طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی مبتنی‌بر کنترلر منطق فازی نوع IIجهت کاهش نوسانات ولتاژ لینک DC توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

علی درویش فالحی
استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد شادگان، دانشگاه آزاد اسلامی، شادگان، ایران
a_darvishfalehi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

چکیده: این مقاله به منظور کاهش نوسانات ولتاژ لینک DC در سیستم تبدیل انرژی بادی سرعت متغیر مبتنی‌بر ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ارائه می‌شود. در لینک 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 می‌پذرد. جهت بهبود عملکرد PMSG و کنترل ولتاژ لینک 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

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[2,1]. 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 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 آن ها از نوع سرعت ثابت به سرعت متغییر تغییر کرده است چراکه این نوع توربین‌ها در مقایسه با توربین‌های سرعت ثابت بازدهی بسیار بالاتری دارند[7,6].

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

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.3.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

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 بادنیازمند ذخیره‌سازهای انرژی هستیم. در این صورت، چنانچه توان تولیدی منابع بادی از مقدار مورد انتظار کمتر باشد، مقدار کسری توان از طریق ذخیره سازهای انرژی تأمین می‌شوند و نیز در حالتی که توان تولیدی منابع بادی بیش از مقدار پیش‌بینی شده باشد، توان اضافی تولیدی در ذخیره سازهای 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 درنظر 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 مبتنی‌بر هیسترزیس 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 mppt 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 به مبدل بوست برای دستیابی به سیگنال بهینه جریان مرجع انجام می‌شود.

در همین راستا این مقاله یک توربین بادی PMSG را مورد مطالعه قرار می‌دهد که مستقیما 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 بیشمار 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 اخیرا به دلیل قابلیت‌های منحصربه‌فرد کاربرد آنها در مصارف انرژی بادی بسیار بالا رفته است. باوجود 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 مبتنی‌بر 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 مبتنی‌بر کنترل‌کننده فازی نوعII ولتاژ شبکه را در تمام شرایط بارگیری شبکه از کم باری تا بار کامل در

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.3.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

محدوده مجاز نگه می‌دارد. همچنین این قابلیت را دارد که در مدت زمان اغتشاش توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم با وجود آن عملکرد مناسبی را ارائه دهد. چراکه کنترل‌کننده فازی می‌تواند با عدم قطعیت‌های شبکه ناشی از غیرخطی بودن آن و نیز ماهیت متغیر سرعت باد سیگنال‌های مناسبی را به سیستم کنترلی شبکه قدرت تزریق کند.

۲- مدلسازی ژنراتور بادی سرعت متغیر

از الزامات اساسی در مطالعه این سیستم، مدلسازی توربین باد، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، سیستم کنترل توربین-ژنراتور است که در زیربخش پیش‌رو به آن پرداخته می‌شوند.

۲-۱- مدلسازی توربین باد

توان ایرودینامیکی روتور توربین بادی معمولا به فرم زیر ارائه می‌گردد [23]:

$$P_t = \frac{1}{2}\rho\pi R_t^{\,2} v^3 C_p(\lambda,\beta) \qquad (۱)$$

که در آن ρ چگالی هوا برحسب $k.g.m^{-3}$، R_t شعاع توربین برحسب m، v سرعت باد برحسب m/s و $Cp(\lambda,\beta)$ ضریب توان می‌باشد. ضریب توان روتور جزو مشخصات مهمی است که بازده ایرودینامیکی توربین را تعیین می‌کند که به زاویه پیچ β و همچنین نسبت سرعت نوک پره λ بستگی دارد. رابطه زیرنسبت بین سرعت مماس نوک پره روتور و سرعت باد را ارائه می‌دهد [23]:

$$\lambda = \frac{R_t \Omega_t}{v} \qquad (۲)$$

در این رابطه Ω_t بیانگرسرعت مکانیکی توربین است که برحسب rad/s می‌باشد. لذا گشتاور مکانیکی توربین را می‌توان بصورت زیر ارائه داد [23]:

$$T_t = \frac{1}{2}\rho\pi R_t^{\,3} v^2 C_t(\lambda,\beta) \qquad (۳)$$

در این رابطه $Ct(\lambda,\beta)$ بیانگر ضریب گشتاور توربین است که بصورت زیر ارائه می‌شود [23]:

$$C_t(\lambda,\beta) = \frac{C_p(\lambda,\beta)}{\lambda} \qquad (۴)$$

مدل مکانیکی شفت انتقال‌دهنده انرژی از روتور به ژنراتور را می‌توان بصورت زیر ارائه داد:

$$J_T \frac{d\Omega_t}{dt} = T_t - T_{em} - f\Omega_t - T_s \qquad (۵)$$

در این رابطه T_t، T_{em} و T_s به ترتیب بیانگر گشتاور توربین، گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور اصطکاکی هستند که برحسب $n.m$ می‌باشند. f ضریب ثابت اصطکاک ویسکوزیته است که بر حسب $n.m.s.rad^{-1}$ می‌باشد.

اکثر توربین‌های بادی مورد استفاده برمبنای سرعت متغیر هستند که در آن‌ها از یک محرک جهت کنترل زاویه گام پره‌ها به منظور کاهش ضریب توان C_p و اطمینان از تثبیت مقدار توان استفاده می‌شود. یک مدل از زایه گام را بصورت زیر می‌توان ارائه داد:

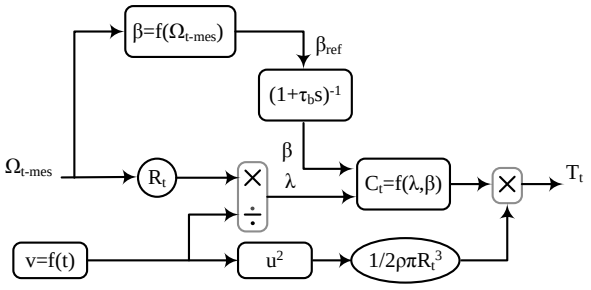
$$\beta = \frac{1}{1+\tau_b s}\beta_{ref} \qquad (۶)$$

که s عملگر لاپلاس و τ_b ثابت زمانی می‌باشد.

بنابراین مرجع زاویه گام را می‌توان بصورت زیر تعریف کرد:

$$\beta_{ref} = \begin{cases} \beta_0 = -2 & for\ \ \Omega_t > \Omega_{tn} \\ \dfrac{\Delta\beta}{\Delta\Omega}\left(\Omega_t - \Omega_{tn}\right) + \beta_0 & for\ \ \Omega_t > \Omega_{tn} \end{cases} \qquad (۷)$$

در این رابطه β_0 زاویه گام اولیه یا مرجع پره‌ها می‌باشد که برحسب درجه ارائه می‌شود. بلوک دیاگرام سیستم کنترل زاویه گام در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل (۱): بلوک دیاگرام سیستم کنترل زاویه گام

۲-۲- مدلسازی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

مدل پارک مدلی دینامیکی رایج برای PMSG می‌باشد. با حذف مؤلفه‌های اعوجاج هارمونیکی و صرفاً درنظر گرفتن هارمونیک اصلی مدل ساده آن حاصل می‌شود که جریان‌های استاتور مربوط به آن با روابط دینامیکی زیر ارائه می‌شوند [24]:

$$\begin{cases} \dfrac{di_{sd}}{dt} = \dfrac{1}{L_s}\left(v_{sd} - R_s i_{sd} + L_s p\Omega_t i_{sq}\right) \\ \dfrac{di_{sq}}{dt} = \dfrac{1}{L_s}\left(v_{sq} - R_s i_{sq} - L_s p\Omega_t i_{sd} - p\Omega_t \phi_a\right) \end{cases} \qquad (۸)$$

در این رابطه R_s مقاومت فاز سیم‌پیچ استاتور برحسب Ω، L_s اندوکتانس استاتور برحسب H، φ_a شار القا شده توسط مغناطیس دائم برحسب wb و زیرنویس‌های sd و sq بترتیب نشان‌دهنده مولفه‌های محور d و q ولتاژ و جریان استاتور می‌باشند. و نیز ثابت p نشان‌دهنده جفت قطب‌ها می‌باشد. در ادامه گشتاور الکترومغناطیسی را می‌توان بصورت زیر ارائه داد:

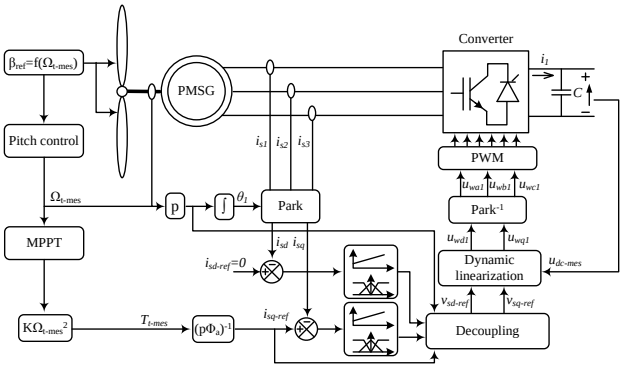
$$T_{em} = p\phi_a i_{sq} \qquad (۹)$$

۲-۳- مدلسازی سیستم کنترل ژنراتور بادی

جهت ماکزیمم بهره‌برداری از سیستم VSWG، بایستی سیستم کنترلی دقیقی درنظر گرفت. ساختار کنترلی کلی VSWG تحت مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است. مطابق شکل، کنترل‌کننده بشدت به سرعت اندازه‌گیری شده توربین Ω_t وابسته است. درصورتیکه توان توربین کمتر از توان نامی آن باشد، از سیستم ردیابی ماکزیمم

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.3.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

توان(MPPT) جهت تعیین گشتاور مرجع PMSG استفاده می‌شود. و در صورتیکه توان باد از مقدار نامی بیشتر باشد، زاویه گام پره‌های توربین بایستی جهت تثبیت توان کنترل شوند. پس از آن در سیستم کنترلPMSG، مقادیر مرجع جریان‌های استاتور بدست آمده و مبدل، با استفاده از کنترل‌کننده‌های PI جریان‌های استاتور را کنترل می‌کنند.



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

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

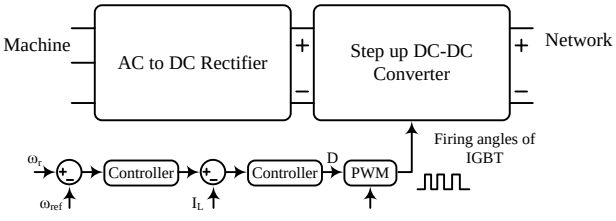
$$T_{em,ref} = \frac{P_{MPPT}}{\Omega_t} = K\Omega_t^{\,2} \qquad (۱۰)$$

که توان در MPPT بصورت زیر است[24]:

$$P_{MPPT} = \frac{\rho \pi R_t^{\,5} C_{p,max}}{2\lambda_{opt}^3}\Omega_t^3 = K\Omega_t^3 \qquad (۱۱)$$

در اینجا از نسبت سرعت بهینهλ_{opt}، جهت بدست آوردن ماکزیمم ضریب توان،$C_{p,max}$ استفاده می‌شود.

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 ا ست. مبدل سمت ژنراتور یک مبدل یکسو ساز دیودی بوده که نقش یکسوکنندگی را ایفا می‌نماید. الگوریتم MPPT از طریق کنترل مبدل بوست در لینک DC با استفاده از کنترل‌کننده PI و یا فازی نوع I و II جریان مبدل بوست و سرعت ژنراتور را کنترل می‌کند. باتوجه به ساختار توربین مورد استفاده، جهت استخراج ماکزیمم توان از کنترل‌کننده مبدل بوست استفاده می‌شود.



