کاهش نوسانات توان خروجی منابع تولید پراکنده در ریزشبکهها با استفاده از سیستم ذخیرهساز انرژی باتری

محمدامین رجبی نژاد^ر، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ سید یوسف موسی زاده موسوی^۲، دانشجوی دکتری؛ علیرضا جلیلیان^۳، دانشیار ۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت تهران - ایران - ۱. ایران - n_rajabinezhad@alumni.iust.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت تهران - ایران - S_Y_Mosazade@iust.ac.ir

۳- قطب علمی اتوماسیون و بهرهبرداری از سیستمهای قدرت - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت تهران - jalilian@iust.ac.ir

چکیده: در منابع انرژی تجدیدپذیر مانند توربینهای بادی و سیستمهای انرژی خورشیدی، به دلیل آنکه توان تولیدی به صورت مستقیم وابسته به شرایط جوی و میزان وزش باد است، خروجی انرژی مزرعههای بادی و خورشیدی دارای ماهیتی تصادفی است. این ماهیت تصادفی می تواند منجر به مشکلاتی مانند نوسانات توان و فرکانس، کاهش کیفیت توان و قابلیت اطمینان در محل اتصال این منابع به شبکه شود. در این مقاله، یک ریزشبکهی متصل به شبکه مبتنی بر سیستم توربین بادی و فتوولتائیک با در نظر گرفتن شرایط جوی و تغییرات سرعت باد مورد بررسی قرار گرفته است. به مبکه شود. در این مقاله، یک ریزشبکهی منطور کاهش نوسانات توان و فرکانس، کاهش کیفیت توان و قابلیت اطمینان در محل اتصال این منابع به شبکه شود. در این مقاله، یک ریزشبکهی منطور کاهش نوسانات توان، یک سیستم ذخیره ساز انرژی باتری به کار گرفته شده است. سیستم کنترل ذخیره ساز انرژی باتری، دارای سه بخش است. به واسطه دو سطح کنترلی اول، توان مرجع برای میراسازی نوسانات توان سیستمهای تولید پراکنده محاسبه میشود. فرآیی مدارای موان مرجع با در نظرگرفته شده است. سیستم کنترل ذخیره ساز انرژی باتری، دارای سه بخش است. در نظرداشتن عمر معای دول ان مرجع برای میراسازی نوسانات توان سیستم های تولید پراکنده محاسبه می شود. فرآین محاسبه توان مرجع با در نظرداشت. در محل اتصال مرجع تولید شده به سیستم کنترلی پیشنهادی میداست. و توانات توان سیستمهای تولید پراکنده محاسبه می شود. فرآیند محاسبه توان مرجع با در نظرداشتن عمر معید سیستم ذخیره ساز انرژی باتری به شبکه داده می شود. جهت صحت سنجی کاربرد سیستم ذخیره ساز انرژی باتری جهت کنترلی میان تولید مرایز باتری به شبکه داده می شود. جهت صحت سنجی کاربرد سیستم ذخیره ساز انرژی باتری جهت کنور این وسانات توان منابع تولید پراکنده شبیهادی میران کارایی ولیان توان مربی تولید پراکنده شیستمهای تولیدی سیستمهای انده می مود. به قونهای می تولی تولی کربرد سیستم ذخیره از انرژی باتری جهت کنترل میرای رایز رایزای مولی ایزای مرامای گرونهای کربرد سیستم کربرلی پر مراین کربی سیستم کنوری باتری موست کاهش نوسانات توان منابع تولید پراکنده شاین می از مینا مرجع تولید می گرد، به گونهای که محتوای هارمونیکی نوسانات فر کانس میرای رایز میرای کاهش نوستم مربی گرویی میز مرمای مرده در تاین می مول ای مرایز مولیات توان می کرای که محتوای هارمهای

واژههای کلیدی: توربین بادی، ذخیرهسازه انرژی باتری، کاهش نوسانات توان، منابع تولید پراکنده، ریزشبکهها، سیستم فتوولتائیک

Smoothing Output Power Fluctuations of DGs in Microgrids Using Battery Energy Storage System

Mohammad Amin Rajabinezhad¹, MSc student; Seyyed Yousef Mousazadeh², PhD Student; Alireza Jalilian³, Associate Professor

1- Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: M_Rajabinezhad@alumni.iust.ac.ir

2- Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: S_Y_Mosazade@iust.ac.ir

3- Iran University of Science and Technology, Excellent center of power and automation, Tehran, Iran, Email: Jalilian@iust.ac.ir

Abstract: In distributed generations (DG) such as wind turbines (WT) and photovoltaic systems (PV), since power production is directly dependent on weather conditions and wind speed, their powers have an intermittent nature. This intermittent characteristic can lead to power fluctuation, frequency deviation, reduction of power quality and reliability indexes at the Point of Common Coupling (PCC). In this paper, a grid-tied microgrid including WT and PV is studied and the effect of weather conditions and wind speed changes on power fluctuation and frequency deviatiom is investigated. In order to smooth the power fluctuations, a battery energy storage system (BESS) is used. Control system of this BESS consists of three control levels. Through the first two control levels, the DGs reference power is calculated aiming to smooth the network power. Effective life and protection of the BESS is considered in reference power calculation process. Afterward, the generated reference power is injected to the grid proper control system of voltage source converter connecting battery storage to PCC. In order to validate the effectiveness of BESS control system for smoothing power fluctuations of DGs, simulations studies have been done in MATLAB/ Simulink software. The results confirm that the proposed BESS control system is capable to reduce the output power fluctuations of DGs, Such a way that the average frequency of the fluctuations harmonic content reduce from 15.5 to 5.4 percent.

Keywords: Battery energy storage system, Distributed generation, Photovoltaic System, Power fluctuation smoothing, Mcrogrids, Wind turbines.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۲ و ۱۳۹۶/۰۵/۱۸ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۵۷ و ۱۳۹۶/۰۵/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۷ نامنی نویسنده مسئول: ایران – تهران – نارمک – دانشگاه علم و صنعت ایران – دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

ادامه روند رشد بارهای الکتریکی و افزایش توان انتقالی بین شبکههای بزرگ، منجر به پیچیدگی و کاهش قابلیت اطمینان عملکرد سیستمهای قدرت شدهاست. مقدار توان تولیدی و نحوه انتقال آن پاسخگوی رشد فزاینده تقاضای انرژی الکتریکی بوده؛ لذا جهت کاهش مشکلات بیان شده ایدهی استفاده از منابع تولید پراکنده مطرح شده است [۱]. همزمان با رشد و توسعه منابع تولید پراکنده شبکههای فشار ضعیف معمولی نیز از حالت غیرفعال به حالت فعال تغییر ساختار دادهاند. شبکه فعالی که در آن فرآیند تولید، توزیع و مصرف انرژی به صورت کنترل شده اجرا انرژی تجدیدپذیر، سیستمههای ذخیره کننده انرژی (معمولاً) و بارهای کنترل شده و کنترل نشده است. منابع تولید انرژی و تجهیزات ذخیرهساز به طور مستقیم غالباً از طریق ادوات الکترونیک قدرت مورد بهره برداری قرار می گیرند [۳].

