Archive of SID

ارزیابی اقتصادی آربیتراژ انرژی سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری با توجه به نوع بهره‌برداری آن

جلال محمدی[۱]، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ سعیدرضا گلدانی[۲]، استادیار؛ حمید فلقی[۳]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - jalalmohammady70@gmail.com
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - sgoldani@birjand.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - falaghi@birjand.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر بهره‌برداری از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی موردتوجه بسیاری از محققین در صنعت برق قرارگرفته است. به‌دلیل هزینه نسبتاً بالای ذخیره‌سازها، معمولاً سرمایه‌گذاران زیادی در راستای نصب و بهره‌گیری از آن‌ها در سیستم قدرت پیش‌قدم نمی‌شوند. در این مقاله تأثیر شاخص نوع بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی (کل سال یا بخشی از سال) بر سود حاصل از آربیتراژ (جابجایی) انرژی در بازار برق، توسط یک ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی موردبررسی قرارگرفته است. برای ارزیابی تأثیر خطای پیش‌بینی قیمت بر درآمد آربیتراژ انرژی از دو نوع قیمت (قیمت واقعی، قیمت پیش‌بینی ۳ ساعت آینده) استفاده شده است. به‌دلیل تشویق سرمایه‌گذاران خصوصی، برای هزینه سرمایه‌گذاری اولیه استفاده از وام پیشنهاد شده است تا طرح ارائه‌شده برای سرمایه‌گذار ازنظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد. به‌دلیل هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری و افزایش طول عمر سیستم ذخیره‌ساز انرژی، تعداد شارژ و دِشارژ انرژی در روز یک‌بار است که، زمان شارژ در پایین‌ترین قیمت انرژی و زمان دِشارژ در بالاترین قیمت انرژی برای افزایش درآمد آربیتراژ انرژی در نظر گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: ذخیره‌ساز انرژی، بهره‌برداری، آربیتراژ انرژی، پیش‌بینی قیمت، بازار برق.

Economic Evaluation of Energy Arbitrage of Battery Energy Storage According to its Operation regime

J. Mohammadi[1], MSc Student; S. R. Goldani[2], Assistant Professor; H. Falaghi[3], Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: jalalmohammady70@gmail.com
2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: sgoldani@birjand.ac.ir
3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: falaghi@birjand.ac.ir

Abstract: In recent years, the exploitation of the energy storage systems has attracted many researchers in the electricity industry. Due to the relatively high cost of storage, usually many investors are not being prevented from installing and operating in a power system. In this paper, the effect of the type of operation of the energy storage system (the whole year or part of the year) on the profit of the energy arbitrage (shift) in the electricity market is investigated by an electrical energy storage system. For Evaluation the effect of the price prediction error on the energy arbitrage revenue, two types of prices (real price, 3 Hour Ahead Predispatch Prices) have been used. Due to the encouragement of private investors, it is proposed to use the loan for the initial investment cost so that the proposed plan for the investor is economically justified. Due to high investment costs and longer lifespan of the energy storage system, the number of charging and discharging energy is one, which is the time of charging at the lowest cost of energy and the time of discharge at the highest energy cost to increase energy returns.

Keywords: Energy storage, operation, energy arbitrage, prediction price, electricity market.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۹/۵
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۱ و ۱۳۹۷/۲/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۲/۲۶
نام نویسنده مسئول: سعید رضا گلدانی
نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند – بلوار شهید آوینی - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

www.SID.ir

Archive of SID

۱ -مقدمه

انرژی الکتریکی امروزه به‌صورت یک کالا در نظر گرفته می‌شود که درگذشته امکان ذخیره‌سازی آن (مخصوصاً در ابعاد کلان) وجود نداشت. با پیشرفت فن‌آوری‌ها و استفاده از فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی انرژی همانند نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای[۱] و باتری‌های[۲] الکتروشیمیایی، برای مدت‌زمان نسبتاً طولانی، می‌توان انرژی الکتریکی را ذخیره نمود. دلیل عدم‌توجه به این روش‌های ذخیره‌سازی درگذشته، هزینه‌های ساخت‌وساز بالا و عدم وجود ظرفیت ذخیره‌سازی مناسب برای استفاده عملی در سیستم‌های قدرت بوده است. در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت فناوری و پیدایش سیستم‌های مدرن ذخیره‌سازی و افزایش نیاز به بهبود کارایی سیستم برق‌رسانی، سیستم‌های ذخیره انرژی الکتریکی موردتوجه محققین قرارگرفته و بسیاری از برنامه‌های کاربردی که می‌توانند از دستگاه‌های ذخیره‌ساز استفاده نمایند، توسعه داده شده است [۱]. ذخیره‌ساز انرژی[۳] می‌تواند کاهش نوسانات مرتبط با تولید انرژی برق را پشتیبانی کند، همچنین بهره‌برداری از ذخیره‌ساز انرژی برای افزایش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر به‌منظور کاهش آلایندگی و استفاده کمتر از منابع فسیلی اجتناب‌ناپذیر است[۲]. به‌طورکلی ذخیره‌سازهای انرژی را می‌توان به ۴ دسته تقسیم نمود [۳].

۱) مکانیکی شامل تلمبه ذخیره‌ای، چرخ طیار[۴] و ذخیره‌ساز هوای فشرده[۵]
۲) الکتریکی شامل ابر خازن[۶] و ابررسانا[۷]
۳) شیمیایی شامل هیدروژن و باتری‌ها
۴) حرارتی شامل حرارت دما بالا و حرارتی محسوس

کاربردهای ذخیره‌ساز انرژی در سیستم‌های قدرت شامل آربیتراژ انرژی[۸]، تنظیم فرکانس، جلوگیری از هزینه‌های به‌روزرسانی زیرساخت سیستم‌های توزیع و انتقال، گرفتگی خطوط انتقال و غیره است [۱، ۴].

در برخی تحقیقات، مطالعاتی برای ارزیابی عایدی در مقابل هزینه سرمایه‌گذاری برای سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی انجام شده است. برخی از این سودآوری‌ها به‌طور مستقیم به مشتری مربوط است مانند آربیتراژ انرژی و کمک به گرفتگی خطوط انتقال، ذخیره غیرچرخان و ذخیره چرخان؛ درحالی‌که برخی کاربردهای دیگر به‌صورت غیرمستقیم به مشتری مربوط است مانند هزینه‌های زیرساخت سیستم‌های انتقال و توزیع، کاهش تلفات، افزایش قابلیت اطمینان و غیره [۱].

هزینه‌های یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی شامل هزینه‌های ادوات الکترونیک قدرت، اتصال به شبکه، هزینه واحد ذخیره‌کننده، هزینه تعویض و نگهداری و هزینه تعمیر و بهره‌برداری است [۵]. به‌طورکلی هزینه‌های یک ذخیره‌ساز شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های ثابت و متغیر بهره‌برداری است [۶].

در این مقاله از باتری لیتیوم‌یون[۹] که داری طول عمر بالا، راندمان تقریباً ۱۰۰ درصدی و میزان دِشارژ پایین استفاده شده است [۶]. هزینه سرمایه‌گذاری باتری لیتیوم در سال ۲۰۱۲ از ۶۰۰ به ۵۰۰ دلار بر کیلووات ساعت کاهش یافت و پیش‌بینی می‌شود که در سال ۲۰۲۰ به ۲۰۰ دلار بر کیلووات ساعت کاهش یابد. در اکتبر ۲۰۱۵ شرکت ژنراتور موتور[۱۰] (GA) یک نوع باتری لیتیوم‌یون که در سال ۲۰۱۵ هزینه سرمایه‌گذاری آن ۱۴۵ دلار بر کیلووات ساعت و در سال ۲۰۲۱ به ۱۰۰ دلار بر کیلووات ساعت کاهش می‌یابد معرفی کرده است [۷].

قیمت انرژی از یک الگوی قیمت‌پایین در کم‌باری و قیمت‌بالا در زمان پرباری پیروی می‌کند. ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند انرژی را با قیمت پایین‌تر ذخیره کند و آن را با قیمت بالاتر بفروشد، که سود حاصل از این اختلاف قیمت آربیتراژ انرژی گفته می‌شود.

در [۲] به بررسی بهره‌برداری از یک دستگاه ذخیره‌ساز در یک شبکه فرضی (شامل ۶ باس انتقال و ۳ باس توزیع) برای تعادل بازار پرداخته شده است. ۴ سناریو که عبارت‌اند از: تأثیر بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز، تأثیر بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی در باس انتقال یا توزیع، تأثیر ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی و سیستم ذخیره‌ساز انرژی به‌صورت متمرکز (مثلاً ۶۰ مگاوات) یا پخش‌شده (مثلاً سه سیستم ۲۰ مگاواتی) موردبررسی قرار گرفته است.

