیره‌ساز به شبکه انرژی تزریق می‌نماید. در نتیجه میزان تولید نیروگاه‌ها به همراه توان تولیدی ذخیره‌ساز می‌بایست برابر با بار شبکه در این ساعات باشد، که به صورت زیر خواهد بود:

$$\sum_{i=1}^{n} P_i + P_{ess} = P_D \quad (۱۹)$$

۵- محدودیت انرژی ذخیره‌ساز: ذخیره‌ساز در طول شبانه‌روز یک بار شارژ و دشارژ می‌شود، در نتیجه انرژی دریافتی از شبکه در حالت شارژ می‌بایست برابر با انرژی تزریقی به شبکه در حالت دشارژ باشد. این محدودیت به صورت زیر است:

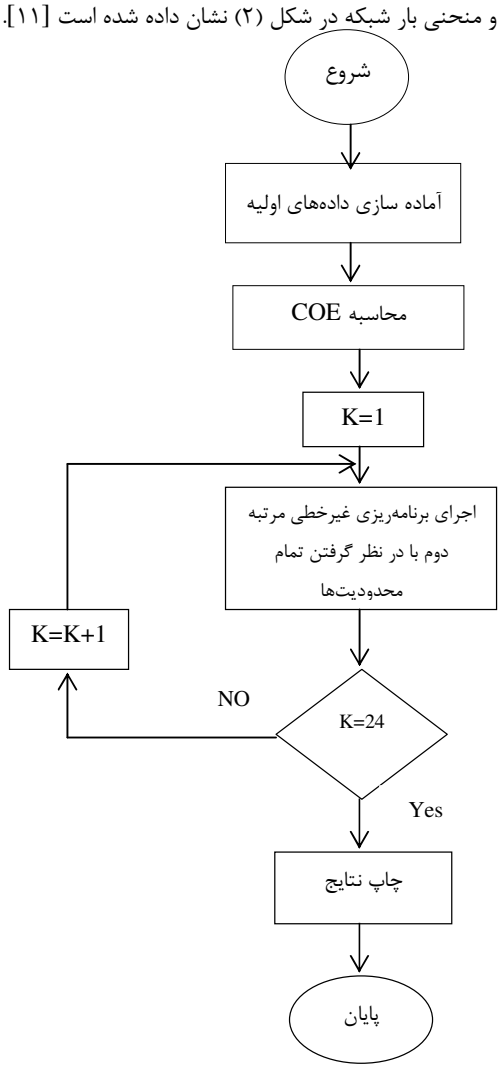
$$\sum_{t=1}^{t_{dech}} P_{ess_t} - \sum_{m=1}^{m_{ch}} P_{ess_m} = 0 \quad (۲۰)$$

که $t_{dech}$ و $m_{ch}$ به ترتیب تعداد ساعات دشارژ و شارژ می‌باشند.

نیمه‌های شب کم مصرف‌ترین ساعات شبانه‌روز می‌باشد، به همین دلیل در این مدل‌سازی ساعات ۱۲ شب تا ۷ صبح را ساعات شارژ در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم در بقیه ساعات شبانه‌روز ذخیره‌ساز می‌تواند انرژی به شبکه تزریق نماید. انتخاب ساعات مناسب برای شارژ و دشارژ و همچنین میزان شارژ و دشارژ در هر ساعت توسط برنامه‌ریزی غیرخطی درجه دوم تعیین می‌گردد. فلوچارت روش پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است.

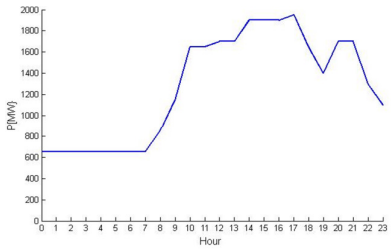
## ۴- نتایج و شبیه‌سازی‌ها

در این مقاله برای حل معادله غیرخطی مرتبه دوم از نرم افزار GAMS استفاده شده است. اطلاعات مربوط به بار شبکه در جدول (۱) آورده شده است و منحنی بار شبکه در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۱].




