

تاثیر منبع ذخیره انرژی بر رفتار دینامیکی ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG)

سید مصطفی حسینی*^۱، ایمان پورفر^۲

* ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، smhahvaz@yahoo.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، pourfar@jsu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۱۰

چکیده: بهره برداری از نیروگاه بادی به دلیل ماهیت متغیر باد و شبکه دارای مشکلاتی می باشد. به دلیل عدم ثبات در سرعت وزش باد توان خروجی نیروگاه بادی متغیر می باشد. این عدم قطعیت موجب کاهش کنترل پذیری نیروگاه های بادی می گردد. مشکل دیگر، جزیره ای شدن نیروگاه از شبکه سراسری بر اثر خطا می باشد. در این شرایط عدم تناسب بین توان تولیدی و توان مورد نیاز بار در بخش جدا شده سیستم، موجب دور شدن ولتاژ از مقدار مطلوب می شود. مشکل بعدی که مختص DFIG می باشد، افزایش جریان مبدل سمت روتور در هنگام وقوع خطا در شبکه می باشد. در این مقاله به بررسی تاثیرات منبع ذخیره انرژی بر رفتار نیروگاه بادی با ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در یک ریز شبکه پرداخته شده است. هدف این مقاله هموارسازی توان خروجی DFIG در هنگام تغییرات سرعت باد و حفاظت و جلوگیری از خروج آن از مدار با استفاده از منبع ذخیره انرژی باتری و ابر خازن با دو نوع اتصال مختلف می باشد. با استفاده از شبیه سازی های انجام شده توسط نرم افزار PSCAD نشان داده شده است که سیستم ذخیره انرژی نقش مهمی در بهبود پایداری دینامیکی شبکه و DFIG دارد. همچنین به مقایسه دو سیستم مختلف کنترلی ESS^{□□} پرداخته شده است و نشان داده شده که ESS توزیع شده برای تغییرات درونی DFIG و ESS مجتمع برای خطاهای سمت شبکه تاثیر بهتری در بهبود وضعیت شبکه دارد.

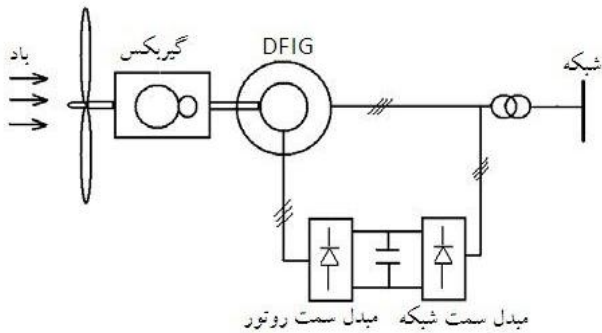
واژه های کلیدی: ژنراتور القایی از دو سو تغذیه، منبع ذخیره انرژی، جزیره ای شدن، هموار سازی توان، پایداری دینامیکی

۱- مقدمه

با وجود این تغییرات در توان و با گسترش و بزرگ شدن مزارع بادی نمی توان پیش بینی دقیقی از میزان تولید این نیروگاه ها داشت و همیشه باید روی حداقل تولید این نیروگاه ها حساب کرد. این کار باعث کاهش راندمان نیروگاه می شود. برای افزایش قابلیت اطمینان توان تولیدی و افزایش راندمان، ضروری است تا یک سیستم ذخیره ساز انرژی در مزرعه بادی نصب شود. هدف از این کار، ذخیره مازاد انرژی در هنگام تولید بیش از مصرف، و تزریق آن به شبکه در زمان پیک مصرف یا عدم وزش باد می باشد. مشکل دیگر نیروگاه های

در سال های اخیر به علت کاهش منابع فسیلی، راندمان کم انرژی و آلودگی زیست محیطی، تمایل به تولید توان از طریق منابع تجدید پذیر مانند انرژی باد افزایش یافته است [۱]. اتصال مزارع بادی به شبکه قدرت با چالش های فراوانی از قبیل کاهش نوسات توان و پیش بینی الگوی باد، اتصال مزارع بادی بزرگ به شبکه های ضعیف، تضمین کیفیت توان و ... روبرو می باشد [۲]. یکی از مشکلات نیروگاه های بادی ماهیت متغیر سرعت باد می باشد که باعث تولید توان خروجی متغیر در نیروگاه های بادی می شود [۳].

لینک وسط به هم متصل شده اند که در شکل (۱) مشاهده می‌شود [۱۲].



شکل (۱): مدل اتصال ژنراتور القایی از دو سو تغذیه به شبکه [۶]

ژنراتور DFIG دارای مزایا و معایبی به شرح زیر می باشد.

- هزینه مبدل الکترونیک قدرت به علت اینکه بازه توان مبدل معمولاً ۲۵-۳۰ درصد کل توان سیستم می‌باشد، کاهش می‌یابد. مبدلی با این توان می‌تواند تا ۳۰ درصد تغییرات سرعت سنکرون را کنترل کند.
- عملکرد این سیستم در مقابل اختلالات خارجی بهتر است.
- به علت کاهش توان در مبدل‌ها، هزینه فیلترها نیز کاهش می‌یابد.

ایراد اصلی DFIG استفاده از جاروبک می‌باشد که نیازمند تعمیرات دوره ای بخصوص در مزارع بادی کنار دریا می‌باشد.

۲-۲- سیستم ذخیره انرژی

انرژی الکتریکی نمی‌تواند در یک سیستم جریان متناوب ذخیره شود و باید در زمانی که تولید می‌شود، مصرف گردد. به همین دلیل، برای ذخیره سازی این انرژی باید آن را به صورت‌های دیگری از انرژی تبدیل نمود که البته نیاز به وجود یک مبدل خوب برای این تبدیل است [۷]. بنابر تعریف، یک سیستم فیزیکی با قابلیت اخذ انرژی برای جایگزینی الکتریسیته در زمان‌های بعد را یک منبع ذخیره ساز انرژی الکتریکی (ESS)، می‌نامند.

۲-۲-۱- سیستم‌های ذخیره انرژی باتری

باتری‌ها انرژی الکتریکی را از طریق واکنش‌های شیمیایی ذخیره می‌کنند. یکی از ویژگی‌های مهم باتری‌ها زمان پاسخ سریع آنها می‌باشد، برخی از باتری‌ها قادرند در کمتر از ۲۰ میلی‌ثانیه به تغییرات بار پاسخ دهند. بازده باتری‌ها بین ۷۰٪ تا ۸۰٪ می‌باشد که بستگی به نوع باتری و نیز سیکل استفاده از آن دارد. تلفات ذخیره

بادی، جزیره‌ای شدن آن به علت وجود خطا در شبکه می‌باشد [۴]. در این شرایط عدم تناسب بین توان تولیدی و توان مورد نیاز بار در بخش جدا شده سیستم، موجب دور شدن ولتاژ از مقدار مطلوب می‌شود که همین امر موجب قطع شدن بار از ژنراتور و یا خاموش شدن ژنراتور می‌شود. مورد دیگر که مختص نیروگاه بادی با ژنراتور القایی از دو سو تغذیه می باشد، عملکرد نیروگاه در طی خطای شبکه است [۵،۶]. خطا در شبکه حتی اگر دور از محل توربین باشد باعث ایجاد افت ولتاژ در نقطه اتصال توربین بادی به شبکه می‌شود. این امر باعث افزایش جریان کشیده شده از سمت مبدل‌های ژنراتور و بوجود آمدن مشکل در سیم پیچ و مبدل سمت روتور می‌شود.