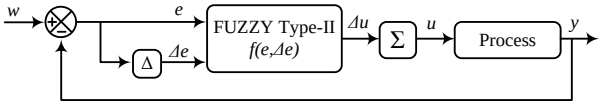
شکل (۳): بلوک دیاگرام کنترل مبدل بوست لینک DC

که در این مقاله جهت کنترل سرعت مرجع و جریان سلف از کنترل‌کننده منطق فازی نوعIIپیشنهاد می‌شود که با کنترل‌کننده‌های PI و کنترلر فازی نوع I مورد مقایسه قرار می‌گیرند

۴-۲- مدلسازی سیستم کنترل PMSG

یکی از مهم‌ترین وظایف هر سیستم ژنراتور بادی، تنظیم دقیق مولفه‌های dq جریان استاتور PMSG است. در اینجا از دو کنترل‌کننده مجزا جهت کنترل جریان‌هایi_{sd}و i_{sq}استفاده می‌نماید. جهت سادگی می‌توان 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 می‌شود که تحت تبدیل پارک معکوس قرار می‌گیرند تا ولتاژهای مرجع(u_{wc1}وu_{wb1}،u_{wc1}) وارد بلوک مدولاسیون پهنای پالس شده و سیگنال‌های سوئیچینگ بدست آید.

با توجه به سادگی و مقاوم بودن کنترل‌کننده PI،جریان‌های منتجه نوسانی بوده و تاثیرگذاری بر روی شبکه را نیز دارد. در این قسمت کنترلر فازی مدلسازی می‌شود که جریان دقیقتری را فراهم کنند. نکته ممکن است.جهت تنظیم جریان‌های$\mathbf{i_{sd}}$و $\mathbf{i_{sq}}$ تامین‌کننده شبکه، کنترلرهای PI بخش قبلی با کنترل‌کننده‌های فازی نوع I و نوع II با استنتاج ممدانی جایگزین می‌شوند که در شکل ۴ ارئه شده است.



شکل (۴): بلوک کنترل‌کننده فازی مورد مطالعه

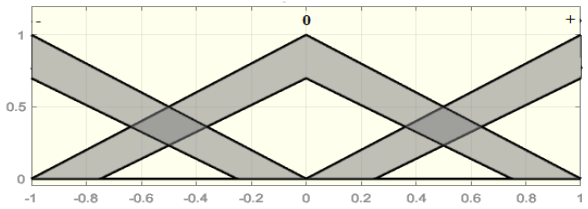
ورودی‌های مورد نیاز کنترلر منطق فازی، خطاهای جریان و تغییرات آن‌ها شامل Δe_dوΔe_q می‌باشند. خروجی‌های این کنترلر تغییرات ولتاژهای کنترلی Δv_{sd}وΔv_{sq}می‌باشند. قواعد فازی مورد استفاده جهت مرحله استنتاج بگونه‌ای انتخاب می‌گردند که مجموعه فازی ورودی کنترلuرا به ازای هر جفت (e_dوΔe_d) تشکیل دهند. در کنترل‌کننده‌های مطرح شده، در مرحله استنتاج از روش max-min و از روش مرکز ثقل برای فرآیند غیرفازی‌سازی استفاده می‌شود.

کنترل‌کننده‌های منطق فازی نوع II که به آن‌ها کنترلرهای فازی-فازی نیز اطلاق می‌گردد، بسیار مشابه با فازی نوع I بوده با این تفاوت که در آن توابع عضویت دارای محدوده نیز می‌باشند که بعبارتی در این نوع از فازی، عدم قطعیت ورودی‌ها نیز دخالت داده شده است. ورودی کنترل-کننده، خطای بین مقدار مرجع جریان محور dq/مرجع سرعت روتور و مقدار اندازه‌گیری شده جریان محورهای dq/سرعت روتور محاسبه می-شود. ساختار اصلی سیستم کنترل منطق فازی نوع II شامل چهار مؤلفه اصلی می‌باشد: بخش فازی‌سازی، پایگاه قواعد، موتور استنتاج و بخش غیرفازی‌کننده. مراحل ذیل کنترلر را توصیف می‌نماید[26,25]:

مرحله فازی کردن: بخش فازی‌کننده مقادیر ورودی عددی را با استفاده از توابع عضویت نرمالیزه شده و بهره‌های ورودی به متغیرهای فازی تبدیل می‌نماید. فرآیند فازی کردن با استفاده از مجموعه‌های فازی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.3.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

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 رااستخراج می‌کند. این مرحله براساس جدول قواعد زیر بدست می‌آید.

