

بهره‌برداری و کنترل سیستم ترکیبی نیروگاه بادی با ژنراتورهای DFIG و ذخیره‌ساز انرژی

امیررضا قلی‌زاده^۱، دکتر محمد توکلی بینا^۲، دکتر مسعود علی‌اکبر گلکار^۳، آذین اصلانی^۴

^۱ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Amirreza.ghz@gmail.com

^۲ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، tavakoli@eetd.kntu.ac.ir

^۳ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، golkar@eetd.kntu.ac.ir

^۴ گروه صنعتی مپنا، aslani@mapna.com

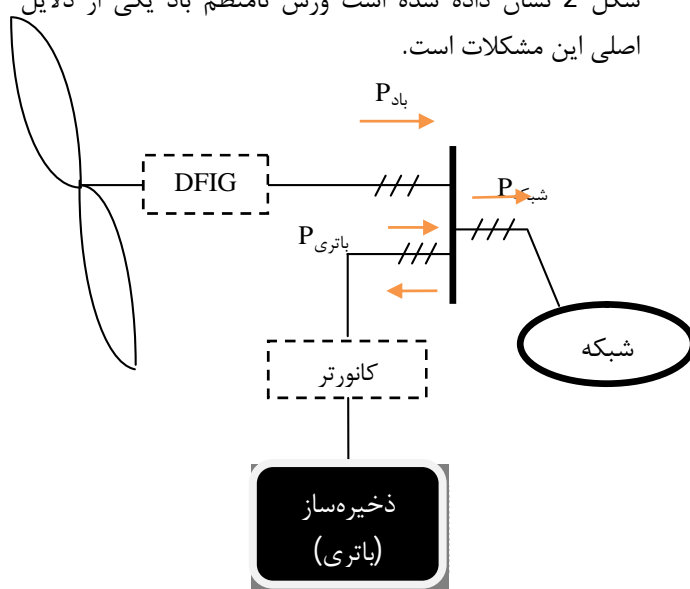
چکیده - نیروگاه بادی به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر توان نوسانی تولید می‌کند که به علت ذات متغیر باد است. این نوسانات توان تأثیرات مضر بر کیفیت توان، ولتاژ و فرکانس سیستم دارند. بکارگیری منابع ذخیره‌ساز انرژی به همراه نیروگاه‌های بادی می‌تواند این توان خروجی متغیر را یکنواخت سازد. بدین منظور تکنولوژی‌های مختلفی از ذخیره‌سازها و همچنین روش‌های گوناگونی برای اتصال آنها وجود دارد. در این مقاله نحوه تعیین سائز بهینه این ذخیره‌سازها و ادوات الکترونیک قدرت متصل کننده آنها به شبکه بررسی شده و سپس استراتژی کنترلی حلقه بسته‌ای برای اطمینان از عملکرد صحیح سیستم ترکیبی، ایجاد و اعمال می‌شود. سیستم موردنظر در محیط *MATLAB* پیاده‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی که بیانگر کارایی سیستم کنترلی در یکنواخت سازی توان خروجی است ارائه خواهد شد
کلیدواژه: نوسانات توان، یکنواخت‌سازی توان خروجی، SOC.

1- مقدمه

این موضوع که به علت ذات متغیر باد بوده و به شرایط هوایی بستگی دارد، موجب نوسانات در توان خروجی می‌شود. این نوسانات توان خروجی باعث انحراف ولتاژ و فرکانس در سیستم می‌گردد که بسیار مضر است. برای افزایش قابلیت اطمینان توان تولیدی، ضروری است که یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی در مزرعه بادی نصب شود تا بتوان بر این مشکلات فائق آمد. هدف از این کار اینست که توان تولیدی مازاد، هنگامیکه تولید بیش از مصرف است در این ذخیره‌سازها ذخیره شود تا در هنگام پیک مصرف یا در زمان‌هایی که در اثر عدم وزش باد تولید نیروگاه بادی با کمبود مواجه است، به شبکه تزریق گردد.