در مرجع [۶] درآمد آربیتراژ انرژی برای یک سیستم ذخیره‌سازی با ظرفیت‌های مختلف در یک شبکه ۱۴ باسه IEEE مورد بررسی قرار گرفته است. در [۸] تأثیر نیروی باد بر درآمد آربیتراژ انرژی در بریتانیا برای ذخیره‌سازی انرژی (با توجه به قیمت واقعی و قیمت شبیه‌سازی‌شده) برای سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۰۷ به‌دست آورده است؛ سپس با توجه به معیار باد سالانه سال ۲۰۰۷، میزان تولید انرژی باد و آربیتراژ انرژی را برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۵ مورد بررسی قرار داده است. در [۹] حداکثر درآمد ممکن آربیتراژ انرژی سیستم ذخیره‌ساز با توجه به ظرفیت‌های مختلف در بازار برق PJM مورد ارزیابی قرار داده شده است. در [۱۰] درآمد آربیتراژ انرژی برای بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی متصل به سیستم فتوولتاییک با اتصال مستقیم به شبکه مورد بررسی قرار داده شده است. در [۱۱] حداکثر سود یک واحد ذخیره‌ساز انرژی بر اساس قیمت‌های بازار روز جلوتر، در بازار برق برای یک سیستم ۲۴ باسه IEEE مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۲] میزان درآمد آربیتراژ انرژی سیستم ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده با مالک خصوصی با الگوریتم دیسپاچینگ بهینه زمان واقعی[۱۱] نشان داده است. در [۱۳] از بهینه‌سازی مقاوم برای ارزیابی ریسک برای دیسپاچینگ یک مزرعه بادی در ترکیب با ذخیره انرژی برای درآمد آربیتراژ انرژی بر اساس تغییرات قیمت در بازار روز جلوتر بررسی شده است.

در مراجع [۱۲، ۱۳] بهینه‌سازی توان شارژ و دِشارژ مورد استفاده قرار گرفته است. این بهینه‌سازی مختص بازار برق آنتاریو است و در دسترس عموم قرار ندارد و میزان توان شارژ و دِشارژ را برای هر روز به‌دست می‌آورد. همچنین در این مراجع هزینه توان شارژ، توان دِشارژ و مخزن سیستم ذخیره‌ساز (ذخیره‌ساز هوای فشرده) با توجه به توان‌های

www.SID.ir

Archive of SID

شارژ و دِشارژ در نظر گرفته شده است. عیب عمده آن در نظر نگرفتن هزینه بالای سرمایه‌گذاری برای درآمد آربیتراژ انرژی است.

در مرجع [۱۴] اثرات مثبت حضور ذخیره‌سازها در زمان‌بندی تعمیرات واحدهای تولیدی که هدف آن حداقل‌سازی و یا حداکثرسازی قابلیت اطمینان سیستم قدرت است. تابع هدف سیستم ذخیره‌ساز انرژی شامل هزینه خرید و فروش انرژی و در نظرگرفتن حالت تعمیرات سیستم ذخیره‌ساز انرژی است و هزینه بالای سرمایه‌گذاری لحاظ نشده است. در [۱۵] استراتژی مدیریت انرژی بر اساس بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی و تعیین میزان شارژ و دِشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی در دو حالت با و بدون در نظرگرفتن برنامه پاسخگویی بار با هدف حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی است. در اینجا هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه نگهداری در نظر گرفته شده است اما مالکیت آن مجهول و هدف آن مسطح‌نمودن سطح بار و پاسخگویی بار است.

در این مقاله برای جذب سرمایه‌گذاران خصوصی از یک فلوچارت پیشنهادی برای حداکثرسازی درآمد آربیتراژ انرژی استفاده شده است. در این فلوچارت ابتدا بهترین زمان شاژ و دِشارژ تعیین می‌شود، سپس با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل مصنوعی بهینه‌ترین حالت شارژ و دِشارژ در هر ساعت با توجه به قیمت انرژی روزانه تعیین و با کسر هزینه خرید از فروش انرژی درآمد آربیتراژ انرژی تعیین می‌شود. بعد از تعیین حداکثر درآمد آربیتراژ انرژی هزینه سرمایه‌گذاری، ثابت و متغیر بهره‌برداری از آن کسر می‌شود تا سود حاصل از درآمد آربیتراژ انرژی با در نظرگرفتن هزینه‌های سیستم ذخیره‌ساز انرژی محاسبه شود. همچنین برای در نظرگرفتن منافع سرمایه‌گذار خصوصی، از سیستم ذخیره‌ساز انرژی در روزهای تعطیل به دو دلیل افزایش طول عمر سیستم ذخیره‌ساز انرژی و کاهش ریسک ناشی از درآمد آربیتراژ انرژی منفی به‌دلیل کاهش میزان مصرف در مقابل تولید بهره‌برداری نمی‌شود. در این مقاله همچنین برای تأثیر خطای پیش‌بینی قیمت از دو نوع قیمت (واقعی و ۳ ساعت آینده) استفاده شده است. برای تشویق سرمایه‌گذاران خصوصی، برای هزینه سرمایه‌گذاری اولیه استفاده از وام پیشنهاد شده است تا طرح ارائه‌شده برای سرمایه‌گذار ازنظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد. به‌طور خلاصه نوآوری‌های مقاله حاضر تحت عناوین زیر قابل بیان است:

- ✓ ارائه فلوچارت پیشنهادی برای حداکثرسازی درآمد آربیتراژ انرژی.
- ✓ در نظرگرفتن هزینه‌های سرمایه‌گذاری، ثابت و متغییر بهره‌برداری، مالیات و استهلاک
- ✓ تأثیر تعداد روزهای بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر درآمد آربیتراژ انرژی.

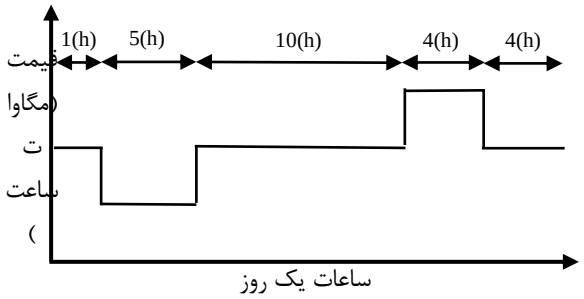
در بخش ۲ فرمول‌بندی مسئله که شامل مدل‌سازی قیمت و بار، مدل‌سازی ذخیره‌ساز انرژی، تشریح مسئله در سه حالت (بدون درنظر گرفتن وام و مالیات، در نظرگرفتن مالیات بدون وام و در نظر گرفتن مالیات و وام) برای اقتصادی‌بودن طرح مطرح شده است. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی در دو حالت بهره‌برداری در کل سال و بهره‌برداری در روزهایی که درآمد آربیتراژ انرژی در حد قابل‌قبولی باشد آورده شده است. بخش آخر به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲ -فرمول‌بندی مسئله

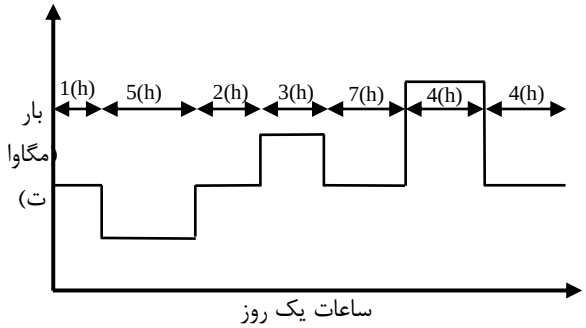
۲ ـ۱ -مدل‌سازی قیمت و بار

قیمت‌های روزانه بازار آنتاریو همانند شکل ۱ به ۳ دسته، قیمت‌پایین (کم‌باری)، قیمت متوسط (پیک روزانه و بار متوسط) و قیمت‌بالا (پیک شبانه) تقسیم شده است.

بارهای روزانه بازار برق آنتاریو همانند شکل ۲ به ۴ دسته، کم باری، پیک روزانه، میان باری و پیک شبانه تقسیم شده است. طبق شکل ۲ سیستم ذخیره‌ساز باتری قادر به انجام چندین بار شارژ و دِشارژ در روز می‌باشد اما هدف مقاله حداکثرسازی سود حاصل از سیستم ذخیره‌ساز انرژی است پس بهتر است در زمان‌هایی که قیمت انرژی پایین است شارژ شود و زمان‌هایی که قیمت انرژی بالاتر است دِشارژ شود و همچنین به‌دلیل اینکه میزان توان (مگاوات) و انرژی سیستم ذخیره‌ساز انرژی (مگاوات ساعت) بالا است تعداد شارژ و دِشارژ در روز یک‌بار در نظر گرفته شود. (طول عمر یک سیستم ذخیره‌ساز باتری بستگی به تعداد شارژ و دِشارژش دارد). هر چه تعداد شارژ و دِشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی در روز بیشتر باشد از طول عمر آن کاسته می‌شود.



