

طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر کنترلر منطق فازی نوع II جهت کاهش نوسانات ولتاژ لاینک DC توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

علی درویش فالچی

استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد شادگان، دانشگاه آزاد اسلامی، شادگان، ایران

a_darvishfalehi@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۱۳

چکیده: این مقاله به منظور کاهش نوسانات ولتاژ لاینک DC در سیستم تبدیل انرژی بادی سرعت متغیر مبتنی بر ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ارائه می‌شود. در لاینک DC مربوط به PMSG از یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ طیار متصل به ماشین القایی قفس سنجابی استفاده می‌شود. هدف بکارگیری از FESS کاهش نوسانات ظاهر شده در توان تزریقی به شبکه و تنظیم شارش توان است که از طریق ارسال/دریافت توان از FESS به هنگام بیشبود/کمبود توان شبکه صورت می‌پذیرد. جهت بهبود عملکرد PMSG و کنترل ولتاژ لاینک DC، کنترل‌کننده منطق فازی نوع II پیشنهاد می‌شود که مورد مطالعه و مقایسه با دو کنترل‌کننده کنترلر PI و منطق فازی نوع I قرار می‌گیرند. از مبدل متصل به شبکه به منظور کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو جهت بهره‌برداری در ضریب توان واحد استفاده می‌شود. مدل دینامیکی سیستم پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB-Simulink شبیه‌سازی شده است و نتایج بدست آمده عملکرد مناسب کنترل‌کننده پیشنهادی را به اثبات می‌رساند.

واژه‌های کلیدی: سیستم تبدیل انرژی، توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، سیستم ذخیره سازی انرژی چرخ طیار، کنترل‌کننده منطق فازی نوع II.

۱- مقدمه

سرمایه‌گذاران در چند سال اخیر تولید انرژی الکتریکی از انرژی باد توانسته است براساس تغییرات آب و هوایی و امنیت منبع انرژی در میان منابع تولید توان الکتریکی رشد چشمگیری داشته باشد [4]. هم‌اکنون تولیدکنندگان توربین‌های بادی متعددی در سراسر جهان وجود دارند که جهت افزایش قابلیت عملکرد آنها از ساختارهای متنوعی ژنراتورها و مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده می‌شود [5]. اصولاً توربین‌های بادی در دو نوع سرعت ثابت و متغیر باد انرژی الکتریکی را تولید می‌کنند. با افزایش اندازه توربین‌های بادی، تکنولوژی ساخت آن‌ها از نوع سرعت ثابت به سرعت متغیر تغییر کرده است چراکه این نوع توربین‌ها در مقایسه با توربین‌های سرعت ثابت بازدهی بسیار بالاتری دارند [6,7].

به دلیل راه‌اندازی مستقیم ژنراتورهای سنکرون آهنربا دائم نسبت به دیگر ژنراتورهای توربین بادی سرعت متغیر در برخی کاربردها بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ژنراتورها ممکن است به صورت طرح

در حال حاضر جامعه جهانی درصدد کاهش مؤثر مصرف سوخت‌های فسیلی جهت تولید برق می‌باشد که تاثیر بسزایی در تغییر اقلیم جهانی داشته است. در واقع تغییرات آب و هوایی در ارتباط مستقیم با تولید گازهای گلخانه‌ای می‌باشد [1,2]. سیستم‌های الکتریکی در مقایسه با دیگر سیستم‌های انرژی از منابع انرژی با آلودگی کمتر می‌تواند بهره‌مند شوند. با توجه به افزایش تقاضای بیش از حد انرژی الکتریکی و همچنین مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر جهت تولید برق بصورت قابل توجهی افزایش یافته است. لذا تلاش در جهت افزایش تولید انرژی الکتریکی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر است تا نگرانی‌ها از کاهش منابع سوخت فسیلی و آلودگی‌های زیست محیطی کاهش یابد [3]. با توجه به پیشرفت و توسعه صنایع مربوط به سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی و همچنین تشویق

به مبدل بوست برای دستیابی به سیگنال بهینه جریان مرجع انجام می-شود.

در همین راستا این مقاله یک توربین بادی PMSG را مورد مطالعه قرار می‌دهد که مستقیماً به شبکه متصل می‌باشد که لینک DC آن به یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار (FESS) مجهز است. این سیستم FESS سرعت پایین از یک چرخ طیار متصل به ماشین القایی قفس سنجابی کلاسیک استفاده می‌کند [18]. در طی این سال‌ها مطالعات و تحقیقات صنعتی متعددی در خصوص بکارگیری از سیستم‌های ذخیره‌ساز چرخ طیار را با توجه به مزیت‌های بیشتر آن‌ها اعم از دینامیک‌های بالا، طول عمر بالا و ماهیت زیست محیطی مناسب ارائه شده‌اند. اگر چه مدت‌های زیادی از چرخ‌های طیار استفاده شده است ولی در سال‌های اخیراً به دلیل قابلیت‌های منحصر به فرد کاربرد آنها در مصارف انرژی بادی بسیار بالا رفته است. با وجود این که سیستم‌های FESS تنها برای مدت کوتاهی می‌توانند انرژی را ذخیره‌سازی کنند، اما این مدت زمان برای توربین‌های بادی که اغلب در مناطق بادخیز نصب می‌گردند مناسب است [19-21].

این سیستم FESS به منظور کاهش نوسانات تولیدی در توان تزریقی به شبکه و تنظیم شارش توان ارائه می‌شود. سیستم ذخیره‌ساز انرژی هم در زمان‌های عملکرد نامی سیستم و نیز در زمان‌های اغتشاشی توربین بادی را حمایت می‌کند تا پایداری سیستم حفظ شود [22]. در زمان بروز اغتشاش از سیستم ذخیره‌ساز انرژی جهت ذخیره‌سازی انرژی اضافی در سیستم توربین بادی در شبکه قدرت استفاده می‌شود تا ولتاژ لینک DC در مقدار نامی خود با کمترین نوسان محفوظ بماند. یکی از مشکلات اصلی این سیستم، استراتژی کنترلی بخش‌های مختلف توربین بادی و سیستم FESS و همچنین راندمان کلی و عملکرد دینامیکی آن است. لذا جهت کاهش نوسانات ولتاژ از کنترل‌کننده منطق فازی نوع II استفاده می‌شود. در دهه گذشته کنترل‌رهای منطق فازی (FLC) برای آنالیز و کنترل سیستم‌های غیرخطی بکارگیری می‌شدند. کنترلر فازی، کنترلری مبتنی بر توصیف بوده که سرعت و دقت پاسخی بالایی دارد و طراحی آن مبتنی بر دانش و تجربه فرد خبره است که این کنترل‌کننده وابستگی به مدل سیستم تحت مطالعه ندارد.