ادوات ذخیره‌ساز انرژی گران بوده و در زمان بهره‌برداری راندمان معینی دارند. از این رو تعیین ظرفیت نامی آنها برای دستیابی به طراحی بهینه سیستم، حائز اهمیت است [5]. از سوی دیگر برای یکنواخت‌سازی توان خروجی و حفظ وضعیت شارژ (SOC)^۱

در سالهای اخیر بهره‌برداری انرژی بادی در سراسر جهان به عنوان یک انرژی پاک و منبعی تمام نشدنی رشد فراوانی کرده است، [2] و این موضوع آنرا به یکی از مهم‌ترین گونه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، در نظر دولت‌ها، مراکز آکادمیک و صنایع بدل ساخته است [7]. از سوی دیگر اتصال مزارع بادی به شبکه قدرت با چالش‌های فراوانی روبروست؛ مانند کاهش نوسانات توان و از بین بردن آن، اتصال مزارع بادی بزرگ به شبکه‌های ضعیف، تضمین کیفیت توان، پیش‌بینی الگوی باد و غیره. همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است وزش نامنظم باد یکی از دلایل اصلی این مشکلات است.



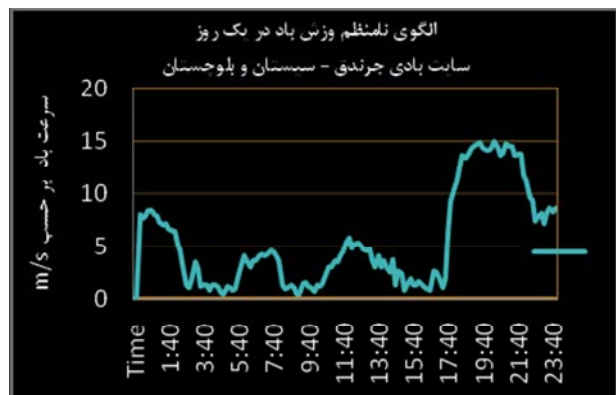
شکل 1) پیکربندی سیستم ترکیبی

¹ State of charge

ذخیره‌ساز، باید کنترل حلقه بسته‌ای بر اساس فیدبک خروجی بکار گرفته شود تا بهترین عملکرد حاصل شود.

دو نوع پیکربندی رایج برای اتصال ذخیره‌سازها به مزارع بادی وجود دارد. نخست به صورت مجتمع و دیگری به صورت توزیع شده. هردوی این پیکربندی‌ها در مرجع [4] مورد بررسی و موشکافی قرار گرفته‌اند. اما از آنجاییکه در حالت مجتمع عملکرد بهتری حاصل می‌شود این نحوه اتصال در اینجا مورد استفاده قرار گرفته است.

شکل 1 نشان‌دهنده سیستم مورد مطالعه و پیاده‌سازی شده است. در این سیستم از باتری‌های لید-اسید به عنوان ذخیره‌ساز استفاده شده است. یکی از دلایل این انتخاب، خودکفایی کشور در تولید اقتصادی این نوع باتری‌هاست. ذخیره‌ساز به سیستم قدرت در نقطه اتصال مشترک (PCC) با نیروگاه بادی متصل شده و از طریق یک کانورتر دوجتته شارژ و تخلیه می‌گردد.



2- ذخیره‌سازهای مورد استفاده در صنعت برق

ذخیره‌سازی انرژی امکان ایجاد توازن بین تولید و مصرف را در اختیار می‌گذارد. تکنولوژی‌های مختلفی برای این منظور موجوداند، که مهمترین آنها عبارتند از: ذخیره‌ساز هوای فشرده، پمپ ذخیره‌ای، ابرخازن‌ها، چرخ‌طیار و باتری. موضوع اصلی در انتخاب نوع ذخیره‌ساز به تکنولوژی به کار رفته در آن و قیمت آن مربوط است. [2]

در زیر به صورت اجمالی این ذخیره‌سازها معرفی شده و نقاط ضعف و قوت آنها بیان می‌گردد.

ذخیره‌ساز هوای فشرده Compressed air energy storage (CAES) روشی برای ذخیره‌سازی در ابعاد عظیم است. بدین منظور از معادن زیر زمینی بزرگ جهت نگهداری هوای فشرده استفاده می‌شود. در اکثر واحدهای مدرن این هوای فشرده با گاز طبیعی مخلوط شده و جهت چرخاندن توربین‌های متصل به