شکل ۱ : سیگنال قیمتی در کل سال برای شارژ و دِشارژ[۱۶]



شکل ۲ : منحنی بار در کل سال برای شارژ و دِشارژ[۱۶]

www.SID.ir

Archive of SID

طبق شکل ۱ و شکل ۲، زمانی‌که بار کم است، قیمت انرژی هم کم است و زمانی‌که بار افزایش پیدا می‌کند، قیمت هم افزایش پیدا می‌کند، پس بهترین زمان برای شارژ (خرید) انرژی، زمان کم‌باری و بهترین زمان برای دِشارژ (فروش) انرژی، زمان پرباری است.

۲ ۲ -مدل‌سازی ذخیره‌ساز انرژی باتری

ابتدا به بیان چند شاخص در مورد باتری‌ها پرداخته شده و روابط مربوط به هر شاخص بیان می‌شود.

الف) حالت شارژ باتری[۱۲] (SOC): این پارامتر وضعیت شارژ باتری را نشان می‌دهد. اگر باتری به‌طور کامل شارژ شود، SOC آن برابر با یک و اگر کمتر باشد از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. این شاخص معمولاً به درصد بیان می‌شود [۱۷].

$$SOC = \frac{E_{ch}^{'}}{E_{ch}} \times 100 \quad (\%) \tag{۱}$$

که در آن :

$E_{ch}^{'}$: میزان انرژی موجود در باتری؛

E_{ch}: حداکثر انرژی قابل ذخیره‌سازی در باتری.

ب) دِشارژ خودی[۱۳] باتری: نسبت میزان انرژی تلف‌شده در سیستم ذخیره‌ساز در یک بازه زمانی مانند a (معمولاً یک ماه یا یک سال) بدون آنکه ذخیره‌ساز شارژ یا دِشارژ شود؛ به‌میزان انرژی موجود در ذخیره‌ساز در ابتدای بازه زمانی a دِشارژ خودی باتری گویند [۱۸].

$$E_{self} = \frac{E_{loss,a}}{E_{ch,a}} \times 100 \quad (\%) \tag{۲}$$

که در آن :

$E_{loss,a}$: میزان انرژی تلف شده در بازه زمانی a ؛

$E_{ch,a}$: میزان انرژی ذخیره‌ساز در ابتدای بازه زمانی a .

ج) راندمان باتری: همان بازده باتری است. باتری‌ها داری دو راندمان متفاوت هستند. یک، راندمان شارژ که نسبت انرژی تحویل داده‌شده به پایانه‌های باتری، به انرژی ذخیره‌شده در باتری است و دیگری راندمان دِشارژ که نسبت انرژی دریافت‌شده از پایانه‌های باتری به انرژی ذخیره‌شده در باتری است. راندمان کل حاصل‌ضرب راندمان شارژ و دِشارژ آن است [۱۸].

$$\eta = \eta_{dis} \times \eta_{ch} \tag{۳}$$

که در آن :

η_{ch}: راندمان شارژ.

η_{dch}: راندمان دِشارژ.

د) رابطه ظرفیت توان و انرژی باتری: میزان انرژی که یک باتری می‌تواند در یک ثانیه انتقال دهد (شارژ یا دِشارژ) را ظرفیت توان باتری و کل انرژی‌ای که می‌تواند ذخیره کند را ظرفیت انرژی آن باتری گویند.

$$E_{ch} = t_{ch} \times P_{ESS} \times \eta_{ch} \tag{۴}$$

که در آن :

t_{ch}: مدت‌زمان شارژ سیستم ذخیره‌ساز؛

P_{ESS} : حداکثر توان ذخیره‌ساز انرژی.

باید به این نکته توجه کرد که عملکرد باتری در هرلحظه قطعی نیست؛ مثلاً در ساعت شارژ عملکرد باتری می‌تواند به ۳ حالت زیر باشد:

۱) باتری می‌تواند در کل ساعت با توان نامی شارژ شود ($t_{ch} = 1$).

۲) باتری می‌تواند در بخشی از ساعت شارژ شود ($0 < t_{ch} < 1$).

۳) باتری می‌تواند در کل ساعت بدون عملکرد باقی بماند ($t_{ch} = 0$).

ه) میزان انرژی شارژ: میزان انرژی‌ای که یک سیستم ذخیره‌ساز می‌تواند در خود ذخیره کند و بر اساس رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$E_{ch} = E_{ESS} \times \eta_{ch} \tag{۵}$$

و) میزان انرژی دِشارژ: میزان انرژی‌ای که یک سیستم ذخیره‌ساز می‌تواند به شبکه بازگرداند یا به فروش برساند، که بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۱۸].

$$E_{dis} = E_{ch} \times \eta_{dis} = E_{ESS} \times \eta_{ch} \times \eta_{dis} \tag{۶}$$

در ذخیره‌سازهای انرژی باتری، به‌دلیل افزایش طول عمر، معمولاً SOC در هنگام شارژ به ۱۰۰٪ و در هنگام دِشارژ به صفر نخواهد رسید که در این صورت انرژی شارژ و دِشارژ انرژی، به‌صورت رابطه (۷) و رابطه (۸) تعریف می‌شوند.

$$E_{ch} = (a_{ch}) \times E_{ch} \tag{۷}$$

$$E_{dis} = E_{ch} - [(a_{dis}) \times E_{ch}] \tag{۸}$$

که در آن :

a_{ch}: محدودیت شارژ بین ۰/۹ تا ۰/۹۵ برای باتری لیتیوم یون؛

a_{dis}: محدودیت دِشارژ بین ۰/۱۵ الی ۰/۲ برای باتری لیتیوم یون.

ز) حداکثر توان شارژ و دِشارژ: که به‌ترتیب با استفاده از رابطه (۹) و رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$P_{ch} = \frac{E_{ch}}{t_{ch}} \tag{۹}$$

$$P_{dis} = \frac{E_{dis}}{t_{dis}} \tag{۱۰}$$

ح) محدودیت‌های بهره‌برداری از ذخیره‌ساز: برای بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی محدودیت‌هایی در نظر گرفته‌شده است که به‌صورت روابط (۱۱) - (۱۴) بیان می‌شوند.

$$0 \le P_{ch} \le P_{ESS} \tag{۱۱}$$

$$0 \le P_{dis} \le P_{ESS} \tag{۱۲}$$

$$0 \le E_{ch} \le E_{ESS} \tag{۱۳}$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$0 \le E_{dis} \le E_{ESS} \qquad (۱۴)$$

در محدودیت‌های گفته‌شده، قیود (۱۱) و (۱۲) در بازه مجاز خواهند بود، چنانچه قیود (۱۳) و (۱۴) و تعداد ساعت شارژ و دِشارژ رعایت شوند، یعنی میزان شارژ و دِشارژ از حداکثر انرژی ذخیره‌شده در باتری تجاوز نکند [۶].

محدودیت‌های (۱۱) تا (۱۴)، برای کل بازه زمانی شارژ در نظر گرفته‌شده است و در زمان شارژ و دِشارژ، میزان انرژی شارژ و دِشارژ در هر ساعت دارای محدودیتی است، به صورتی که نباید از حد مجاز در هر ساعت تجاوز کند. محدودیت شارژ و دِشارژ ساعتی به‌ترتیب به‌صورت رابطه (۱۵) و رابطه (۱۶) تعریف می‌شوند.

$$E_{\min} \le E_{ch,h} \le E_{\max} \qquad (۱۵)$$

$$E_{\min} \le E_{dis,h} \le E_{\max} \qquad (۱۶)$$

که در آن :

$E_{\min}$: حداقل انرژی در زمان شارژ و دِشارژ؛

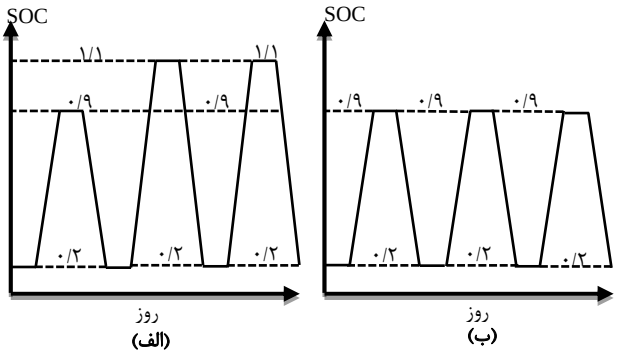
$E_{\max}$: حداکثر انرژی در زمان شارژ و دِشارژ؛

$E_{ch,h}$: انرژی ذخیره‌شده در هر ساعت؛

$E_{dis,h}$: انرژی دِشارژ شده در هر ساعت.

