

روشی جدید برای کنترل سیستم ترکیبی سلول خورشیدی و باتری متصل به شبکه الکتریکی با کنترل کننده پیش‌بین

امین سلیمی^۱، نوید غفارزاده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - قزوین - ایران

amin.salimi90@yahoo.com

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - قزوین - ایران

ghaffarzadeh@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

در این مقاله از کنترل کننده پیش‌بین MPC (Model Predictive Control) برای کنترل سیستم ترکیبی قدرت، دربردارنده سلول خورشیدی و سیستم ذخیره‌سازی انرژی (باتری) استفاده شده است. سیستم ترکیبی استفاده شده در این مقاله، متصل به شبکه الکتریکی است. در طراحی سیستم کنترل کننده، مسائل مختلفی نظیر مسائل اقتصادی و فنی در نظر گرفته شده است. مسائل اقتصادی، دربردارنده بیشینه‌سازی سود حاصل از فروش انرژی به شبکه از طریق فروش انرژی در ساعات گرانی انرژی است. مسائل فنی، دربردارنده بهبود پاسخ دینامیکی و هموارسازی توان خروجی سلول خورشیدی و همچنین بیشینه‌سازی عمر باتری‌ها از طریق به حداقل رسانیدن سیکل شارژ و دشارژ مربوط به آن‌ها است. همچنین برای بهینه‌کردن نتایج حاصل از کنترل کننده پیش‌بین، از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات برای به دست آوردن ضرایب بهینه تابع هدف استفاده شده است. کنترل کننده پیشنهادی، ضمن اینکه به طور اتوماتیک و دینامیکی خود را با تغییرات خروجی سلول خورشیدی تطبیق می‌دهد، قادر به پاسخ‌گویی درخواست‌های بیرونی، مثل سیگنال‌های قیمت یا ارضا محدودیت‌های سیستم قدرت یا درخواست‌های اپراتور است. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی سیستم با کنترل کننده پیشنهادی و نتایج سیستم با کنترل کننده PID ارائه و مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی، باتری، تولید پراکنده برق، مدیریت انرژی، هموارسازی توان خروجی سلول خورشیدی، کنترل کننده پیش‌بین.

۱- مقدمه

تولید انرژی‌های نو استفاده می‌کنند به سرعت رو به افزایش برود؛ ولی ماهیت بیشتر انرژی‌های نو، متغیر و پیش‌بینی نشده است که این به مانعی برای استفاده گسترده‌تر از انرژی‌های نو تبدیل شده است. برای حل این مشکل از منابع ذخیره‌ساز انرژی استفاده می‌شود [۱-۳] که ماهیت پیش‌بینی نشده و متغیر انرژی‌های نو را برطرف می‌کند. به همین علت در این مقاله در کنار سیستم سلول خورشیدی از یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی (باتری) هم استفاده شده است. این کار باعث می‌شود قابلیت اطمینان و پایداری منابع تولید بیشتر شوند. باتری و سلول خورشیدی در کنار هم

نگرانی‌های جامعه جهانی در رابطه با محیط زیست، باعث شده است استفاده از تولیدات پراکنده‌ای که از منابع

^۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۰۸/۲۷

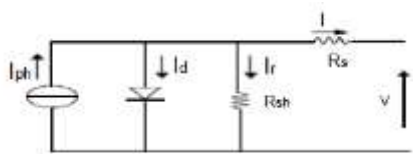
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۵/۰۱/۳۰

نام نویسنده مسئول : نوید غفارزاده

نشانی نویسنده مسئول : ایران - قزوین - دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - دانشکده فنی و مهندسی - اتاق ۴۹۷ -

این مزیت را دارند که سلول خورشیدی، انرژی مازاد بر مصرف تولید شده را در باتری ذخیره کند و در ساعاتی که تابش نداریم، می‌توان از انرژی ذخیره شده در باتری استفاده کرد. این عمل به پیک‌سایی شبکه و افزایش کارایی شبکه کمک می‌کند و حتی انرژی ذخیره شده در باتری می‌تواند جایگزین رزرو چرخان شبکه هم بشود. سیستم‌های ترکیبی برای کارایی بهتر به کنترل کننده هم نیاز دارند. انواع مختلف کنترل کننده وجود دارد که در این مقاله از کنترل کننده پیش‌بین استفاده شده است. در پژوهش‌های مختلف از انواع سیستم‌های ترکیبی و کنترل کننده‌های مختلف استفاده شده است که ما در اینجا برخی از آن‌ها را معرفی می‌کنیم. مرجع [۱] عناصر مختلف یک سیستم ترکیبی (که در بردارنده دیزل ژنراتور و توربین بادی و باتری است) معرفی شده است. در مرجع [۲] از یک سیستم ترکیبی (که در بردارنده دیزل ژنراتور و توربین بادی است) استفاده شده است. در این مقاله، از دیزل ژنراتور فقط برای اندازه‌گیری فرکانس استفاده شده است. در مرجع [۴] از کنترل کننده پیش‌بین برای کنترل سیستم ترکیبی قدرت (که در بردارنده ژنراتور بادی و باتری است) استفاده شده است. در اینجا هدف کنترل کننده پیش‌بین، هموار کردن توان خروجی توربین بادی است. در مرجع [۵] از کنترل کننده پیش‌بین برای کنترل سیستم ترکیبی قدرت (که در بردارنده توربین بادی، سلول خورشیدی و باتری و بار AC است) استفاده شده است. در این مقاله توربین بادی و سلول خورشیدی با معادلات غیرخطی شبیه‌سازی شده است. در مرجع [۶] از کنترل کننده پیش‌بین برای کنترل سیستم ترکیبی قدرت (که در بردارنده سلول سوختی، باتری و ابر خازن است) استفاده شده است. در این مرجع سعی شده است با کنترل کننده پیش‌بین از تغییرات سریع و ناگهانی جریان جلوگیری شود تا عمر باتری به بیشترین مقدار خود برسد. در مرجع [۷] از کنترل کننده پیش‌بین برای کنترل سیستم ترکیبی قدرت (که در بردارنده توربین بادی و باتری است) استفاده شده است. این کنترل کننده برای دو حالت وصل به شبکه و جدا از شبکه طراحی شده است. در مرجع [۸] از کنترل کننده پیش‌بین برای کنترل سیستم ترکیبی قدرت (که در بردارنده دیزل ژنراتور، توربین بادی، سلول خورشیدی و باتری