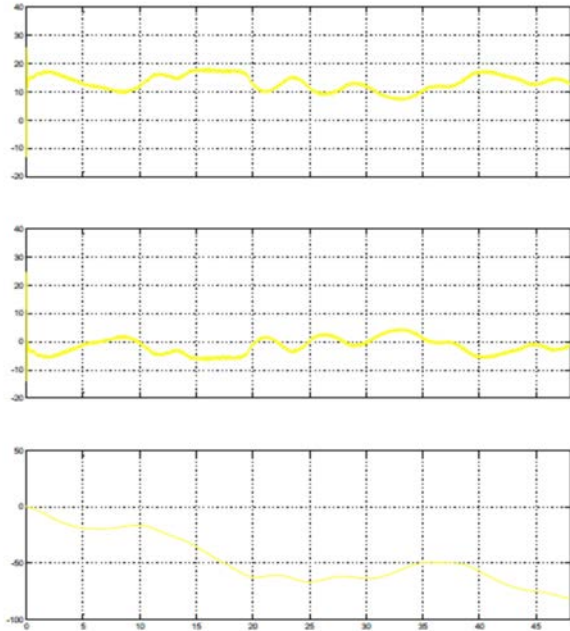
ژنراتورها به کار می‌رود. جایابی این سیستم بسیار خاص و مهم است و اغلب برای پروژه‌های در ابعاد بزرگ به کار می‌رود.

پمپ ذخیره‌ای (Pumped storage) یکی از رایج‌ترین شکل‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی است. در این روش آب از مخازن پایین دست به مخازن بالا دست پمپ می‌شود و با این کار انرژی الکتریکی به صورت انرژی پتانسیل در آب پمپ شده به ارتفاع ذخیره می‌شود. و در هنگام مورد نیاز دوباره آب به مخزن پایین دستی جاری می‌شود که در این بین توربین آبی را نیز می‌چرخاند و برق تولید می‌شود. این روش راندمانی در حدود 80 درصد دارد.

ابرخازن (Ultra-capacitor) یک نوع خازن الکتروشیمیایی است که در مقایسه با خازن‌های معمولی ظرفیت ذخیره‌سازی به مراتب بالایی دارد. این نوع خازن انرژی را در میدان الکتریکی مابین دو دی‌الکتریک ذخیره می‌سازد. از گونه‌های رایج ابرخازن‌ها می‌توان به خازن‌های الکتریکی دولایه (Electric double layer capacitor (EDLC)) اشاره کرد که چگالی توان بسیار بالا و راندمانی بیش از 95 درصد دارند. اما بسیار گران نیز هستند.

چرخ‌طیار (Flywheel) انرژی الکتریکی را از طریق تبدیل به انرژی جنبشی ذخیره می‌نماید. این عمل از طریق افزایش سرعت یک روتور و نگهداری انرژی به صورت انرژی چرخشی صورت می‌پذیرد. وقتی انرژی از آن گرفته می‌شود از سرعت روتور کاسته و هنگامیکه به آن انرژی داده می‌شود این سرعت افزایش می‌یابد. در مقایسه با باتری‌های لید-اسید، چرخ‌طیارها سرعت تخلیه بالاتری دارند، طول عمر بیشتر داشته و کم خطرتر می‌باشند. احتیاج بسیار کمی به تعمیرات و نگهداری دارند و برای کاربردهای پیشرفته مناسب می‌باشند. اما در حال حاضر نسبتاً گران بوده و ظرفیت ذخیره‌سازی آنها در مقایسه با سایر ذخیره‌سازها پایین است. با در دسترس قرار گرفتن انواع جدید آن و پیشرفت تکنیک‌های ساخت، انتظار می‌رود که این ذخیره‌سازها در آینده توانایی رقابت بیشتری با سایر ادوات داشته باشند.

باتری رایج‌ترین نوع ذخیره‌سازهای انرژی برای نیروگاه‌های ترکیبی انرژی‌های تجدیدپذیر است که تکنولوژی آن بیش برای 150 سال قدمت دارد. این باتری‌ها چندین نوع دارند که پر کاربردترین آنها لید-اسید (Lead-Acid) می‌باشد که نسبتاً ارزان بوده و احتیاجی به تعمیرات و نگهداری ندارد. تکنولوژی مربوط به این باتری‌ها به کمال و بلوغ رسیده و محدودیت‌ها، نقص و ایرادات فنی و همچنین تعمیرات و نگهداری آنها به خوبی شناخته شده و می‌توان در طراحی مدنظر قرار داده شوند [9]، از



Time offset: 0

شکل 4 روند تعیین ظرفیت مورد نیاز باتری

شکل نخست پروفیل توان خروجی نیروگاه بادی است. شکل دوم توان مورد نیاز باتری است، برای اینکه مجموع توان خروجی نیروگاه بادی و باتری (توان تحویلی به شبکه) مقداری ثابت باقی بماند. و شکل سوم انتگرال زمانی توان باتری است که نشان دهنده ظرفیت انرژی مورد نیاز باتری برای این الگوی باد است، که در هر دو مورد تعیین توان و انرژی باتری از روی نمودارهای مربوط، باید پیک نمودارها در نظر گرفته شود، (خواه مثبت، خواه منفی).