در مقایسه با کنترل‌کننده‌های مرسوم که جهت افزایش عملکرد توربین بادی از روش ترکیبی تنظیم ضرایب کنترل‌کننده تناسبی با استفاده از کنترل‌کننده فازی نوع I انجا می‌شود، این مقاله برای افزایش عملکرد توربین بادی ضرایب کنترل‌کننده تناسبی و انتگرالی را حذف کرده و از سیستم تکمیلی مبتنی بر کنترل‌کننده منطق فازی نوع II استفاده شده است تا اینکه نوسانات ولتاژ و جریان کاهش یابد.

در حقیقت کنترل‌کننده منطق فازی نوع II تنظیم و کنترل مولفه‌های dq جریان استاتور PMSG را بعهده می‌گیرد که مورد مطالعه و مقایسه با دو کنترل‌کننده کنترلر PI و منطق فازی نوع I قرار می‌گیرند. سیگنال‌های خطا در سیستم کنترلی مبتنی بر کنترل‌کننده فازی نوع II ولتاژ شبکه را در تمام شرایط بارگیری شبکه از کم باری تا بار کامل در

چندقطبی و ساختار بدون دنده باشند که عملکرد سرعت پایینی داشته و به دلیل عدم حضور جاروبک‌ها نیاز کمتری به تعمیر و نگهداری دارند [8]. در این نوع ژنراتورها جهت استخراج حداکثر توان بادی موقع اتصال به شبکه، کنترل‌پذیری کاملی وجود خواهد داشت و در حالت وقوع خطا نیز قابلیت عملکردی بالاتری را ارائه می‌دهد و پشتیبانی شبکه نیز از آن صورت می‌پذیرد. بنابراین، راندمان و قابلیت اطمینان این نوع توربین بادی در مقایسه با دیگر توربین بادی سرعت متغیر بیشتر می‌باشد [9].

با توجه به اینکه توان خروجی توربین‌های بادی تابع سرعت وزش باد بوده و عدم امکان تعیین دقیق سرعت وزش باد، توان خروجی توربین بادی دارای عدم قطعیت است که از دو منظر قابل بررسی است [10]. در اولین منظر، به این دلیل که توان خروجی این منابع قابل پیش‌بینی دقیقی نمی‌باشد، جهت افزایش قابلیت اطمینان شبکه و تأمین انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان حتی در مدت زمان کاهش وزش باد نیازمند ذخیره‌سازهای انرژی هستیم. در این صورت، چنانچه توان تولیدی منابع بادی از مقدار مورد انتظار کمتر باشد، مقدار کسری توان از طریق ذخیره‌سازهای انرژی تأمین می‌شوند و نیز در حالتی که توان تولیدی منابع بادی بیش از مقدار پیش‌بینی شده باشد، توان اضافی تولیدی در ذخیره‌سازهای انرژی ذخیره شده تا در زمان‌های پیک مصرف مورد استفاده قرار گیرد. لذا، در نظر گرفتن عملکرد ذخیره‌سازهای انرژی در حضور منابع بادی اهمیت دوچندانی دارد. از دیگر منظر به دلیل ماهیت متغیر توان تولیدی منابع بادی، ولتاژ سیستم تحت نوسان‌های شدیدی است که استفاده از روش کنترلی کارآمد جهت کاهش نوسانات ولتاژ دارای اهمیت زیادی است [11-13].

در مرجع [14] یک سیستم تبدیل انرژی باد مستقل مجهز به کنترل ردیاب حداکثر توان جهت انتقال ماکزیمم توان ارائه شده است. در این مقاله یک سیستم بادی PMSG مستقل از شبکه در نظر گرفته شده است که مجهز به سیستم کنترل mppt حلقه بسته است که توسط lookup table کنترل توان خروجی آن با تنظیم سرعت شفت می‌کند صورت می‌پذیرد.

در مرجع [15] یک استراتژی حداکثر تولید توان مستقل برای سیستم‌های تبدیل انرژی باد پیشنهاد شد که سیستم کنترل mppt آن مبتنی بر هیستریزس مستقل از مشخصه ژنراتور-توربین بوده است.

در مقاله [16] یک اینورتر منبع جریان جهت جبران‌سازی توان اکتیو PMSG پیشنهاد شد. توربین PMSG آن بصورت متصل به شبکه با مدل مبدل سمت ژنراتور رکتیفایر دیودی بوده و مبدل سمت شبکه آن نیز بصورت اینورتری تایریستوری بوده است.

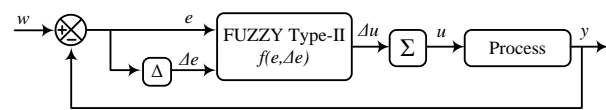
در مرجع [17] یک روش کنترل d-q ارائه شد که بدون وجود سنسور ردیابی نقطه حداکثر توان توربین بادی PMSG انجام می‌شود. عملکرد آن بر اساس کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو تولیدی توسط توربین بادی توسط جریان محورهای d و q می‌باشد، و همچنین ردیابی نقطه حداکثر توان توربین بادی با استفاده از کنترل جریان dc ورودی

که در این مقاله جهت کنترل سرعت مرجع و جریان سلف از کنترل کننده منطق فازی نوع II پیشنهاد می شود که با کنترل کننده های PI و کنترلر فازی نوع I مورد مقایسه قرار می گیرند

۴-۲- مدلسازی سیستم کنترل PMSG

یکی از مهم ترین وظایف هر سیستم ژنراتور بادی، تنظیم دقیق مولفه های dq جریان استاتور PMSG است. در اینجا از دو کنترل کننده مجزا جهت کنترل جریان های i_{sd} و i_{sq} استفاده می نماید. جهت سادگی می توان از دو کنترلر تناسبی-انتگرالی با پارامترهای تناسبی و انتگرالی مشابه استفاده کرد. از کنترلرهای جریان جهت تولید مراجع ولتاژ $v_{sd,ref}$ و $v_{sq,ref}$ استفاده می شود که تحت تبدیل پارک معکوس قرار می گیرند تا ولتاژهای مرجع ($u_{wcl}, u_{wb1}, u_{wcl}$) وارد بلوک مدولاسیون پهنای پالس شده و سیگنال های سوئیچینگ بدست آید.