است) استفاده شده است. در این مقاله از کنترل کننده پیش‌بین برای بهینه‌کردن تولید توان توربین بادی با توجه به محدودیت‌های اقتصادی استفاده شده است؛ برای مثال: حداقل کردن هزینه سوخت و حداقل کردن تغییرات خروجی دیزل ژنراتور و بیشینه‌کردن عمر باتری. در مرجع [۹] از کنترل کننده پیش‌بین برای مدیریت توان برای وسایل نقلیه برقی مثل اتوبوس‌های شهری استفاده شده است. وسایل نقلیه موتوری به علت تغییرات زیادی که در بار خود دارند احتیاج به کنترل کننده‌هایی دارند که بتوانند این تغییرات را کمینه کنند که در این مقاله از کنترل کننده پیش‌بین استفاده شده است. در مرجع [۱۰] از کنترل کننده پیش‌بین برای کنترل سیستم ذخیره‌سازی انرژی (باتری) استفاده شده است. در این مقاله با کنترل کننده پیش‌بین، سعی شده است سیکل شارژ و دشارژ باتری، کنترل بهینه شود تا عمر باتری به بیشترین مقدار خود برسد. در مرجع [۱۱] از کنترل کننده پیش‌بین برای کنترل سیستم ترکیبی سلول خورشیدی متصل به شبکه و باتری استفاده شده است. در این مقاله، پارامترهای اقتصادی برای کنترل سیستم مد نظر قرار گرفته است. در مرجع [۱۲] از کنترل کننده پیش‌بین برای کنترل سیستم ترکیبی توربین بادی و باتری استفاده شده است. در این مقاله، هدف کنترل کننده، هموار کردن خروجی توربین بادی است. در سیستم کنترلی که در این مقاله استفاده شده است، پارامترهای اقتصادی و فنی با هم در نظر گرفته شده‌اند. سلول خورشیدی استفاده شده در شبیه‌سازی، ماکزیمم توان ۳۸۰kW را دارد و سیستم ذخیره‌ساز انرژی دو باتری مجزا دارد که یک باتری با ظرفیت زیاد، 1000kWh و باتری کوچک‌تر با ظرفیت 180kWh است. باتری کوچک‌تر به علت اضافه‌کردن خازن به آن، سرعت دینامیکی بالایی دارد. به همین دلیل برای هموارسازی توان خروجی سلول خورشیدی از آن استفاده شده است و در نهایت برای نشان‌دادن کارایی کنترل کننده پیش‌بین، سناریوهای مختلفی آزمایش شده است و همچنین نتایج کنترل کننده پیش‌بین با کنترل کننده PID مقایسه و نتایج ارائه شده است. ساختار کلی این مقاله به این صورت است: در بخش دوم، معادلات ریاضی عناصر سیستم قدرت و محدودیت‌های سیستم ارائه شده است. در بخش سوم، اهداف کنترل کننده پیش‌بین



شکل (۲): مدار معادل سلول خورشیدی

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad , \text{ with} \quad (1)$$

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i \cdot (T - T_{SIC})] \cdot E/E_r$$

$$I_d = I_s \cdot [\exp((q \cdot V_d)/(n \cdot k \cdot T)) - 1], \quad \text{and} \quad (2)$$

$$I_{sinit} = I_{sc} / (\exp((q \cdot V_{oc}) / (n \cdot k \cdot T_{init})) - 1)$$

$$I_s = I_{sinit} \cdot (T/T_{init})^3$$

$$\cdot \exp((q \cdot V_g)/(n \cdot k)) \cdot (1/T - 1/T_{init}) \quad (3)$$

$$\text{and } V_{oc} = V_{ocinit} \cdot (1 - 0.0037(T - T_{init}))$$

در آخر، جریان خروجی از سلول خورشیدی از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$I_{pv} = n_p \cdot I_{ph} - n_p \cdot I_{rs} \quad (4)$$

$$\cdot [\exp(q/(k \cdot T \cdot A) \cdot V_{pv}/n_s) - 1]$$

E	تابش خورشید
I_{pv}	جریان خروجی سلول
E_r	تابش خورشید مرجع
T	درجه حرارت سلول‌ها
I_s	جریان اشباع
I_{ph}	E و T جریان ناشی از
V_d	ولتاژ دیود
I_d	جریان دیود
K	ضریب بولتمن
R_s	مقدار معادل مقاومت سری
R_{sh}	مقاومت موازی
q	مقدار بار الکترون
n_p	تعداد سلول‌های موازی
n_s	تعداد سلول‌های سری
T_{init}	دمای اولیه سلول‌های خورشیدی

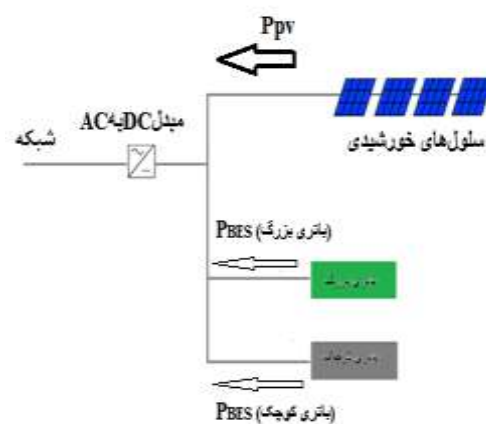
۲-۲- سیستم ذخیره‌سازی انرژی (باتری)

سیستم ذخیره‌سازی انرژی به دو قسمت مجزا تقسیم شده است: در قسمتی، باتری با ظرفیت بالا و سرعت کم، برای انتقال انرژی و قسمت دیگر، باتری با ظرفیت کم و سرعت بالا که برای هموارسازی توان خروجی سلول خورشیدی استفاده شده است. باتری بزرگ‌تر می‌تواند

توضیح داده شده و تابع هدف سیستم ارائه شده است. در بخش چهارم، استراتژی کنترل‌کننده پیشنهادی توضیح داده شده است. در بخش پنجم، پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده، ارائه شده است. در فصل ششم، نتایج ارائه شده است و در بخش هفتم نتیجه‌گیری شده است.

۲- مدل دینامیکی سیستم و محدودیت‌ها

شماتیک کلی سیستم شبیه‌سازی شده به صورت شکل ۱ است.



شکل (۱): شماتیک کلی سیستم

۲-۱- آرایه‌های سلول خورشیدی

اساس کارکرد سلول‌های خورشیدی ساده است. به این صورت که فوتون‌های خورشید با برخورد به نیمه‌هادی‌های موجود در این سلول‌ها و با دادن انرژی خود به الکترون‌های موجود در این نیمه‌هادی‌ها باعث پخش این الکترون‌ها به لایه‌های بالاتر می‌شوند که این امر موجب به‌وجود آمدن جریان الکتریکی می‌شود و به همین خاطر است که رابطه شدیدی بین شدت تابش خورشید و شدت جریان این نیمه‌هادی‌ها وجود دارد. با توجه به توضیح اساس عملکرد سلول‌های خورشیدی، این عملکرد شبیه به عملکرد دیودهای نیمه‌رسانا است، که می‌توان به کمک این دیودها یک سلول خورشیدی را به صورت شکل (۲) شبیه‌سازی کرد [۱۳].