طبق شکل ۳- ب، برای اینکه میزان انرژی ذخیره‌شده سیستم ذخیره‌ساز باتری از حداکثر انرژی ذخیره‌ساز انرژی (E_{ESS}) تجاوز نکند رابطه (۷) از روز دوم به بعد (بعد از اولین بار شارژ) به‌صورت رابطه (۱۷)، بازنویسی می‌شود.

$$E_{ch(t+i)} = \frac{E_{dis(t)}}{\eta_{dis}} \qquad t = 1 \ , \ i = 1,2,3,...,364 \qquad (۱۷)$$



شکل ۳ : منحنی SOC باتری در چند روز متوالی از سال
الف) طبق رابطه (۷) ب) طبق رابطه (۱۷)

طبق شکل ۳- الف، درصورتی‌که میزان انرژی شارژ از رابطه (۷)، محاسبه شود منحنی SOC و میزان انرژی شارژ باتری از حداکثر مقدار خود تجاوز می‌کند درنتیجه قید (۱۳) را نقض می‌کند لذا بایستی از روز دوم بهره‌برداری همانند شکل ۳- ب، از رابطه (۱۷) برای میزان شارژ باتری استفاده شود، در این صورت هزینه خرید انرژی کاهش و میزان درآمد آربیتراژ انرژی از روز دوم افزایش خواهد یافت.

ط) هزینه‌های سیستم ذخیره‌ساز: به‌طورکلی هزینه‌های سیستم ذخیره‌ساز باتری شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه ثابت بهره‌برداری و هزینه متغیر بهره‌برداری است، که به‌ترتیب طبق روابط (۱۸)-(۲۰) برحسب دلار محاسبه می‌شوند [۶].

$$\cos t_{cap} = c_{cap} \times E_{ESS} \qquad (۱۸)$$

$$\cos t_{fix} = c_{fix} \times P_{ESS} \qquad (۱۹)$$

$$\cos t_{\text{var}} = c_{\text{var}} \times (P_{dis} + P_{ch}) \qquad (۲۰)$$

که در آن :

c_{cap} : هزینه هر کیلووات ساعت (دلار بر هر کیلووات ساعت)؛

c_{fix} : هزینه ثابت هر کیلووات (دلار بر کیلووات)؛

c_{var} : هزینه متغیر هر کیلووات (دلار بر کیلووات).

بر اساس روابط (۱۸) - (۲۰) هزینه سرمایه‌گذاری برای طول عمر سیستم ذخیره‌ساز انرژی، هزینه ثابت بهره‌برداری برای یک سال و هزینه متغیر بهره‌برداری برای یک روز است. برای محاسبه ارزش خالص فعلی و اقتصادی‌بودن طرح، نیاز به هزینه‌های بر سال‌شده توسط رابطه (۲۱) و رابطه (۲۲) از [۱۹] است.

$$A = \cos t_{cap} \times CRF \qquad (۲۱)$$

$$CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \qquad (۲۲)$$

که در آن :

A : هزینه بر سال شده؛

r : نرخ بهره[۱۴].

۳ ۲ -تشریح مسئله

هدف این تحقیق حداکثرسازی درآمد آربیتراژ انرژی در مقابل حداقل هزینه‌های سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری است. برای تعیین حداکثر درآمد آربیتراژ انرژی برای سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۷ دو حالت در نظر گرفته‌شده است.

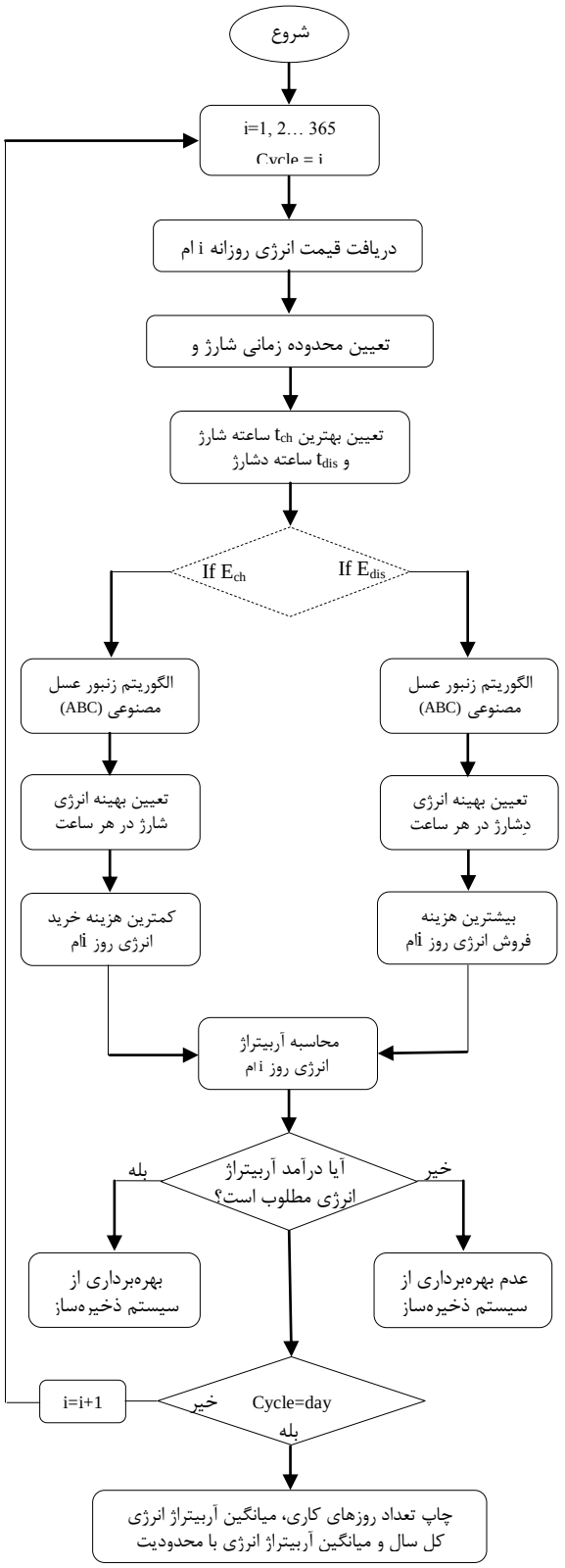
الف) حالت اول: در این حالت زمان‌های شارژ و دِشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری ثابت است (حالت مرسوم)، به‌این‌صورت که زمان شارژ در هر روز بین ساعات ۲-۵ صبح و زمان دِشارژ آن بین ساعات ۱۸-۱۹ هر روز است (مدت‌زمان شارژ ۴ ساعت و مدت‌زمان دِشارژ ۲ ساعت در نظر گرفته شده است). حالت اول بیانگر دو مزیت سیستم ذخیره‌ساز انرژی شامل، پیک‌سایی و آربیتراژ انرژی است. در این حالت در زمان‌های خاموشی هیچ تدبیری اندیشیده نشده است و از یک حالت تکرار در هر روز استفاده شده است.

ب) حالت دوم: در این حالت از شکل ۴ برای افزایش درآمد آربیتراژ انرژی استفاده شده است. بر اساس شکل ۴، مبنای شارژ و دِشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی، قیمت انرژی است با تکیه بر این واقعیت که جهش‌های قیمتی در زمان کمبود تولید ایجاد می‌شود. بر اساس این

www.SID.ir

Archive of SID

واقعیت می‌توان بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی را بر اساس قیمت انرژی تعیین نمود بدین معنی، زمانی‌که قیمت انرژی افزایش یافته است حتماً سیستم قدرت با کمبود تولید مواجه است.



شکل ۴ : الگوریتم پیشنهادی برای تعیین شارژ و دِشارژ بهینه و افزایش درآمد آربیتراژ انرژی

۴ ۲ -تابع هدف مسئله بدون در نظرگرفتن وام و مالیات

تابع هدف مسئله شامل دو قسمت، درآمد آربیتراژ انرژی و هزینه‌های بر سال‌شده سیستم ذخیره‌ساز انرژی طبق رابطه (۲۳) است.

$$\text{Revenue} = [\sum_{i=1}^{day}\sum_{j=1}^{t_{dis}} E_{dis}(\text{i},\text{j}) \times p_{dis}(\text{i},\text{j}) - \sum_{z=1}^{t_{ch}} E_{ch}(\text{i},\text{z}) \times p_{ch}(\text{i},\text{z})] - (\sum_{i=1}^{day} \text{cost}_{\text{var}} + (\text{cost}_{fix} + A)) \quad (۲۳)$$

که در آن :

day : تعداد روزهای کارکرد سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری؛

$p_{dis}(\text{i},\text{j})$: هزینه فروش انرژی در ساعت j ام روز i ام؛

$p_{ch}(\text{i},\text{z})$: هزینه خرید انرژی در ساعت z ام روز i ام.