از آنجاییکه بخش الکتریسیته در حال تغییرات عمده است، ذخیره سازی انرژی یک انتخاب مهم برای تحت پوش قرار دادن مسائلی از قبیل تجدید ساختار در بازار برق، وارد شدن منابع تجدیدپذیر، افزایش تولیدات پراکنده، بهبود کیفیت توان و ... است [۷،۸]. پر استفاده‌ترین این منابع، باتری‌ها و ابرخازن‌ها می‌باشند که به علت سرعت در نصب و پاسخ‌گویی به سیستم، از اهمیت بالایی برخوردار هستند [۹،۱۰]. این منابع به طرق مختلف به شبکه متصل می‌شوند که هر کدام دارای مزایا و معایبی می‌باشند [۱۱].

در این مقاله تاثیر منبع ذخیره انرژی با سیستم کنترل طراحی شده بر نیروگاه بادی با ژنراتور القایی از دو سو تغذیه، در هنگام تغییر سرعت باد و تغییرات در شبکه به علت خطاهای مختلف و جزیره‌ای شدن آن مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مسائل بیان شده تنها از جنبه فنی مورد بررسی قرار می‌گیرند و به بررسی مسائل اقتصادی پرداخته نشده است. شبیه سازی و نتایج، در محیط نرم افزار PSCAD/EMTDC V.4.2 انجام گرفته است.

۲- تئوری مسئله

۲-۱- ژنراتور القایی از دو سو تغذیه

یکی از انواع توربین‌های سرعت متغیر، توربین‌های بادی مجهز به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG) می‌باشند. امروزه در اکثر توربین‌های بادی از DFIG استفاده شده است [۶]. این ژنراتور روتور سیم پیچی شده، از طریق استاتور به شبکه متصل می‌شود و روتور از طریق مبدل AC/DC/AC فرکانس متغیر پشت به پشت که از سوئیچ‌های IGBT استفاده می‌کند، به شبکه متصل می‌شود. این مبدل تشکیل شده از دو مبدل مختلف است که توسط یک خازن

همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است قطر نمودار نایکوئیست میزان مقاومت R را نشان داده و با بدست آوردن نقطه اکستریم نمودار به عنوان ω_c ، می توان از فرمول (۱) مقدار خازن مدار RC را بدست آورد.

$$\omega_c = 2\pi f_c = \frac{1}{RC} \quad (1)$$

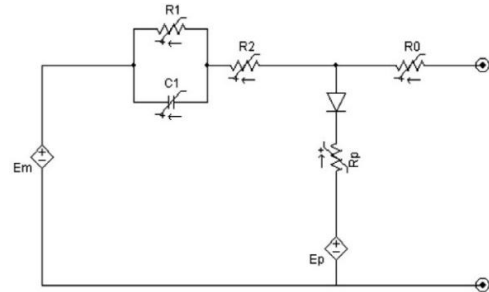
۲-۲-۲- سیستم ذخیره انرژی ابرخازن

یکی دیگر از روش های ذخیره مستقیم انرژی الکتریکی استفاده از ابرخازن ها است. ابرخازن ها انرژی الکتریکی را در میدان الکتریکی خازن که بین الکتروود و الکترولیت تشکیل می شود، ذخیره می کنند. ظرفیت و چگالی انرژی ابرخازن ها هزار برابر بزرگتر از خازن های الکترولیتی است. در مقایسه با باتری ها، ابرخازن ها چگالی انرژی پایین تری دارند، اما ابرخازن ها می توانند دهها هزار بار شارژ و دشارژ شوند و نسبت به باتری ها نرخ شارژ و دشارژ بسیار سریعتری دارند. مهمترین ایراد ابرخازن ها و باتری ها هزینه بالا و لزوم استفاده از مبدل DC به AC در آنهاست که این امر نیز به خودی خود موجب کاهش بازده و افزایش هزینه می گردد. امروزه استفاده همزمان از ابرخازن ها و باتری ها برای ذخیره انرژی الکتریکی مطرح گردیده است؛ در این صورت سیکل های شارژ و دشارژ باتری کاهش یافته و طول عمر آن افزایش می یابد [۱۰].

۲-۲-۳- انواع طریقه اتصال ESS به نیروگاه بادی DFIG

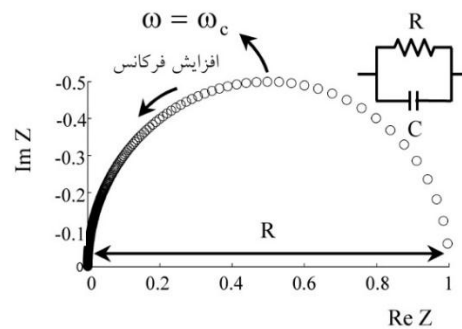
به طور کلی دو نوع اتصال برای منبع ذخیره انرژی به نیروگاه های بادی وجود دارد که در شکل (۴) دیده می شود. به علت استفاده از نیروگاه های بادی به صورت مجتمع می توان ESS را به صورت یک مجموعه کلی در کنار مزرعه بادی قرار داد و یا برای هر توربین از یک ESS مجزا استفاده کرد [۱۱]. هر کدام از این سیستم ها دارای مزایا و معایبی می باشند که برخی از آنها به این شرح می باشند. ESS مجتمع به یک مبدل الکترونیک قدرت نیاز دارد و تمام آن به صورت یکجا و حتی بعد از تاسیس مزرعه بادی می تواند در کنار آن به کار برده شود در حالی که ESS توزیع شده در DFIG باید درون سیستم نصب شود و باید تغییراتی در سیستم نیروگاه اعمال شود. در مقابل در صورت خراب شدن ESS مجتمع کل این سیستم از مدار خارج می شود، اما در حالت ESS توزیع شده، خرابی ESS بر

انرژی باتری ها کم است و در عین حال چگالی ذخیره انرژی الکتریکی بالایی دارند. شاید بتوان ایراد اصلی باتری ها را طول عمر آنها و همچنین حساسیت آنها به شرایط محیطی همچون دما و حرارت دانست. باتری به صورت یک مدار الکتریکی که در شکل (۲) نشان داده شده است مدل می شود [۹].

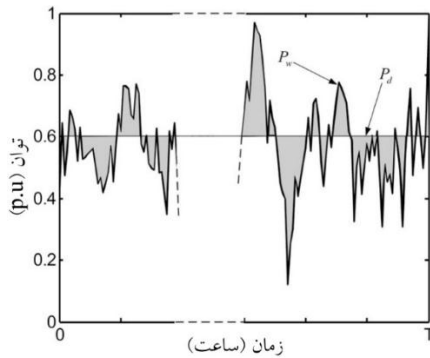


شکل (۲): مدل الکتریکی باتری [۹]

مشخصه سیستم باتری غیرخطی است و نسبت به شرایط داخلی سیستم و عوامل بیرونی تغییر می کند. باتری ایدال بصورت یک منبع و یک مقاومت به صورت سری مدل می شود. در شکل (۲) E_m و R_2 به عنوان منبع اصلی باتری در نظر گرفته می شود. مدار RC موازی به صورت سری با مدار باتری ایدال قرار می گیرد. این سیستم برای شبیه سازی رفتار امپدانس باتری در حالات تغییر شارژ و دشارژ باتری در نظر گرفته می شود. نمودار نایکوئیست امپدانس یک مدار RC موازی در شکل (۳) نشان داده شده است [۱۳]. E_p و R_p برای زمان شارژ در نظر گرفته شده اند که به صورت یک منبع ذخیره انرژی در نظر گرفته شده است. R_0 نیز مقاومت شارژ خارج از محدوده می باشد که با شارژ شدن کامل باتری میزان آن افزایش می یابد. میزان این مشخصه ها نسبت به تغییرات شرایط شارژ و دشارژ تغییر می کند.