۳- اهداف کنترل کننده پیشنهادی

سیستم کنترلی استفاده شده در این مقاله دو هدف دارد. هدف اولیه، هموارسازی توان خروجی سلول خورشیدی و مدیریت توان، و هدف دوم سیستم کنترلی، حداقل کردن سیکل شارژ و دشارژ باتری به منظور بیشینه کردن عمر باتری است. تابع هزینه کلی سیستم به شرح زیر است:

$$L(\hat{P}_{grid}(t), \hat{P}_{BES}(t)) = \varphi_{shift}(\hat{P}_{grid}(t)) + \varphi_{smooth}(\hat{P}_{grid}(t)) + \varphi_{cyc}(\hat{P}_{BES}(t)) \quad (10)$$

علامت \wedge بالای پارامترها نشان دهنده مقادیر پیش بینی شده کنترلی کننده است. ترم اول معادله بالا $\varphi_{shift}(\hat{P}_{grid}(t))$ نشان دهنده سود به دست آمده از فروش انرژی به شبکه است. از آنجا که تابع استفاده شده، تابع هزینه است و سعی در مینیم کردن آن است، پس برای اینکه سود حاصل از فروش انرژی به شبکه ماکزیمم شود، باید این عبارت با علامت منفی در تابع هزینه قرار گیرد که در واقع سود حاصل از فروش انرژی بیشینه شود. ترم اول رابطه (۱۰) را می توان به صورت رابطه (۱۱) بیان کرد.

$$\varphi_{shift}(\hat{P}_{grid}(t)) = C(t) \hat{P}_{grid}(t) \quad (11)$$

$C(t)$ قیمت لحظه ای انرژی و $\hat{P}_{grid}(t)$ انرژی انتقال یافته از طرف سلول خورشیدی و باتری به شبکه است. ترم دوم معادله تابع هزینه $\varphi_{smooth}(\hat{P}_{grid}(t))$ است که برای حداقل کردن نوسانات توان خروجی سلول خورشیدی است. این ترم، شامل مینیم کردن سه بخش می شود: ماکزیمم تغییرات، شیب و انحنای توان خروجی.

$$\begin{aligned} \varphi_{smooth}(\hat{P}_{grid}(t)) = & \alpha_{range} (\max \hat{P}_{grid} - \min \hat{P}_{grid}) \\ & + \alpha_{diff} |\hat{P}_{grid}(t) - \hat{P}_{grid}(t-1)| \\ & + \alpha_{curv} [(\hat{P}_{grid}(t-1) \\ & - 2\hat{P}_{grid}(t) + \hat{P}_{grid}(t+1))]^2 \end{aligned} \quad (12)$$

ضرایب وزن دهی هستند. α_{curve} و α_{range} و α_{diff} سوم تابع هزینه $\varphi_{cyc}(\hat{P}_{BES}(t))$ مربوط به حداقل کردن سیکل شارژ و دشارژ مربوط به باتری ها است که می توان به صورت رابطه (۱۳) بیان کرد.

البته رابطه (۱۳) باید برای هردو باتری نوشته شود.

انرژی را در خود ذخیره کند و در ساعاتی که قیمت انرژی بالاست به شبکه بفروشد و یا در مواقعی که مشکلی در شبکه به وجود آمده است و شبکه نمی تواند انرژی مصرفی را تأمین کند به شبکه کمک کند. از باتری کوچک هم، برای هموارسازی توان خروجی سلول خورشیدی استفاده شده است. محدودیت شارژ و دشارژ برای باتری های استفاده شده در سیستم شبیه سازی به شرح زیر است [۱۴].

$$-D_{BES}^{max} \leq \hat{P}_{BES} \leq C_{BES}^{max} \quad (5)$$

معادله ۵ باید برای هر کدام از باتری ها در نظر گرفته شود D_{BES}^{max} نرخ دشارژ باتری، C_{BES}^{max} نرخ شارژ باتری، $\hat{P}_{BES}(t)$ توان ورودی به باتری است. معادله حالت مربوط به باتری ها:

$$Q_{BES}(t+1) = \delta_{BES}^q Q_{BES}(t) + \delta_{BES}^p P_{BES}(t) \quad (6)$$

$P_{BES}(t)$ توان ورودی به باتری در زمان t است. δ_{BES}^p و δ_{BES}^q اعدادی بین $[0,1]$ هستند که ضرایب ذخیره سازی و شارژ باتری هستند. در رابطه (۶) مقدار $Q_{BES}(t)$ باید در محدوده تعریف شده برای باتری باشد.

$$Q_{BES}^{min} Q_{BES}^{cup} \leq Q_{BES}(t) \leq Q_{BES}^{max} Q_{BES}^{cup} \quad (7)$$

Q_{BES}^{min} و Q_{BES}^{max} مقادیری بین $[0,1]$ هستند.

۲-۳- اتصال به شبکه

باتری و سلول خورشیدی و شبکه هر سه در نقطه مشترکی به هم متصل شده اند که در این نقطه مشترک همواره باید رابطه (۸) برقرار باشد:

$$P_{grid}(t) = P_{pv}(t) + 1^T \hat{P}_{BES}(t) \quad (8)$$

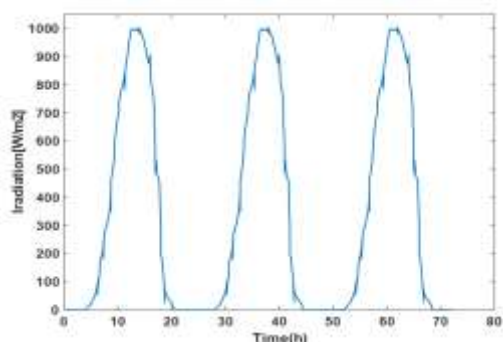
$P_{grid}(t)$ توان محاسبه شده در نقطه مشترک در زمان t است. که باید در بازه مشخص شده باشد که این بازه را ظرفیت خطوط انتقال مشخص می کنند. مقدار این محدودیت در رابطه (۹) نشان داده شده است و منظور از ترم 1^T در معادله ۸ ماتریسی 1×2 است که برای جمع کردن توان های مربوط به هردو باتری استفاده شده است.

$$|P_{grid}(T)| \leq P_{grid}^{max} \quad (9)$$

پیش‌بینی شده است. عبارت ۲۰ برای این اضافه شده است که در آخر هر پله زمانی، احیاناً انرژی داخل باتری، خالی نشود؛ یعنی در آخر هر پله زمانی، انرژی داخل باتری بزرگ‌تر یا مساوی q_{final} شود که این مقدار برابر با $0/2 Q_{cap}$ است. در این مقاله سعی شده است که کارایی کنترل‌کننده پیش‌بین در کنترل‌کردن سیستم ترکیبی قدرت نشان داده شود؛ به همین دلیل برای معرفی دینامیک سیستم از معادلات پیچیده استفاده نشده است. کنترل‌کننده پیش‌بین بدون سعی و خطا و به‌طور مستقیم مسئله را حل کرده است؛ برای همین از سرعت بالایی برخوردار است. از مزیت‌های دیگر کنترل‌کننده پیش‌بین این است که تنها به اطلاعات محلی احتیاج دارد و نیازی به داشتن اطلاعات از کل سیستم ندارد.