شکل (۱): فلوچارت روش پیشنهادی

Fig. (1): The flowchart of the proposed method




شکل (۲): منحنی بار شبکه

Fig. (2): The network load curve

سیستم مورد نظر توسط دو نیروگاه تغذیه می‌شود. پارامترهای توابع هزینه بهره‌برداری و محدودیت‌های نیروگاه‌ها در جدول (۲) آورده شده‌اند [۱۱].

همچنین تکنولوژی مورد بررسی در این مطالعه، ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده می‌باشد. اطلاعات مربوط به این نوع ذخیره‌ساز در جدول (۳) نشان داده شده است [۱۲].

Table (1): Requested daily load of network

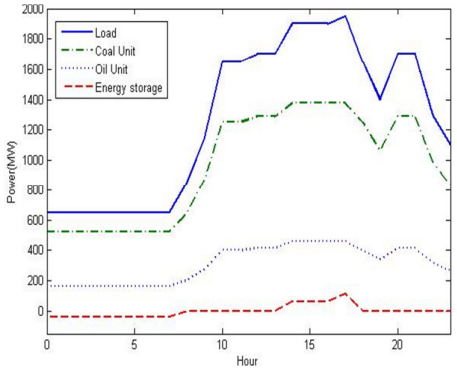
جدول (۱): بار روزانه درخواستی شبکه

| Hour | Lighting (MW) | Residential (MW) | Commercial (MW) | Total (MW) |
|---|---|---|---|---|
| 0000 | 100 | 250 | 300 | 650 |
| 0100 | 100 | 250 | 300 | 650 |
| 0200 | 100 | 250 | 300 | 650 |
| 0300 | 100 | 250 | 300 | 650 |
| 0400 | 100 | 250 | 300 | 650 |
| 0500 | 100 | 250 | 300 | 650 |
| 0600 | 100 | 250 | 300 | 650 |
| 0700 | 0 | 350 | 300 | 650 |
| 0800 | 0 | 450 | 400 | 850 |
| 0900 | 0 | 550 | 600 | 1150 |
| 1000 | 0 | 550 | 1100 | 1650 |
| 1100 | 0 | 550 | 1100 | 1650 |
| 1200 | 0 | 600 | 1100 | 1700 |
| 1300 | 0 | 600 | 1100 | 1700 |
| 1400 | 0 | 600 | 1300 | 1900 |
| 1500 | 0 | 600 | 1300 | 1900 |
| 1600 | 0 | 600 | 1300 | 1900 |
| 1700 | 0 | 650 | 1300 | 1950 |
| 1800 | 0 | 750 | 900 | 1650 |
| 1900 | 0 | 900 | 500 | 1400 |
| 2000 | 100 | 1100 | 500 | 1700 |
| 2100 | 100 | 1100 | 500 | 1700 |
| 2200 | 100 | 900 | 300 | 1300 |
| 2300 | 100 | 700 | 300 | 1100 |

Table (2): Operating cost function parameters and power plants limits

جدول (۲): پارامترهای توابع هزینه بهره‌برداری و محدودیت‌های نیروگاه‌ها

| نوع نیروگاه | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | $P_{i(min)}$ | $P_{i(max)}$ | $P_r$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Coal | 561 | 7.92 | 0.001562 | 344 | 1377 | 150 |
| Oil | 78 | 7.97 | 0.00482 | 115 | 459 | 150 |




شکل (۳): منحنی‌های بار شبکه، توان تولیدی نیروگاه‌ها و توان ذخیره‌ساز

Fig. (3): The curves of network load, productive power of plants and storage power