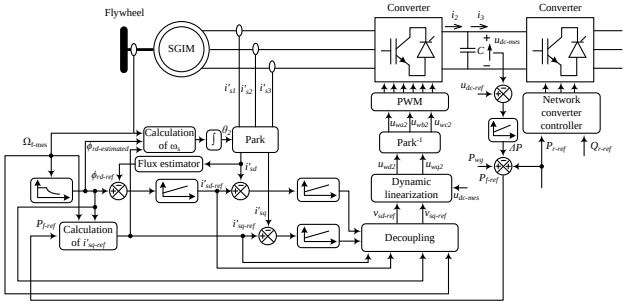
جدول (۱): قواعد فازی برای کنترل‌کننده منطق فازی

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.



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:

۳-۱- 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 است[27]:

$$E_f = \frac{1}{2} J_f \Omega_f^2 \qquad (۱۲)$$

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 ذخیره سازی توان نامی IM که بصورت P_{n-IM} نشان داده می‌شود، مثلاً بین دو قله موج به منظور کاهش نوسان ژنراتور در بازه Δt بصورت زیر ارائه می‌شود:

$$E_f = P_{n-IM}\,\Delta t \qquad (۱۳)$$

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

$$J_f = \frac{2P_{n-IM}\,\Delta t}{\Omega_{f,max}^2 - \Omega_{f,min}^2} \qquad (۱۴)$$

در این رابطه، $\Omega_{f,max}$ و $\Omega_{f,min}$ بترتیب بیانگر ماکزیمم و مینیمم سرعت چرخ طیار است. به دلیل اینکه شفت مکانیکی چرخش را منتقل می‌نماید، از مدل ساده زیر می‌توان جهت مدل‌سازی استفاده کرد:

$$J_f = \frac{d\Omega_f}{dt} = T'_{em} - f'\Omega_f \qquad (۱۵)$$

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

$$\frac{di'_{sd}}{dt} = -\frac{R_{sr}}{\sigma L'_s} i'_{sd} + \omega_s i'_{sq} + \frac{M}{\sigma L'_s L_r T_r}\phi_{rd} + \frac{Mp'}{\sigma L'_s L_r}\phi_{rq} + \frac{1}{\sigma L'_s} v'_{sd} \qquad (۱۶)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.3.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

$$\frac{di'_{sq}}{dt} = -\frac{R_{sr}}{\sigma L'_s} i'_{sq} - \omega_s i'_{sd} + \frac{M}{\sigma L'_s L_r T_r}\phi_{rq} + \frac{Mp'}{\sigma L'_s L_r}\phi_{rd} + \frac{1}{\sigma L'_s} v'_{sq} \quad (۱۷)$$

$$\frac{d\phi_{rd}}{dt} = \frac{M}{T_r} i'_{sd} - \frac{1}{T_r}\phi_{rd} + \left(\omega_s - p'\Omega_f\right)\phi_{rq} \quad (۱۸)$$

$$\frac{d\phi_{rq}}{dt} = \frac{M}{T_r} i'_{sq} - \frac{1}{T_r}\phi_{rq} - \left(\omega_s - p'\Omega_f\right)\phi_{rd} \quad (۱۹)$$

L'_sوL_rبترتیب اندوکتانس‌های استاتور و روتور برحسبHمی‌باشند.M بیانگر اندوکتانس مشترک بین استاتور و روتور برحسبHمی‌باشد. σبیانگر ضریب پراکندگی ماشین است.R'_sوR_rبترتیب مقاومت‌های استاتور و روتور هستند. ϕ_{rd}وϕ_{rq}ترتیب مولفه‌های d وq شار روتور برحسبwbهستند.i'_{sd} و i'_{sq} بترتیب مولفه‌های d وq جریان استاتور برحسب آمپرمی‌باشند.v'_{sd} و v'_{sq} بترتیب مولفه‌های d وq ولتاژ استاتور برحسب ولت می‌باشند.p'تعداد جفت قطب‌های سیستم است.ω_sضربان استاتور برحسبrad/sاست. در ادامه، گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی توسط چرخ طیار را می‌توان بصورت زیر ارائه داد:

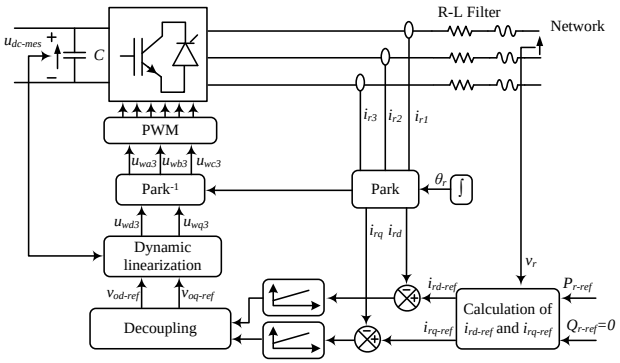
$$T'_{em} = p'\frac{M}{L_r}\left(i'_{sq}\phi_{rd} - i'_{sd}\phi_{rq}\right) \quad (۲۰)$$

۲-۳- مدلسازی سیستم کنترل ذخیره‌ساز چرخ طیار

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

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}\left(i_1 + i_2 + i_3\right) \quad (۲۱)$$

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



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

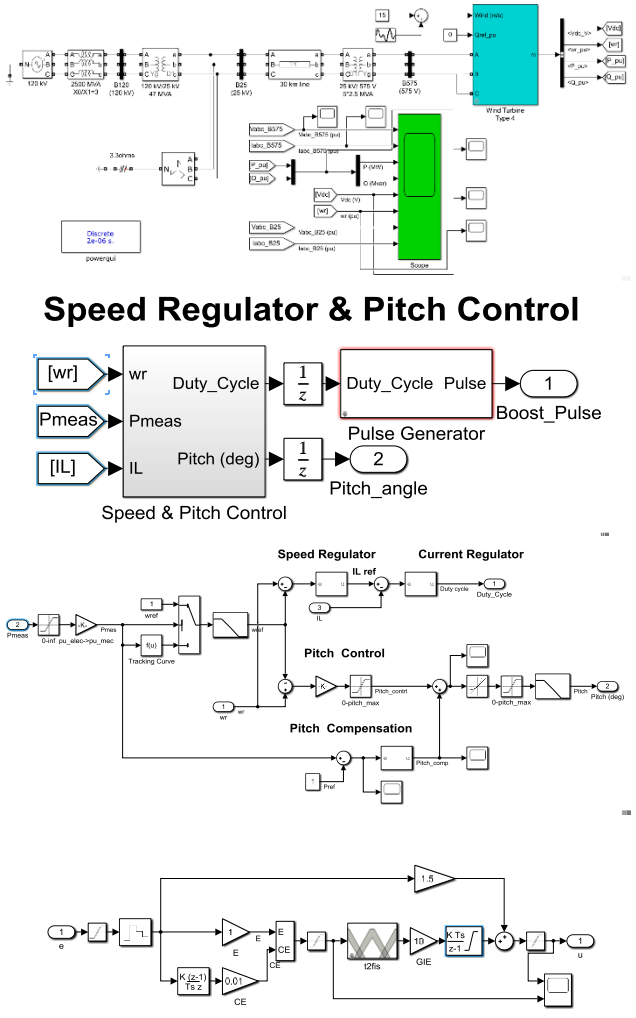
به منظور اطمینان از تأمین توان شبکه در مقدار$P_{r,ref}$می‌توان توان اکتیو مبادله شده بین FESS و شبکه را بصورت زیر تعریف نمود:

$$P_{f,ref} = P_{r,ref} - P_{wg} + \Delta P \quad (۲۲)$$

درصورتیکه$P_{f,ref}>0$، توان تولیدی بیشتر از تقاضا بوده و بایستی انرژی اضافی در FESS ذخیره‌سازی شود و درصورتیکه$P_{f,ref}<0$ باشد توان تولیدی کمتر از تقاضا بوده و مقدار کمبود انرژی را بایستی توسط FESS جبران کرد. در قاب مرجع شار جهتدار، از اندازه‌گیری جریان‌های استاتور و سرعت روتور جهت تخمین موقعیت بردار فضایی شار روتور استفاده می‌شود. همچنین، از مدل مناسب دینامیکی اشباع کامل ماشین برای مدل‌سازی IM استفاده شده است تا امکان بهره‌برداری در ناحیه تضعیف شار با سرعت‌های زیر و بالای مقدار مبنا فراهم باشد.