۵- پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده

ساختار کلی سیستم شبیه‌سازی شده در متلب به‌صورت شکل (۳) است. برای نگه‌داشتن سلول‌های خورشیدی استفاده شده در ماکزیمم توان، همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است از کنترل‌کننده اغتشاش و مشاهده استفاده شده است. سیستم کنترل‌کننده اغتشاش و مشاهده با تغییر سیکل وظیفه، سعی در نگه‌داشتن نقطه کار سلول خورشیدی در ماکزیمم مکان خود را دارد. شکل (۵) مدل تابش استفاده شده برای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل (۵): نمودار تابش

تغییرات سیکل وظیفه به‌صورت شکل (۶) است.

ضریب وزن‌دهی است.

$$\varphi_{cyc}(\hat{P}_{BES}(t)) = \alpha_{(BES,cyc)} |P_{BES}(t) - P_{BES}(t-1)| \quad (13)$$

۴- استراتژی کنترل‌کننده پیشنهادی

استراتژی کنترل‌کننده پیشنهادی در این مقاله به این‌گونه است که براساس اطلاعات موجود در زمان T ، (برای مثال اطلاعات مربوط به پارامترهای مختلف سیستم قدرت نظیر کانورترها و محدودیت‌های خطوط انتقال و سیگنال قیمت و...) با توجه به معادله حالت سیستم مقادیر مجهول را پیش‌بینی می‌کند و براساس پیش‌بینی‌ها، تابع هدف را مینیمم می‌کند و انرژی بهینه‌ای که در هر باتری باید باشد را به دست می‌آورد [۱۵-۱۸].

کنترل‌کننده پیش‌بین، باید تابع هزینه به‌دست‌آمده از بخش اهداف را در هر پله زمانی و با توجه به محدودیت‌های مد نظر مینیمم‌سازی کند و این به شرح زیر است:

با توجه به:

$$(\min)_{P_{grid}(\tau), P_{BES}(\tau)} \sum_{t=T}^{t+T-1} L((\hat{P}_{grid}(t)), (\hat{P}_{BES}(t))) \quad (14)$$

$$\hat{P}_{grid}(T) + \hat{P}_{pv}(T) + 1^T \hat{P}_{BES}(T) = 0 \quad (15)$$

$$|P_{grid}(T)| \leq P_{grid}^{max} \quad (16)$$

$$q_{BES}^-(t+1) = \delta_{BES}^d \hat{q}_{BES}^-(t) + (\delta_{BES}^c) (\hat{P}_{BES}(t))_+ + (1/\delta_{BES}^d) (\hat{P}_{BES}(t))_- \quad (17)$$

$$Q_{BES}^{min} Q_{BES}^{cap} \leq q_{BES}^-(t) \leq Q_{BES}^{max} Q_{BES}^{cap} \quad (18)$$

$$-D_{BES}^{max} \leq \hat{P}_{BES}(t) \leq C_{BES}^{max} \quad (19)$$

$$\hat{q}(t+\tau) \geq q_{final} \quad (20)$$

منظور از زیروند + و - در معادلات بالا به شرح زیر است.

$$(Z)_+ = \max(0, Z) \text{ و } (Z)_- = \min(0, Z) \quad (21)$$

علامت ^ در معادلات مذکور نشان‌دهنده متغیرهای

سلول خورشیدی و باتری به شبکه خط انتقال داری محدودیت است؛ یعنی خط انتقال، توانایی انتقال مقدار مشخصی از انرژی را دارد که در شبیه سازی $P_{grid}^{max} = 500 \text{ KW}$ در نظر گرفته شده است.

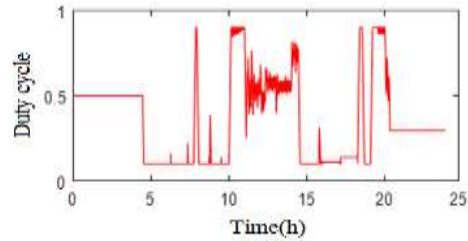
۶- نتایج

برای نشان دادن توانایی های کنترل کننده پیشنهادی در کنترل سیستم ترکیبی سلول خورشیدی و باتری در این بخش، نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم در متلب ارائه شده است. برای بررسی بهتر عملکرد کنترل کننده پیش بین، سناریوهای مختلفی از لحاظ استراتژی کنترلی بررسی شده است. برای مقایسه سود حاصل از فروش انرژی به شبکه، می توان سطح زیر نمودار $C(t)P_{grid}(t)$ را از رابطه (۲۲) حساب کرد [۱۳]:

$$\varphi_{shift} = \sum_{t=1}^{TF-1} \frac{1}{2} (C(t)P_{grid}(t) + C(t+1)P_{grid}(t+1)) dt \quad (22)$$

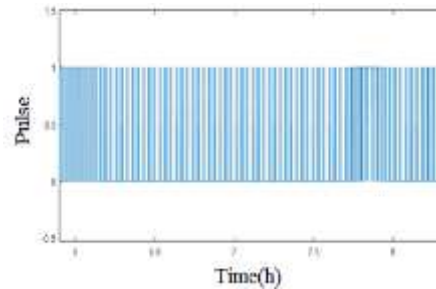
مهم ترین وظیفه کنترل کننده، هموارسازی توان خروجی سیستم سلول خورشیدی است. معیار مناسبی که بتوان عملکرد کنترل کننده را در این زمینه بررسی کرد در رابطه (۲۳) ارائه شده است.

$$\varphi_{smooth} = \frac{\sum_{t=1}^{TF-1} |P_{grid}(t+1) - P_{grid}(t)|}{\sum_{t=1}^{TF-1} |P_{pv}(t+1) - P_{pv}(t)|} \quad (23)$$