شکل (۳): نمودار نایکوئیست امپدانس یک مدار RC موازی [۱۳]



شکل (۵): نمودار توان خروجی یک نیروگاه بادی [۱۴]

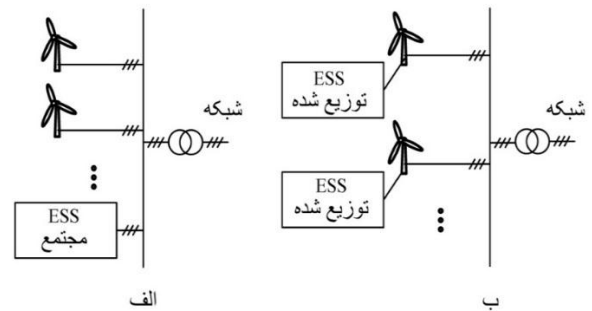
در شکل (۵) نشان داده شده که اگر بخواهیم در بهترین حالت نیروگاه بادی توان ثابتی برابر با $0/6$ پریونیت به صورت مداوم به شبکه تزریق نماید، پس باتری باید ظرفیتی برابر بیشترین منطقه هاشور خورده در بالا یا پایین توان تولیدی ثابت، داشته باشد. بنابراین با توجه به الگوهای پیش بینی باد و انجام شبیه سازی بدون در نظر گرفتن منابع ذخیره ساز، می توان ظرفیت انرژی و توان ذخیره ساز را بدست آورد.

$$W_{ESS}(t) = \int_0^t P_{ESS}(u) du + W_{ESS}(0) \quad (3)$$

در این معادله W_{ESS} و P_{ESS} به ترتیب انرژی و توان ESS می باشند. تبدیلی که برای این ذخیره ساز در نظر گرفته شده، یک مبدل AC/DC دوجته می باشد. عامل اصلی در تعیین ظرفیت نامی این مبدل، تعیین ظرفیت سوئیچ های آن می باشد که خود به دو پارامتر مهم وابسته است؛ ماکزیمم ولتاژ سد معکوس و ماکزیمم جریان هدایت مستقیم. حاصل ضرب این دو پارامتر، ولت آمپر نامی هر سوئیچ را می دهد و مجموع توان همه سوئیچ ها، توان نامی کانورتور می باشد [۱۱].

برای این منبع ذخیره ساز انرژی سیستم کنترلی بر اساس چند هدف پایه گذاری شده است. این اهداف شامل یکنواخت سازی توان خروجی، حفظ توازن و وضعیت شارژ باتری و کنترل ولتاژ در زمان وقوع خطا در شبکه می باشد. برای تولید سیگنال کنترلی توان اکتیو، کنترل حلقه بسته ای بر اساس فیدبک از توان خروجی مزرعه بادی، حالت شارژ یا SOC باتری و ولتاژ ترمینال مزرعه بادی اعمال شده است. اولین قدم در روش کنترلی پیشنهادی در شکل (۶) نشان داده شده است، که در آن مقدار توانی که باید به شبکه تحویل داده شود با توان خروجی نیروگاه بادی مقایسه می شود تا توان باتری P_{bat} بدست آید [۱۵].

یک توربین تاثیر گذار است و تاثیر زیادی در عملکرد مزرعه بادی ندارد.



شکل (۴): کاربرد مجتمع ESS (الف)، کاربرد توزیع شده ESS (ب) [۱۱]

در حالت مجتمع چون خروجی ESS به خروجی نیروگاه متصل می شود، باید از مبدل AC/DC استفاده کرد. اما در حالت توزیع شده، چون ESS به خازن سر وسط DFIG متصل می شود از مبدل DC/DC برای اتصال استفاده می شود.

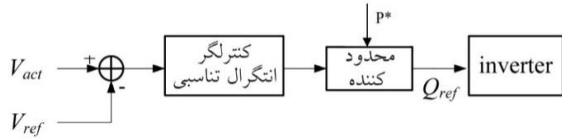
۳- روش حل مسئله

۳-۱- سیستم ذخیره انرژی باتری

سیستم ذخیره انرژی باتری مورد نظر در این مقاله، شامل یک بانک باتری ایدال، یک مبدل الکترونیک قدرت و یک سیستم کنترل می باشد. عمل اصلی این سیستم تبدیل ولتاژ و ذخیره آن در باتری در هنگام افزایش سرعت باد و توان تولیدی و عکس این عمل در زمان کاهش سرعت باد و توان تولیدی نیروگاه می باشد. میزان ظرفیت بانک باتری بسته به میزان تغییرات سرعت باد در منطقه و یا مدت زمان تغییرات در سرعت باد متغیر می باشد. منابع ذخیره ساز انرژی گران بوده و راندمان بهره برداری معینی دارند. از این رو تعیین ظرفیت نامی آنها برای دستیابی به طراحی بهینه سیستم، از اهمیت بالایی برخوردار است [۸]. به طور کلی الگوی باد در تعیین اندازه باتری نقش مهمی دارد، به این معنی که هر چه تغییرات باد بیشتر باشد ظرفیت باتری نیز باید افزایش یابد که این خود به مثابه افزایش هزینه های اقتصادی است. توان مورد نیاز باتری برای تبادل با شبکه در هر لحظه از فرمول (۲) محاسبه می شود [۱۴].

$$P_{bat} = P_{wind} - P_G \quad (2)$$

منظور یک نمونه ولتاژ از ترمینال گرفته شده و با ولتاژ مرجع مورد نظر مقایسه می‌شود. سپس این سیگنال از یک کنترلر انتگرال-تناسبی عبور داده می‌شود تا مقدار مرجع جریان بدست آید و سپس توسط یک محدود کننده، میزان توان راکتیو مرجع بدست می‌آید که این محدود کننده از همان سیستم ظرفیت باتری تبعیت می‌کند [۱۱].



شکل (۸): بلوک محاسبه توان راکتیو مرجع [۱۶]

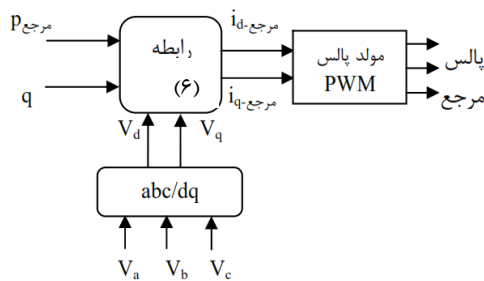
در این مرحله از سیگنال مرجع توان اکتیو و راکتیو برای تولید سیگنال‌های مرجع سوئیچینگ برای مبدل استفاده می‌شود. بدین منظور از ولتاژ و جریان‌های خط ترمینال خروجی مزرعه بادی، نمونه گیری می‌شود. سپس نمونه‌ها را توسط تبدیل پارک به دستگاه مرجع dq می‌بریم. پس توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای از فرمول (۵) محاسبه می‌شوند.

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ -V_q & V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

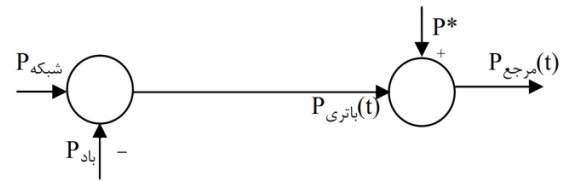
از فرمول (۶) نیز برای بدست آوردن جریان مرجع برای مقایسه با جریان‌های خط استفاده می‌شود.

$$\begin{bmatrix} i_{d-ref} \\ i_{q-ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (6)$$

در نهایت توسط بلوک شکل (۹) پالس مرجع جهت تولید سیگنال سوئیچ به مبدل ارسال می‌گردد.