به دلیل ماهیت تصادفی توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، توان خروجی این منابع نوسانی است [۵،۴]؛ که می تواند باعث کاهش کیفیت توان تولیدی و بازده عملکرد سیستم شود. به خصوص در مواردی که ریز شبکه مستقل و مانند یک سیستم مجزا عمل میکند. این ماهیت تصادفی می تواند منجر به مشکلاتی مانند، نوسانات توان و فرکانس و نیز کاهش کیفیت توان و قابلیت اطمینان در محل اتصال این منابع به شبکه شود [۳]. مقابله با مشکلاتی از قبیل استفاده روزافزون انرژی متغیر تجدیدپذیر، نیازمند روشهای جبرانسازی برای کاهش نوسانات توان و پایدارسازی فرکانس سیستم است. در این راستا، سیستمهای ذخیرهساز انرژی از قبیل باتریها، چرخ طیار، خازنهای نسل جدید و ذخیره انرژی با فنآوری عناصر ابررسانا [۷٬۶] میتوانند به عنوان جبرانساز بسیار مفید در جهت کاهش نوسانات و افزایش میرایی در سیستمهای قدرت به کار برده شوند [۸]. همچنین با پیشرفت های اخیر در تجهیزات ذخیره انرژی و فناوری الکترونیک قدرت، ضرورت استفاده از سیستمهای ذخیرهساز انرژی و مهمتر از آن کنترل این تجهیزات بهعنوان یک راهحل مؤثر برای بهبود قابلیت اطمینان و عملکرد ترکیبی سیستمهای انرژی بادی و فتوولتائیک در ریزشبکه، مورد توجه قرار گرفته است [۹،۶].

برای کاهش این نوسانات روشهای مختلفی توسط مقالات ارائه شده است. کاهش نوسانات توان خروجی توربین بادی با کنترل زاویه پره در مراجع [۱۰] پیشنهاد شدهاست. اگرچه این روش کنترل میتواند نوساتات توان خروجی را کاهش دهد، ولی زاویه پره نمیتواند در مواقع نیاز به تنظیم سریع توان خروجی مزرعه بادی، به سرعت تغییر نماید؛ زیرا زاویه پره با سرعت ۷ درجه بر ثانیه تغییر میکند. مرجع [۱۱] یک روش برای کنترل توان توربینهای بادی فراساحلی ارائه کردهاست. در این روش سیستمهای توربین بادی از طریق خطوط انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا HVDC به شبکه ساحلی متصل میباشند و بر اساس این روش توان خروجی توربینهای فراساحلی با تغییرات سرعت باد در

مقداری ثابت نگه داشتهمیشود. در این مرجع مبدل سمت ژنراتور کنترل توان اکتیو خروجی توربینها را بر عهده دارند و مبدلهای سمت شبکه برای کنترل ولتاژ لینک DC ولتاژ استفاده میشوند.

در [۱۲]، تکنولوژیهای ذخیره انرژی متفاوت از لحاظ بازدهی و قیمتشان در مقیاسهای زمانی متفاوت مقایسه شدهاند و جنبههای کلیدی استفاده از ذخیرهسازهای انرژی بررسی شده است. در میان تجهیزات ذخیره ساز انرژی، باتریهای توان بالا، چرخطیارها، ابر خازنها، و ابررساناهای ذخیره انرژی مغناطیسی به عنوان گزینههای مناسب ذخیرهساز انرژی شناسایی شده و کاربردهای آنها در سیستم انرژی بادی به طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفتهاست. سیستمهای ذخیره کننده انرژی به عنوان یک راه حل مؤثر برای چالشهای قابلیت اطمینان و پایداری در سیستمهای قدرت آینده با ترکیب سیستمهای توربین بادی در مقیاسهای بزرگتر، مناسب ارزیابی شدهاند [۱۴،۱۳].

در [۱۵]، به منظور کاهش نوسانات توان باد از ذخیرهساز هوای فشرده استفاده شده است. این ذخیرهسازها نیاز به سرمایه گذاری زیادی دارند و با اینوجود دارای دینامیک تنظیم سرعت کندی بوده و برای مزارع بادی در مقیاس بزرگ مناسب نیستند. برای جبرانسازی نوسانات توان خروجی توربین بادی در [۱۶] از سیستم ذخیرهساز انرژی مغناطیسی ابررسانا استفاده شده است. قیمت این تجهیز ذخیرهساز نیز کاربرد آن را جهت کاهش نوسانات توان توربین بادی محدود کردهاست.

در مرجع [۱۷] به منظور کاهش نوسانات توان خروجی سیستم توربین بادی و سیستم انرژی خورشیدی، یک روش کنترل مبتنی بر ذخیرهساز انرژی باتری لیتیوم یون فسفات پیشنهاد شدهاست. در این مرجع برای کنترل وضعیت حالت شارژ باتری روشهای مختلفی مورد فطالعه قرار گرفتهاند. مراجع [۱۹،۱۸] یک مدل عمومی برای سیستم ذخیرهساز انرژی باتری پیشنهاد دادهاند. در این مراجع باتری بهوسیله یک منبع ولتاژ کنترل شده سری با یک مقاومت ثابت مدل شدهاست. این منبع ولتاژ کنترل شونده وابسته به وضعیت حالت شارژی باتری است و رفتار باتری را به خوبی و دقیق مدل سازی می کند.