هزینه به ازای هر مگاوات ساعت انرژی این نوع ذخیره‌ساز، ۲۸/۳ دلار می‌باشد. هرچه توان خروجی نیروگاه‌ها افزایش یابد، هزینه افزایشی نیز زیاد می‌شود. این به این معناست که هرچه بار شبکه بیشتر باشد، هزینه افزایشی بیشتر می‌باشد و بالعکس. در نتیجه می‌توان در مواقعی که بار شبکه کم است ذخیره‌ساز را شارژ نمود و در مواقع پرباری از انرژی ذخیره شده در آن استفاده کرد، که این امر موجب کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌گردد. همان طور که قبلاً نیز گفته شد، یکی از کاربردهای سیستم‌های ذخیره‌ساز در بخش تولید می‌باشد. به طوری که استفاده از این منابع سبب کاهش نیاز به نصب ظرفیت نیروگاهی به منظور تامین انرژی مصرفی در ساعات اوج مصرف می‌شود. در اینجا از ذخیره‌ساز بدین منظور استفاده شده است و نتایج حاصل از روش ارائه شده در جدول (۴) نشان داده شده است. این جدول بیانگر ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز به ازای ساعات مختلف شبانه‌روز است. علامت منفی نشان دهنده حالت شارژ ذخیره‌ساز می‌باشد. در این روش علاوه بر ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز، میزان توان تولیدی اقتصادی نیروگاه‌ها نیز به دست می‌آید. با توجه به منحنی بار، ساعات ۱ الی ۷ بار شبکه کم می‌باشد و ذخیره‌ساز در این ساعات شارژ می‌شود. ساعات ۱۴-۱۷ ساعات پرباری می‌باشند و همان طور که از نتایج مشخص است، ذخیره‌ساز در این ساعات به همراه نیروگاه‌های حرارتی بار مورد نیاز شبکه را تامین می‌نماید. ماکزیمم تقاضای بار مربوط به ساعت ۱۷ می‌باشد و چون در این ساعت بالاترین نرخ هزینه افزایشی نیروگاه‌ها را داریم، در نتیجه بیشترین مقدار توان تزریقی ذخیره‌ساز در این ساعت می‌باشد. به منظور مقایسه بهتر نتایج به دست آمده با بار شبکه در ساعات مختلف شبانه‌روز، شکل (۳) منحنی‌های بار شبکه، توان تولیدی نیروگاه‌ها و توان ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد. همان طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، نیروگاه‌های حرارتی به دلایل فنی نمی‌توانند به صورت آنی توان خود را افزایش یا کاهش دهند و این افزایش و کاهش با آهنگی همراه است. از طرفی بار مصرفی در طول شبانه‌روز متغیر است و گاهی این تغییر بیش از محدوده مجاز نیروگاه‌ها می‌باشد. در نتیجه اعمال این محدودیت منجر به افزایش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. جدول (۵) نشان‌دهنده ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز و توان بهینه تولیدی نیروگاه‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز با در نظر گرفتن محدودیت نرخ مجاز افزایش و یا کاهش توان نیروگاه‌ها می‌باشد. نتایج بیانگر این موضوع می‌باشند که اعمال این محدودیت موجب نیاز به ذخیره‌سازی با ظرفیت بالاتر می‌شود. در این حالت بطور قطع نمی‌توان گفت ذخیره‌ساز در ساعات کم باری شارژ و در ساعات پرباری دشارژ می‌شود، زیرا در این حالت در بعضی ساعات به دلیل اینکه از حد مجاز نرخ افزایش و یا کاهشی توان تولیدی نیروگاها تجاوز نکنیم، ذخیره‌ساز می‌بایست مقداری توان به شبکه تزریق کند. مثلاً در حالت اول در ساعت ۱۰ ذخیره‌ساز انرژی با شبکه تبادل نمی‌کند، ولی هنگامی که محدودیت نرخ افزایشی و یا کاهشی توان در نظر گرفته می‌شود، در این ساعت ذخیره‌ساز ۲۰۰ مگاوات توان به شبکه تزریق می‌کند.