شکل (۹): بلوک تولید پالس مولد PWM



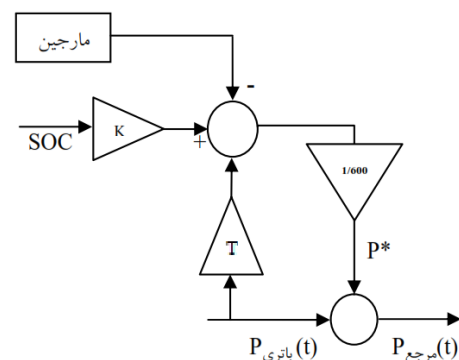
شکل (۶): بلوک محاسبه توان اکتیو مرجع

توان باتری باید با سیگنال تصحیح توان P^* مقایسه شود تا سیگنال مرجع توان بدست آید. از آنجایی که 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 پایین گذر عبور داد تا این نوسانات فرکانس حذف شوند. سیگنال خروجی این فیلتر همان P_{wind} می‌باشد.

SOC باتری که نشان دهنده وضعیت شارژ باتری است در حقیقت نسبت مقدار ظرفیت انرژی موجود باتری به کل ظرفیت آن است که به صورت درصد بیان می‌شود. بهترین محدوده شارژ و تخلیه باتری درون محدوده ۳۰ تا ۷۰ درصد ظرفیت باتری می‌باشد. در شرایط نامی انرژی مبادله شده از فرمول (۴) محاسبه می‌شود.

$$E(t) = P_{bat}(t) \cdot T \quad (4)$$

سیگنال تصحیح توان عبارت است از: "انرژی موجود در باتری \pm انرژی مورد نیاز برای تبادیل با سیستم منهای مارجین انرژی" که در آن K ضریبی است که SOC را از درصد به مقدار حقیقی تبدیل می‌کند. شکل (۷) حلقه کنترل داخلی محاسبه P^* را نشان می‌دهد [۱۶].

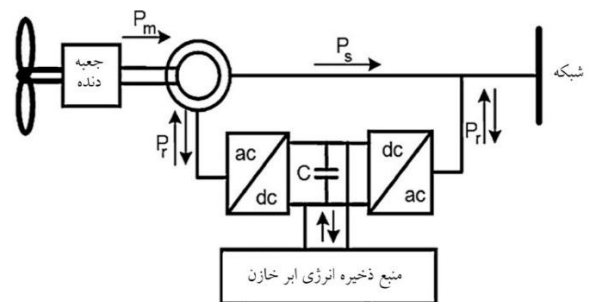


شکل (۷): بلوک محاسبه P^* [۱۶]

اکنون برای کنترل ولتاژ همانند بلوک شکل (۸) در حالات غیر عادی شبکه، باید سیگنال کنترل توان راکتیو را محاسبه کنیم. به همین

۲-۳ - سیستم ذخیره انرژی ابرخازن

سیستم ذخیره انرژی ابرخازن مورد نظر در این مقاله شامل یک ابرخازن، یک مبدل الکترونیک قدرت و یک سیستم کنترل می‌باشد. تفاوت این سیستم با سیستم قبل در مبدل آن می‌باشد. در این سیستم از مبدل DC/DC استفاده می‌شود. این مبدل یک مبدل باک-بوست می‌باشد که در هنگام افزایش توان با کاهش ولتاژ DC، توان را در ابر خازن ذخیره می‌کند و در حالت کاهش توان خروجی توربین، با تخلیه ابر خازن، کاهش توان را جبران می‌کند [۱۷]. شکل (۱۰) طریقه قرار گرفتن ESS در مدار DFIG را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): مدار DFIG به همراه ESS توزیع شده [۱۸]

عوامل مهم در این سیستم، میزان ظرفیت ذخیره ساز انرژی یا همان ابرخازن بسته به میزان شارژ و یا تخلیه انرژی، زمان این عملکرد، قدرت مبدل و ... می‌باشد. هر سلول ابر خازن در محاسبات ریاضی به صورت یک خازن و یک مقاومت سری در نظر گرفته می‌شود. بانک خازن تشکیل شده از یک سری خازن است که به صورت سری و موازی به هم متصل شده‌اند. در نهایت این ابرخازن به صورت یک مقاومت سری معادل ESR^2 و یک خازن در نظر گرفته می‌شود. در ادامه به محاسبه تعداد خازن های سری- موازی در بانک خازن می‌پردازیم. اگر ولتاژ مجاز هر خازن v_{cell} در نظر گرفته شود، تعداد خازن‌ها از فرمول (۷) بدست می‌آید [۱۸].

$$V_{sc-max} = n_s \cdot v_{cell} \quad (7)$$

n_s تعداد خازن‌ها و V_{sc-max} حداکثر ولتاژ بانک خازن می‌باشد. مشابه آن برای محاسبه ESR از فرمول (۸) استفاده می‌شود که در آن R_{cell} مقاومت هر خازن و R_s مقاومت کل می‌باشد. برای تعداد خازن‌ها نیز از فرمول (۹) استفاده می‌شود.

$$R_s = n_s \cdot R_{cell} \quad (8)$$

$$C_s = C_{cell}/n_s \quad (9)$$

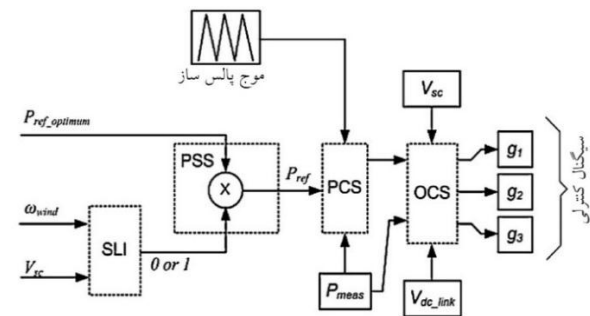
ظرفیت بانک خازن نیز از معادله (۱۰) تعیین می‌گردد در حالیکه V_{sc-nom} ولتاژ نامی، V_{sc-min} حد پایین ولتاژ بانک خازن و t_d مدت زمان تامین انرژی می‌باشد.

$$C_{sc} = \frac{2 \cdot P_c \cdot t_d}{(V_{sc-nom} - V_{sc-min})^2} \quad (10)$$

مبدل باک-بوست نوعی مبدل DC-DC است که می‌تواند به صورت افزایشده یا کاهشده به کار رود. از این مبدل در منابع تغذیه DC رگولاته شده‌ای استفاده می‌شود که در آنها بخواهیم ولتاژ خروجی بیشتر و یا کمتر از ولتاژ ورودی باشد. برای محاسبه سلف این مبدل از معادله (۱۱) استفاده می‌شود که در آن I_L جریان سلف، T دوره زمانی و D چرخه کار است که معادل ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.

$$L = \frac{V_{sc}}{\Delta I_L} \cdot D \cdot T \quad (11)$$

در شکل (۱۱) سیستم کنترلی منبع ذخیره انرژی ابر خازن به طور کلی نشان داده شده است که در ادامه بخش‌های مختلف آن را توضیح می‌دهیم. یکی از تفاوت‌های این منبع ذخیره با منبع قبل در این می‌باشد که سیستم کنترل توان آن در مبدل سمت شبکه DFIG می‌باشد. در واقع کنترل توان اکتیو و راکتیو خروجی با مبدل سمت شبکه DFIG می‌باشد و برای کنترل ولتاژ باید تغییراتی را در سیستم کنترل DFIG انجام دهیم [۱۷].