در این مقاله، یک ریزشبکه مبتنی بر سیستم توربین بادی و سیستم فتوولتائیک در حالت متصل به شبکه و با در نظر گرفتن شرایط جوی و تغییرات سرعت باد که سبب ایجاد نوسانات توان خروجی در هر دو سیستم تولید پراکنده موجود است، همراه با یک سیستم ذخیرهساز انرژی باتری^۱(BESS) جهت کاهش این نوسانات از دید شبکه مورد بررسی و شبیهسازی قرار گرفتهاست. سسیستم کنترلی ذخیرهساز انرژی بررسی و شبیهسازی قرار گرفتهاست. سسیستم کنترلی ذخیرهساز انرژی مرجع برای میراسازی نوسانات توان سیستمهای تولید پراکنده، با در نظرداشتن عمر مفید سیستم ذخیرهساز و حفاظت آن، محاسبه میشود. در نهایت توان مرجع محاسبه شده در دو سطح اولیه سیستم کنترلی به مرجلاف اکثر کارهای انجامشده در این مقاله از مزیت تزریق توان راکتیو بر خلاف اکثر کارهای انجامشده در این مقاله از مزیت تزریق توان راکتیو توسط مبدل نیز به منظور پشتیبانی ولتاژ در نقطه اتصال مشترک بهرهگیری شدهاست. تأثیر وجود سیستم ذخیرهساز انرژی باتری در کاهش نوسانات فرکانس متوسط در سیستم قدرت بررسی شده است. در این مدل، سیستم ذخیرهساز انرژی با سیستمهای تولید پراکنده در لینک DC مشترک نیست، بلکه از طریق یک مبدل که توانایی کارکرد در دو ناحیه کاری یکسوکنندگی و معکوس کنندگی را دارد، به شین PCC متصل است. در ادامه جزئیات این سیستم تشریح و نتایج شبیهسازی آن مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- ساختار ریزشبکه مورد بررسی

بلوک دیاگرام کلی ریزشبکه مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. ریزشبکه مورد مطالعه در حالت متصل به شبکه بهرهبرداری میشود و شامل سیستم توربین بادی، سیستم فتوولتائیک، بار ثابت و سیستم ذخیره ساز انرژی باتری جهت کاهش نوسانات توان شبکه است. این بخش شامل چهار قسمت است، که در قسمت اول مدلسازی سیستم فتوولتائیک و سیستم کنترل مبدل اتصالدهنده آن به شبکه، قسمت دوم مدلسازی سیستم توربین بادی، قسمت سوم مدلسازی باتری و در قسمت چهارم سیستم کنترل سه سطحی سیستم ذخیره ساز انرژی سیستم فتوولتائیک از دید شبکه تشریح خواهد شد.



شکل ۱: ساختار ریزشبکه مورد بررسی

۲-۱- سیستم انرژی خورشیدی

مدل سازی سیستم انرژی خورشیدی بر اساس یک منبع DC سری با یک مقاومت در سمت جریان مستقیم، متصل به یک اینورتر با کلیدهای کامل قابل کنترل، انجام شدهاست [۲۰]. دیاگرام سیستم کنترلی برای تولید پالسهای کلیدزنی مبدل اتصالدهنده PV به شبکه، در شکل ۲ قابل مشاهده است. رابطهی میان جریان و توان مرجع بر اساس رابطه (۱) است، که در آن ۷ ولتاژ شین PV، P_{nf}^* و p_{nf}^* توانهای مرجع

هستند. توانهای مرجع در حقیقت توانهایی هستند که جهت تزریق توان توسط سیستم انرژی خورشیدی تعریف میشوند [۲۱].

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{d}^{*} \\ \mathbf{i}_{q}^{*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{d} & \mathbf{v}_{q} \\ -\mathbf{v}_{q} & \mathbf{v}_{d} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{ref}^{*} \\ \boldsymbol{Q}_{ref}^{*} \end{bmatrix} = \frac{1}{\mathbf{v}_{d}^{2} + \mathbf{v}_{q}^{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{d} & -\mathbf{v}_{q} \\ \mathbf{v}_{q} & \mathbf{v}_{d} \end{bmatrix}$$
(1)



شکل ۲: دیاگرام سیستم کنترل اینور تر سیستم فتوولتائیک

در این شبیهسازی نوسانات توان خروجی سیستم انرژی خورشیدی که در اثر تغییرات مقدار تابش در بازههای مختلف زمانی است، نیز مدل شده است. توان تزریقی سیستم انرژی خورشیدی بر اساس شکل ۳ میباشد؛ البته با توجه به این که تغییرات تابش خورشید نسبت به باد کندتر است، میزان این نوسانات در سیستم فتوولتائیک نسبت به توربین بادی کمتر است.



۲-۲- سیستم توربین بادی

توان قابل استحصال از توربین بادی بر اساس رابطه (۲) است [۲۲]:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^{3} C_{p} \tag{(7)}$$

که در آن $_{
ho}^{} C$ ضریب توان روتور یا راندمان روتور، A سطح مقطعی است که توسط پرههای توربین جاروب شده و ho برابر چگالی هوا و v سرعت باد است.

عموماً دو نوع سیستم تبدیل انرژی بادی سرعت ثابت و سرعت متغیر وجود دارد [۲۳و۲۴]. توربین بادی سرعت ثابت در شکل ۴ نشان داده شده است. ژنراتورهای القایی قفسه سنجابی^۲ (SCIGs) با توجه به مقرون به صرفه بودن و مقاوم بودن، محبوب ترین ژنراتورهای سرعت ثابت بادی هستند [۳]. در این توربینها ژنراتور القایی قفسه سنجابی به شبکهی برق متصل شده یا به طور مستقیم به بار وصل می شود. نوع دیگر

سیستمهای تولید انرژی بادی از نوع سرعت متغیر میباشند، که از جمله آنها می توان به ژنراتور از نوع القایی تغذیه دوگانه (با روتور سیمپیچی شده) اشاره کرد. در این نوع توربینها، روتور ژنراتور به وسیلهی یک مبدل منبع ولتاژ یا جریان پشت به پشت تغذیه شدهاست. استاتور ژنراتور نیز به طور مستقیم به بار یا شبکه متصل است [۲۳]. ژنراتورهای القایی در توربینهای بادی سرعت ثابت در حالت ماندگار توان راکتیو را از سیستم قدرت جذب میکنند، بنابراین برای جبرانسازی بخشی از این توان راکتیو از یک بانک خازنی اسنفاده می شود. سرعت ژنراتور بستگی به تعداد جفت قطبها و فرکانس شبکه دارد [۲۵]

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد توان خروجی توربینهای بادی به شدت وابسته به شرایط جوی و سرعت باد است. تغییرات سرعت باد در بازه زمان(۰-۵۰) ثانیه همچون شکل ۵ فرض شدهاست. به تبع این تغییرات توان خروجی توربین بادی نیز متغیر خواهد بود.



۲-۳- سیستم ذخیرهساز انرژی باتری

سیستمهای ذخیره ساز انرژی برای وظایفی خاص تعیین شدهاند که این وظایف بر اساس ظرفیت توان و نرخ شارژ و دشارژ انرژی (مقدار انرژی ذخیره شده) متفاوت هستند. بر اساس نرخ تخلیه انرژی این سیستمها به سه دستهی زیر طبقه بندی میشوند:

- سیستمهایی که به مدت بیش از چند دقیقه تا چند ساعت، انرژی را به منظور مدیریت انرژی تأمین میکنند که شامل عملکرد ریزشبکه در حالت جزیرهای است.
- منابع تغذیه اضطراری: منابعی هستند که انرژی را به مدت زمان چند دقیقه برای محلهایی که کمبود انرژی دارند تأمین میکنند.
- 3) سیستمهایی که به منظور جبران کیفیت توان به مدت چند ثانیه یا کمتر انرژی را تأمین میکنند [۳و۲۶].