Table (3): Information about compressed air energy storage
جدول (۳): اطلاعات مربوط به ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده

| پارامتر | بازده | هزینه تجهیزات الکترونیک قدرت ($/KW) | هزینه واحد ذخیره‌ساز ($/KWh) | هزینه اتصال به شبکه(بالانس) ($/KWh) | هزینه تعمیر و نگهداری ($/KW-y) | هزینه تعویض ($/KWh) | تعداد دفعات شارژ و دشارژ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مقادیر | ۰.۷۳ | ۴۲۵ | ۳ | ۵۰ | ۲.۵ | ۰ | ۲۵۰۰۰ |

Table (4): Using of storage in order to providing required power of network at peak hours
جدول (۴): استفاده از ذخیره‌ساز با هدف تامین توان مورد نیاز شبکه در ساعات اوج بار

| Hour | Coal Generation(MW) | Oil Generation(MW) | Energy Storage (MW) |
|---|---|---|---|
| 00:00 | 523.71 | 164.53 | -38.25 |
| 01:00 | 523.71 | 164.53 | -38.25 |
| 02:00 | 523.71 | 164.53 | -38.25 |
| 03:00 | 523.71 | 164.53 | -38.25 |
| 04:00 | 523.71 | 164.53 | -38.25 |
| 05:00 | 523.71 | 164.53 | -38.25 |
| 06:00 | 523.71 | 164.53 | -38.25 |
| 07:00 | 523.71 | 164.53 | -38.25 |
| 08:00 | 645.87 | 204.12 | 0 |
| 09:00 | 872.45 | 277.54 | 0 |
| 10:00 | 1250.07 | 399.92 | 0 |
| 11:00 | 1250.07 | 399.92 | 0 |
| 12:00 | 1287.84 | 412.16 | 0 |
| 13:00 | 1287.84 | 412.16 | 0 |
| 14:00 | 1377 | 459 | 64 |
| 15:00 | 1377 | 459 | 64 |
| 16:00 | 1377 | 459 | 64 |
| 17:00 | 1377 | 459 | 114 |
| 18:00 | 1249.65 | 400.35 | 0 |
| 19:00 | 1061.266 | 338.73 | 0 |
| 20:00 | 1287.84 | 412.16 | 0 |
| 21:00 | 1287.84 | 412.16 | 0 |
| 22:00 | 985.74 | 314.26 | 0 |
| 23:00 | 834.69 | 265.3 | 0 |

در این قسمت ظرفیت ذخیره‌ساز را تنها با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری نیروگاه‌ها تعیین کرده‌ایم. روش حل به این صورت است که در تابع هدف، قیمت ذخیره‌ساز مقدار بسیار کمی لحاظ شده است به طوری که تقریباً تاثیری در هزینه ندارد. نتایج در جدول (۶) آورده شده است. از آنجایی که هزینه افزایشی در ساعات کم باری پایین‌تر از بقیه ساعات می‌باشد، ذخیره‌ساز در این ساعات شارژ می‌شود و در ساعاتی که بار شبکه زیاد می‌باشد و هزینه افزایشی بالا، به شبکه انرژی تزریق می‌نماید. در ساعات ۷-۰ که بار شبکه کمترین مقدار را دارد، ذخیره‌ساز شارژ می‌شود و در طول روز انرژی ذخیره شده را متناسب با توان بار به شبکه تزریق می‌نماید، یعنی در ساعاتی که بیشترین مقدار بار مصرفی را داریم، انرژی تزریقی ذخیره‌ساز به شبکه بیشتر است. مثلاً در ساعت ۱۷ ذخیره‌ساز بیشترین مقدار انرژی را به شبکه تزریق می‌نماید. در این بخش ظرفیت ذخیره‌ساز تنها با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و اعمال محدودیت نرخ افزایشی یا کاهشی توان تولیدی نیروگاه‌ها تعیین شده است. نتایج در جدول (۷) نشان داده شده است. اعمال این محدودیت موجب ایجاد تغییراتی در بهره‌برداری بهینه از نیروگاه‌ها و همچنین ذخیره‌ساز می‌شود.