4- مبدل‌های الکترونیک قدرت

در توربین‌های بادی سرعت متغیر سرعت مکانیکی روتور و فرکانس الکتریکی شبکه بایستی از هم مجزا شوند. بدین منظور از ادوات الکترونیک قدرت استفاده می‌شود. در ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه (DFIG)، یک مبدل منبع ولتاژی پشت به پشت دوطرفه که از سویچ‌های IGBT استفاده می‌کند، این عمل را انجام می‌دهد [10].

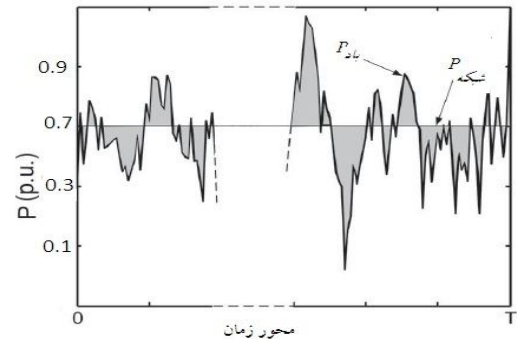
این رو این باتری‌ها را می‌توان برای اکثر کاربردها به کار گرفت. در [8] تکنولوژی مربوط به این باتری‌ها معرفی شده و اطلاعات مفیدی راجع به آنها ارائه شده است.

3- تعیین ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز

به طور کلی ظرفیت باتری توسط ظرفیت انرژی و توان نامی آن مشخص می‌گردد. ظرفیت انرژی توانایی باتری برای ذخیره‌سازی انرژی است و توان نامی تعیین کننده توانی است که باتری در بازه زمانی مشخص شارژ و یا تخلیه می‌تواند در خود ذخیره نماید یا به شبکه تحویل دهد [6].

بنابراین الگوی باد در تعیین سائز باتری نقش مهمی دارد، به این معنی که هرچه تغییرات باد بیشتر باشد ظرفیت باتری نیز باید افزایش یابد که این خود به مثابه افزایش هزینه‌های اقتصادی است. بنابر شکل 1 توان مورد نیاز باتری برای تبادل با شبکه در هر لحظه برابر است با (1).

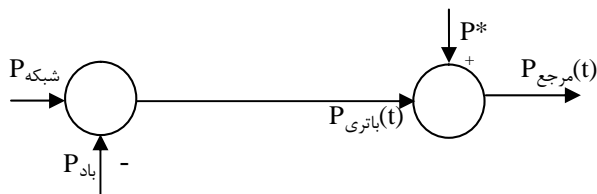
$$P_{\text{باتری}} = P_{\text{شبکه}} - P_{\text{باد}} \quad (1)$$



شکل 3 تفاوت توان تولیدی باد با توان مورد نیاز [6]

در حالت ایده‌آل، توان کاملاً یکنواخت و ثابت بهترین خروجی برای نیروگاه بادی است. با توجه به شکل 3 این مطلب را به صورت پایه‌ای می‌توان تشریح کرد. در این شکل پروفیل توان خروجی نیروگاه بادی با $P_{\text{باد}}$ نشان داده شده است. اگر بخواهیم در بهترین حالت نیروگاه بادی توان ثابتی برابر با 0.7 پیونیت به صورت مداوم به شبکه تزریق نماید، پس باتری باید ظرفیتی برابر با منطقه هاشورخورده (توسی رنگ) داشته باشد.

بنابراین با توجه به الگوهای پیش‌بینی باد و انجام شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن منابع ذخیره‌ساز، می‌توان ظرفیت انرژی و توان ذخیره‌ساز را بدست آورد، که در شکل 4 آمده است.