با توجه به سادگی و مقاوم بودن کنترل کننده PI، جریان های منتجه نوسانی بوده و تاثیرگذاری بر روی شبکه را نیز دارد. در این قسمت کنترلر فازی مدلسازی می شود که جریان دقیقتری را فراهم کنند. نکته ممکن است. جهت تنظیم جریان های i_{sd} و i_{sq} تامین کننده شبکه، کنترلرهای PI بخش قبلی با کنترل کننده های فازی نوع I و نوع II با استنتاج مددانی جایگزین می شوند که در شکل ۴ ارئه شده است.



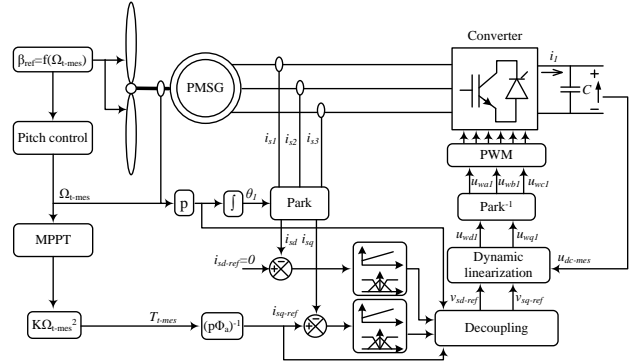
شکل (۴): بلوک کنترل کننده فازی مورد مطالعه

ورودی های مورد نیاز کنترلر منطق فازی، خطاهای جریان و تغییرات آنها شامل Δe_d و Δe_q می باشند. خروجی های این کنترلر تغییرات ولتاژهای کنترلی v_{sd} و v_{sq} می باشند. قواعد فازی مورد استفاده جهت مرحله استنتاج بگونه ای انتخاب می گردند که مجموعه فازی ورودی کنترلر را به ازای هر جفت (e_d و Δe_d) تشکیل دهند. در کنترل کننده های مطرح شده، در مرحله استنتاج از روش max-min و از روش مرکز ثقل برای فرآیند غیرفازی سازی استفاده می شود.

کنترل کننده های منطق فازی نوع II که به آنها کنترلرهای فازی-فازی نیز اطلاق می گردد، بسیار مشابه با فازی نوع I بوده با این تفاوت که در آن توابع عضویت دارای محدوده نیز می باشند که عبارتی در این نوع از فازی، عدم قطعیت ورودی ها نیز دخالت داده شده است. ورودی کنترل کننده، خطای بین مقدار مرجع جریان محور dq/ مرجع سرعت روتور و مقدار اندازه گیری شده جریان محورهای dq/ سرعت روتور محاسبه می شود. ساختار اصلی سیستم کنترل منطق فازی نوع II شامل چهار مؤلفه اصلی می باشد: بخش فازی سازی، پایگاه قواعد، موتور استنتاج و بخش غیرفازی کننده. مراحل ذیل کنترلر را توصیف می نماید [26,25]:

مرحله فازی کردن: بخش فازی کننده مقادیر ورودی عددی را با استفاده از توابع عضویت نرمالیزه شده و بهره های ورودی به متغیرهای فازی تبدیل می نماید. فرآیند فازی کردن با استفاده از مجموعه های فازی

توان (MPPT) جهت تعیین گشتاور مرجع PMSG استفاده می شود. و در صورتیکه توان باد از مقدار نامی بیشتر باشد، زاویه گام پره های توربین بایستی جهت تثبیت توان کنترل شوند. پس از آن در سیستم کنترل PMSG، مقادیر مرجع جریان های استاتور بدست آمده و مبدل، با استفاده از کنترل کننده های PI جریان های استاتور را کنترل می کنند.



شکل (۲): بلوک دیاگرام سیستم کنترل ژنراتور باد سرعت متغیر

برای کنترل توان VSWG، کفایت که گشتاور الکترومغناطیسی دقیق PMSG، T_{em} محاسبه شود. در کل می توان با انتخاب مقدار مرجع $T_{em,ref}$ ، گشتاور الکترومغناطیسی را بدست آورد. با استفاده از ردیاب حداکثر توان، می توان گشتاور الکترومغناطیسی مرجع را بدست آورد [24]:

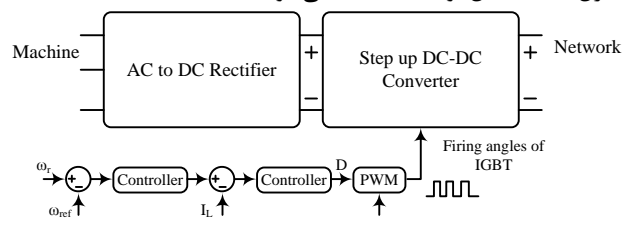
$$T_{em,ref} = \frac{P_{MPPT}}{\Omega_t} = K\Omega_t^2 \quad (10)$$

که توان در MPPT بصورت زیر است [24]:

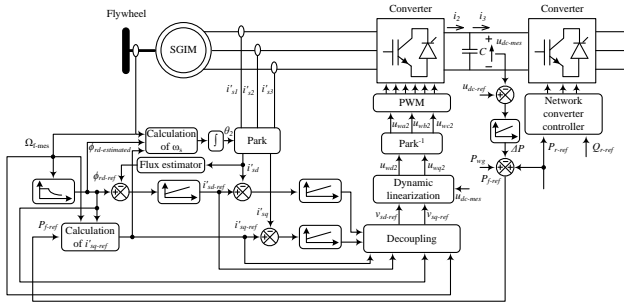
$$P_{MPPT} = \frac{\rho \pi R_t^5 C_{p,max}}{2\lambda_{opt}^3} \Omega_t^3 = K\Omega_t^3 \quad (11)$$

در اینجا از نسبت سرعت بهینه λ_{opt} جهت بدست آوردن ماکزیمم ضریب توان $C_{p,max}$ استفاده می شود.

ساختار PMSG متشکل از توربین باد، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، یکسوساز دیودی و نیز مبدل بوست است که جهت پایداری ولتاژ لینک DC و کنترل MPPT توربین جهت اتصال به لینک DC استفاده شده است. مبدل سمت ژنراتور یک مبدل یکسوساز دیودی بوده که نقش یکسوکندگی را ایفا می نماید. الگوریتم MPPT از طریق کنترل مبدل بوست در لینک DC با استفاده از کنترل کننده PI و یا فازی نوع I و II جریان مبدل بوست و سرعت ژنراتور را کنترل می کند. باتوجه به ساختار توربین مورد استفاده، جهت استخراج ماکزیمم توان از کنترل کننده مبدل بوست استفاده می شود.