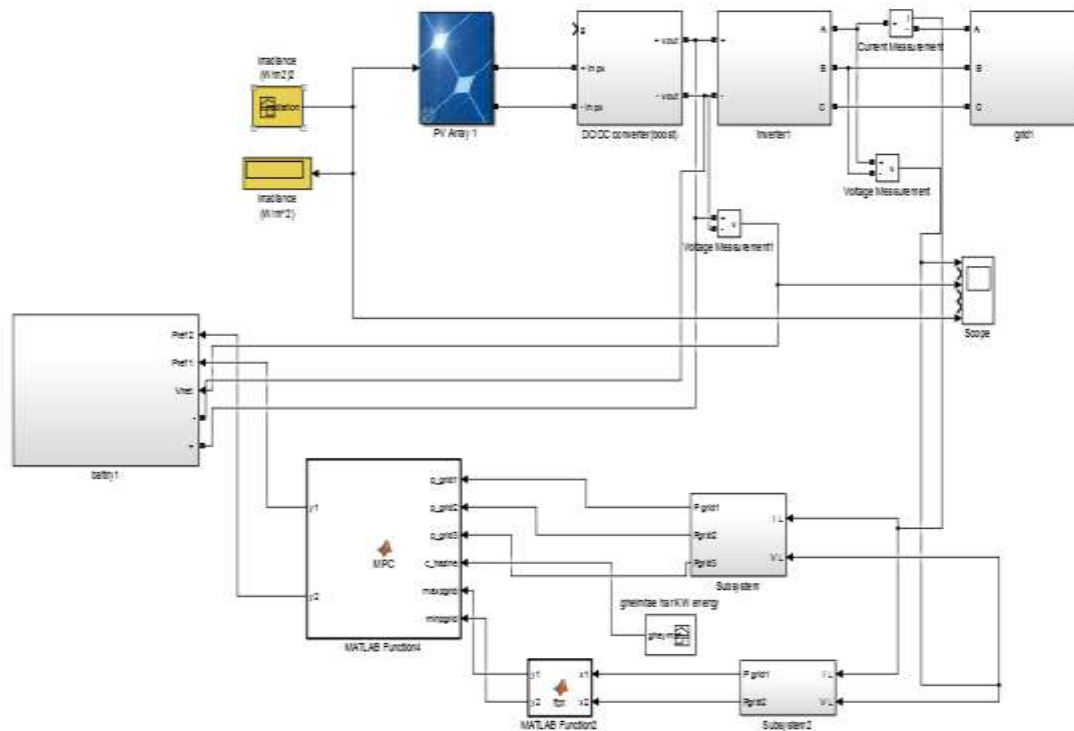
شکل (۶): تغییرات سیکل وظیفه

و پالس ایجاد شده برای کنترل مبدل DC/DC که با توجه به سیکل وظیفه ساخته شده به صورت شکل (۷) است.



شکل (۷): پالس اعمالی به مبدل DC/DC

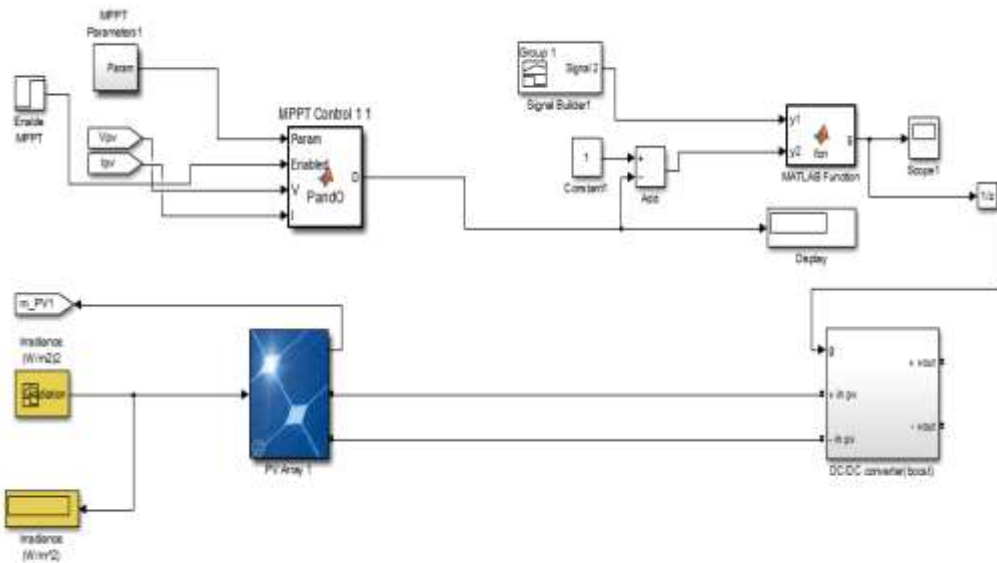
در این مقاله سیستم فتوولتاییک دارای توان 380 kW در ماکزیمم تابش است. باتری های استفاده شده در سیستم شبیه سازی شده دارای توان های 500 kW و 250 kW هستند و ظرفیت 1000 kWh و 180 kWh هستند. نرخ شارژ و دشارژ هر باتری C_{BES}^{max} و D_{BES}^{max} برابر در نظر گرفته شده است. ضریب ذخیره سازی برای هر دو باتری، یک در نظر گرفته شده است. و مقدار اولیه انرژی داخل هر باتری برابر با 50% انرژی اولیه نامی هر باتری در نظر گرفته شده است. مشخصات کامل باتری ها در جدول (۱) آمده است. تفاوت اساسی بین دو باتری در سرعت انتقال انرژی به علت تفاوت در تکنولوژی ساخت است؛ البته این تفاوت باعث بالاتر رفتن هزینه تمام شده باتری هم می شود. در نقطه اتصال



شکل (۳): سیستم شبیه‌سازی شده در متلب

جدول (۱): مشخصات باتری‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی

پارامتر	توضیح	مقدار
$D_{BES}^{max} = C_{BES}^{max}$	ماکزیمم و مینیمم نرخ شارژ و دشارژ باتری بزرگ	500kW
$D_{BES}^{max} = C_{BES}^{max}$	ماکزیمم و مینیمم نرخ شارژ و دشارژ باتری کوچک	250kW
Q_{BES}^{cap}	ظرفیت نامی باتری بزرگ	1000kWh
Q_{BES}^{cap}	ظرفیت نامی باتری کوچک	180kWh
δ_{BES}^c	ضریب شارژ باتری بزرگ	۰/۷
δ_{BES}^c	ضریب شارژ باتری کوچک	۰/۵۹
δ_{BES}^d	ضریب ذخیره‌سازی باتری بزرگ	۱
δ_{BES}^d	ضریب ذخیره‌سازی باتری کوچک	۱
δ_{BES}^d	ضریب دشارژ باتری بزرگ	۱
δ_{BES}^d	ضریب دشارژ باتری کوچک	۱



شکل (۴): سیستم تعقیب کننده ماکزیم توان سلول خورشیدی

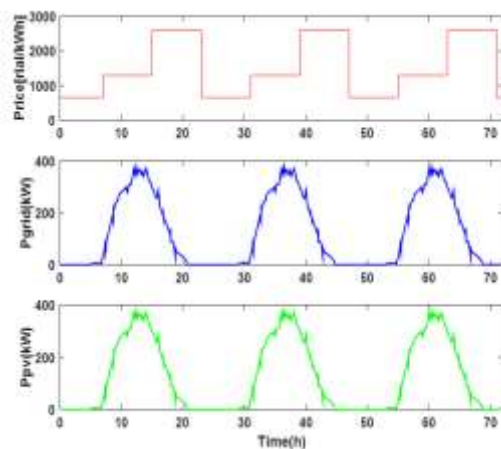
سناریوی ۱

در این حالت، سلول خورشیدی بدون باتری و بدون هیچ کنترل کننده‌ای به شبکه وصل است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم در این حالت، در شکل (۸) آورده شده است. مقادیر معیارهای عملکرد در این حالت به شرح زیر است.