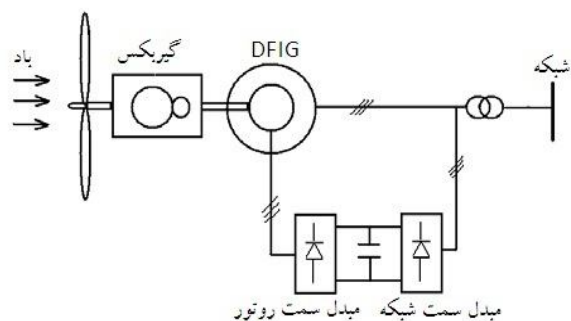
شکل 6 مرحله نخست روش کنترلی

از آن توان باتری بایستی با سیگنال تصحیح توان (P^*)، مقایسه شود تا در قدم بعد سیگنال مرجع توان بدست آید. از آنجاییکه توان خروجی نیروگاه بادی در اثر کلیدزنی دارای نوسانات فرکانس بالا روی شکل موج خروجی می‌باشد، ابتدا باید توان خروجی نیروگاه بادی را از یک فیلتر پایین‌گذر عبور داد تا این نوسانات فرکانس حذف شوند. مطابق با استاندارد بین‌المللی IEC 61400-21 که مربوط به مباحث کیفیت توان نیروگاه‌های بادی است، پیک توان را در بازه‌های زمانی 10 دقیقه‌ای باید در نظر گرفت. بنابراین ثابت زمانی این فیلتر را 600 ثانیه انتخاب می‌کنیم. سیگنال خروجی این فیلتر همان P_{bat} است (شکل 6). SOC باتری که نشان دهنده‌ی وضعیت شارژ باتری است، در حقیقت نسبت مقدار ظرفیت انرژی موجود باتری به کل ظرفیت آن است که به صورت درصد بیان می‌شود. این داده توسط سیستم مدیریت باتری (Battery management system, BMS) فراهم آورده می‌شود.

سیگنال تصحیح توان P^* ، در حقیقت سیگنال فیدبک دیگری است که مربوط به SOC باتری است. این حلقه داخلی که در شکل 7 نشان داده شده است، این اطمینان را حاصل می‌کند که وضعیت شارژ باتری درون محدوده مشخص باقی بماند. در غیر اینصورت چنانچه باتری زیر حد مجاز (که توسط سازنده مشخص می‌گردد) تخلیه گردد مواد فعال درون آن کاهش یافته و در نتیجه از عمر باتری کاسته می‌شود. این حدود را معمولاً مساوی ± 30 درصد ظرفیت باتری در نظر می‌گیرند. یعنی مطلوب این است که باتری درون محدوده 30% تا 70% ظرفیت خود شارژ و تخلیه شود. بنابراین این محدوده برای باتری اینگونه تعریف می‌شود: $E(1-2m)$ ، که 'm' همان مارجین شارژ و تخلیه است و 'E' انرژی باتری. ثابت زمانی شارژ و یا تخلیه با ماکزیمم توان باتری برابر با (2) است.

$$T = E(1-2m) / P_{\max \text{ باتری}} \quad (2)$$

این زمان بیشترین زمانی است که باتری می‌تواند بدون اینکه آسیبی ببیند با ماکزیمم توان، به تبادل انرژی با سیستم بپردازد.