الف) تعیین هزینه‌های ثابت و متغیر بهره‌برداری برای طول عمر سیستم ذخیره‌ساز انرژی: طول عمر سیستم ذخیره‌ساز انرژی n سال در نظر گرفته‌شده و هزینه متغیر و ثابت بهره‌برداری برای یک سال داده‌شده به همین منظور هزینه ثابت و متغیر بهره‌برداری با توجه به نرخ تورم برای سال‌های آینده طبق رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود [۱۹].

$$F = \sum_{i=2}^{n} (1+f)^{i-1} \times P \quad (۲۴)$$

که در آن :

F : هزینه (ثابت و متغیر) بهره‌برداری برای سال دوم به بعد؛

f : نرخ تورم[۱۵]؛

P : هزینه (ثابت و متغیر) بهره‌برداری سال اول برنامه‌ریزی؛

n : طول عمر سیستم ذخیره‌ساز انرژی.

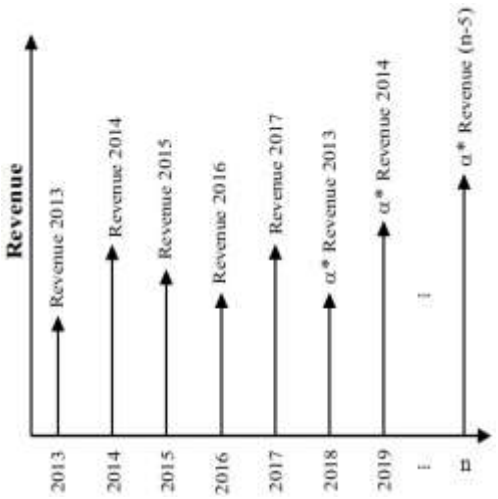
ب) تعیین درآمد آربیتراژ انرژی برای طول عمر سیستم ذخیره‌ساز انرژی: اگر طول عمر سیستم ذخیره‌ساز انرژی با سال‌های محاسبه درآمد آربیتراژ انرژی همانند شکل ۵ یکی نباشد از رابطه (۳۱) برای تخمین سال‌های آینده استفاده می‌شود.

$$\alpha = (\sum_{i=2013}^{2016} (\frac{\text{Revenue}(i+1)}{\text{Revenue(i)}})) + (\text{r}) \quad (\%) \quad (۲۵)$$

که در آن : Revenue(i) درآمد آربیتراژ سال i ام.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵ : تخمین درآمد آربیتراژ انرژی برای طول عمر ذخیره‌ساز

۲ ۵ -ارزیابی اقتصادی سیستم ذخیره‌ساز باتری

۲ ۵ ۱ -محاسبه درآمد خالص یا فرآیند مالی بعد از کسر مالیات[۱۶] (CFAT) بدون در نظر گرفتن وام

الف) محاسبه فرآیند مالی قبل از کسر مالیات[۱۷] (CFBT)

$$CFBT = \text{Revenue} \tag{۲۶}$$

ب) محاسبه استهلاک[۱۸] (D) : برای محاسبه استهلاک روش‌های مختلفی همانند خط مستقیم، روش جمع سنوات و روش مدت عملیات نام برد اما در این مقاله از سیستم MACRS[۱۹] استفاده شده است.

ج) محاسبه درآمد مشمول مالیات[۲۰] (TI) :

$$TI = \text{Revenue} - D = [\sum_{i=1}^{day}\sum_{j=1}^{t_{dis}} E_{dis}(\mathrm{i},\mathrm{j}) \times p_{dis}(\mathrm{i},\mathrm{j}) - \sum_{z=1}^{t_{ch}} E_{ch}(\mathrm{i},\mathrm{z}) \times p_{ch}(\mathrm{i},\mathrm{z})] - (\sum_{i=1}^{day} \cos t_{\text{var}} + (\cos t_{fix} + A + D)) \tag{۲۷}$$

د) محاسبه مالیات[۲۱] (TX) :

$$TX = TI \times TR = (\text{Revenue} - D) \times TR \tag{۲۸}$$

ه) محاسبه درآمد خالص :

$$CFAT = CFBT - TX = \text{Revenue} - ((\text{Revenue} - D) \times TR) \tag{۲۹}$$

و) محاسبه درآمد خالص فعلی (NPV) :

$$NPV = -C_0 + \sum_{i=1}^{n} \frac{CFAT_i}{(1+\mathrm{r})^i} \tag{۳۰}$$

ز) محاسبه مقدار یکنواخت سالیانه[۲۲] (EUAC) :

$$EUAC = NPV \times CRF \tag{۳۱}$$

که در آن :

TR : نرخ مالیات[۲۳]

C_0 : هزینه سرمایه‌گذاری اولیه [۱۹]

۲ ۶ -اثر وام برای اقتصادی‌شدن طرح

هنگامی‌که از بانک وام گرفته می‌شود سرمایه‌گذار باید هرسال مبلغی را به‌عنوان قسط به بانک جهت وام دریافتی بپردازد. قسط سالیانه از دو بخش اصل پول[۲۴] (PR) و بهره پول (I) تشکیل شده‌است. در این‌صورت روابط (۲۵) و (۲۷) به‌صورت روابط (۳۲) و (۳۳) بازنویسی می‌شوند.

$$TI = \text{Revenue} - D - I \tag{۳۲}$$

$$CFAT = \text{Revenue} - (I + PR + (\text{Revenue} - D + I) \times TR)) \tag{۳۳}$$

طبق روابط (۲۴)-(۳۳)، تابع هدف با در نظر گرفتن مالیات بدون وام طبق رابطه (۲۷) در غیر این‌صورت طبق رابطه (۳۳) می‌شود.

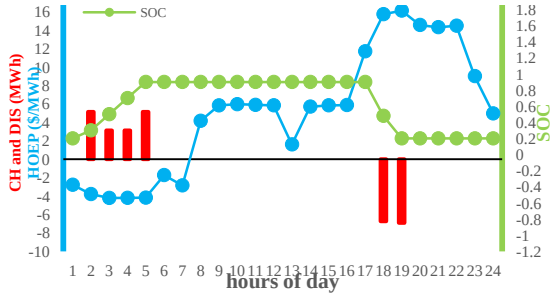
۳ -شبیه‌سازی و نتایج

در این قسمت ابتدا حداکثر درآمد آربیتراژ انرژی را بر اساس مشخصات سیستم ذخیره‌ساز انرژی در جدول ۱، بین حالت شارژ و دِشارژ بهینه (حالت اول و حالت دوم) محاسبه شده است، سپس با کسر هزینه‌های سیستم ذخیره‌ساز انرژی، ارزش خالص فعلی محاسبه می‌شود.

۳ ۱ -تعیین حداکثر درآمد آربیتراژ انرژی

حالت اول : در این حالت طبق شکل ۶، ساعت شارژ ۲-۵ صبح و زمان دِشارژ ساعت ۱۸-۱۹ است. برای محاسبه درآمد آربیتراژ انرژی و تأثیر خطای پیش‌بینی قیمت از قیمت‌های ساعتی واقعی بازار آنتاریو[۲۵] (HOEP) و قیمت پیش‌بینی‌شده ۳ ساعت آینده[۲۶] برای سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۷ از [۱۶] استفاده و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.

محدودیت حالت اول، درآمد آربیتراژ انرژی در هرروز (درآمد بالای ۱۷۰ دلار در روز) است که باعث افزایش هزینه‌های ثابت بهره‌برداری در هر روز و کاهش درآمد آربیتراژ انرژی سالانه به‌دلیل کاهش تعداد روزهای بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی می‌شود.