$\lambda$ نرخ هزینه افزایشی کل می‌باشد و این نرخ با افزایش بار شبکه افزایش می‌یابد. به منظور درک بهتر عملکرد روش پیشنهادی، این نرخ در تمام ساعات شبانه‌روز محاسبه شده و در جدول (۸) نشان داده شده است. معمولاً زمان‌های بهینه به منظور شارژ و دشارژ بهینه ذخیره‌ساز را می‌توان با توجه به مقدار $\lambda$ تشخیص داد. به این صورت که در مواقعی که $\lambda$ کم می‌باشد، ذخیره‌ساز شارژ شود و در مواقعی که $\lambda$ زیاد می‌باشد، دشارژ شود.

Table (5): Using of storage in order to providing required power of network at peak hours considering incremental power rate
جدول (۵): استفاده از ذخیره‌ساز با هدف تامین توان مورد نیاز شبکه در ساعات اوج بار با در نظر گرفتن محدودیت نرخ توان افزایشی

| Hour | Coal Generation(MW) | Oil Generation(MW) | Energy Storage (MW) |
|---|---|---|---|
| 00:00 | 549.22 | 172.8 | -72 |
| 01:00 | 549.22 | 172.8 | -72 |
| 02:00 | 549.22 | 172.8 | -72 |
| 03:00 | 549.22 | 172.8 | -72 |
| 04:00 | 549.22 | 172.8 | -72 |
| 05:00 | 549.22 | 172.8 | -72 |
| 06:00 | 549.22 | 172.8 | -72 |
| 07:00 | 585 | 172 | -107 |
| 08:00 | 735 | 115 | 0 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 09:00 | 885 | 265 | 0 |
| 10:00 | 1035 | 415 | 200 |
| 11:00 | 1185 | 465 | 0 |
| 12:00 | 1287.84 | 412.16 | 0 |
| 13:00 | 1287.84 | 412.16 | 0 |
| 14:00 | 1377 | 459 | 64 |
| 15:00 | 1377 | 459 | 64 |
| 16:00 | 1377 | 459 | 64 |
| 17:00 | 1377 | 459 | 114 |
| 18:00 | 1249.65 | 400.35 | 0 |
| 19:00 | 1099.76 | 300.23 | 0 |
| 20:00 | 1249.76 | 450.23 | 0 |
| 21:00 | 1160.91 | 439.08 | 100 |
| 22:00 | 1010.91 | 289.08 | 0 |
| 23:00 | 860.91 | 239.08 | 0 |

Table (6): Economic dispatch regardless of the storage cost

جدول (۶): توزیع اقتصادی بار بدون در نظر گرفتن قیمت ذخیره‌ساز

| Hour | Coal Generation(MW) | Oil Generation(MW) | Energy Storage (MW) |
|---|---|---|---|
| 00:00 | 985.7 | 314.24 | -649.95 |
| 01:00 | 985.7 | 314.24 | -649.95 |
| 02:00 | 985.7 | 314.24 | -649.95 |
| 03:00 | 985.7 | 314.24 | -649.95 |
| 04:00 | 985.7 | 314.24 | -649.95 |
| 05:00 | 985.7 | 314.24 | -649.95 |
| 06:00 | 985.7 | 314.24 | -649.95 |
| 07:00 | 985.7 | 314.24 | -649.95 |
| 08:00 | 645.87 | 204.12 | 0 |
| 09:00 | 872.45 | 277.54 | 0 |
| 10:00 | 985.79 | 314.27 | 349.92 |
| 11:00 | 985.79 | 314.27 | 349.92 |
| 12:00 | 985.79 | 314.27 | 399.92 |
| 13:00 | 985.79 | 314.27 | 399.92 |
| 14:00 | 985.79 | 314.27 | 599.92 |
| 15:00 | 985.79 | 314.27 | 599.92 |
| 16:00 | 985.79 | 314.27 | 599.92 |
| 17:00 | 985.79 | 314.27 | 649.92 |
| 18:00 | 985.79 | 314.27 | 349.92 |
| 19:00 | 985.79 | 314.27 | 99.92 |
| 20:00 | 985.79 | 314.27 | 399.92 |
| 21:00 | 985.79 | 314.27 | 399.92 |
| 22:00 | 985.74 | 314.26 | 0 |
| 23:00 | 834.69 | 265.3 | 0 |