شکل (۳): بلوک دیاگرام کنترل مبدل بوست لینک DC



شکل (۶): بلوک دیاگرام استراتژی کنترلی سیستم FESS-IM

سیستم کنترلی ارائه شده در این شکل وابستگی شدیدی به اندازه‌گیری سرعت چرخشی چرخ طیار و همچنین مرجع توان IM که توسط کنترل‌کننده تخمین زده می‌شود، دارد. توان مرجع جهت تخمین مقدار مرجع مؤلفه q جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد درحالی‌که از سرعت به منظور تخمین شار روتور IM و با توسعه مقدار مرجع جریان مؤلفه d استفاده می‌شود. در زیر به توضیحات کلی در مورد سیستم کنترل آن پرداخته می‌شود:

۱-۳- مدل‌سازی سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار

جهت مدل‌سازی چرخ طیار و شفت مکانیکی به اینصورت عمل می‌شود که به ازای یک اینرسی مشخص، انرژی ذخیره شده در چرخ طیار متناسب با مربع سرعت چرخشی می‌باشد که رابطه آن بصورت زیر

$$E_f = \frac{1}{2} J_f \Omega_f^2 \quad (12)$$

است [27]:

که در آن J_f ، ممان اینرسی برحسب kg.m^2 و Ω_f ، سرعت چرخ طیار برحسب rad/s می‌باشد. مقدار انرژی مورد نیاز جهت ذخیره‌سازی توان نامی IM که بصورت P_{n-IM} نشان داده می‌شود، مثلاً بین دو قله موج به

$$E_f = P_{n-IM} \Delta t \quad (13)$$

منظور کاهش نوسان ژنراتور در بازه Δt بصورت زیر ارائه می‌شود:

با ترکیب روابط (۱۲) و (۱۳)، اینرسی مورد نیاز چرخ طیار بصورت زیر

$$J_f = \frac{2P_{n-IM} \Delta t}{\Omega_{f,max}^2 - \Omega_{f,min}^2} \quad (14)$$

قابل ارائه است:

در این رابطه، $\Omega_{f,min}$ و $\Omega_{f,max}$ به ترتیب بیانگر ماکزیمم و مینیمم سرعت چرخ طیار است. به دلیل اینکه شفت مکانیکی چرخش را منتقل می‌-

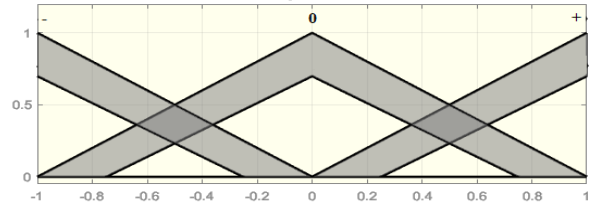
$$J_f = \frac{d\Omega_f}{dt} = T'_{em} - f'\Omega_f \quad (15)$$

نماید، از مدل ساده زیر می‌توان جهت مدل‌سازی استفاده کرد:

جریان‌ها و شار موتور القایی قفس سنجابی کلاسیک را می‌توان توسط مدل پارک بصورت زیر ارائه داد:

$$\frac{di'_{sd}}{dt} = -\frac{R_{sr}}{\sigma L'_s} i'_{sd} + \omega_s i'_{sq} + \frac{M}{\sigma L'_s L_r T_r} \phi'_{rd} + \frac{Mp'}{\sigma L'_s L_r} \phi'_{rq} + \frac{1}{\sigma L'_s} v'_{sd} \quad (16)$$

تعریف شده صورت می‌گیرد که در آن بترتیب بصورت $E+$, 0 , $E-$ برای سیگنال خطا و $DE-$, 0 , $DE+$ برای سیگنال تغییرات خطا (مشتق خطا) نشان داده شده است و مقادیر در نظر گرفته شده برای خروجی نیز $+$, 0 , $-$ می‌باشند. شکل ۵ توابع عضویت ورودی‌های کنترل‌کننده منطق فازی نوع II را نشان می‌دهد.



شکل (۵): خطای متغیر (e) و تغییرات خطای متغیر (Δe)

مرحله استنتاج: موتور استنتاج منطق فازی باتوجه به پایگاه قواعد موجود، اقدام کنترلی مناسب را استخراج می‌کند. این مرحله براساس جدول قواعد زیر بدست می‌آید.

جدول (۱): قواعد فازی برای کنترل‌کننده منطق فازی

Δe \ e	E-	E0	E+
DE-	-	-	0
DE0	-	0	+
DE+	0	+	+

مرحله غیرفازی کردن: اقدام کنترلی فازی صورت گرفته توسط بخش غیرفازی‌کننده و با استفاده از توابع عضویت نرمالیزه شده و بهره‌های خروجی به مقادیر مناسب تبدیل می‌شود. در این مرحله مقدار خروجی باید دوباره به یک مقدار فازی متناسب با عدد تبدیل گردد. خروجی‌ها دارای مقادیر crisp ۱، ۰ و -۱ بترتیب برای توابع $+$ ، 0 و $-$ می‌باشد. متغیرهای ورودی نرمالیزه شده کنترل‌کننده فازی، خطای جریان و تغییرات آن می‌باشند که توسط جدول ۱ به منطق فازی نوع II تبدیل می‌شوند. سیگنال‌های ورودی توسط بخش فازی‌کننده با استفاده از سه تابع عضویت مثلثی بترتیب بصورت $E+$, 0 , $E-$ برای سیگنال خطا و $DE-$, 0 , $DE+$ برای سیگنال تغییرات خطا (مشتق خطا) به اعداد فازی تبدیل می‌شوند.

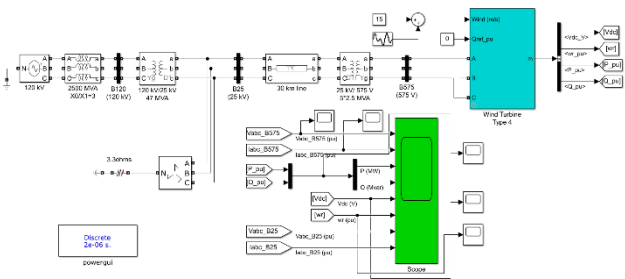
۳- مدل‌سازی سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار

مطابق با شکل ۶، سیستم FESS از یک چرخ طیار، یک ماشین القایی و یک مبدل پشت به پشت تشکیل شده است که گشتاور وارده به چرخ طیار و توان مبادله شده را کنترل می‌کند. استفاده از FESS دو هدف اصلی یعنی تنظیم ولتاژ باس DC و تنظیم شارش توان به سمت ژنراتور و سیستم اصلی را دنبال می‌کند.