سیستم ذخیرهساز انرژی بهوسیله یک منبع ولتاژ کنترل شونده سری با یک مقاومت ثابت بر اساس مقالات مرجع [۱۹و۱۹] مدل شده است. شمای کلی این مدل در شکل ۶ آمده است. بر اساس این مدل مشخصات باتری در هر دوحالت شارژ و دشارژ یکسان است. دو پارامتر مهم که رفتار باتری را توصیف می کنند عبارتند از vbat و وضعیت حالت شارژ^۳ باتری (SOC). ولتاژ مدار باز در این مدل بهوسیله یک رابطه غیرخطی مبتنی بر SOC باتری بهصورت زیر محاسبه می شود.

$$V_{bat} = E_{bat} - R_{int}I_{bat} \tag{(4)}$$

که در این رابطه Rint مقاومت داخلی باتری و Ebat ولتاژ مدار باز باتری است. وضعیت حالت شارژ باتری از طریق رابطه (۴) به صورت تابعی

است. وصعیت حالت سار: باتری باتری از طریق رابطه (۱) بهصورت تابعی از جریان باتری محاسبه می شود.

$$SOC = 100(SOC_{\text{int}} - \frac{\int I_{bat} dt}{Q})$$
 (*)

که در آن SOCint وضعیت حالت اولیه باتری و Q ظرفیت باتری است؛ که بهوسیله منبع ولتاژ کنترل شونده مبتنی بر رابطه (۵) مدل می شود.

$$E_{bat} = E_0 - K \frac{1 - SOC}{SOC} Q + A e^{-B(1 - SOC)Q}$$
(Δ)

در این رابطه Ebat ولتاژ مدار باز (ولت)، Eo ولتاژ نامی باتری (ولت)، K ولتاژ پلاریزاسیون (ولت)، Q ظرفیت باتری (Ah)، A ولتاژ نمایی[†] و B ظرفیت نمایی^۵ است. ولتاژ نامی باتری، نقطه انتهایی ناحیه خطی مشخصه دشارژ را نشان میدهد. تمامی پارامترهای این مدل باتری که روابط آن از مقالات مرجع [۸۸و۱۹] گرفته شده است، از منحنیهای دشارژ کارخانه تولیدکننده که در برگه اطلاعات باتری² آمده است، قابل استخراج هستند.



شکل ۶: مدل غیرخطی باتری [۱۸]

۳- تعريف مسأله

با توجه به مطالب بیانشده، به منظور کاهش نوسانات توان خروجی توربین بادی و سیستم انرژی خورشیدی در این مقاله روشی جهت کنترل سیستم ذخیرهساز انرژی باتری پیشنهاد میشود. باتوجه به گران بودن این سیستمهای ذخیرهساز استفاده بهینه از آنها که بر پایه طراحی مناسب سیستم کنترل است، ضروری است. مطالعه بر روی پاسخ فرکانسی شبکه نشان میدهد که سیستمهای قدرت به نوسانات توان فرکانس متوسط (بین ۰/۰۱ تا ۱ هرتز) حساس هستند، زیرا نوسانات

فرکانس بالا توسط اینرسی ژنراتورها جذب میشود و نوسانات فرکانس پایین توسط کنترل تولید اتوماتیک^۷ (AGC) (در یک سیستم قدرت (AGC) سیستمی است که برای تنظیم توان خروجی ژنرتورهای چندگانه در قسمتهای مختلف شبکه، برای پاسخ گویی به تغییرات بار وجود دارند) میرا میشود. بنابراین بر اساس مقاله مرجع [۱۴] در این مقاله نیز سیستمهای ذخیره انرژی باتری برای کاهش نوسانات قرار گرفته شده در ناحیه فرکانس متوسط طراحی میشود. همان طور که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است، سیستم ذخیره ساز انرژی در نقطه اتصال مشترک^۸ از طریق مبدل به شبکه متصل شده است.

سیستم بهساز انرژی شامل یک مبدل منبع ولتاژ^۹ و سیستم کنترل آن است. مبدل منبع ولتاژ سه فاز میتواند به عنوان یک یکسوکننده یا معکوس کننده برای شارژ یا دشارژ سیستم ذخیرهساز انرژی عمل نماید. سیستم کنترل مبدل، از توان اکتیو خروجی مزرعه بادی و سیستم فتوولتائیک، نمونه می گیرد و حالت کاری مبدل منبع ولتاژ برای صاف کردن مجموع توان اکتیو در نقطه اتصال مشترک را تعیین می کند. به منظور پشتیبانی ولتاژ در نقطه اتصال مشترک، همچنین در سیستم کنترل از ولتاژ سمت شبکه V_{grid} نمونه گیری می شود.

شکل ۷ سطوح مختلف کنترل سیستم ذخیرهساز انرژی را نشان میدهد، که شامل سطوح محاسبه تقاضای شبکه، مدیریت انرژی و حفاظت BESS و سطح کنترل مبدل منبع ولتاژ سیستم ذخیرهساز است.



شکل ۷: ساختار سلسله مراتبی سیستم کنترل ذخیرهساز انرژی

سطح اول که سطح محاسبه تقاضای شبکه است خود شامل دو قسمت هموارکننده توان اکتیو و جبران سازی توان راکتیو است. برای دستیابی به نرخ تغییرات مناسب توان اکتیو، واحد هموارکننده توان اکتیو مقدار مرجع توان اکتیو $P_{\rm ref}$ که باید توسط سیستم ذخیره انرژی باتری تولید شود را محاسبه میکند. بخش جبرانساز توان راکتیو در اولین سطح سیستم کنترل BESS/VSC به منظور پشتیبانی ولتاژ شبکه، تقاضای توان راکتیو $P_{\rm ref}$ را محاسبه میکند. سطح مدیریت انرژی شامل بخش مدیریت انرژی و حفاظت باتری است. وظیفه این دو سطح، اصلاح بخش مدیریت انرژی و حفاظت باتری است. وظیفه این دو سطح، اصلاح بور اساس وضعیت شارژ باتری و حفاظت آنها در برابر شارژ یا دشارژ بیش از حد در شرایط خاص بوده و بر این اساس $P_{\rm ref}$ را به $P_{\rm ref}^*$ تبدیل

می کند. بر اساس توانهای مرجع تولیدی توسط دو سطح اول سیستم کنترلی، نیازمند یک سطح کنترل مبدل منبع ولتاژ برای تولید پالسهای کلیدزنی مبدل متصل کننده سیستم ذخیره کننده انرژی باتری به شبکه، جهت تزریق توان است. سطح کنترل مبدل منبع ولتاژ، یک روش کنترل مبدل منبع ولتاژ را برای دنبال کردن مقدار مرجع توان اکتیو و راکتیو محاسبه شده، بیان می کند.