شکل (۱۱): سیستم کنترلی مبدل باک-بوست منبع ذخیره ابر خازن [۱۸]

این سیستم کنترلی شامل چهار بخش می‌باشد. بخش اول که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود یک سیستم محدود کننده یا SLI^f می‌باشد که در واقع یک سیستم حفاظتی است و در صورت پایین آمدن بیش از حد ولتاژ خازن و یا بالا رفتن سرعت باد، DFIG را خاموش و از مدار خارج می‌کند.

۴- نتایج شبیه سازی

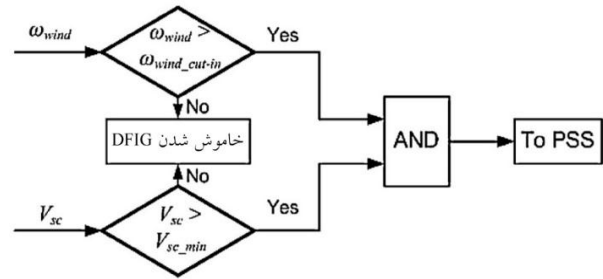
۴-۱- سیستم قدرت نمونه

همانطور که اشاره شد در این مقاله از دو نوع منبع ذخیره انرژی با ساختار و سیستم کنترلی مختلف برای بهبود عملکرد DFIG استفاده شده است. شبکه مورد نظر مطابق شکل (۱۴) شامل یک ریز شبکه می باشد که از طریق یک ترمینال با یک خط انتقال به شبکه سراسری متصل شده است. این ریز شبکه شامل یک مزرعه بادی متشکل از چند توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه می باشد که در مجموع یک پارک بادی با توان ۶۰ مگاوات آمپر را تشکیل می دهند. همچنین یک دیزل ژنراتور با توان ۵ مگا وات آمپر برای تامین توان مبدل های DFIG در حالت جزیره ای، در ریز شبکه وجود دارد. توان مصرف کننده این ریز شبکه، ۲۰ مگاوات توان اکتیو و ۵ مگاوار توان راکتیو می باشد که به شین سیستم توربین بادی متصل شده است. مشخصات سیستم قدرت در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات نیروگاه بادی با ژنراتور DFIG

| شعاع روتور نیروگاه | ۴۰ متر |
|------------------------|-----------------|
| چگالی هوا | ۱.۲۲۵ |
| ضریب قدرت | ۰.۲۸ |
| توان نیروگاه | ۶۰ مگا وات آمپر |
| ولتاژ | ۱۳.۸ کیلو ولت |
| فرکانس | ۶۰ هرتز |
| مقاومت استاتور | ۰.۰۰۵۴ پریونیت |
| مقاومت روتور | ۰.۰۰۶۰۷ پریونیت |
| اندوکتانس متقابل | ۴.۳۶۲ پریونیت |
| اندوکتانس نشتی استاتور | ۰.۱۰۲ پریونیت |
| اندوکتانس نشتی روتور | ۰.۱۱ پریونیت |
| ظرفیت خازن لینک وسط | ۰.۲ فاراد |

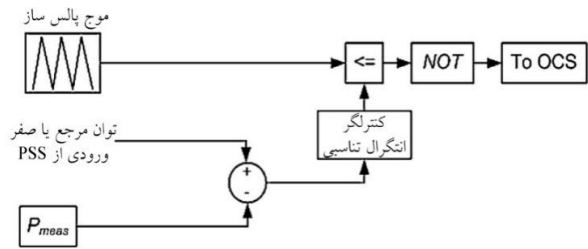
منبع ذخیره انرژی به دو صورت به شبکه متصل می شود. نوع اول ESS مجتمع که به شین خروجی DFIG متصل می شود و در نوع دوم آن ESS توزیع شده که به خازن لینک وسط مبدل DFIG متصل می شود. در شکل (۱۴) طریقه اتصال هر دو نوع ESS به مدار نشان داده شده است. منابع ذخیره انرژی به صورت ایده آل در نظر گرفته شده اند. در جدول (۲) مشخصات منابع ذخیره انرژی بیان شده است.



شکل (۱۲): بلوک SLI [۱۸]

قسمت بعد تنظیم توان مرجع سیستم PSS^۵ را انجام می دهد. این قسمت سیگنال خروجی از SLI را در توان ورودی مرجع ضرب می کند و در صورتی که یکی از شرایط SLI درست نباشد توان ورودی به قسمت بعد صفر می شود.

در شکل (۱۳) سیستم کنترل توان PCS^۶ نشان داده شده است که در آن توان مرجع ورودی با توان خروجی DFIG مقایسه شده و پس از عبور از یک سیستم کنترلر انتگرال-تناسبی به صورت پالس در می آید و به قسمت کنترلی بعد فرستاده می شود.



شکل (۱۳): بلوک کنترل توان PCS [۱۸]

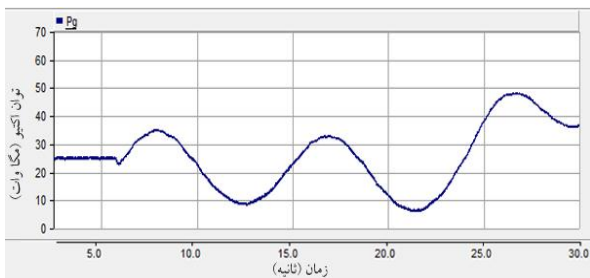
در قسمت کنترل عملیات OCS^۷ که آخرین مرحله این سیستم است سیگنال های سوئیچ ساخته می شوند. اگر ولتاژ بانک خازنی و ولتاژ خازن لینک DC در مقدار مطلوب خود باشند، سیگنال خروجی PCS از طریق g1 به سوئیچ مبدل فرستاده می شود. در صورتی که شروط قبل مورد قبول واقع نشوند سیگنال صفر به g2 ارسال شده و موجب از مدار خارج شدن بانک خازنی می شود. همچنین اگر نیروگاه در حالت غیرعادی قرار گیرد و شروع به جذب توان کند، توان نیروگاه منفی شده و برای حفاظت از منبع ذخیره انرژی از طریق ارسال سیگنال به g3، موجب خارج شدن ESS از مدار می شود.

جدول (۲): مشخصات منابع ذخیره انرژی

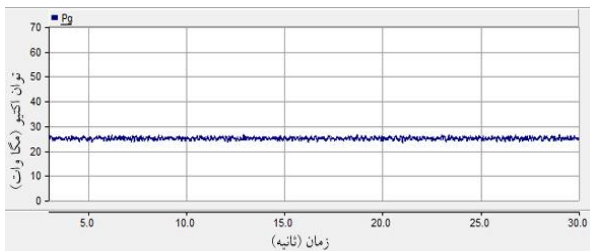
| ولتاژ منبع ذخیره | ۱۳۵۰ ولت |
|------------------------|---------------|
| مقاومت | ۰.۰۰۳ پریونیت |
| زمان تاخیر | ۰.۰۰۱ ثانیه |
| حد بالای ولتاژ | ۱.۰۵ پریونیت |
| حد پایین ولتاژ | ۰.۹۵ پریونیت |
| فرکانس فیلتر پایین گذر | ۱۰۰ هرتز |
| ظرفیت خازن | ۲ فاراد |
| ظرفیت سلف | ۰.۳ پریونیت |
| ولتاژ خازن | ۷۰۰ ولت |

می‌شود با افزایش و کاهش سرعت باد، توان اکتیو هم افزایش و کاهش می‌یابد.