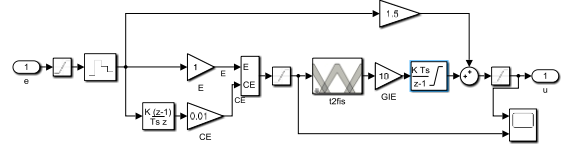
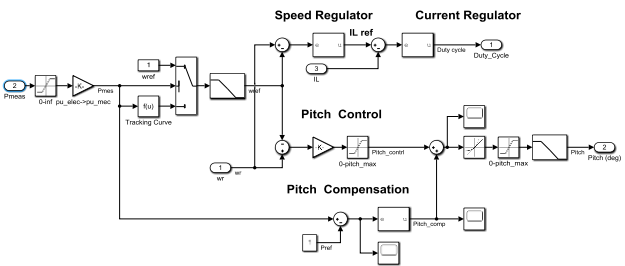
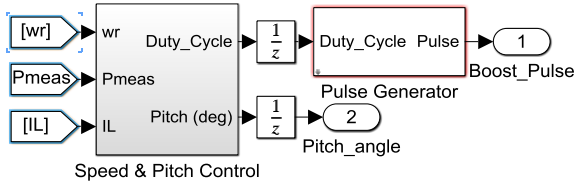
جبران کرد. در قاب مرجع شار جهتدار، از اندازه گیری جریان های استاتور و سرعت روتور جهت تخمین موقعیت بردار فضایی شار روتور استفاده می شود. همچنین، از مدل مناسب دینامیکی اشباع کامل ماشین برای مدل سازی IM استفاده شده است تا امکان بهره برداری در ناحیه تضعیف شار با سرعت های زیر و بالای مقدار مینا فراهم باشد.

۴- نتایج و تحلیل شبیه سازی

در اینجا شبیه سازی سیستم تحت مطالعه مورد تحلیل قرار می گیرد. این سیستم شامل یک توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم است که توسط خط انتقال به شبکه و باس بی نهایت با ولتاژ ۱۲۰kV وصل شده است که سیستم شبیه سازی در نرم افزار MATLAB در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین، زیر سیستم های مربوط به کنترل سرعت و زاویه گام مبتنی بر کنترل کننده منطق فازی نوع II در این شکل قابل مشاهده هستند.



Speed Regulator & Pitch Control



شکل (۸): سیستم شبیه سازی شده در نرم افزار MATLAB

این سیستم یک مزرعه بادی PMSG ۱۰۰kW (۵×۲۰) متشکل از ۵ توربین ۳۵kW است که با ضریب توان ۰,۹ و به توان کل ۱۰۰kW ولتاژ ۵۷۵V را تولید می کند و توسط ترانسفورماتور ۱۲,۵MVA این ولتاژ به

$$\frac{di'_{sq}}{dt} = -\frac{R_{sr}}{\sigma L'_s} i'_{sq} - \omega_s i'_{sd} + \frac{M}{\sigma L'_s L_r T_r} \phi_{rq} + \frac{Mp'}{\sigma L'_s L_r} \phi_{rd} + \frac{1}{\sigma L'_s} v'_{sq} \quad (17)$$

$$\frac{d\phi_{rd}}{dt} = \frac{M}{T_r} i'_{sd} - \frac{1}{T_r} \phi_{rd} + (\omega_s - p' \Omega_f) \phi_{rq} \quad (18)$$

$$\frac{d\phi_{rq}}{dt} = \frac{M}{T_r} i'_{sq} - \frac{1}{T_r} \phi_{rq} - (\omega_s - p' \Omega_f) \phi_{rd} \quad (19)$$

L_r و L'_s بترتیب اندوکتانس های استاتور و روتور برحسب H می باشند. بیانگر اندوکتانس مشترک بین استاتور و روتور برحسب H می باشد. σ بیانگر ضریب پراکندگی ماشین است. R'_s و R_r بترتیب مقاومت های استاتور و روتور هستند. ϕ_{rd} و ϕ_{rq} ترتیب مولفه های d و q شار روتور برحسب Wb هستند. i'_{sq} و i'_{sd} بترتیب مولفه های d و q جریان استاتور برحسب آمپر می باشند. v'_{sq} و v'_{sd} بترتیب مولفه های d و q ولتاژ استاتور برحسب ولت می باشند. p' تعداد جفت قطب های سیستم است. ω_s ضربان استاتور برحسب rad/s است. در ادامه، گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی توسط چرخ طیار را می توان بصورت زیر ارائه داد:

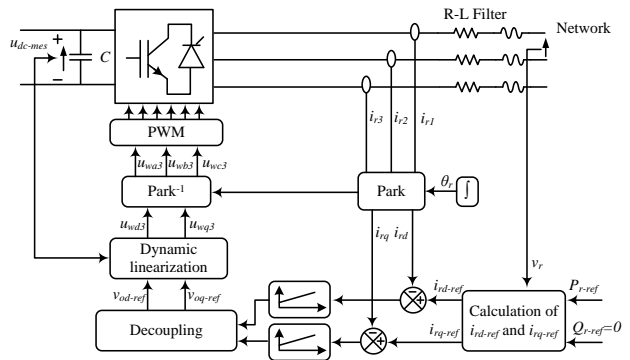
$$T'_{em} = p' \frac{M}{L_r} (i'_{sq} \phi_{rd} - i'_{sd} \phi_{rq}) \quad (20)$$

۲-۳- مدل سازی سیستم کنترل ذخیره ساز چرخ طیار

در اینجا سیستم کنترل چرخ طیار متصل به توربین باد سرعت ارائه می شود. ولتاژ لینک DC بصورت زیر قابل ارائه است:

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (i_1 + i_2 + i_3) \quad (21)$$

استراتژی کنترلی لینک DC در شکل ۷ ارائه شده است. مرجع توان اکتیو شبکه با $P_{f,ref}$ می توان اکتیو بهینه تولیدی توسط VSWG با P_{wg} نشان داده می شود.