شکل ۶ : شارژ و دِشارژ با ۱۰ مگاوات (۲۰ مگاوات ساعت)

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱ : مشخصات سیستم ذخیره‌ساز انرژی

مشخصات	مقادیر
حداکثر توان ذخیره‌ساز (مگاوات)	۱۰
حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی (مگاوات ساعت)	۲۰
راندمان شارژ	۰/۹۵
راندمان دشارژ	۰/۹۵
راندمان رفت‌وبرگشت	۰/۹
دشارژ خودی در یک ماه	٪۲
حداکثر انرژی شارژ در هر ساعت (مگاوات ساعت)	۱۰
حداقل انرژی شارژ در هر ساعت (مگاوات ساعت)	۲
حداکثر انرژی دِشارژ در هر ساعت (مگاوات ساعت)	۱۰
حداقل انرژی دِشارژ در هر ساعت (مگاوات ساعت)	۲
حداکثر انرژی شارژ روز اول (مگاوات ساعت)	۱۷
حداکثر انرژی شارژ روز دوم به بعد (مگاوات ساعت)	۱۴/۴
حداکثر انرژی دشارژ در زمان تخلیه (مگاوات ساعت)	۱۳/۶

جدول ۲ : درآمد آربیتراژ انرژی با توجه به نوع بهره‌برداری (حالت اول)

سال	قیمت	نوع بهره‌برداری	تعداد روز	میانگین درآمد روزانه (دلار)
۲۰۱۳	واقعی	کل سال	۳۶۵	۲۸۹
		همراه با محدودیت	۲۰۷	۴۵۹
	۳ ساعت آینده	کل سال	۳۶۵	۳۲۸
		همراه با محدودیت	۲۳۷	۴۶۱
۲۰۱۴	واقعی	کل سال	۳۶۵	۴۰۶
		همراه با محدودیت	۲۵۴	۵۶۸
	۳ ساعت آینده	کل سال	۳۶۵	۴۴۳
		همراه با محدودیت	۲۸۱	۵۵۱
۲۰۱۵	واقعی	کل سال	۳۶۵	۲۸۸
		همراه با محدودیت	۲۴۰	۴۱۰
	۳ ساعت آینده	کل سال	۳۶۵	۳۷۱
		همراه با محدودیت	۲۵۵	۴۶۹
۲۰۱۶	واقعی	کل سال	۳۶۵	۳۰۷
		همراه با محدودیت	۱۸۶	۵۱۸
	۳ ساعت آینده	کل سال	۳۶۵	۲۶۶
		همراه با محدودیت	۲۳۰	۳۵۸
۲۰۱۷	واقعی	کل سال	۲۰۷	۲۴۷
		همراه با محدودیت	۹۴	۴۵۸
	۳ ساعت آینده	کل سال	۲۰۷	۲۰۳
		همراه با محدودیت	۸۱	۳۷۶

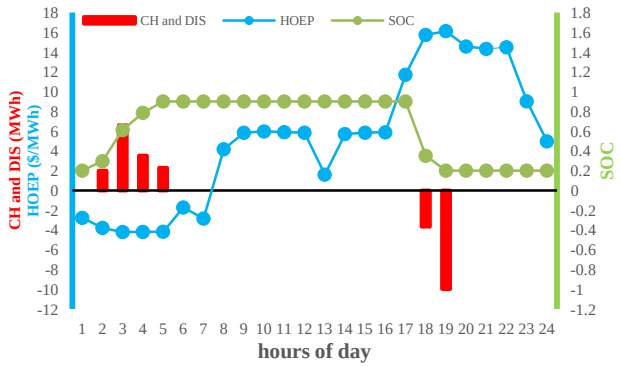
حالت دوم : در این حالت از شکل ۴، برای افزایش درآمد آربیتراژ انرژی استفاده شده به صورتی‌که سیستم ذخیره‌ساز انرژی به‌غیراز زمان غیرپیک قادر به دِشارژ انرژی ذخیره‌شده است.

حالت دوم به‌غیراز محدودیت درآمد آربیتراژ انرژی، تعداد روزهای بهره‌برداری را در نظر گرفته، به‌صورتی که تعداد روزهای بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی حدود ۳۰۰ روز در سال است.

حالت اول از قیمت پیش‌بینی‌شده ۳ ساعت آینده (پیش‌بینی‌شده توسط خود بازار) برای تأثیر خطای پیش‌بینی قیمت بر درآمد آربیتراژ انرژی استفاده شده است. نسبت درآمد آربیتراژ انرژی قیمت واقعی بر قیمت پیش‌بینی ۳ ساعت آینده برای سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۷ به‌ترتیب ۸۸٪، ۹۱٪، ۷۷٪، ۱۱۵٪ و ۱۲۰٪ است.

جدول ۳، میانگین درآمد آربیتراژ انرژی با توجه به نوع بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی براساس شکل ۴ و شکل ۷ نشان می‌دهد. حالت دوم تنها از قیمت واقعی برای تأثیر فلوچارت ارائه‌شده در شکل ۴ برای افزایش درآمد آربیتراژ انرژی استفاده شده است.

حالت اول به‌دلیل در نظر گرفتن تنها محدودیت درآمد آربیتراژ انرژی موردقبول نخواهد بود لذا در حالت دوم به غیر از در نظر گرفتن محدودیت درآمد آربیتراژ انرژی، تعداد روزهای بهره‌برداری هم برای افزایش درآمد آربیتراژ انرژی درنظر گرفته شده است.



شکل ۷ : شارژ و دِشارژ بهینه با ۱۰ مگاوات (۲۰ مگاوات ساعت)

طبق فلوچارت ارائه‌شده در شکل ۴، با درنظرگرفتن هزینه‌های سیستم ذخیره‌ساز انرژی جدول ۳، حداکثر درآمد آربیتراژ انرژی جدول ۴ آمده است، حال با توجه به تابع هدف (۲۳)، درآمد حاصل از آربیتراژ انرژی برای یک روز از سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۷ با کسر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری (ثابت و متغیر) در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۳ : مشخصات و هزینه‌های سیستم ذخیره‌ساز انرژی [۶، ۲۰، ۲۱]

مشخصات	مقدار (دلار)	مشخصات	مقدار
هزینه متغیر بهره‌برداری	۰/۰۰۰۱۵ (کیلووات)	نرخ تورم	۲ (٪)
هزینه ثابت بهره‌برداری	۷ (کیلووات)	نرخ بهره	۴ و ۶ (٪)
هزینه سرمایه‌گذاری	۱۰۰ تا ۱۴۵ (کیلووات ساعت)	طول عمر	۲۰ (سال)
مالیات فدرال	۳۳ (٪)	مالیات استانی	۱۱ (٪)

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴ : درآمد آربیتراژ انرژی با توجه به نوع بهره‌برداری (حالت دوم)

سال	نوع بهره‌برداری	تعداد روز	میانگین درآمد روزانه (دلار)
۲۰۱۳	کل سال	۳۶۵	۵۹۷
	همراه با محدودیت	۳۰۴	۶۹۰
۲۰۱۴	کل سال	۳۶۵	۸۴۶
	همراه با محدودیت	۳۰۳	۹۸۲
۲۰۱۵	کل سال	۳۶۵	۷۹۲
	همراه با محدودیت	۳۰۰	۹۲۹
۲۰۱۶	کل سال	۳۶۵	۶۳۵
	همراه با محدودیت	۳۰۱	۷۴۸
۲۰۱۷	کل سال	۲۰۷	۸۹۳
	همراه با محدودیت	۱۶۶	۱۰۸۸

با مقایسه جدول ۲ و ۴، برتری الگوریتم پیشنهادی بر حالت مرسوم که در بیشتر مقالات مورد استفاده قرار گرفته قابل مشاهده است. استفاده از الگوریتم پیشنهادی شکل ۴، درآمد آربیتراژ انرژی ۲ برابر حالت مرسوم شده که واقعیت برتری آن را نسبت به حالت عادی را نشان می‌دهد.

جدول ۵ : سود حاصل از ذخیره‌ساز برای یک روز سال

سال	سرمایه‌گذاری	نرخ بهره	بهره‌برداری	سود
۲۰۱۳	۲ میلیون دلار	٪ ۴	۳۶۵	۱
			۳۰۴	۳۷
		٪ ۶	۳۶۵	-۷۴
			۳۰۴	-۵۶
	۲/۹ میلیون دلار	٪ ۴	۳۶۵	-۱۸۰
			۳۰۴	-۱۵۲
		٪ ۶	۳۶۵	-۲۸۹
			۳۰۴	-۲۸۸
۲۰۱۴	۲ میلیون دلار	٪ ۴	۳۶۵	۲۴۶
			۳۰۳	۳۲۲
		٪ ۶	۳۶۵	۱۷۲
			۳۰۳	۲۲۹
	۲/۹ میلیون دلار	٪ ۴	۳۶۵	۶۵
			۳۰۳	۱۳۲
		٪ ۶	۳۶۵	-۴۳
			۳۰۳	-۴
۲۰۱۵	۲ میلیون دلار	٪ ۴	۳۶۵	۱۸۸
			۳۰۰	۲۵۸
		٪ ۶	۳۶۵	۱۱۴
			۳۰۰	۱۶۳
	۲/۹ میلیون دلار	٪ ۴	۳۶۵	۷
			۳۰۰	۶۶
			۳۶۵	-۱۰۱
		٪ ۶	۳۰۰	-۷۷
۲۰۱۶	۲ میلیون دلار	٪ ۴	۳۶۵	۲۷
			۳۰۱	۷۴
		٪ ۶	۳۶۵	-۴۷
			۳۰۱	-۲۰
	۲/۹ میلیون دلار	٪ ۴	۳۶۵	-۱۵۴
			۳۰۱	-۱۱۷
		٪ ۶	۳۶۵	-۲۶۲
			۳۰۱	-۲۵۲
۲۰۱۷	۲ میلیون دلار	٪ ۴	۲۰۷	۲۸۱
			۱۶۶	۳۹۰
		٪ ۶	۲۰۷	۲۱۵
			۱۶۶	۲۹۳
	۲/۹ میلیون دلار	٪ ۴	۲۰۷	۱۰۰
			۱۶۶	۱۹۳
		٪ ۶	۲۰۷	-۸
			۱۶۶	۵۲

طبق جدول ۵، سود حاصل از ذخیره‌ساز انرژی روزانه، برای سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶ منفی است ولی برای ارزیابی اقتصادی بودن طرح، بایستی کل دوره در نظر گرفته شود.