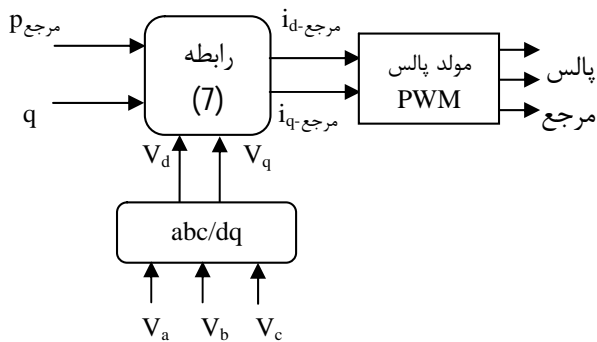
شکل 5 توربین بادی با ژنراتور دوسو تغذیه

در سیستم DFIG توان نامی کانورتر معمولاً $1/3$ توان نامی ژنراتور است. کانورتر با این توان برای کنترل سرعت ژنراتور در محدوده $+30\%$ تا -30% سرعت سنکرون کافیتست، و بدین طریق عملکرد سرعت متغیر این ژنراتور امکان پذیر می‌گردد. این کانورتر در شکل 5 قابل مشاهده است که شامل دو کانورتر منبع‌ولتاژی است، یکی به صورت یکسوساز و دیگری به عنوان اینورتر، که توسط خازن لینک DC به یکدیگر متصل می‌شوند. این خازن کنترل آنها را به صورت مستقل از هم امکان‌پذیر نموده و تلفات توان در هر سمت را جبران می‌نماید. کانورتر دیگری مد نظر است در شکل 1 قابل مشاهده می‌باشد که متصل‌کننده ذخیره‌ساز به سیستم بوده و به صورت مبدل AC/DC دو جهته می‌باشد. عامل اصلی در تعیین ظرفیت نامی این کانورتر، تعیین ظرفیت سویچ‌های آن است که خود به دو پارامتر مهم وابسته است؛ ماکزیمم ولتاژ سد معکوس و ماکزیمم جریان هدایت مستقیم. حاصلضرب این دو پارامتر ولت‌آمپر نامی هر سویچ را می‌دهد و مجموع توان همه سویچ‌ها، توان نامی کانورتر می‌باشد. در [4] این مباحث به صورت مشروح شرح داده شده است.

5- استراتژی کنترل

استراتژی کنترلی بر اساس دو هدف بنا شده است؛ نخست یکنواخت‌سازی توان خروجی و دیگری حفظ توازن و وضعیت شارژ باتری. بدین منظور کنترل حلقه‌بسته‌ای براساس فیدبک از هر دو سیگنال توان خروجی (P_{out}) و SOC باتری اعمال شده است [1]. شکل 6 اولین قدم در روش کنترلی پیشنهادی را نشان می‌دهد، که در آن مقدار توانی که باید به شبکه تحویل داده شود با توان خروجی نیروگاه بادی مقایسه می‌شود تا توان باتری (P_{bat}) بدست آید. این توان در شکل 2-4 آمده است.

در نهایت سیگنال‌های مرجع تولید شده باید به مولد پالس PWM داده شوند تا سیگنال‌های سویچینگ کانورتر را تولید نماید.

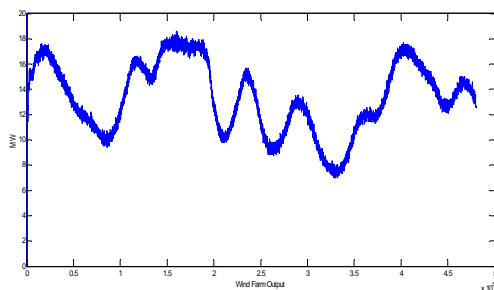


شکل 8 تولید پالس‌های مرجع سویچینگ کانورتر

کانورتر واسط ذخیره‌ساز از طریق راکتورهایی به باس مشترک سیستم (PCC) متصل می‌شود. این راکتورها نقش مهمی در حفظ پیوستگی جریان دارند. این راکتورها هنگام انتقال جریان از سویچ‌های بالایی به سویچ‌های پایینی، تغییرات لحظه‌ای جریان را از بین می‌برند. هرچه اندوکتانس این راکتورها بیشتر باشد تغییرات جریان کمتر بوده و هرچه اندازه آن کمتر باشد فرکانس سویچینگ می‌تواند بالاتر باشد. افزایش فرکانس سویچینگ مطلوب است اما تا آنجاییکه تلفات و هزینه را بیش از اندازه زیاد نکند. بنابراین برای انتخاب مقدار این راکتورها باید موازنه‌ای بین شرایط عملی ایجاد نمود [11].

6- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت نتایج پیاده‌سازی سیستم مورد مطالعه، در محیط نرم‌افزار MATLAB ارائه می‌شود. طبق الگوی باد داده شده، توان خروجی نیروگاه بدون حضور ذخیره‌سازها مطابق با شکل 9 می‌باشد.



شکل 9 توان خروجی نیروگاه بادی بدون ذخیره‌ساز انرژی

که برای حذف نوسانات فرکانس بالا و متوسط‌گیری در بازه‌های 10 دقیقه‌ای از فیلتر به صورت شکل 10 عبور داده می‌شود.