شکل (۷): بلوک دیاگرام سیستم کنترل ولتاژ لینک DC

به منظور اطمینان از تأمین توان شبکه در مقدار $P_{r,ref}$ می توان توان اکتیو مبادله شده بین FESS و شبکه را بصورت زیر تعریف نمود:

$$P_{f,ref} = P_{r,ref} - P_{wg} + \Delta P \quad (22)$$

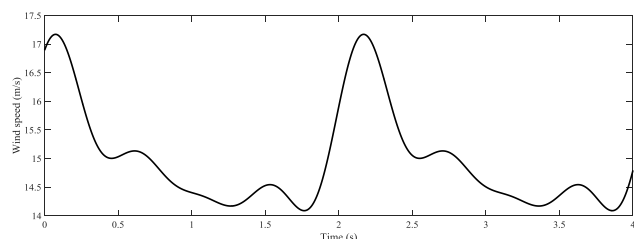
در صورتیکه $P_{f,ref} > 0$ ، توان تولیدی بیشتر از تقاضا بوده و بایستی انرژی اضافی در FESS ذخیره سازی شود و در صورتیکه $P_{f,ref} < 0$ باشد توان تولیدی کمتر از تقاضا بوده و مقدار کمبود انرژی را بایستی توسط FESS

P_{PMSG}	توان نامی ژنراتور و توربین	۱۰۰kW
V_{p-p}	ولتاژ نامی ژنراتور	۵۷۵V
f_s	فرکانس نامی ژنراتور	۶۰Hz
R_s	مقاومت استاتور	$\Omega, ۰.۵$
L_A	اندوکتانس آرمیچر	۰,۰۰۰۶۳۵H
F_r	شار پیوندی	۰,۱۹۲V.s
P	تعداد جفت قطبها	۴
C_{DC}	ظرفیت خازن لینک DC	۹۰mF
V_{DC}	ولتاژ لینک DC نامی	۱۱۰۰V
H_s	ثابت اینرسی توربین	۴,۳۲s

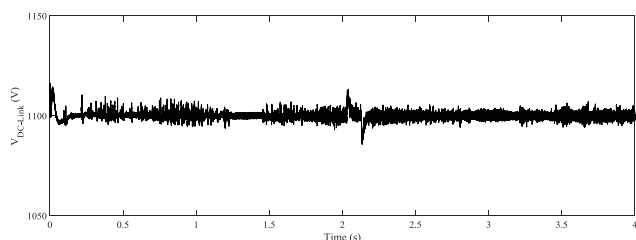
در ادامه جهت بررسی دقیق تاثیر روش پیشنهادی در کنترل ولتاژ سیستم مورد مطالعه مقایسه بین کنترل کننده‌ها در نظر گرفته می‌شود که در زیر ارائه می‌شوند:

۱-۴- ارزیابی عملکرد سیستم قدرت با حضور کنترل-کننده PI

در این قسمت، سیستم قدرت تحت مطالعه در شرایط وزش باد نوسانی قرار می‌گیرد. سرعت باد نیز طبق الگوی شکل ۹ تغییر می‌کند. پاسخ ولتاژ لینک DC سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل (۹): تغییرات سرعت باد



شکل (۱۰): ولتاژ لینک DC ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

هدف استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار، تنظیم توان تزریقی ژنراتور به شبکه با پایداری ولتاژ لینک DC در تمامی شرایط می‌باشد که طبق شکل مشخص است FESS با وجود خطا و افت ولتاژ در شبکه توانسته است ولتاژ باس DC را روی ۱۱۰۰ ولت تنظیم کند بجز در لحظات شروع و پایان خطا که مقدار بدلیل وقوع ناگهانی گذرایی ایجاد می‌گردد و پیک و افتی را ایجاد می‌نماید هرچند این پیک و افت ولتاژ در محدوده مجاز است و کمتر از ۱۰ ولت است. می‌توان مشاهده نمود که ولتاژ باس DC با وجود تغییرات و اغتشاشات تقریباً ثابت مانده است.

ولتاژ ۲۵kV تبدیل می‌شود و سپس توسط خط انتقال ۳۰ کیلومتری با مدل متوسط (مدل π) به شبکه ۲۵kV متصل شده است که این شبکه توسط ترانسفورماتوری دیگر ولتاژ ۲۵kV را به ولتاژ ۱۲۰kV تبدیل نموده و سپس توسط یک خط با مدل خط بلند به شبکه و باس بی‌نهایت ۱۲۰kV متصل می‌شود. در این بین یک ترانسفورماتور زمین با توان ۱۰۰MVA به باس ۲۵kV متصل بوده و اتصال نوترال و نقطه صفر شبکه را تقویت می‌کند. در این شبکه در لحظه ۲,۰۳s افت ولتاژی به اندازه ۰,۳pu در اثر خطا در شبکه رخ می‌دهد که مدت ۰,۱s بطول می‌انجامد. این افت ولتاژ موجب ایجاد خطای جریان در سیم‌پیچ ژنراتور و در نتیجه افزایش ولتاژ لینک DC بدلیل تزریق جریان بالا می‌شود که هدف از این مقاله، کنترل ولتاژ لینک DC ژنراتور به منظور تزریق توان پایدار به شبکه و تغذیه آن می‌باشد. FESS مبتنی بر ماشین القایی قفس سنجایی کوپل شده به چرخ طیار می‌باشد. یک مبدل متصل به شبکه امکان تبادل توان اکتیو و راکتیو با شبکه را فراهم می‌سازد. سیستم کنترلی باید بگونه‌ای عمل نماید تا توان اکتیو و راکتیو بخوبی کنترل شده و ژنراتور در ضریب توان واحد بهره‌برداری گردد. شبیه‌سازی برای کنترل کننده‌های تحت مطالعه در شرایط وزش باد متغیر انجام شده و نتایج آن ارائه می‌گردد. پارامترهای سیستم قدرت تحت مطالعه در جدول ۲ ارائه گردید. توربین بادی PMSG در شرایط نرمال با سرعت باد ۱۱m/s و ولتاژ ۵۷۵V را تولید می‌کند که این ولتاژ توسط ترانسفورماتور محلی به ولتاژ ۲۵kV تبدیل می‌گردد. پس از آن توان تولیدی PMSG به ترانسفورماتوری با نسبت تبدیل ۱۲۰kV/۲۵kV، منتقل شده و در آنجا به ولتاژ ۱۲۰kV تبدیل می‌شود که این ترانسفورماتور توان را توسط فیدر ۲۵kV و ۳۰km به شبکه ۱۲۰kV منتقل می‌نماید. همچنین ولتاژ و فرکانس نامی باس بی‌نهایت شبکه برترتیب دارای مقادیر ۶۰Hz و ۱۲۰kV می‌باشد.