Table (7): Economic dispatch regardless of the storage cost and considering incremental power rate

جدول (۷): توزیع اقتصادی بار بدون در نظر گرفتن قیمت ذخیره‌ساز و اعمال محدودیت نرخ افزایشی

| Hour | Coal Generation(MW) | Oil Generation(MW) | Energy Storage (MW) |
|---|---|---|---|
| 00:00 | 991.64 | 316.17 | -657.81 |
| 01:00 | 991.64 | 316.17 | -657.81 |
| 02:00 | 991.64 | 316.17 | -657.81 |
| 03:00 | 991.64 | 316.17 | -657.81 |
| 04:00 | 991.64 | 316.17 | -657.81 |
| 05:00 | 991.64 | 316.17 | -657.81 |
| 06:00 | 991.64 | 316.17 | -657.81 |
| 07:00 | 846.93 | 303.07 | -500 |
| 08:00 | 696.93 | 153.07 | 0 |
| 09:00 | 846.93 | 303.07 | 0 |
| 10:00 | 991.73 | 316.2 | 342.06 |
| 11:00 | 991.73 | 316.2 | 342.06 |
| 12:00 | 991.73 | 316.2 | 392.06 |
| 13:00 | 991.73 | 316.2 | 392.06 |
| 14:00 | 991.73 | 316.2 | 592.06 |
| 15:00 | 991.73 | 316.2 | 592.06 |
| 16:00 | 991.73 | 316.2 | 592.06 |
| 17:00 | 991.73 | 316.2 | 642.06 |
| 18:00 | 991.73 | 316.2 | 342.06 |
| 19:00 | 991.73 | 316.2 | 92.06 |
| 20:00 | 991.73 | 316.2 | 392.06 |
| 21:00 | 991.73 | 316.2 | 392.06 |
| 22:00 | 985.2 | 314.8 | 0 |
| 23:00 | 835.22 | 264.77 | 0 |

Table (8): λ values during the day
جدول (۸): مقادیر λ در طول شبانه‌روز

| Hour | Coal Generation(MW) | Oil Generation(MW) | λ ($) |
|---|---|---|---|
| 00:00 | 494.83 | 155.17 | 9.4658 |
| 01:00 | 494.83 | 155.17 | 9.4658 |
| 02:00 | 494.83 | 155.17 | 9.4658 |
| 03:00 | 494.83 | 155.17 | 9.4658 |
| 04:00 | 494.83 | 155.17 | 9.4658 |
| 05:00 | 494.83 | 155.17 | 9.4658 |
| 06:00 | 494.83 | 155.17 | 9.4658 |
| 07:00 | 494.83 | 155.17 | 9.4658 |
| 08:00 | 645.88 | 204.12 | 9.9377 |
| 09:00 | 872.45 | 277.54 | 10.6455 |
| 10:00 | 1250 | 400 | 11.8252 |
| 11:00 | 1250 | 400 | 11.8252 |
| 12:00 | 1287.84 | 412.16 | 11.9432 |
| 13:00 | 1287.84 | 412.16 | 11.9432 |
| 14:00 | 1377 | 459 | 12.264 |
| 15:00 | 1377 | 459 | 12.264 |
| 16:00 | 1377 | 459 | 12.264 |
| 17:00 | 1377 | 459 | 12.264 |
| 18:00 | 1250 | 400 | 11.8252 |
| 19:00 | 1061.26 | 338.73 | 11.235 |
| 20:00 | 1287.84 | 412.16 | 11.9432 |
| 21:00 | 1287.84 | 412.16 | 11.9432 |
| 22:00 | 985.74 | 314.25 | 10.9994 |
| 23:00 | 834.69 | 265.3 | 10.5275 |