۳ ۴ -ارزیابی اقتصادی سیستم ذخیره‌ساز انرژی با در نظر گرفتن مالیات و استهلاک بدون وام

برای ارزیابی اقتصادی سیستم ذخیره‌ساز انرژی نیاز به تمام پارامترهای لازم دوره برنامه‌ریزی که یکی از آن‌ها، هزینه استهلاک است از سیستم MACRS استفاده شده که بر اساس آن برای طول عمر ۲۰-۲۵ سال از جدول ۶ می‌توان استفاده نمود. با توجه به مطالب گفته‌شده ارزش خالص فعلی و مقدار یکنواخت سالیانه برای هزینه سرمایه‌گذاری ۱۴۵-۱۰۰ دلار بر هر کیلووات ساعت در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۶ : هزینه استهلاک سالیانه [۲۲]

سال	درصد استهلاک	تجمعی	سال	درصد استهلاک	تجمعی
۱	۵	۵	۱۱	۵/۹۱	۷۳/۴۳
۲	۹/۵	۱۴/۵	۱۲	۵/۹	۷۹/۳۳
۳	۸/۵۵	۲۳/۰۵	۱۳	۵/۹۱	۸۵/۲۴
۴	۷/۷	۳۰/۷۵	۱۴	۵/۹	۹۱/۱۴
۵	۶/۹۳	۳۷/۶۸	۱۵	۵/۹۱	۹۷/۰۵
۶	۶/۲۳	۴۳/۹۱	۱۶	۲/۹۵	۱۰۰
۷	۵/۹	۴۹/۸۱	۱۷	۰	۱۰۰
۸	۵/۹	۵۵/۷۱	۱۸	۰	۱۰۰
۹	۵/۹۱	۶۱/۶۲	۱۹	۰	۱۰۰
۱۰	۵/۹	۶۷/۵۲	۲۰	۰	۱۰۰

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۷ : ارزش فعلی خالص با در نظر گرفتن مالیات و استهلاک بدون وام

هزینه سرمایه‌گذاری	نرخ بهره	بهره‌برداری	NPV	EUAC
۱۰۰ (دلار بر کیلووات ساعت)	٪ ۴	۳۶۵ روز	۳۸۶۰۵۰	۲۸۴۰۶
		۳۰۰ روز	۶۳۶۹۱۰	۴۰۷۷۰
	٪ ۶	۳۶۵ روز	۵۷۲۹۰	۴۹۹۴
		۳۰۰ روز	۲۲۶۳۶۰	۱۷۷۰۷
۱۲۵ (دلار بر کیلووات ساعت)	٪ ۴	۳۶۵ روز	۴۸۱۲۷	۳۵۴۱
		۳۰۰ روز	۲۹۵۹۱۰	۱۸۹۴۲
	٪ ۶	۳۶۵ روز	-۳۰۳۴۴۰	-۲۶۴۵۵
		۳۰۰ روز	-۱۳۶۱۶۰	-۱۰۶۵۱
۱۴۵ (دلار بر کیلووات ساعت)	٪ ۴	۳۶۵ روز	-۲۵۹۴۵۰	-۱۹۰۹۱
		۳۰۰ روز	-۱۹۵۶۱	-۱۲۵۲
	٪ ۶	۳۶۵ روز	-۶۲۴۸۹۰	-۵۴۴۸۱
		۳۰۰ روز	-۴۶۴۷۸۰	-۳۶۳۵۹

طبق جدول ۷، زمانی بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی اقتصادی است که هزینه سرمایه‌گذاری ۱۰۰ دلار با نرخ بهره ۴ و ۶ درصد و ۱۲۵ دلار با نرخ بهره ۴ درصد باشد، در دیگر هزینه‌های سرمایه‌گذاری اقتصادی نیست لذا بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز برای مالک آن، اگر تنها سود آن آربیتراژ انرژی باشد توصیه نمی‌شود. در بخش بعد هزینه سرمایه‌گذاری از بانک با نرخ بهره ۴ و ۶ درصد وام گرفته می‌شود تا بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری اقتصادی گردد.

۳ ۳ -ارزیابی اقتصادی سیستم ذخیره‌ساز انرژی با درنظر گرفتن مالیات و استهلاک با در نظر گرفتن وام

ارزش خالص فعلی و مقدار یکنواخت سالانه با درنظرگرفتن وام با نرخ بهره ۴ و ۶ درصد در جدول ۸ آورده شده است. در این حالت تنها هزینه سرمایه‌گذاری به‌صورت وام در نظر گرفته است و هزینه ثابت و متغیر بهره‌برداری از سود حاصل از آربیتراژ انرژی کسر می‌شود.

جدول ۸ : ارزش فعلی خالص با در نظرگرفتن وام

هزینه سرمایه‌گذاری	نرخ بهره	بهره‌برداری	NPV	EUAC
۱۰۰ (دلار بر کیلووات ساعت)	٪ ۴	۳۶۵ روز	۷۳۸۵۲۰	۵۴۳۴۱
		۳۰۰ روز	۱۰۸۷۶۰۰	۶۹۶۱۹
	٪ ۶	۳۶۵ روز	۵۷۵۴۱۰	۵۰۱۶۷
		۳۰۰ روز	۸۹۰۳۰۰	۶۹۶۴۶
۱۲۵ (دلار بر کیلووات ساعت)	٪ ۴	۳۶۵ روز	۴۰۵۲۵۰	۲۹۸۱۹
		۳۰۰ روز	۷۸۴۰۸۰	۵۰۱۹۰
	٪ ۶	۳۶۵ روز	۲۴۶۷۲۰	۴۷۵۰۳
		۳۰۰ روز	۶۰۷۲۴۰	۲۱۵۱۰
۱۴۵ (دلار بر کیلووات ساعت)	٪ ۴	۳۶۵ روز	۱۱۸۳۳۰	۸۷۰۶
		۳۰۰ روز	۵۱۶۴۰۰	۳۳۰۵۶
	٪ ۶	۳۶۵ روز	-۴۳۶۸۹	-۳۸۰۹
		۳۰۰ روز	۳۵۱۵۵۰	۲۷۵۰۱

طبق جدول ۸، بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی تنها زمانی‌که هزینه سرمایه‌گذاری ۱۴۵ دلار و نرخ بهره ۶ درصد و در کل سال مورد بهره‌برداری قرار بگیرد، اقتصادی نیست.

جدول ۹ : هزینه سرمایه‌گذاری اقتصادی برای طول عمر مختلف

عمر	نرخ بهره	بهره‌برداری	هزینه سرمایه‌گذاری	NPV	EUAC
۱۰	٪ ۴	۳۶۵ روز	۷۸ دلار	۱۳۸۹	۱۷۱
		۳۰۰ روز	۱۰۳ دلار	۲۰۴۳	۲۰۴
	٪ ۶	۳۶۵ روز	۷۳ دلار	۷۳۰۹	۹۹۳
		۳۰۰ روز	۹۶ دلار	۱۰۳۸۸	۱۱۷۳
۱۳	٪ ۴	۳۶۵ روز	۱۰۱ دلار	۱۲۶۰۶	۱۲۶۲
		۳۰۰ روز	۱۲۸ دلار	۱۳۶۲۰	۱۱۶۸
	٪ ۶	۳۶۵ روز	۹۵ دلار	۱۹۴۰	۲۱۹
		۳۰۰ روز	۱۱۸ دلار	۷۳۸۲	۷۳۰

جدول ۹ : ادامه

عمر	نرخ بهره	بهره‌برداری	هزینه سرمایه‌گذاری	NPV	EUAC
۱۶	٪ ۴	۳۶۵ روز	۱۲۹ دلار	۳۱۰۸	۲۶۶
		۳۰۰ روز	۱۵۱ دلار	۱۰۷۸۶	۷۹۳
	٪ ۶	۳۶۵ روز	۱۱۸ دلار	۱۳۸۷۳	۱۳۷۲
		۳۰۰ روز	۱۴۱ دلار	۳۱۲	۲۷
۲۰	٪ ۴	۳۶۵ روز	۱۵۲ دلار	۹۴۳۹	۶۹۴
		۳۰۰ روز	۱۷۷ دلار	۱۳۰۴۴	۸۳۵
	٪ ۶	۳۶۵ روز	۱۴۲ دلار	۱۶۷۹	۱۴۶
		۳۰۰ روز	۱۶۸ دلار	۱۱۵۶۶	۹۰۴

www.SID.ir

Archive of SID

۴ ۳ -تأثیر طول عمر سیستم ذخیره‌ساز باتری

در قسمت‌های قبل طول عمر سیستم ذخیره‌ساز باتری ثابت در نظر گرفته شده است در این قسمت برای طول عمرهای مختلف سیستم ذخیره‌ساز باتری، هزینه سرمایه‌گذاری اقتصادی در جدول ۹ آورده شده است.