جدول (۲): پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

مقدار	کمیت	نماد
شبکه بالادستی		
۱۲۰kV	ولتاژ خط (فاز به فاز، RMS)	V_{p-p}
$\pi 2 \times 60$ Hz	فرکانس زاویه‌ای شبکه	ω_s
۲۵۰۰MVA	توان مینا	S_{base}
سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ طیار		
۶۶۰KVA	توان نامی ماشین القایی	P_{SC}
۶۹۰V	ولتاژ نامی	V_{SC}
۵۰Hz	فرکانس نامی	f_{SC}
$50 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$	مجموع ممان اینرسی ماشین	J
۲	تعداد جفت قطبها	P
۰,۵	پهنای باند کنترلر	τ_s
1μs	زمان نمونه‌برداری	f_s
۲۰۰۰۰Hz	ماکزیمم فرکانس سوئیچینگ	
توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم		
111 N.m 560Vdc 3000 RPM-126 N.m	نوع و مدل	
۰,۱۱ kg.m ²	ممان اینرسی ژنراتور	J

توان مشاهده نمود که ولتاژ باس DC با وجود تغییرات و اغتشاشات تقریباً ثابت مانده است. کنترل کننده منطق فازی نوع-۲ توانسته بهتر انرژی اضافی را توسط سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار مصرف نماید و از افزایش ولتاژ لینک DC و آسیب به تجهیزات جلوگیری کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سیستم قدرت شامل ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم که لینک DC آن به یک سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار کوپل با ماشین القایی قفس سنجابی است مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. هدف بکارگیری از FESS کاهش نوسانات ظاهر شده در توان تزریقی به شبکه و تنظیم شارش توان است که از طریق ارسال/دریافت توان از FESS به هنگام بیشبود/کمبود توان شبکه صورت می‌پذیرد. بدین منظور جهت کنترل مولفه‌های dq در سیستم کنترلی جریان استاتور PMSG از کنترل کننده منطق فازی نوع II بهره برده شده است. هدف استفاده از کنترل کننده منطق فازی نوع II بهبود عملکرد PMSG و کنترل ولتاژ لینک DC است که متعاقباً با دو کنترل کننده PI و منطق فازی نوع I مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که کنترل کننده منطق فازی نوع II دقت بالایی در کاهش نوسانات ولتاژ لینک DC را دارد.

مراجع

[1] L. Tian, Q. Ye, Z. Zhen, "A new assessment model of social cost of carbon and its situation analysis in China", Journal of Cleaner Production, Vol. 211, 2019, pp. 1434-1443.

[2] L. Pereira, I. D. Posen, "Lifecycle greenhouse gas emissions from electricity in the province of Ontario at different temporal resolutions", Journal of Cleaner Production, Vol. 270, 2020, 122514.

[3] A. D. Falehi, "Half-cascaded multilevel inverter coupled to photovoltaic power source for AC-voltage synthesizer of dynamic voltage restorer to enhance voltage quality", International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, Vol. 34, No. 5, pp. e2883.

[4] D. Maradin, L. Cerović, A. Šegota, "The efficiency of wind power companies in electricity generation", Energy Strategy Reviews, Vol. 37, 2021, 100708.

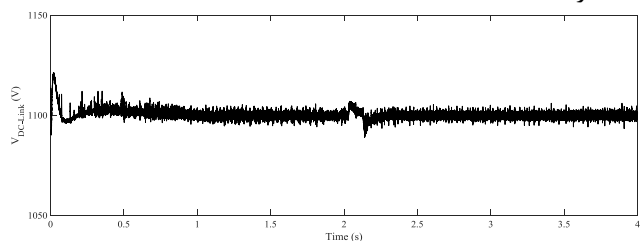
[5] T. R. S. de Freitas, P. J. M. Menegaz, D. S. L. Simonetti, "Rectifier topologies for permanent magnet synchronous generator on wind energy conversion systems: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 54, 2016, pp. 1334-1344.

[6] A. D. Falehi, "An innovative optimal RPO-FOSMC based on multi-objective grasshopper optimization algorithm for DFIG-based wind turbine to augment MPPT and FRT capabilities", Chaos, Solitons & Fractals, Vol. 130, 2020, pp. 109407.

[7] A. D. Falehi, "An optimal second-order sliding mode based inter-area oscillation suppressor using chaotic whale optimization algorithm for doubly fed induction generator",

۲-۴- ارزیابی عملکرد سیستم قدرت با حضور کنترل کننده منطق فازی نوع I

در این قسمت، کنترل کننده منطق فازی نوع I جایگزین کنترل کننده PI می‌شود. پاسخ ولتاژ لینک DC سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار در شکل (۱۱) ارائه شده است.

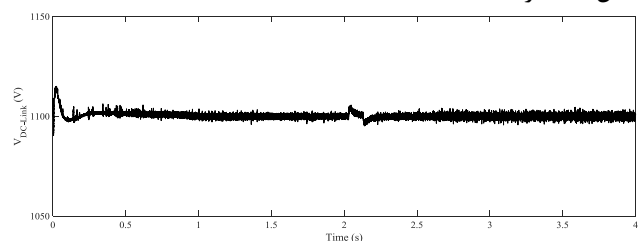


شکل (۱۱): ولتاژ لینک DC ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

مطابق شکل مشخص است سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار با وجود خطا و افت ولتاژ در شبکه توانسته است ولتاژ باس DC را روی 1100 ولت حفظ کند بجز در لحظات شروع و پایان خطا که مقدار بدلیل وقوع ناگهانی گذرای ایجاد می‌گردد و پیک و افتی را ایجاد می‌کند هرچند این پیک و افت ولتاژ در محدوده مجاز است و کمتر از 5V می‌باشد. می‌توان مشاهده نمود که ولتاژ باس DC با وجود تغییرات و اغتشاشات تقریباً ثابت مانده است. البته علاوه بر سنکرون شدن و پایدار شدن زودتر سیستم با استفاده از کنترل کننده منطق فازی نوع-۱، با استفاده از این کنترلر طبق شکل‌های فوق و ولتاژ لینک DC که بیشترین تاثیر را از خطا خواهد دید، با استفاده از کنترلر فازی نوع-۱ سیستم بهتر عمل نموده و توانسته بهتر انرژی اضافی را توسط FESS مصرف نماید و از افزایش ولتاژ لینک DC و آسیب به تجهیزات جلوگیری کند.

۳-۴- ارزیابی عملکرد سیستم قدرت با حضور کنترل کننده منطق فازی نوع II

در این قسمت، کنترل کننده منطق فازی نوع II جایگزین کنترل کننده PI می‌شود. پاسخ ولتاژ لینک DC سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار در شکل (۱۲) ارائه شده است.