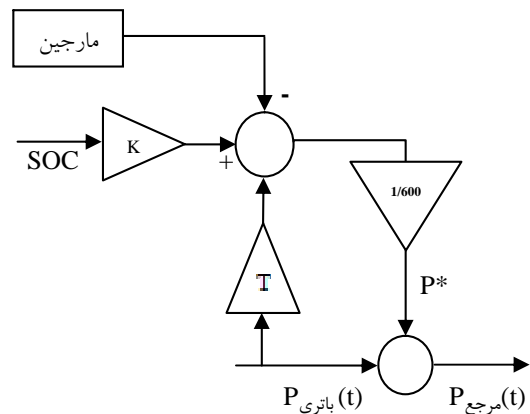
در شرایط کار نامی انرژی مبادله شده را به صورت (3) در نظر می‌گیریم.

$$E(t) = P_{\text{باتری}}(t) \cdot T \quad (3)$$

طبق توضیحات فوق، سیگنال P^* را به صورت (4) در نظر می‌گیریم.

$$P^* = k \cdot \text{SOC}(t) - E(t) - m \cdot E \quad (4)$$

در حقیقت سیگنال تصحیح توان عبارتست از: " انرژی موجود باقیمانده در باتری \pm انرژی موردنیاز برای تبادل با سیستم منهای مارجین انرژی". که در آن 'k' ضریبی است که SOC را از درصد به مقدار حقیقی تبدیل می‌کند.



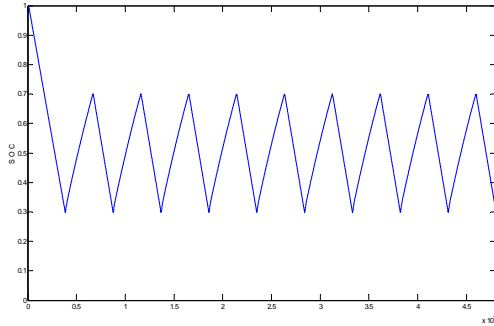
شکل 7 حلقه کنترل داخلی

در این مرحله از سیگنال مرجع توان برای تولید سیگنال‌های مرجع سویچینگ برای کانورتر استفاده می‌شود. بدین منظور نیاز است که از ولتاژهای خطی باس خروجی نیروگاه بادی، (V_a, V_b, V_c) نمونه‌گیری شود. در ادامه ولتاژهای نمونه‌گیری شده توسط تبدیل پارک به ولتاژهای V_d و V_q تبدیل می‌شوند. V_d و V_q به ترتیب مولفه‌های محور d و محور q سیگنال ولتاژ سه‌فاز می‌باشند. پس توان‌های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای برابر با (6) خواهند بود.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ -V_q & V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

توان راکتیو مصرفی نیروگاه بادی صفر در نظر گرفته می‌شود که این امر با وجود ژنراتورهای DFIG و عملکرد مناسب سیستم کنترلی کانورتر آن امکان‌پذیر است. از این رو در رابطه 6 برای بدست آوردن سیگنال‌های مرجع سویچینگ پس از اعمال تبدیل معکوس، تنها جایگزینی مرجع لازم است.

$$\begin{bmatrix} i_{d-ref} \\ i_{q-ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$



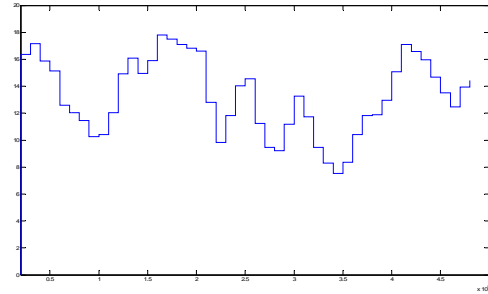
شکل 13 SOC باتری

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله با معرفی اثر واحدهای بادی بر روی قابلیت اطمینان شبکه، اثر بکارگیری واحدهای ذخیره‌ساز انرژی در بهبود کیفیت توان و افزایش قابلیت اطمینان ارائه شد. مزرعه بادی 18 مگاواتی با ژنراتورهای DFIG و باتری‌های ذخیره‌ساز لید-اسید (Lead-Acid) شبیه سازی شد و نتایج حاصل از آن نشان‌دهنده‌ی کارآمد بودن استراتژی کنترلی پیشنهادی می‌باشد.