۴- فرموله نمودن مسأله و طراحي كنترل كنندهها

۱-۴- سطح محاسبه تقاضای شبکه

به منظور هموار کردن توان تزریقی به شبکه، از مجموع توان تزریقی آنی توربین بادی و سیستم فتوولتائیک ($P_{Wind} P_{Wind}$)، نمونه برداری شده و از یک فیلتر پایین گذر مرتبه اول برای فیلتر کردن اجزاء نوسانی فرکانس بالا استفاده شدهاست. ثابت زمانی فیلتر π برابر با $\frac{1}{2\pi f_c}$ است که f_c فرکانس قطع آن است. تفاوت بین توان منابع تولید پراکنده پیش و پس از فیلتر شدن به عنوان سیگنالی برای شارژ یا دشارژ خروجی سیستم ذخیره انرژی باتری استفاده می شود.

تابع انتقال فیلتر پایینگذر در رابطه (۶) و رابطه بین توان خروجی تولیدات پراکنده (P_{ref} و $P_{Wind} + P_{PV} = P_{DG}$) در رابطه (۲) داده شده است.

$$G_{filter}\left(s\right) = \frac{P_{filter}}{P_{wind} + P_{PV}} = \frac{1}{\tau s + 1}$$
(9)

$$P_{ref} = \frac{\tau s}{\tau s + 1} (P_{DG}) \tag{Y}$$

که τ ثابت زمانی فیلتر P_{DG} و P_{filter} توان تولید پراکنده پیش و پس از فیلتر شدن و P_{ref} خروجی هدف سیستمهای ذخیره انرژی باتری است. بلوک دیاگرام این بخش از سطح محاسبه تقاضای شبکه در شکل ۸ آمده است.



شکل ۸: سطح محاسبه تقاضای شبکه جهت تولید توان اکتیو مرجع

بخش پشتیبان ولتاژ شبکه، یک ورودی ولتاژ مرجع و یک ورودی ولتاژ واقعی اندازهگیری شده در نقطه اتصال مشترک دریافت میکند؛ سپس ولتاژ مرجع از ولتاژ شبکه کم میشود و از سیگنال منتجه برای فعالسازی عملکرد استفاده میشود. این سطح کنترل بر اساس روابط (۸و۹) بیان میشود.

$$\Delta V = V_{grid} - V_{ref} \tag{(A)}$$

$$Q_{ref} = \Delta V \left(K_{P1} + \frac{K_{i1}}{s} \right) \tag{9}$$

۲-۴- سطح مدیریت انرژی اکتیو

برای محافظت باتری و نگاه داشتن SOC بین ۳/۰تا ۰/۷ مقدار SOCref بین ۳/۰تا ۰/۷ مقدار برابر با ۵۰ درصد و ۲۰۱۰ میباشد.



شکل ۹: دیاگرام بلوک کنترل حالت شارژ برای سیستمهای ذخیره انرژی باتری در سطح مدیریت انرژی [۱۸]

$$\Delta SOC = SOC_{ref} - SOC_{bat} \tag{11}$$

$$\begin{cases} e_{soc} = \Delta SOC , |\Delta SOC| \ge C_{1} \\ e_{soc} = o , |\Delta SOC| < C_{1} \end{cases}$$
(17)

$$P_{SOC} = e_{SOC}G_{PI2} = e_{SOC}\left(K_{P2} + \frac{K_{i2}}{s}\right)$$
(17)

$$P_{bat} = P_{SOC}G_{LPF} = P_{SOC} \frac{1}{\tau_1 s + 1}$$
(14)

$$P_{ref}^* = P_{ref} + P_{bat} \tag{10}$$

BESS/VSC -۴-۳ سطح کنترل مبدل

با توجه به دو سطح کنترلی پیشین، مقادیر اصلاح شده و نهایی توان اکتیو و توان راکتیو در دسترس هستند. سطح کنترل مبدل منبع ولتاژ سبب میشود که مبدل به فرمان توان اکتیو و راکتیو محاسبه شده توسط سطح بالا پاسخ سریع داشته باشد. در این سطح کنترل همان گونه که در شکل ۱۰ به ثصویر کشیده شدهاست، توانهای اصلاح شده و نهایی مرجع اکتیو و راکتیو همراه با بازخورد گرفته شده از ولتاژ شبکه، با استفاده از رابطه (۱۶)، جریانهای مرجع i_a^* و j_a^* را تولید می کنند. این جریانها بهمنظور جبرانسازی نوسانات توان منابع تولید پراکنده با تزریق مناسب توان توسط BESS/VSC، بایستی توسط جریانهای خروجی BESS/VSC

دنبال شوند. در نهایت به منظور تولید پالس های کلیدزنی مناسب برای هدف ذکر شده، این جریان ها همراه جریان خروجی BESS/VSC به کنترل کننده هیسترزیس داده می شوند. جذب و یا تزریق توان از طریق علامت سیگنال توان مشخص می شود. به منظور ارزیابی کمی نوسانات توان سراسر نواحی فرکانسی خاص، محتوای هارمونیکی نوسانات در مرجع [1۳] معرفی شده است. برای محاسبه FHC داریم:

$$FHC(F) = \frac{\sqrt{\sum_{f \in \{F\}} (P(f) / \sqrt{2})^2}}{P_0}$$
(1Y)

که در این رابطه، f ناحیه فرکانسی و P_0 جزء dc یا توان متوسط است. برای بررسی میزان کمی کاهش نوسانات، مقادیر FHC ناحیه فرکانس متوسط در دو حالت وجود و عدم وجود سیستم ذخیرهساز انرژی محاسبه می گردد.