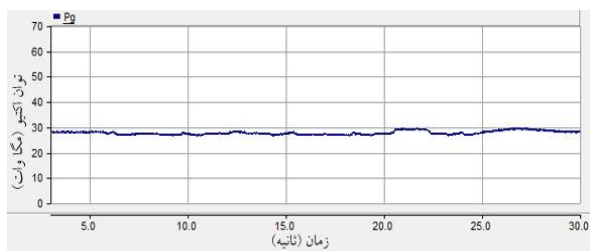
در کنترل توان اکتیو با در نظر گرفتن ESS توزیع شده، با تغییر سرعت باد توان خروجی نیروگاه با توان مرجع مورد مقایسه قرار می‌گیرد. سپس در صورت داشتن تفاوت با ساختن سیگنال سوئیچینگ، ESS شروع به جذب یا ارائه توان از طریق مبدل سمت شبکه DFIG می‌کند. این امر باعث می‌شود که توان اکتیو خروجی DFIG همانگونه که در شکل (۱۷) می‌بینیم در تغییرات سرعت باد ثابت بماند.



شکل (۱۶): توان خروجی DFIG بدون ESS



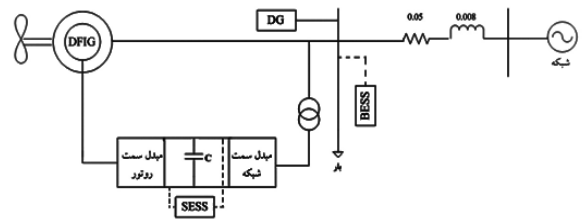
شکل (۱۷): توان خروجی DFIG با وجود ESS توزیع شده



شکل (۱۸): توان خروجی DFIG با وجود ESS مجتمع

همانگونه که در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن ESS مجتمع، خروجی DFIG تحت تاثیر قرار گرفته و توان خروجی را در تغییرات سرعت باد یکنواخت ساخته است. در شکل (۱۹) نیز توان اکتیو و راکتیو مبادله شده در ترمینال DFIG با ESS نشان داده شده است.

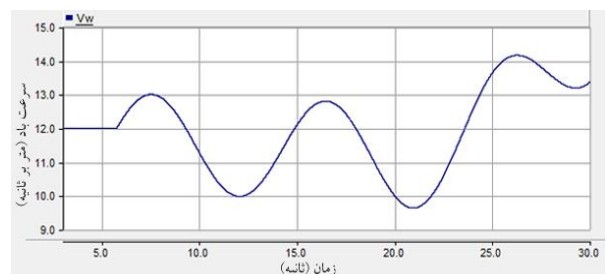
در این بخش، ابتدا به بررسی تاثیر ESS بر کنترل توان اکتیو خروجی DFIG در تغییرات سرعت باد پرداخته می‌شود. در مرحله دوم تاثیر ESS بر جریان مبدل و سیم‌پیچ سمت روتور برای حالت عملکرد بی‌وقفه DFIG در هنگام خطا در شبکه را مورد بررسی قرار می‌دهد. در مرحله سوم مانند مرحله دوم رفتار می‌شود با این تفاوت که در حالت جزیره‌ای شدن ریز شبکه بعد از بر طرف شدن خطا تاثیر ESS بر کنترل ولتاژ را مورد بررسی قرار می‌دهد.



شکل (۱۴): ریز شبکه مورد مطالعه

۴-۲- کنترل توان اکتیو در حالت تغییر سرعت باد

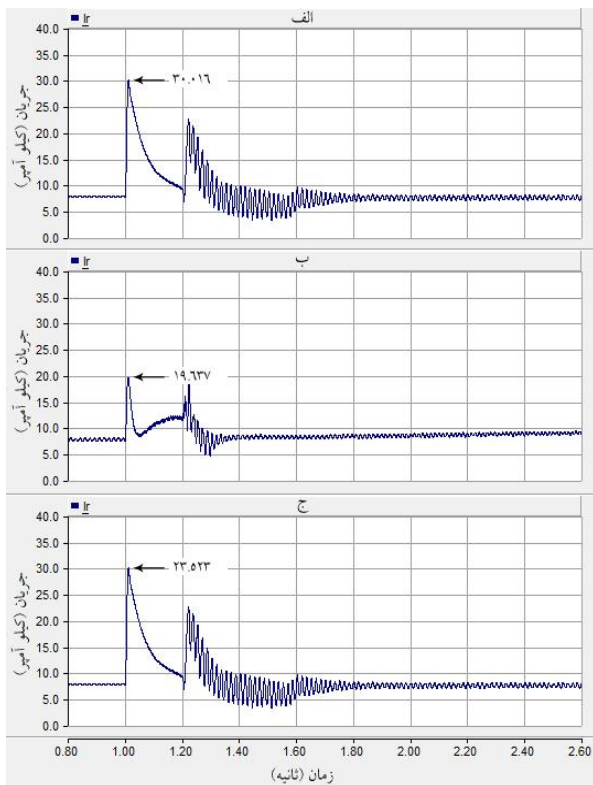
نمونه باد در نظر گرفته شده برای این مقاله در شکل (۱۵) نشان داده شده است. سرعت متوسط باد در نظر گرفته شده در این توربین ۱۲ متر بر ثانیه می‌باشد.



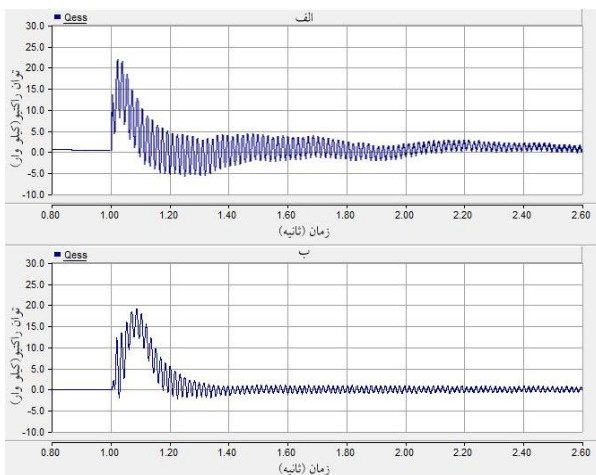
شکل (۱۵): نمودار تغییرات سرعت باد

در شکل (۱۶) توان خروجی DFIG که در معرض این نمونه سرعت باد قرار گرفته است، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده

جریان در حالت خطای سه فاز به زمین در هر دو حالت وجود ESS کاهش یافته است.