$$\varphi_{shift} = \sum_{t=1}^{Tf-1} \frac{1}{2} (C(t)P_{grid}(t) + C(t+1)P_{grid}(t+1)) dt = 6446499.9 \quad (24)$$

$$\varphi_{smooth} = \frac{\sum_{t=1}^{Tf-1} |P_{grid}(t+1) - P_{grid}(t)|}{\sum_{t=1}^{Tf-1} |P_{pv}(t+1) - P_{pv}(t)|} = 1 \quad (25)$$

1



شکل (۸): نمودار هزینه، توان خروجی شبکه، توان تولیدی

سلول خورشیدی مربوط به سناریوی اول

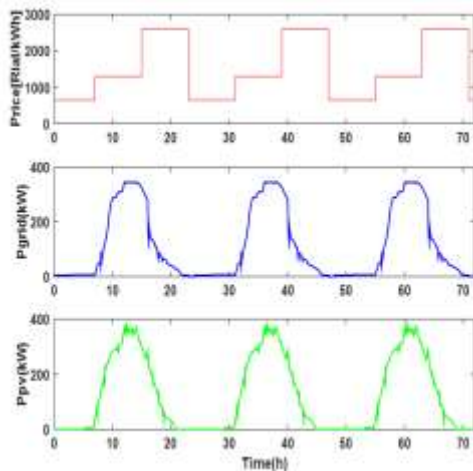
سناریوی ۲

در این حالت، در تابع هدف کنترلی، تنها هدف، هموارسازی توان خروجی سلول خورشیدی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم در این حالت، در شکل (۹) آورده شده است. مقادیر معیارهای عملکرد در این حالت به شرح زیر است.

$$\varphi_{shift} = \sum_{t=1}^{Tf-1} \frac{1}{2} (C(t)P_{grid}(t) + C(t+1)P_{grid}(t+1)) dt = 6708597.9 \quad (26)$$

$$\varphi_{smooth} = \frac{\sum_{t=1}^{Tf-1} |C(t)P_{grid}(t) + C(t+1)P_{grid}(t+1)|}{\sum_{t=1}^{Tf-1} |P_{pv}(t+1) - P_{pv}(t)|} = 0.3043 \quad (27)$$

0.3043



شکل (۹): نمودار هزینه، توان خروجی شبکه، توان تولیدی

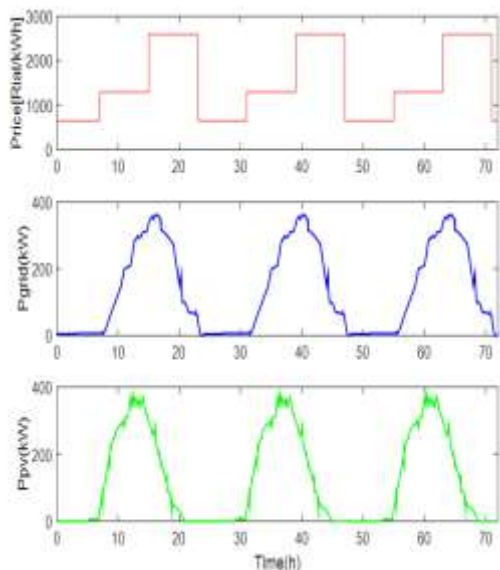
سلول خورشیدی مربوط به سناریوی دوم

$$\varphi_{shift} = \sum_{t=1}^{T-1} \frac{1}{2} (C(t)P_{grid}(t) + C(t+1)P_{grid}(t+1)) dt \quad (30)$$

= 8358515

$$\varphi_{smooth} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} |C(t)P_{grid}(t) + C(t+1)P_{grid}(t+1)|}{\sum_{t=1}^{T-1} |P_{pv}(t+1) - P_{pv}(t)|} = \quad (31)$$

0.6253



شکل (۱۱): نمودار هزینه، توان خروجی شبکه، توان تولیدی سلول خورشیدی مربوط به سناریوی چهارم

سناریوی ۵

در این حالت، اهداف کنترلی، دربردارنده هموارسازی و ماکزیمم‌سازی سود حاصل از فروش انرژی به شبکه و مینیمم‌سازی سیکل شارژ و دشارژ باتری است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم در این حالت، در شکل (۱۲) آورده شده است. مقادیر معیارهای عملکرد در این حالت به شرح زیر است.

$$\varphi_{shift} = \sum_{t=1}^{T-1} \frac{1}{2} (C(t)P_{grid}(t) + C(t+1)P_{grid}(t+1)) dt \quad (32)$$

= 8053911

سناریوی ۳

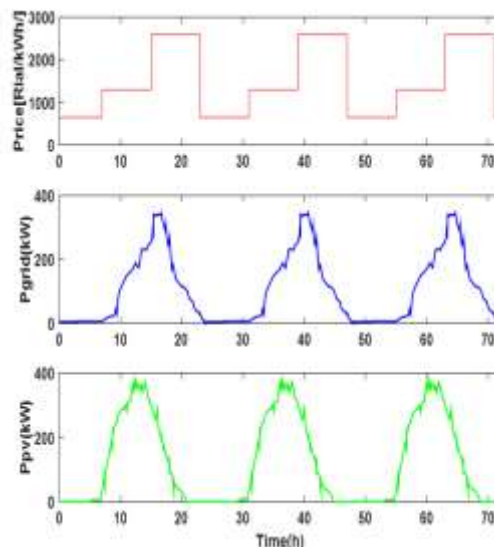
در این حالت، هدف سیستم کنترل‌کننده، بیشینه‌سازی سود حاصل از فروش انرژی به شبکه است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این حالت، در شکل (۱۰) آورده شده است. مقادیر معیارهای عملکرد در این حالت به شرح زیر است.

$$\varphi_{shift} = \sum_{t=1}^{T-1} \frac{1}{2} (C(t)P_{grid}(t) + C(t+1)P_{grid}(t+1)) dt = \quad (28)$$

10688832

$$\varphi_{smooth} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} |C(t)P_{grid}(t) + C(t+1)P_{grid}(t+1)|}{\sum_{t=1}^{T-1} |P_{pv}(t+1) - P_{pv}(t)|} = \quad (29)$$

1.3860



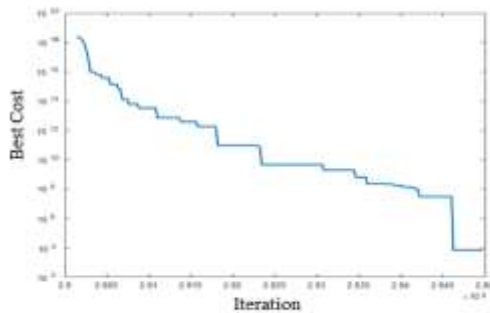
شکل (۱۰): نمودار هزینه، توان خروجی شبکه، توان تولیدی سلول خورشیدی مربوط به سناریوی سوم

سناریوی ۴

در این حالت، اهداف سناریوهای ۲ و ۳ را این بار با هم در نظر گرفتیم؛ یعنی هدف کنترل‌کننده در این حالت هموارسازی توان خروجی سلول خورشیدی و ماکزیمم‌سازی سود حاصل از فروش انرژی به شبکه است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم در این حالت، در شکل (۱۱) آورده شده است. مقادیر معیارهای عملکرد در این حالت به شرح زیر است.

$$L(\hat{P}_{grid}(t), \hat{P}_{BES}(t)) = 0.2411 \varphi_{shift}(P_{grid}(t)) + 0.2375 \varphi_{smooth}(\hat{P}_{grid}(t)) + 0.5204 \varphi_{cyc}(\hat{P}_{BES}(t)) \quad (35)$$

نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم در این حالت، در شکل (۱۴) آورده شده است.