شكل ١٠: سطح كنترل مبدل منبع ولتاژ

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}^{*}_{d} \\ \mathbf{i}^{*}_{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{gd} & \mathbf{v}_{gq} \\ -\mathbf{v}_{gq} & \mathbf{v}_{gd} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}^{*}_{ref} \\ \boldsymbol{Q}^{*}_{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{\mathbf{v}^{2}_{gd} + \mathbf{v}^{2}_{gq}} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{gd} & -\mathbf{v}_{gq} \\ \mathbf{v}_{gq} & \mathbf{v}_{gd} \end{bmatrix}$$
(19)

۵- نتایج شبیهسازی

شبیه سازی سیستم پیشنهادی که در شکل ۱ دیاگرام کلی آن مشاهده می شود، با استفاده از جعبه ابزار Simulink در نرمافزار Matlab صورت گرفته است. به علت تغییرات سرعت باد (همانند شکل۵) توان خروجی توربین بادی به تبع آن دارای نوسان خواهد بود. توان خروجی سیستم فتوولتائیک نیز بر اساس آنچه در بخش (۲–۱) بیان شد، نوسانی است. در نهایت امر توان خروجی سیستم فتوولتائیک، توان خروجی توربین بادی و توان مجموع این دو سیستم تولید پراکنده به صورت شکل ۱۱ فرض شده است. به صورت نمونه با دقت در شکلهای ۵ و ۱۱ مشاهده می شود که در بازه زمانی ۱۰–۱۲ ثانیه که سرعت باد افت کرده است، توان خروجی توربین بادی نیز دچار کاهشی محسوس شده است. توان توان مرجع می باشد، در شکل ۱۲ آورده شده است.



شکل ۱۱: توان سیستم توربین بادی و فتوولتائیک و مجموع آنها در اثر تغییرات شرایط جوی



شکل ۱۲: توان تولیدی سیستمهای تولید پراکنده قبل و پس از فیلتر شدن در سطح محاسبه تقاضای شبکه

طیف فرکانسی نوسانات توان که از آنالیز تبدیل فوریه به دست آمده است، برای سیستمهای تولید انرژی تجدیدپذیر قبل و بعد از فیلتر شدن، در شکل ۱۳ آمدهاست. ثابت زمانی فیلتر پایین گذر طراحی شده برای تولید توان مرجع توسط سطح محاسبه تقاضای شبکه ۱۵/۹=T۶ ثانیه می باشد. همان طور که اشاره شد با توجه به حساسیت سیستمهای قدرت به نوسانات فرکانس متوسط بین ۱۰/۰ تا ۱ هرتز، در شکل ۱۳ مشاهده می شود که توان مرجع در سطح کنترلی اول به خوبی توانسته این نوسانات فرکانسی را در ناحیه مذکور کاهش دهد.



تجدیدپذیر قبل و بعد از فیلتر شدن (Ts=15/9 sec)

در این گام از شبیه سازی برای نشان دادن نحوه عملکرد سطح مدیریت انرژی و حفاظت باتری از شارژ و دشارژ بیش از حد دو سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریو اول وضعیت حالت شارژ اولیه سیستم ذخیره ساز انرژی برابر با ۵۰ درصد فرض شده است. در سناریو دوم SOCint برای BESS برابر با ۳۰/۱ در صد فرض شده است.

۱-۵- سناریوی ۱ : وضعیت حالت شارژ اولیه باتری: ۵۰ درصد

در شکل ۱۴ توان مرجع تولیدی سطوح کنترل محاسبه تقاضای شبکه و سطح مدیریت انرژی همراه با توان تزریقی سیستم ذخیرهساز انرژی باتری به نمایش درآمدهاست. همچنین در شکل ۱۵ نحوه دنبال کردن جریان مرجع Id-ref و جریان محور عمودی- Id – سیستم ذخیرهساز و مبدل قابل مشاهده می اشد.

به صورت نمونه در بازه زمانی ۱۲–۱۰ ثانیه به سبب کاهش سرعت باد موجب نوسان توان در خروجی توربین بادی و در نهایت توان خروجی سیستمهای تولید پراکنده، خواهد شد، بنابر توان مرجع، بایستی سیستم ذخیره ساز انرژی همراه با مبدل آن وارد عمل شده و در راستای کاهش نوسان توان از دید شبکه عمل نمایند. بر اساس شکلهای ۱۴و ۱۵ مشهود است که سیستم BESS/VSC توانسته به خوبی جریان مرجع ا و به تبع آن توان مرجع را دنبال کند البته برای نشان دادن نحوه دنبال کردن توان و جریان مرجع توسط سیستم ذخیره ساز انرژی مبتنی بر سیستم کنترلی بیان شده، همراه با توان و جریان مرجع در یک نمودار، منفی توان و جریان تزریقی توسط سیستم ذخیره ساز انرژی باتری رسم شده است.



شکل ۱۴: توان مرجع و توان تزریقی توسط سیستم ذخیره ساز

از آنجا که توان توربین بادی در این بازه کاهش یافتهاست، برای تأمین توان بارها در این بازه زمانی، در صورت نبود سیستم ذخیرهساز انرژی، توان کشیده شده از شبکه افزایش مییابد و این نوسان توان به شبکه منتقل میشود. این افزایش توان کشیده شده از شبکه را به خوبی میتوان در شکل ۱۶، در توان شبکه قبل از کاهش نوسانات توان مشاهده کرد.

در این بازه زمانی سیستم ذخیره ساز انرژی BESS/VSC وارد عمل شده و بر اساس توان مورد نیاز محاسبه شده در سطوح کنترلی محاسبه تقاضای شبکه و سطح مدیریت انرژی، توانی به شبکه تزریق میکند تا این نوسان توان خروجی توربین بادی ناشی از تغییرات سرعت باد تا حد امکان به شبکه نرسد.



شکل1۵: جریان مرجع محور -d- و جریان محور عمودی -d- باتری

همان طور که در شکل ۱۶ مشاهده می شود، سیستم ذخیره ساز انرژی توانسته با توجه به توان مرجعی که توسط دو سطح کنترلی سلسله مراتبی برای آن تعریف شده بود و توسط سطح کنترل مبدل منبع ولتاژ بر اساس این توان مرجع، تبدیل به پالس های کلیدزنی برای سیستم BESS/VSC، شده، به خوبی نوسانات توان شبکه را کاهش دهد.



همان طور که اشاره شد، سیستمهای قدرت به نوسانات توان فرکانس متوسط (بین ۲۰/۰ تا ۲ هرتز) حساس هستند. برای مقایسه بهتر، مقادیر FHC ناحیه فرکانس متوسط در دو حالت وجود و عدم وجود سیستم ذخیرهساز انرژی محاسبه شده و در جدول ۲ گردآوری شده است. بر اساس جدول ۲ در ناحیه فرکانسی ۲۰/۱ تا ۲ هرتز، نوسانات توان به طور چشمگیری کاهش یافته است. در ادامه در شکلهای ۱۲ وضعیت حالت شارژ باتری، آمدهاست.