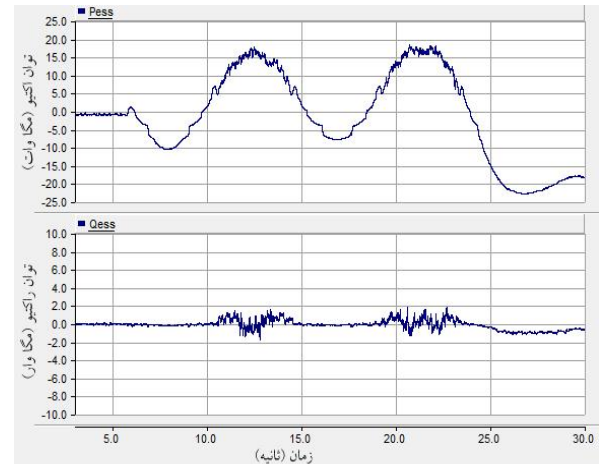


شکل (۲۱): جریان روتور در خطای سه فاز به زمین (الف) بدون ESS (ب) ESS مجتمع (ج) توزیع شده



شکل (۲۲): توان راکتیو تزریق شده از ESS به شبکه (الف) مجتمع ESS (ب) ESS توزیع شده

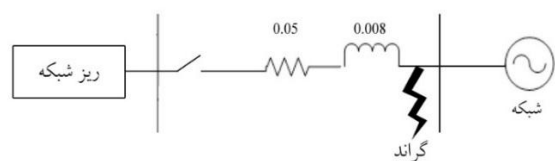
در شکل (۲۲) مشاهده می شود که ESS با تزریق توان راکتیو توانسته بیشینه جریان سمت روتور در خطای سه فاز به زمین کنترل کند. با وجود ESS نیز بیشینه جریان روتور در تمام خطاها، اگر چه کمتر می شود، اما باعث جلوگیری از مشکل اضافه جریان مبدل سمت روتور نمی شود. در واقع از این سیستم به عنوان یک سیستم



شکل (۱۹): توان اکتیو و راکتیو مبادله شده با ESS

۳-۴- تاثیر ESS بر کنترل جریان روتور در طی خطای شبکه

در این قسمت به بررسی خطای سه فاز به گراند ABCG مطابق شکل (۲۰) بر روی سیستم می پردازیم و تاثیرات منبع ذخیره انرژی در حالات مختلف بر جریان روتور را نشان می دهیم. خطا به مدت ۲۰۰ میلی ثانیه اتفاق می افتد و بعد از آن برطرف می گردد. در حین خطا نیروگاه در مدار بوده و بعد از آن نیز به کار خود ادامه می دهد. لازم به ذکر است که هیچ گونه حفاظتی در مراحل زیر برای DFIG به کار برده نشده است. قسمت مهم این نمودارها بیشینه جریان در لحظه اول می باشد، چون بعد از آن سیستم های حفاظتی سمت روتور وارد عمل می شوند.



شکل (۲۰): محل خطا در شبکه

در شکل (۲۱) جریان روتور را در حالات مختلف سیستم از جمله بدون ESS، با ESS مجتمع و با ESS توزیع شده را مشاهده می کنیم. وقتی ESS در مدار نیست مشاهده می شود که به علت افت ولتاژ، جریان مبدل سمت روتور افزایش یافته است. اما با استفاده از ESS مجتمع و به علت کنترل توان در لحظه خطا، این اضافه جریان کاهش یافته است و نیز با کنترل توان توسط ESS توزیع شده و سیستم مبدل سمت شبکه، اضافه جریان مبدل سمت روتور کاهش یافته است. همان گونه که مشاهده می شود بیشینه

کمکی در کنترل جریان استفاده می‌شود. در جدول (۳) نتایج میزان بیشینه جریان در حالات مختلف نشان داده شده است.

جدول (۳): میزان بیشینه جریان مبدل سمت روتور در خطاهای مختلف

| خطای ABC | خطای ABG | خطای AB | خطای AG | بر حسب آمپر |
|-------------|-------------|------------|------------|----------------|
| ۳۰۰.۱۶ | ۳۷.۱۳۷ | ۴۲.۲۱۳ | ۲۶.۸۱۵ | بدون ESS |
| ۱۹.۶۳۷ | ۲۹.۶۹۲ | ۳۵.۹۷۱ | ۲۰.۶۴۴ | مجتمع ESS |
| ۲۳.۵۲۳ | ۳۱.۶۸۰ | ۳۸.۱۳۲ | ۲۱.۶۲۷ | توزیع شده ESS |

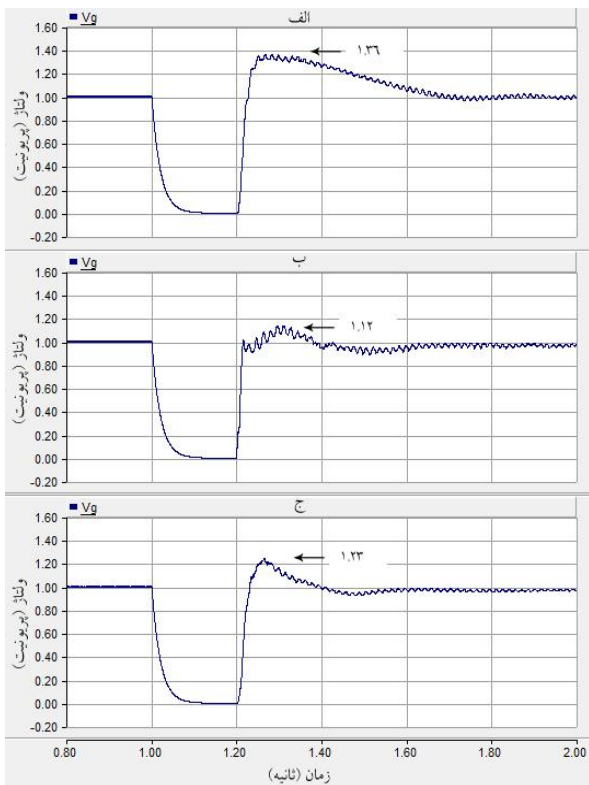
۴-۴- تاثیر ESS بر کنترل ولتاژ ریز شبکه بعد از

جزیره‌ای شدن

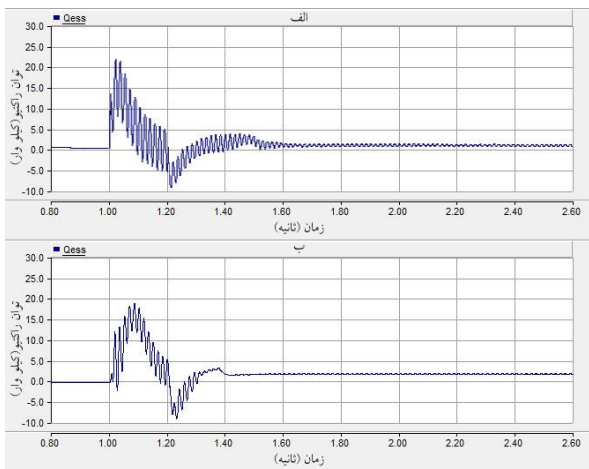
در این بخش به بررسی ولتاژ ریز شبکه در حالت جزیره‌ای شدن بعد از خطا پرداخته می‌شود. در این قسمت هم شبکه در سه حالت بدون وجود ESS، با ESS مجتمع و ESS توزیع شده مورد بررسی قرار گرفته است. شبکه مورد نظر مانند قبل می‌باشد با این تفاوت که این بار خطا بر طرف نشده و مزرعه بادی بعد از وقوع خطا از شبکه سراسری جدا می‌شود. در این قسمت خطای سه فاز به زمین در شبکه رخ داده و اضافه ولتاژ ایجاد شده در ترمینال ریز شبکه بعد از رفع خطا در شکل (۲۳) می‌شود. همانطور که دیده می‌شود در این نوع خطا ولتاژ از حد مجاز مورد نظر بیشتر می‌شود که می‌توان با افزایش ظرفیت منبع ذخیره انرژی و یا استفاده از هر دو سیستم کنترلی مورد نظر آن را کنترل نمود. در شکل (۲۴) نیز خروجی توان راکتیو برای کنترل ولتاژ در خطای سه فاز به زمین مشاهده می‌شود. در جدول (۴) بیشینه ولتاژ بعد از جزیره‌ای شدن ریز شبکه در حالات مختلف استفاده از ESS با یکدیگر مقایسه شده اند.