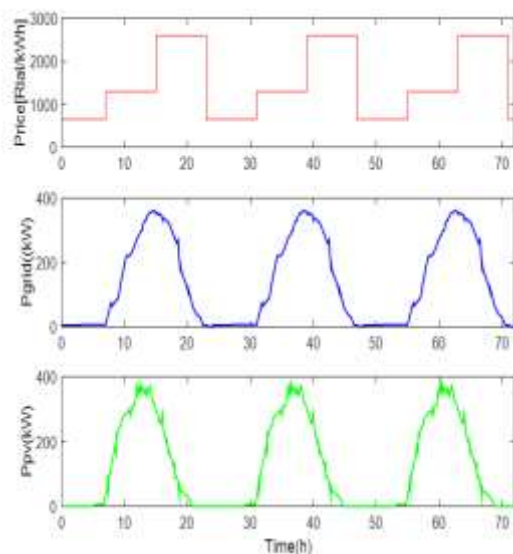


شکل (۱۳): نمودار همگرایی الگوریتم PSO

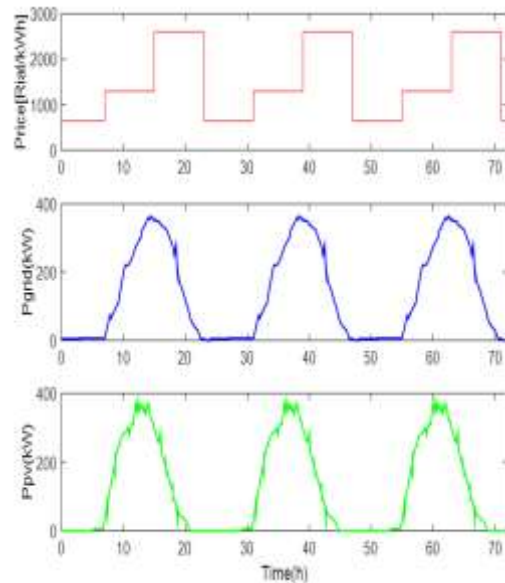
$$\varphi_{shift} = \sum_{t=1}^{TF-1} \frac{1}{2} (C(t)P_{grid}(t) + C(t+1)P_{grid}(t+1)) dt = 8188751 \quad (36)$$

$$\varphi_{smooth} = \frac{\sum_{t=1}^{TF-1} |C(t)P_{grid}(t) + C(t+1)P_{grid}(t+1)|}{\sum_{t=1}^{TF-1} |P_{pv}(t+1) - P_{pv}(t)|} = 0.6349 \quad (37)$$

مقادیر معیارهای عملکرد در این حالت به شرح زیر است:



شکل (۱۴): نمودار هزینه، توان خروجی شبکه، توان تولیدی سلول خورشیدی مربوط به سناریوی ششم



شکل (۱۲): نمودار هزینه، توان خروجی شبکه، توان تولیدی سلول خورشیدی مربوط به سناریوی پنجم

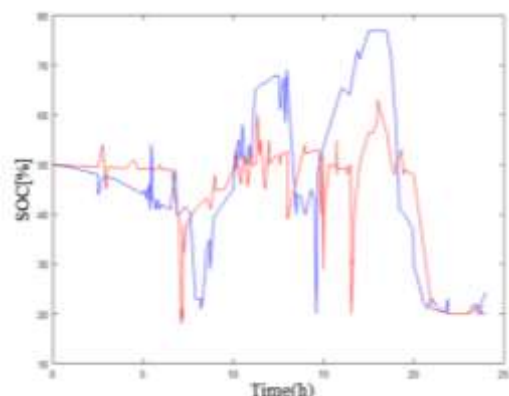
سناریوی ۶

در این حالت، اهداف کنترلی، دربردارنده هموارسازی و ماکزیم‌سازی سود حاصل از فروش انرژی به شبکه و مینیم‌سازی سیکل شارژ و دشارژ باتری‌ها است؛ ولی تفاوتی که با سناریوی ۵ دارد، این است که دیگر وزن این فاکتورها یکسان نیست. الگوریتم بهینه‌سازی ذرات که قسمتی از روند حل آن در شکل (۱۳) آورده شده است، حالت بهینه این ضرایب را به دست آورده است. با تعداد ۳۰۰۰ تکرار، مقدار بهینه ضرایب به دست آمد و ضرایب بهینه به این صورت است:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.2411 \\ a_2 &= 0.2375 \\ a_3 &= 0.5204 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\varphi_{smooth} = \frac{\sum_{t=1}^{TF-1} |C(t)P_{grid}(t) + C(t+1)P_{grid}(t+1)|}{\sum_{t=1}^{TF-1} |P_{pv}(t+1) - P_{pv}(t)|} = 0.6668 \quad (34)$$

درواقع، تابع هزینه سیستم با وزن‌های به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات به صورت رابطه (۳۵) می‌شود.



شکل (۱۶): نمودار درصد شارژ باتری‌ها با کنترل‌کننده PID (نمودار قرمز مربوط به باتری کوچک و نمودار آبی مربوط به باتری بزرگ است).

برای مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌ها در قسمت باتری می‌توان گفت که همه بر این موضع توافق دارند که عمر باتری به تعداد سیکل شارژ و دشارژ آن بسیار وابسته است. پس معیار مناسبی که برای مقایسه عملکرد باتری می‌توان استفاده کرد، سطح زیر منحنی $P_{BES}(t)$ است:

$$\varphi_{cyc} = \sum_{t=1}^{T-1} 1/2 |P_{BES}(t) + P_{BES}(t+1)| dt \quad (38)$$

جدول (۴): مقایسه کنترل‌کننده PID با پیش‌بین

کنترلر	MPC	PID
φ_{cyc}	۷۵۴/۴۸۶۳	۱۱۵۴/۰۴۲۹

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی جدید برای کنترل سیستم ترکیبی سلول خورشیدی و باتری متصل به شبکه الکتریکی با کنترل‌کننده پیش‌بین به‌منظور بهبود پاسخ دینامیکی و پارامترهای بهره‌برداری پیشنهاد شد که در آن، پارامترهای اقتصادی و فنی، هم‌زمان با هم در نظر گرفته شده است؛ همچنین نشان داده شده است که کنترل‌کننده پیشنهادی بدون نیاز به داشتن اطلاعات از کل سیستم قدرت و تنها با داشتن اطلاعات محلی، قادر به کنترل سیستم قدرت است. همچنین در این مقاله برای به‌دست‌آوردن نتایج بهینه از کنترل‌کننده پیشنهادی، ابتدا ضرایب وزنی تابع هدف به‌وسیله الگوریتم بهینه‌سازی ذرات به دست آمده است که

جدول (۲) مقایسه بین نتایج سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد.