جدول ۱: محتوای هارمونیکی نوسانات توان فرکانس متوسط

بین ۰/۰۱ تا ۱ هرتز	ناحیه فرکانسی
۱۵/۵ درصد	توان شبکه بدون حضور سیستم ذخیرهساز انرژی
۵/۴ درصد	توان شبکه با حضور سیستم ذخیرهساز انرژی



بر اساس نتایج قبلی به دست آمده مشاهده میکنیم که وضعیت حال شارژ باتری نیز در بازه مد نظر مؤید تحلیلهای فوق بوده و در این بازه سیستم ذخیرهساز شارژ خواهد شد. در شکل ۱۸ نیز ولتاژ مؤثر شبکه آورده شدهاست.

۲-۵- سناریوی ۲ : وضعیت حالت شارژ اولیه باتری: ۲۰/۱ درصد

در این سناریو وضعیت حالت شارژ اولیه باتری بدین صورت انتخاب شده است تا با توجه به نتایج بهدستآمده از سناریو قبل برای انجام جبرانسازیهای فوق الذکر وضعیت حالت شارژ باتری به زیر ۳۰ درصد برسد و نحوه عملکرد سطح مدیریت انرژی را جهت حفاظت باتری از شارژ و دشارژ بیش از حد مشاهده کرد. زیرا همان طور که قبلاً نیز بدان اشاره شد سیستمهای ذخیرهساز انرژی در مقیاس بزرگ گران قیمت اشاره شد سیستمهای ذخیرهساز انرژی در مقیاس بزرگ گران قیمت اشاره برای دو حالت حضور و عدم حضور این سطح مدیریتی که برای کنترل وضعیت حالت شارژ باتری درنظر گرفته شده، در شکل ۱۸ ارائه شده است.

همان طور که در شکل ۱۸ نیز مشاهده می شود، با داشتن وضعیت حالت شارژ اولیه برابر با ۳۰/۱ درصد برای کاهش نوسانات توان، در حالت نداشتن کنترل روی وضعیت حالت شارژ در سطح مدیریت انرژی، SOC باتری از حد تعیین شده برای بیشترین دشارژ عبور کرده و به زیر ۳۰ درصد افت کرده است و حفاظت باتری به درستی انجام نشده است. در حالتی که سطح مدیریت انرژی فعال بوده و روی SOC باتری کنترل وجود دارد.، در این وضعیت همان طور که در شکل ۱۸ نیز مشخص است، توان مرجع به گونه ای اصلاح شده که حفاظت باتری از این دشارژ بیش از حد به خوبی انجام گیرد.



۶- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور کاهش نوسانات ناشی از منابع تولید پراکنده در ریزشبکه، یک سیستم کنترل برای ذخیرهساز انرژی باتری بر مبنای سلسله مراتب كنترل سه سطحي طراحي شدهاست. اولين سطح كنترل، سطح محاسبه تقاضای شبکه میباشد. برای دستیابی به نرخ تغییرات مناسب توان اكتيو، واحد صافكننده توان اكتيو مقدار توان اكتيو Pref را که باید توسط سیستمهای ذخیره انرژی باتری تولید شود، محاسبه مى كند. براى يشتيباني ولتاژ شبكه، واحد جبران ساز توان راكتيو تقاضاي توان راكتيو Q_{ref} را محاسبه مي كند. دومين سطح كنترل، سطح مديريت انرژی و حفاظت باتری است و برای جلوگیری از شارژ و دشارژ بیش از حد باتری و حفاظت آن توان مرجع تولیدی از سطح کنترلی اولیه را اصلاح مىكند. سطح كنترل سوم سطح كنترل مبدل منبع ولتاژ می باشد، که بر اساس توان های مرجع تولیدی از دو سطح اولیه وثانویه، بهوسیله سیستم کنترلی پیشنهاد شده، پالسهای کلیدزنی مبدل را تعیین میکند. بر اساس توانهای مرجع مد کاری مبدل مشخص شده و مبدل منبع ولتاژ سه فاز میتواند به عنوان یک یکسوکننده یا معکوس کننده برای شارژ یا دشارژ باتریها کار نماید.

شبیهسازی سیستم کنترلی پیشنهادی بر ریزشبکه مورد مطالعه شامل سیستم توربین بادی و سیستم فتوولتائیک دارای ماهیت تصادفی توان خروجی در نرم افزار متلب/ سیمولینک انجام شده است. نتایج نشان میدهد که با تزریق توان توسط سیستم ذخیرهساز انرژی بر اساس توان مرجع محاسبه شده، نوسانات توان از دید شبکه به خوبی کاهش یافته است، به گونهای که محتوای هارمونیکی نوسانات فرکانس متوسط از مقدار ۱۵/۵ به ۱/۴ درصد رسیدهاست.

پيوستھا

پارامترهای ریزشبکه مورد بررسی در این مقاله بهصورت جدول و مجزا در این بخش آورده شده است. جدول ۲ شامل پارامترهای ریزشبکه است. در جدول ۳ پارامترهای توربین بادی و ژنراتور القایی بیان شده است. مشخصات سیستم ذخیره کننده باتری نیز در جدول ۴ ذکر گردیده

است. در نهایت در جدول ۵ پارامترهای سیستم کنترل کننده آورده شدهاست.

جعاول ۱. پاراللغر عالی ریز سبت				
مقادير	پارامترهای سیستم			
۶۰ هرتز	فركانس شبكه			
۱۲ کیلوهرتز	فركانس كليدزنى			
۳۸۰ ولت	ولتاژ مؤثر خط شبكه			
۱،۴:۱	نسبت ترانسفورماتور سه فاز			
۲ میلی هانری و ۲ میلی اهم	فيلتر سيستم فتوولتائيك			
۲ میلی هانری	اندوكتانس سمت شبكه BESS/VSC			
۷۰ کیلوولت آمپر	ترانسفورماتور توزيع			
۳۰ کیلو وات	توان بار خطی			

جدول۲: پارامترهای ریزشبکه

جدول ۳: پارامترهای ژنراتور القایی توربین بادی

مقادير	پارامترهای سیستم
۲۰ کیلو وات	توان نامی
۳۸۰ ولت	ولتاژ مؤثر نامى
۶۰ هرتز	فركانس نامي
۰/۰ ۱۶ پريونيت	مقاومت استاتور
۰/۰۶ پريونيت	اندوكتانس استاتور
۰/۰ ۱۵ پريونيت	مقاومت رتور
۰/۰۶ پريونيت	اندوكتانس استاتور
۳/۵ پريونيت	اندوكتانس مغناطيس كنندكي
۹/۴ متر بر ثانیه	متوسط سرعت باد

جدول۴: مشخصات بانک باتری

مشخصات	مورد	
سرب_اسيد	نوع	
۱۲ ولت_ ۶ آمپرساعت	سلول (AH)	
۶۳	تعداد سری	
1 X×88=VQ8	ولتاژ نامی سیسم ذخیرہساز	
۸۲۳ (۱۳ ولت _ سلول)	حداكثر ولتاژ عملكرد	
۶/۲۵ آمپر ساعت	حداكثر ظرفيت	