۴ -نتیجه‌گیری

هزینه‌های سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی بسیار بالاست، برای همین بایستی ساعت‌های شارژ و دِشارژ بهینه به‌درستی انجام شود به‌گونه‌ای که کمترین هزینه خرید و بیشترین عایدی از فروش انرژی را شامل شود. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی شکل ۴ و تکیه بر این واقعیت که جهش‌های قیمتی در زمان کاهش تولید به بار تولید ایجاد می‌شود می‌توان شارژ و دِشارژ را بر اساس قیمت انرژی تعیین نمود.

یکی از فاکتورهای مهم، در واقعی‌بودن درآمد آربیتراژ انرژی قیمت انرژی و پیش‌بینی درست آن است، درصورتی‌که پیش‌بینی درستی از قیمت انرژی وجود نداشته باشد آربیتراژ انرژی از مقدار واقعی اختلاف دارد. باوجود این‌که قیمت پیش‌بینی‌شده انرژی، توسط خود بازار انجام شده است خطایی حدود ۱۲ درصد بیشتر از حالت واقعی در هر روز را نشان می‌دهد.

طول عمر سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر اساس شارژ و دِشارژ بیان می‌شود، هر چه در طول شبانه‌روز یا در سال، کمتر شارژ و دِشارژ انجام شود، طول عمر سیستم ذخیره‌ساز انرژی افزایش می‌یابد اما تعداد روزهای غیر بهره‌برداری تنها در روزهای تعطیل است، لذا در این مقاله دو عامل تأثیر تعداد روزهای کاری و درآمد آربیتراژ انرژی سیستم ذخیره‌ساز انرژی مورد بررسی قرار داده شد. طبق نتایج محاسبه شده، با در نظرگرفتن وام زمانی‌که تعداد روزهای بهره‌برداری سیستم ذخیره‌ساز انرژی به ۳۰۰ روز در یک سال کاهش یابد، هزینه سرمایه‌گذاری ۱۶۸ دلار بر هر کیلووات ساعت و زمانی‌که در سیستم ذخیره‌ساز انرژی در کل سال مورد بهره‌برداری قرار بگیرد ۱۴۲ دلار بر هر کیلووات ساعت را شامل می‌شود درنتیجه، اقتصادی‌تر این است که سیستم ذخیره‌ساز انرژی در ۳۰۰ روز از سال مورد بهره‌برداری قرار بگیرد.

عمر سیستم ذخیره‌ساز انرژی یک فاکتور مهم در اقتصادی‌شدن طرح است. هراندازه طول عمر سیستم ذخیره‌ساز انرژی بیشتر باشد هزینه سرمایه‌گذاری بیشتری را شامل می‌شود.

مراجع

[1] N. Bhatnagar and B. Venkatesh, "Energy storage and power systems," *2012 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Montreal, *QC*, pp. 1-4, 2012.

[2] A. S. A. Awad, J. D. Fuller, T. H. M. EL-Fouly and M. M. A. Salama, "Impact of Energy Storage Systems on Electricity Market Equilibrium," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 875-885, July 2014.

[3] M. Johnson, J. Vetrano, K. Lynn, W. Parks, R. Handa and L. Kannberg, *" Grid Energy Storage,"* December 2013

[4] Cavanagh K, Ward J K, Behrens S, Bhatt A I, Ratnam E L, Oliver E and Hayward J, *"* Electrical energy storage: technology overview and applications*". CSIRO, Australia*, EP154168.

[5] P. Poonpun and W. T. Jewell, "Analysis of the Cost per Kilowatt Hour to Store Electricity,"*IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 2, pp. 529-534, June 2008.

[6] A. Chen and P. K. Sen, "Deployment of battery energy storage system for energy arbitrage applications," *2016 North American Power Symposium (NAPS)*, Denver, CO, pp. 1-8, 2016.

[7] J. Cobb, "Gm says li-ion battery cells down to $145/kwh and still falling." 2015. [Online]. Available: http:// www. Hybrid cars. com./ gm-ev-battery-cells-down-to-145kwh-and-still-falling/

[8] A. Dunbar, L. C. Cradden, R. Wallace and G. P. Harrison, "Impact of wind power on arbitrage revenue for electricity storage,"*IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 3, pp. 798-806, 2 18 2016.

[9] M. B. C. Salles, M. J. Aziz and W. W. Hogan, "Potential arbitrage revenue of energy storage systems in PJM during 2014," *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Boston, MA, pp. 1-5, 2016.

[10] R. K. Lam, D. H. Tran and H. G. Yeh, "Economics of residential energy arbitrage in california using a PV system with directly connected energy storage," *2015 IEEE Green Energy and Systems Conference (IGESC)*, Long Beach, CA, pp. 67-79, 2015.

[11] H. Pandžić and I. Kuzle, "Energy storage operation in the day-ahead electricity market," *2015 12th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, Lisbon, pp. 1-6, 2015.

[12] H. Khani and M. R. D. Zadeh, "Online Adaptive Real-Time Optimal Dispatch of Privately Owned Energy Storage Systems Using Public-Domain Electricity Market Prices," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 930-938, March 2015.

[13] A. A. Thatte, L. Xie, D. E. Viassolo and S. Singh, "Risk Measure Based Robust Bidding Strategy for Arbitrage Using a Wind Farm and Energy Storage," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 2191-2199, Dec. 2013.

[۱۴] عباس مارینی، محمدامین لطیفی، محمدصادق قاضی‌زاده و احمد سالم‌نیا، «زمان‌بندی توأم تعمیرات واحدهای تولیدی و منابع ذخیره‌ساز انرژی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۲۸۶-۲۹۷، زمستان ۱۳۹۵.

[۱۵] علی مهدی‌زاده و نوید تقی‌زاده، «برنامه‌ریزی تصادفی ریز شبکه جزیره‌ای در حضور سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخگویی بار»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحه ۷۱۲-۷۲۵، تابستان ۱۳۹۶.

[16] Ieso.ca. (2017). *Data Directory*. [online] Available at: http :// www.ieso.ca/en/power-data/data-directory [17 Oct. 2017].

[17] H. Delavaripour, H. R. Karshenas, A. Bakhshai and P. Jain, "Optimum battery size selection in standalone renewable energy systems," *2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Amsterdam, pp. 1-7, 2011.

[18] H. Khani, "*Adaptive Real-Time Optimal Dispatch of Privately Owned Energy Storage Systems*," Master thesis, University of Western Ontario, May 2014.

[19] G. Thuesen and W. Fabrycky. Engineering economy. Beijing: Qing hua da xue chu ban she, 2005.

[20] E. P. R. Institute, "A feasibility analysis of limited energy storage for regulation service," Electric Power Research Institute, Tech. Rep., 2009

www.SID.ir

Archive of SID

[21] " Inflation -Canada ", Fa.tradingeconomics.com, 2017. [Online]. Available: https://fa.tradingeconomics.com/canada/inflation-cpi. [17-Oct- 2017].

[22] "Publication 946 (2016), How To Depreciate Property | Internal Revenue Service", Irs.gov, 2017. [Online]. Available: https://www.irs.gov/publications/p946. [17-Oct- 2017].

زیرنویس‌ها

[1] Pumped hydroelectric
[2] Batteries
[3] Energy storage
[4] Flywheel
[5] Compressed-air energy storage
[6] Capacitors
[7] Superconducting
[8] Energy arbitrage
[9] Li-ion battery
[10] General Motor
[11] Real-Time Optimal Dispatch
[12] State Of Charge
[13] Self-discharge

[14] Discount rate
[15] Inflation Rate
[16] Cash Flow After Tax
[17] Cash Flow Before Tax
[18] Depreciation
[19] Modified Accelerated Cost Recovery System
[20] Taxable Income
[21] Tax
[22] Equivalent Uniform Annual Cost
[23] Tax Rate
[24] Principle
[25] Hourly Ontario Energy Price
[26] 3-Hour Ahead Predispatch Prices

www.SID.ir