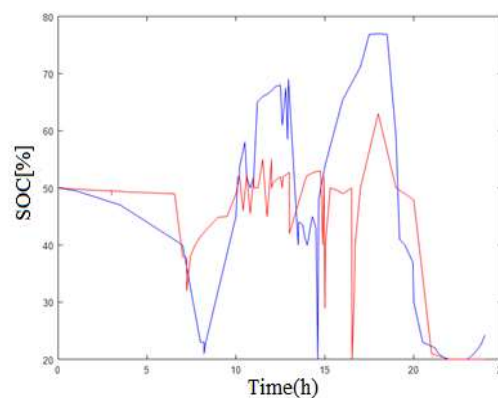
جدول (۲): مقایسه نتایج سناریوهای مختلف

سناریو(هدف سناریو)	φ_{shift}	φ_{smooth}
سناریوی اول	۶۴۴۶۴۹۹/۹	۱
سناریوی دوم	۶۷۰۸۵۹۷/۹	۰/۳۰۴۳
سناریوی سوم	10688832	۱/۳۸۶۰
سناریوی چهارم	8358515	۰/۶۲۵۳
سناریوی پنجم	8053911	۰/۶۶۶۸
سناریوی ششم	8188751	۰/۶۳۴۹

برای نشان‌دادن مزیت‌های کنترل‌کننده پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی سیستم با کنترل‌کننده پیش‌بین با نتایج به‌دست‌آمده با کنترل‌کننده PID مقایسه شده است (ضرایب بهینه کنترل‌کننده PID با روش زیگلر نیکولس به دست آمده است که مقادیر آن در جدول (۳) آورده شده است). شکل (۱۵) بیانگر نتایج کنترل‌کننده پیش‌بین و شکل (۱۶) بیانگر نتایج کنترل‌کننده PID از لحاظ درصد شارژ و دشارژ باتری‌ها هستند. در نمودارهای شکل (۱۵) و (۱۶)، نمودار قرمز برای باتری با ظرفیت کم و سرعت پاسخ بالا است و نمودار آبی برای باتری با ظرفیت بالا و سرعت پایین است.

جدول (۳): ضرایب بهینه کنترل‌کننده PID

ضریب تناسبی	ضریب انتگرالی	ضریب مشتق‌گیر
$K_p=۳۹/۴۲$	$T_i=۳/۰۷۷$	$T_d=۰/۷۶۹۲$



شکل (۱۵): نمودار درصد شارژ باتری‌ها با کنترل‌کننده پیشنهادی (نمودار قرمز مربوط به باتری کوچک و نمودار آبی مربوط به باتری بزرگ است).

- Optimal Control of a Battery Energy Storage System” pp. 16-20, June 2013.
- [11] Emilio P., Hector B., Néstor A., and Pedro R.” Predictive Power Control for PV Plants With Energy Storage” IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 4, No. 2, pp. 474-483, April 2013.
- [12] Muhammad K. “A model predictive control approach to the problem of wind power smoothing with controlled battery storage” Renewable Energy 35. pp. 1520 – 1526, 2010.
- [13] Trudie W., Haresh K., and Steve W. “Control and Optimization of Grid-Tied Photovoltaic Storage Systems Using Model Predictive Control” IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 2, pp. 2815-2820, March 2014.
- [14] Subudhi, B., Pradhan, R., “Review of MPPT Techniques for Photovoltaic Systems” Jan. 2013
- [15] Stephen B. and L. Vandenberghe, Convex Optimization. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2009.
- [16] M. Grant and Stephen B., CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming (Web Page and Software) [Online]. Available: <http://www.stanford.edu/~boyd/cvx/> Jul. 2008..
- [17] J. Mattingley and S. Boyd, CVXGEN: Automatic Convex Optimization Code Generation (web page and software) [Online]. Available: <http://cvxgen.com/> Apr. 2010.
- [18] J. Mattingley and S. Boyd, “Real-time convex optimization in signal processing,” IEEE Signal Process. Mag., Vol. 27, No. 3, pp. 50 – 61, 2010.
- تاکنون این‌گونه مطرح نشده است. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن‌ها، بر کارایی کنترل‌کننده پیشنهادی گواهی می‌دهد.
- ### مراجع
- [1] Rafael, S. and Pena, R, A.”Simulation of an isolated wind diesel system with battery energy storage”, Electric Power Systems Research, Vol. 81, No. 3, pp. 677-686, 2011.
- [2] Rafael, S. ”Simulation of a high penetration wind diesel system with a NI-CD battery energy storage”, 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 3-5 Nov Porto, pp. 4589- 4594, 2009.
- [3] Meisam, K.” Optimal Power Management in a Stand Alone Hybrid Power System Based on Photovoltaic, Fuel Cell and Battery” 25th International Power System Conference, Tehran, Iran, pp. 244-250, 2011.
- [4] Muhammad K. and Andrey V. Savkin” Model Predictive Control for Wind Power Generation Smoothing with Controlled Battery Storage” 48th IEEE Conference on Decision and Control, 2009.
- [5] Yubin, Jia, X. J. Liu “Distributed Model Predictive Control of Wind and Solar Generation System” Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. July pp. 28-30, 2014.
- [6] Amin, B. R. T, Arif S., ” Model Predictive Control of Hybrid Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Power Sources” International Conference on System Engineering and Technology, 2012.
- [7] Junbiao H., Student , Sarika K. S., and Jignesh S.,” Coordinated Predictive Control of a Wind/Battery Microgrid System” IEEE Journal of Emerging And Selected Topics In Power Electronics, Vol. 1, No. 4, December 2013.
- [8] Ebony M., Student Member, IEEE, Karanjit K., Member, IEEE, Marcelo E., Member, IEEE, Wei Z., Shuai Lu, , Nader S., , Karen B., “Optimal Control of Distributed Energy Resources using Model Predictive Control” Conference of IEEE, pp. 978-986, 2012.
- [9] WENG C., ZHANG X., SUN J.” Adaptive Model Predictive Control for Hybrid Electric Vehicles Power Management” Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference July26-28, 2013.
- [10] Borsche, T.; Ulbig, A.; Andersson, G. “Defining a Degradation Cost Function for