جدول (۴): میزان بیشینه ولتاژ بعد از جزیره‌ای شدن شبکه در خطاهای مختلف

| خطای ABC | خطای ABG | خطای AB | خطای AG | بر حسب پرینیت |
|-------------|-------------|------------|------------|------------------|
| ۱.۳۶ | ۱.۲۴ | ۱.۲۵ | ۱.۲۱ | بدون ESS |
| ۱.۱۲ | ۱.۰۳ | ۱.۰۷ | ۱.۰۲ | مجتمع ESS |
| ۱.۲۳ | ۱.۰۶ | ۱.۰۹ | ۱.۰۵ | توزیع شده ESS |



شکل (۲۳): ولتاژ ترمینال در خطای سه فاز به زمین (الف) بدون ESS (ب) ESS مجتمع (ج) توزیع شده



شکل (۲۴): توان راکتیو تزریق شده از ESS به شبکه (الف) مجتمع ESS (ب) توزیع شده

۵- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیرات منبع ذخیره انرژی ESS بر رفتار دینامیکی توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه DFIG در حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج شبیه سازی مشخص است که هر دو سیستم ESS در کنترل توان اکتیو خروجی ریز شبکه در تغییرات سرعت باد موفق عمل کرده اند و

- Equipped With Doubly Fed Induction Generators*”, IEEE Trans. On Industry appl, Vol.45, No.1, Feb 2009.
- [5] Feng Wu, Xiao-Ping Zhang and Keith Godfrey, and Ping Ju “*Modeling and Control of Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator*,” IEEE Power Syst. Conf. Expo. pp. 1404-1409. 2006.
- [6] J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Grundling, J. R. Pinheiro, H. L. Hey, “*A Survey on Variable Speed wind Turbine System*”, conference offederal university of santa maria, Brazil, 2002.
- [7] Paul W. Parfomak: *Energy Storage for Power Grids and Electric Transportation: A Technology Assessment*, A Specialist in Energy and Infrastructure Policy, March 27, 2012.
- [8] Anindita Roy, Shireesh B. Kedare, Santanu Bandyopadhyay, “*Application of design space methodology for optimum sizing of wind-battery systems*” Applied Energy, No.86 , PP. 2690-2703, 2009.
- [9] 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.
- [10] C. Abbey and G. Joos, “*Supercapacitor energy storage for wind energy applications*,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 43, no. 3, pp. 769-776, May 2007.
- [11] W. Li, G. Joos “*Comparison of energy storage system technologies and configurations in a wind farm*,” IEEE Power Syst. Conf. Expo. pp. 1280-1285. 2007.
- [12] A. Ostadi , A .Yazdani , R .K .Varma “*Modeling and Stability Analysis of a DFIG-Based Wind-Power Generator Interfaced With a Series-Compensated Line*,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no.3, pp. 1504-1514, Jun 2009.
- [۱۳] مهدی صدری، عباس شولایی “مدل سازی داخلی باتری سرب اسیدی با در نظر گرفتن اثر سطح شارژ” هفدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ۲۲ الی ۲۴ اردیبهشت ۱۳۸۸، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [14] 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, PP. 2690-2703, sep 2008.
- [15] 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., No. 1, pp. 1244-1251, 2006.
- [16] Matthew Clayton, Cody Hill, “*Battery Energy Storage and Wind Energy Integrated into the Smart Grid*,” IEEE Trans. On Energy Convers, 2011.
- [17] Liyan Qu, Wei Qiao, “*Constant Power Control of DFIG Wind Turbines With Supercapacitor Energy Storage*” IEEE Trans On Industry Application, Vol. 47, No. 1, Jan 2011.

باعث افزایش بازده نیروگاه و کاهش نوسانات توان شده‌اند. همچنین هر دو از قدرت پاسخگویی خوبی در برابر تغییرات سرعت باد برخوردار می‌باشند. در بررسی مورد دوم نیز دیده می‌شود که منبع ذخیره انرژی در کاهش بیشینه جریان روتور در هنگام وقوع خطا توانسته است عملکرد سیستم‌های حفاظتی را بهبود بخشد و با تزریق به موقع توان راکتیو در شبکه و تاثیرگذاری بر ولتاژ، بیشینه جریان اولیه مبدل سمت روتور را کاهش دهد و موجب حفاظت بیشتر از مبدل و سیم پیچ سمت روتور شود. در مورد سوم نیز با کنترل توان راکتیو، ولتاژ نیروگاه در حالت جزیره‌ای شدن و بعد از رفع خطا، به سرعت و بدون خارج شدن از محدوده مجاز به حالت عادی خود باز می‌گردد.

در این مقاله نیز دو منبع ذخیره انرژی با سیستم کنترل، منبع ذخیره و مبدل متفاوت در عملکردهایی مشابه مورد مقایسه قرار گرفته که در حالت کنترل توان، سیستم ذخیره انرژی توزیع شده کنترل بهتری بر توان خروجی نیروگاه و در دو حالت کنترل جریان روتور در وقوع خطای شبکه و کنترل ولتاژ در هنگام جزیره‌ای شدن ریزش‌بکه، منبع ذخیره مجتمع بهتر عملکردده و تاثیر بیشتری دارد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر ESS توزیع شده در تغییرات درونی خود نیروگاه بیشتر است. زیرا این سیستم کنترلی وابسته به سیستم کنترلی نیروگاه می‌باشد و تغییرات درونی نیروگاه را از طریق فیدبک‌های موجود، سریعتر حس می‌کند. اما در طی تغییرات در شبکه، ESS مجتمع به دلیل عملکرد مستقل از نیروگاه بادی عملکرد بهتری دارد. از طرفی به علت کنترل بخشی از توان اکتیو توسط نیروگاه بادی در طی عملکرد ESS مجتمع، این منبع ذخیره انرژی می‌تواند ظرفیت بیشتری را برای تزریق یا جذب توان راکتیو قرار دهد.

مراجع:

- [1] R. H. Lasseter, “*Microgrids*,” in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, , vol. 1, pp. 305-308, Jan 2002.
- [2] Olimpo Anaya-Lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Phill Cartwright, Mike Hughes : *Wind Energy Generation Modelling and Control*, A John Wiley and Sons, Ltd, 2009.
- [3] Xisheng Tang, Wei Deng, Zhiping Qi “*Investigation of the Dynamic Stability of Microgrid*” IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, pp. 1-9. 2013.
- [4] W. Qiao, G. K. Venayagamoorthy, R. G. Harley, “*Real Time Implementation of a STATCOM on a Wind Farm*

- [18] Irtaza M.Syed, Bala Venkatesh, Bin Wu, Alexandre B. Nassif "Two-layer control scheme for a Supercapacitor Energy Storage System coupled to a Doubly Fed Induction Generator" Electric Power Systems Research, vol.86, pp. 76-83, 2012.

رزومه



سید مصطفی حسینی در اهواز متولد شده است (۱۳۶۴). تحصیلات دانشگاهی را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد (۱۳۸۶) و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (۱۳۹۴) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه کیفیت توان، و دینامیک سیستم‌های قدرت و انرژی‌های تجدید پذیر است.

زیرنویس‌ها

- 1 Doubly fed induction generator
- 2 Energy storage system
- 3 Equivalent series resistance
- 4 System limits indicator
- 5 Presetting system
- 6 Power control system
- 7 Operation control system