۴- نتایج و تحلیل شبیه‌سازی

در اینجا شبیه‌سازی سیستم تحت مطالعه مورد تحلیل قرار می‌گیرد. این سیستم شامل یک توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم است که توسط خط انتقال به شبکه و باس بی‌نهایت با ولتاژ ۱۲۰kV وصل شده است که سیستم شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین، زیر سیستم‌های مربوط به کنترل سرعت و زاویه گام مبتنی‌بر کنترل‌کننده منطق فازی نوع II در این شکل قابل مشاهده هستند.



شکل (۸): سیستم شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار MATLAB

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

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.3.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

ولتاژ ۲۵kV تبدیل می‌شود و سپس توسط خط انتقال ۳۰ کیلومتری با مدل متوسط(مدلπ) به شبکه ۲۵kV متصل شده است که این شبکه توسط ترانسفورماتوری دیگر ولتاژ ۲۵kV را به ولتاژ ۱۲۰kV تبدیل نموده وسپس 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 سنجابی 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 کنترل‌کننده‌های 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 باد۱۱m/s 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 بترتیب دارای مقادیر ۶۰Hz و ۱۲۰kV می‌باشد.

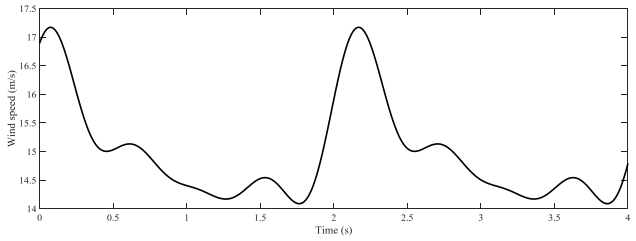
جدول (۲): پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

مقدار	کمیت	نماد
	شبکه بالادستی	
۱۲۰kv	ولتاژ خط(فاز به فاز، RMS)	V_{p-p}
π۲×۶۰Hz	فرکانس زاویه‌ای شبکه	ω_s
۲۵۰۰MVA	توان مبنا	S_{base}
	سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ طیار	
۶۶۰KVA	توان نامی ماشین القایی	P_{SC}
۶۹۰V	ولتاژ نامی	V_{SC}
۵۰Hz	فرکانس نامی	f_{SC}
۵۰۰kg.m^2	مجموع ممان اینرسی ماشین	J
۲	تعداد جفت قطب‌ها	P
۰,۵	پهنای باند کنترلر	
1μs	زمان نمونه‌برداری	τ_s
۲۰۰۰۰Hz	ماکزیمم فرکانس سوئیچینگ	f_s
	توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم	
111 N.m 560Vdc 3000 RPM-126 N.m		نوع و مدل
۰,۰۱۱ kg.m^2	ممان اینرسی ژنراتور	J
۱۰۰kW	توان نامی ژنراتور و توربین	P_{PMSG}
۵۷۵V	ولتاژ نامی ژنراتور	V_{p-p}
۶۰Hz	فرکانس نامی ژنراتور	f_s
Ω۰,۰۵	مقاومت استاتور	R_s
۰,۰۰۰۶۳۵H	اندوکتانس آرمیچر	L_A
۰,۱۹۲V.s	شار پیوندی	F_r
۴	تعداد جفت قطب‌ها	P
۹۰mF	ظرفیت خازن لینک DC	C_{DC}
۱۱۰۰V	ولتاژ لینک DC نامی	V_{DC}
۴,۳۲s	ثابت اینرسی توربین	H_s