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله توزیع اقتصادی بار با وجود ذخیره‌ساز مورد بررسی قرار گرفت و ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز و نیروگاه‌ها توسط برنامه‌ریزی غیرخطی مرتبه دو تعیین گردید. قیود نیز به صورت معادلات برابری و نابرابری خطی مدل شدند. در روش پیشنهادی محدودیت‌های توان تولیدی و نرخ افزایشی و کاهشی توان ژنراتورها در نظر گرفته شدند. نتایج بیانگر این موضوع می‌باشند که می‌توان با استفاده از ذخیره‌ساز توان مورد نیاز ساعات پیک بار را بدون افزایش ظرفیت نیروگاه‌ها تامین نمود. در ساعات کم‌باری که ظرفیت نیروگاه‌ها بیش از مصرف است، ذخیره‌ساز شارژ شده و در ساعات پیک بار، دشارژ شود و بخشی از توان مورد نیاز بار را تامین کند. همانطور که از نتایج مشخص است، روش ارائه شده ساعات کم‌باری را به عنوان زمان مناسب برای شارژ ذخیره‌ساز و ساعات پرباری را به عنوان زمان مناسب برای دشارژ تعیین می‌کند و در هر مرحله ظرفیت بهینه را مشخص می‌کند.

## References


[1] S.M. Schoenung, W.lliam V. Hassenzahl, "Long- vs. short-term energy storage technologies analysis: A life-cycle cost study", Sandia Report, Aug. 2003.

[2] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, G.B. Sheblé, "Power generation, operation and control", 3th Edition, ISBN: 978-0-471-79055-6.

[3] H. Su, Y. Qi, "A chaos cloud particle swarm algorithm based available transfer capability", Indonesian Journal of Electrical Engineering, Vol. 12, No.1, pp. 38-47, Jan. 2014.

[4] L. Gan, N. Li, U. Topcu, S.H. Low, "Exact convex relaxation of optimal power flow in radial networks", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 60, No. 1, Dec. 2014.

[5] H. Mohammadian-Bisheh, A. Rahimi-Kian, M.M. Seyyed-Esfahani, "Solving environmental/economic power dispatch problem by a trust region based augmented Lagrangian method", Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, Vol. 8, No. 2, June 2012.

[6] Y.M. Atwa, E.F. El-Saadany; "Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 25, No. 4, Nov. 2010.

[7] S. Wen, H. Lan, Q. Fu, D.C. Yu, L. Zhang, "Economic allocation for energy storage system considering wind power distribution", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 30, No. 2, March 2015.

[8] Y. Levron, J.M. Guerrero, Y. Beck, "Optimal power flow in microgrids with energy storage", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, No. 3, pp. 3226-3234, July 2013.

[9] R.J. Kerestes, G.F. Reed, A.R. Sparacino, "Economic analysis of grid level energy storage for the application of load leveling", Proceeding of the IEEE/PESGM, pp. 1-9, San Diego, CA, July 2012.

[10] D. Parker, "How much energy are we using? Potential of residential energy demand feedback devices", Proceeding of the ACEEE, Florida, Aug. 2006.

[11] R.J. Kerestes, "Economic analysis of grid level energy storage for the application of load leveling", Master of Science Thesis, Electrical Engineering, University of Pittsburgh, Sep. 2011.

[12] S. Schoenung, "Energy storage systems cost update", Sandia Report, April 2011.