شکل (۱۲): ولتاژ لینک DC ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

از این شکل قایل استنباط است که سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار با وجود خطا و افت ولتاژ در شبکه توانسته است ولتاژ باس DC را روی 1100 ولت حفظ مند. تنها در لحظات شروع و پایان خطا که مقدار بدلیل وقوع ناگهانی گذرای ایجاد می‌گردد و پیک و افتی را ایجاد می‌نماید هرچند این پیک و افت ولتاژ در محدوده مجاز است و کمتر از 2V می‌باشد. می‌

generation costs using a Multi-Contingency TSCOPF with nonlinear loads”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 104, 2019, pp. 69-77

[۲۱] S. Karrari, G. De Carne, M. Noe, “Model validation of a high-speed flywheel energy storage system using power hardware-in-the-loop testing”, *Journal of Energy Storage*, Vol. 43, 2021, pp. 103177

[۲۲] W. Chen, T. Zheng, D. Yang, X. Zhang, “Control of wide-speed-range operation for a permanent magnet synchronous generator-based wind turbine generator at high wind speeds”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 136, 2022, pp. 107650

[۲۳] A. Fathy, A. G. Alharbi, S. Alshammari, H. M. Hasanien, “Archimedes optimization algorithm based maximum power point tracker for wind energy generation system”, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 13, No. 2, 2022, pp. 101548

[۲۴] E. M. Youness, D. Aziz, E. G. Abdelaziz, B. Jamal, E. O. Najib, Z. Othmane, M. Khalid, B. BOSSOUFI, “Implementation and validation of backstepping control for PMSG wind turbine using dSPACE controller board”, *Energy Reports*, Vol. 5, 2019, pp. 807-821

[۲۵] A. D. Falehi, “Robust and intelligent type-2 fuzzy fractional-order controller-based automatic generation control to enhance the damping performance of multi-machine power systems” *IETE Journal of Research*, Vol. ۶۸, No. ۴, pp. 2548-2559.

[۲۶] K. Shukla, P. K. Muhuri, “Big-data clustering with interval type-2 fuzzy uncertainty modeling in gene expression datasets”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 77, 2019, pp. 268-282.

[۲۷] A. Rupp, H. Baier, P. Mertiny, M. Secanell, “Analysis of a flywheel energy storage system for light rail transit”, *Energy*, Vol. 107, 2016, pp. 625-638.

International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, Vol. ۳۵, No. ۲, pp. e2963.

[۸] N. Güler, E. Ilrmak, H. Gör, E. Kurt, “An inverter design for a new permanent magnet synchronous generator”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 28, 2017, pp. 17723-17732.

[۹] H. H. Mousa, A. R. Youssef, E. E. M. Mohamed, “Optimal power extraction control schemes for five-phase PMSG based wind generation systems”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 23, No. 1, 2020, pp. 144-155.

[۱۰] J. Wang, D. Bo, X. Ma, Y. Zhang, Z. Li, Q. Miao, “Adaptive back-stepping control for a permanent magnet synchronous generator wind energy conversion system”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 5, 2019, pp. 3240-3249.

[۱۱] Hosseini, E. Aghadavoodi, L. M. F. Ramirez, “Improving response of wind turbines by pitch angle controller based on gain-scheduled recurrent ANFIS type 2 with passive reinforcement learning”, *Renewable Energy*, Vol. 157, 2020, pp. 897-910.

[۱۲] Lihua, L. Min, M. Li, A. Baziar, Z. M. Ali, “Hybrid RNN-LSTM deep learning model applied to a fuzzy based wind turbine data uncertainty quantization method”, *Ad Hoc Networks*, Vol. 123, 2021, pp. 102658

[۱۳] F. Tooryan, H. Hassanzadeh Fard, E. R. Collins, S. Jin, B. Ramezani, “Smart integration of renewable energy resources, electrical, and thermal energy storage in microgrid applications”, *Energy*, Vol. 212, 2020, pp. 118716.

[۱۴] H. Matayoshi, A. M. Howlader, M. Datta, T. Senjyu, “Control strategy of PMSG based wind energy conversion system under strong wind conditions”, *Energy for Sustainable Development*, Vol. 45, 2018, pp. 211-218.

[۱۵] R. Kumar, H. P. Agrawal, A. Shah, H. O. Bansal, “Maximum power point tracking in wind energy conversion system using radial basis function based neural network control strategy”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 36, 2019, pp. 100533.

[۱۶] M. M. Bajestan, H. Madadi, M. A. Shamsinejad, “Control of a new stand-alone wind turbine-based variable speed permanent magnet synchronous generator using quasi-Z-source inverter”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 177, 2019, pp. 106010.

[۱۷] D. R. Lopez-Flores, J. L. Duran-Gomez, M. I. Chacon-Murguia, “A Mechanical Sensorless MPPT Algorithm for a Wind Energy Conversion System based on a Modular Multilayer Perceptron and a Processor-in-the-Loop Approach”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 186, 2020, pp. 106409.

[۱۸] J. I. Sarasúa, G. Martínez-Lucas, M. Lafoz, “Analysis of alternative frequency control schemes for increasing renewable energy penetration in El Hierro Island power system”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 113, 2019, pp. 807-823.

[۱۹] B. Thormann, P. Puchbauer, T. Kienberger, “Analyzing the suitability of flywheel energy storage systems for supplying high-power charging e-mobility use cases”, *Journal of Energy Storage*, Vol. 39, 2021, pp. 102615.

[۲۰] J. Arredondo, P. Ledesma, E. D. Castronuovo, “Optimization of the operation of a flywheel to support stability and reduce

Designing an energy storage system based on type II fuzzy logic controller to reduce dc-link voltage fluctuations of permanent magnet synchronous generator wind turbine

Ali Darvish Falehi

Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Shadegan Branch, Islamic Azad University, Shadegan, Iran

a_darvishfalehi@sbu.ac.ir

Abstract: This paper aims to reduce dc-link voltage fluctuations in variable speed wind energy conversion system based on permanent magnet synchronous generator (PMSG). A flywheel energy storage system (FESS) which is connected to a squirrel cage induction machine is used for dc-link of PMSG. FESS has been applied to reduce the fluctuations of the injected power into the network and to regulate the power flow, which has been carried out by sending/receiving power from FESS when there is an excess/deficiency of the network power. Type-II fuzzy logic controller is proposed to improve the PMSG performance and dc-link voltage control, that its performance has been compared with PI controller and type-I fuzzy logic controller. The grid connected converter is used to separately control the active and reactive power for achievement of unity power factor. The dynamic model of the proposed system has been simulated using MATLAB-Simulink software and the obtained results prove the effective performance of the proposed controller.

Keywords: Energy conversion system, wind turbine permanent magnet synchronous generator, flywheel energy storage system, type II fuzzy logic controller.