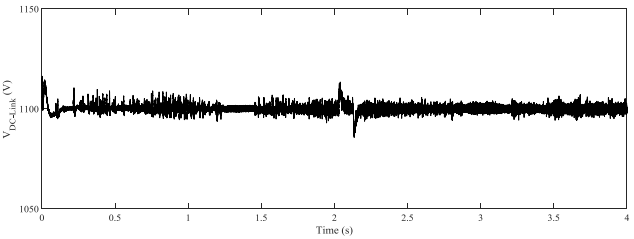
در ادامه جهت بررسی دقیق تاثیر روش پیشنهادی در کنترل ولتاژ سیستم مورد مطالعه مقایسه بین کنترل‌کننده‌ها درنظر گرفته می‌شود که در زیر ارائه می‌شوند:

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



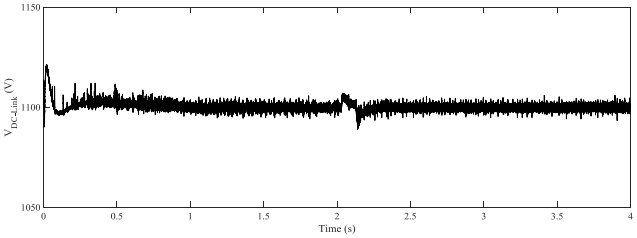
شکل (۱۰): ولتاژ لینک DC ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

هدف استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار، تنظیم توان تزریقی ژنراتور به شبکه با پایداری ولتاژ لینکDC در تمامی شرایط می باشد که طبق شکل مشخص است FESS باوجود خطا و افت ولتاژ در شبکه توانسته است ولتاژ باس DC را روی 1100 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 10 ولت است. می‌توان مشاهده نمود که ولتاژ باس DC باوجود تغییرات و اغتشاشات تقریبا ثابت مانده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.3.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

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

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

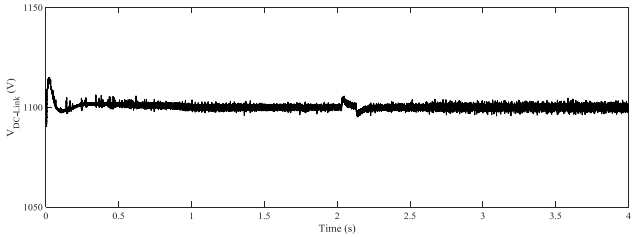


شکل (۱۱): ولتاژ لینک DC ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

مطابق شکل مشخص است سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار باوجود 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 گذرایی ایجاد می‌گردد و پیک و افتی را ایجاد می‌کند هرچند این پیک و افت ولتاژ در محدوده مجاز است و کمتر از ۵V می‌باشد. می توان مشاهده نمود که ولتاژ باس DC باوجود تغییرات و اغتشاشات تقریبا ثابت مانده است. البته علاوه بر سنکرون شدن و پایدار شدن زودتر سیستم با استفاده از کنترل‌کننده 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 نوعII

در این قسمت، کنترل‌کننده منطق فازی نوعII جایگزین کنترل‌کننده 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 باوجود خطا و افت ولتاژ در شبکه توانسته است ولتاژ باس DC را روی1100 ولت حفظ مند. تنها 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 ۲V می‌باشد. می توان مشاهده نمود که ولتاژ باس DC باوجود تغییرات و اغتشاشات تقریبا ثابت مانده است. کنترل‌کننده 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 لینکDC 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 می‌پذرد. بدین منظور جهت کنترل مولفه‌های dq در سیستم کنترلی جریان استاتور PMSG از کنترل‌کننده منطق فازی نوع II بهره برده شده است. هدف استفاده از کنترل‌کننده منطق فازی نوع II بهبود عملکرد PMSG و کنترل ولتاژ لینک DC است که متعاقباً با دو کنترل‌کننده PI و منطق فازی نوع I مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که کنترل‌کننده 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.

[۲]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.

[۳]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. ۳۴, No. ۵, pp. e2883.

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

[۵]T. R. S.de Freitas, P. J. M. Menegáz, 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.

[۶]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.

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

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.3.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

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

[۸]N. Güler, E. lIrmak, 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]. 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. Ramírez, “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. HassanzadehFard, 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]. Arredondo, P. Ledesma, E. D. Castronuovo, “Optimization of the operation of a flywheel to support stability and reduce 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.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.3.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

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 achivement 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.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.3.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]