کننده	كنترل	سيستمهاي	مشخصات	جدول۵:
-------	-------	----------	--------	--------

مشخصات	مورد	
kp=۲۰۰ , ki=۱۰	كنترل كننده سىستم فتوولتائىك	
kp=۲۰۰ , ki=۱۰		
$kp_1=1$, $ki_1=1$, $c_1=\cdot/\cdot$ Y	سطح محاسبه تقاضای شبکه – واحد	
$kp_2=Ya\cdots$, $ki_2=1$.	سطح مدیریت انرژی	

- [13] W. Li, G. Joós, "Comparison of energy storage system technologies and configurations in a wind farm". Power Electronics Specialists Conf., pp. 1280–1285, June 2007.
- [14] K. Li, H. Xu, Q. Ma, J. Zhao, "Hierarchy control of power quality for wind-battery energy storage system", IET Power Electronics, vol. 7, (8), pp.2123-2132, 2014.
- [15] J. Tan, G. J. Li, Z. W. Tang. "Power control and benefit analysis based on compressed air energy storage in wind farms." Autom. Electr. Power Syst 8. pp. 33-37. 2011.
- [16] A. Tomkoi, R. Takahashi, T. Murata, "Smoothing control of wind power generator output by superconducting magnetic energy storage system". In Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea; pp. 302–307. October 2007.
- [17] Li, X., Hui, D., & Lai, X. (2013). Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 4(2), 464-473.
- [18] O. Tremblay, L. A. Dessaint, A. I. Dekkiche, "A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles". In IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference .pp. 284-289. September 2007.
- [19] M. Z. Daud, A. Mohamed, M. C. Wanik, M. A. "Hannan, Performance evaluation of grid-connected photovoltaic system with battery energy storage". In Power and Energy (PECon), IEEE International Conference on, pp. 337-342, December 2012.
- [20] I. Wasiak, R. Pawelek, R. Mienski, "Energy Storage Application in Low-Voltage Microgrids for Energy Management and Power Quality Improvement." IET Generation, Transmission & Distribution, IET. vol8, (3), pp. 463-472. 2014.
- [21] S. S. Khorramabadi, A. Bakhshai, "Critic-based self-tuning PI structure for active and reactive power control of VSCs in microgrid systems", IEEE Transactions on Smart Grid, vol 6, (1), pp. 92-103., 2015
- [22] J.G. Slootweg, Wind power: modeling and impact on power system dynamics, PhD dissertation, Dept. Elect. Eng., Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2003.

[23] ميلاد دلالي؛ عليرضا جليليان، "محاسبه آلودگي هارمونيكي و

میانهارمونیکی ژنراتورهای القائی دوسو تغذیه بادی با استفاده از یک

روش ترکیبی "،مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۱۳۸۹ ; دوره ۴۲،

شماره ۲، زمستان ۱۳۹۱، صفحه ۲۵–۳۷.

- [24] P. Kundur, Power system stability and control (vol. 7). N. J. Balu, & M. G. Lauby (Eds.). New York: McGraw-hill. 1994.
- [25] D. J. Trudnowski, A. Gentile, J. M. Khan, E. M. Petritz, "Fixedspeed windgenerator and wind-park modeling for transient stability studies", IEEE Transactions on Power Systems, vol19, (4), pp. 1911-1917, 2004
- [26] C.Abbey, K.Strunz, G.Joós. "A Knowledge-based Approach for Control of Two-Level Energy Storage for Wind Energy Systems", IEEE Transactions on Energy Convers. vol. 24, (2), pp. 539–547. 2009.

مراجع

- K.K.Leung and D.Stanto, "Improving Power System Operation & Control Utilizing Energy Storage," in Proc.International Conf. on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97, pp. 626-632, Hong Kong, Nov.1997
- [2] A.Ghosh, G.Ledwich, "Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices", Kluwer Academic Publishers, 2012.
- [3] Jin-Hong Jeon; Jong-Yul Kim; Seul-Ki Kim; Jang-Mok Kim, "Unified Compensation Control of a Hybrid Energy Storage System for Enhancing Power quality and Operation Efficiency in a Diesel and Wind-Turbine Based Stand-alone Microgrid", 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), pp. 264-270, 2012.
- [4] J.M.Guerrero, Poh Chiang Loh; Tzung-Lin Lee; Chandorkar, M. "Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part II: Power Quality, Energy Storage, and AC/DC Microgrids", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, (4), pp. 1263-1270, April 2013.
- [5] JJ Justo, F Mwasilu, J Lee, JW Jung, "AC-microgrids versus DC microgrids with distributed energy resources: A review" Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 24, pp. 387– 405, August 2013.
- [6] F. Blaabjerg, Zhe Chen, S.B Kjaer, "Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Peneration Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.19, no.5, pp.1184-1194, Sept 2004.
- [7] S.M. Said, M.M. Aly; Abdel-Akher, M. "Application of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) for Voltage Sag/Swell Supression in Distribution System with Wind Power Penetration", 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 92-96, IEEE 2014.

[8] محسن دارابیان؛ ابوالفضل جلیلوند، "کنترل پیشبین با رویکرد بهبود

میرایی نوسانات سیستم قدرت در حضور مزارع بادی با استفاده از سیستم

ذخیرهساز انرژی ابرخازنی و SSSC" ، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز،

دوره ۴۶، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۵۹–۷۳.

- [9] A. Oudalov, T.Buehler, D. Chartouni, "Utility scale applications of energy storage". In Energy 2030 Conference. ENERGY, IEEE, pp. 1-7, 2008.
- [10] H.C. Sung, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Robust observer-based fuzzy control for variable speed wind power system : LMI approach", Int. Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 9, no. 6, pp. 1103- 1110, 2011, 12.
- [11] N. G. Khani, M. Abedi, G. B. Gharehpetian, G. H. Riahy, "Offshore Wind Farm Power Control Using HVdc Link". Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 39(2), pp. 168-173, 2016.
- [12] J.P. Barton, D.G. Infield, "Energy storage and its use with intermittent renewable energy", IEEE Transactions on Energy Convers. vol. 19, (2), pp. 441–448, 2004.

زيرنويسها

¹ Battery Energy Storage System

⁴ Exponential Voltage

⁵ Exponential Capacity

- ⁶ Data Sheet
- ⁷ Automatic Generation Control
- ⁸ point of common coupling
- ⁹ Voltage Source Convertor (VSC)
 ¹⁰ Fluctuation Harmonic Content (FHC)

² Squirrel-Cage Induction Generators

³ State of Charge