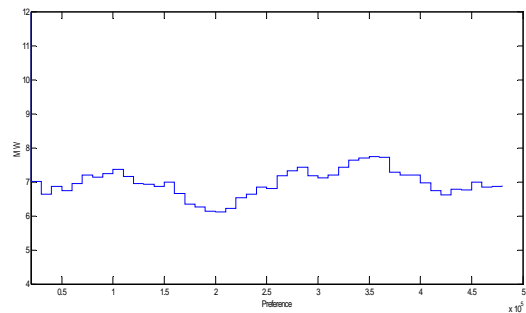
8- مراجع

- [1] [1] K. Yoshimoto, T. Nanahara, and G. Koshimizu, "New control method for regulating state-of-charge of a battery in hybrid wind power/battery energy storage system," in Proc. IEEE Power Syst. Conf. Expo., Oct. 29–Nov. 1, 2006, pp. 1244–1251.
- [2] S. Teleke, M. E. Baran, A. Q. Hung, S. Bhattacharya, L. Anderson, "Control strategy for battery energy storage for wind farm dispatching" IEEE Trans. Energy conversion., vol.24, no. 3, Sep.2009.
- [3] M. S. Lu, C. L. Chang, W. J. Lee, L. Wang, "Combining the wind power generation system with the energy storage equipment," IEEE Transaction on industry applications, vol. 45, no. 6, nov/dec 2009.
- [4] W. Li, G. Joos, "Comparison of energy storage system technologies and configurations in a wind farm," Power Syst. Conf. Expo. pp. 1280-1285. IEEE 2007.
- [5] A. Roy, S. B. Kedare, S. Bandyopadhyay, "Application of design space methodology for optimum sizing of a wind battery systems," ELSEVIER Journal, Applied Energy 86 (2009) 2690–2703.
- [6] X. Y. Wang, D. M. Vilathgamuwa, S. S. Choi, "Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm," IEEE Trans. On energy conversion, vol.23, no.3, sep. 2008.
- [7] Z. Jiang, X. Yu, "modeling and control of an integrated wind power generation and energy storage system," IEEE 2009.
- [8] M. D. Anderson, D. S. Carr, "Battery energy storage technologies," IEEE conf. vol. 81, no. 3, march 1993.
- [9] S. Muinda, "The state of the art of energy storage systems applicable to renewable energy hybrid power plants," october 2002.
- [10] J. G. Sloopweg, "Wind Power-Modeling and Impact on Power System Dynamics," ISBN 90-9017239-4, 2003.
- [11] M. Tavakoli Bina, E Pashajavid, "An efficient procedure to design passive LCL-filter for active power filters" Elsevier: electric power system research 79(2009)606-614
- [12] Renewable Energy Organization of Iran, suna, www.suna.org.ir



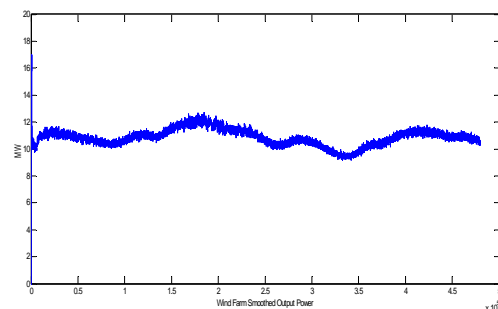
شکل 10 خروجی فیلتر پایین‌گذر

این سیگنال همان سیگنال شکل 9 است با این تفاوت که نوسانات فرکانس بالای آن حذف شده‌اند. طبق مراحل ذکر شده در بخش 5، سیگنال مرجع‌ای که برای ایجاد پالس‌های سویچینگ تولید شده است در شکل 11 آمده است.



شکل 11 سیگنال مرجع برای مولد پالس PWM

توان خروجی نیروگاه که یکنواخت‌تر شده است و طبق انتظار در همسایگی 0.7 پریونیت (نیروگاه 18 مگاواتی)، یعنی 11.5 مگاوات قرار دارد در شکل 12 آمده است.



شکل 12 توان خروجی نیروگاه بادی در حضور ذخیره‌ساز انرژی

مشخصه‌ی دیگری که در پروسه کنترلی مد نظر قرار داشت، وضعیت شارژ باتری بوده است. شکل 13 نشان‌دهنده‌ی SOC باتری است و همانطور که مشخص است استراتژی کنترلی در حفظ مناسب شارژ باتری درون حدود از پیش تعیین شده موفقیت کامل داشته است.