

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳

سیستم تبدیل انرژی بادی مبتنی بر ژنراتور القایی با سیم پیچ استاتور دوگانه جهت تغذیه بار AC مستقل

علی صفایی نژاد^{۱*}، محسن رحیمی^۲

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

a.safaeinejad@grad.kashanu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

mrahimi@kashanu.ac.ir

چکیده: با توجه به نوسانات سرعت باد در سیستم‌های تبدیل انرژی باد، به علت مشکلات ناشی از ژنراتورهای بادی سرعت ثابت، ژنراتورهای بادی سرعت متغیر بر آن‌ها ترجیح داده می‌شوند. یکی از ژنراتورهای سرعت متغیر، ژنراتور القایی با سیم پیچ استاتور دوگانه است. این نوع ژنراتور در مقایسه با ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه که متداول‌ترین نوع ژنراتور سرعت متغیر در بین توربین‌های بادی محسوب می‌شود، به علت حذف جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان، دارای ساختمان مقاوم‌تر و هزینه تعمیر و نگهداری کمتر می‌باشد، همچنین به علت ساختار روتور قفس سنجابی نسبت به ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه بدون جاروبک با ساختار روتور آشیانه‌ای دارای ساختمان ساده‌ترند.

در این مقاله سیستم تبدیل انرژی باد سرعت متغیر با به کارگیری ژنراتور القایی با سیم پیچ استاتور دوگانه برای تغذیه بار جریان متناوب مستقل از شبکه معرفی می‌شود. سپس با به کارگیری مبدل‌های الکترونیک قدرت یک ساختار مناسب پیشنهاد می‌شود. به منظور تنظیم توان و تثبیت ولتاژ با دامنه و فرکانس مطلوب برای بار مستقل از شبکه تحت شرایط تغییرات بار و سرعت باد با در نظر گرفتن روش‌های کنترلی مناسب حلقه‌های کنترلی برای مبدل‌های الکترونیک قدرت طراحی می‌شود. برای اعتبارسنجی سیستم تحت مطالعه و روش کنترلی مورد نظر، نتایج شبیه‌سازی در محیط SIMULINK نرم‌افزار MATLAB ارائه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: دستگاه مرجع سنکرون، سیم پیچ اول استاتور، سیم پیچ دوم استاتور، مبدل تحریک استاتیکی، مبدل DC/DC دو طرفه.

* نویسنده مسئول

• این مقاله برگزیده کنفرانس SJC 2020 بوده که پس از تکمیل و داوری مجدد پذیرفته شده است.

۱. مقدمه

توسعه تمدن جدید به تولید و مصرف انرژی الکتریکی بستگی دارد [۱]. در سال‌های اخیر با توجه به مصرف روزافزون سوخت‌های فسیلی و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، انرژی باد به‌عنوان یکی از وسیع‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، توجه بسیار زیادی را به خود جذب کرده است [۲]. انرژی باد دارای مزایایی چون فراوانی و توزیع منطقه‌ای وسیع و عاری از هرگونه آلودگی است [۳]. ژنراتورهای القایی سه‌فاز قفسی به‌علت داشتن محاسنی چون ساختار مقاوم، چگالی توان بالا و هزینه پایین، به‌عنوان یک گزینه مناسب برای سیستم‌های توان بادی می‌توانند مطرح گردند [۴]. توربین‌های بادی با ژنراتورهای القایی قفسی ستی (SCIG) سرعت ثابت اولیه دارای مشکلاتی نظیر کیفیت توان، وارد شدن تنش مکانیکی بر روی محور توربین و تنظیم ولتاژ ضعیف با تغییرات سرعت و بار هستند. بنابراین برای کاهش این مشکلات و استخراج توان بهینه باد در فناوری‌های جدید توربین‌های بادی با بهره‌گیری از مبدل‌های الکترونیک قدرت و ساختارهای جدید ماشین‌های الکتریکی از توربین‌ژنراتورهای بادی سرعت متغیر استفاده می‌شود [۵ و ۶]. سیستم‌های توربین بادی سرعت متغیر عمدتاً از نوع ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) یا ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG) هستند [۷ و ۸]. توربین‌های بادی مبتنی بر PMSG چگالی توان و بازدهی بالاتری داشته ولی مشکل آن‌ها قیمت بالای ماده کمیاب مغناطیس دائم، عدم امکان کنترل تحریک و هزینه بالای مبدل از نوع کانورتر کامل است؛ درحالی‌که توربین‌های مبتنی بر DFIG سیستم تولیدی از نوع کانورتر کسری بوده و قیمت پایین‌تری دارد اما مشکل این ژنراتورها جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان آن‌هاست که منجر به بالا رفتن هزینه تعمیر و نگهداری و کاهش قابلیت اطمینان آن‌ها می‌شود [۹ و ۱۰]. ژنراتور القایی با سیم‌پیچ استاتور دوگانه (DSWIG) با ساختار روتور قفسی و بدون جاروبک و ماده مغناطیس دائم انتخابی است که به‌عنوان جایگزین ماشین‌های القایی دوسو تغذیه مطرح می‌شود [۱۱]. ژنراتور DSWIG دارای دو مجموعه سیم‌پیچ سه‌فاز استاتور با تعداد قطب‌های مشترک بوده که هیچ‌گونه اتصال الکتریکی با یکدیگر نداشته و بین آن‌ها فقط پیوند مغناطیسی برقرار است. نوع روتور در ژنراتور DSWIG ساختار مقاوم و ساده قفس سنجایی است. بنابراین این ژنراتورها نسبت به ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه بدون

جاروبک (BDFIG) با تعداد قطب‌های متفاوت سیم‌پیچ‌های استاتور و ساختار خاص و پیچیده روتور آشیانه‌ای ترجیح داده می‌شوند [۱۲-۱۴]. در این نوع ژنراتور به‌علت عدم اتصال الکتریکی بین سیم‌پیچ‌های ژنراتور DSWIG ضمن بهبود سازگاری مغناطیسی^۶ (EMC) سیستم، امکان کنترل توان اکتیو مستقل از توان راکتیو تحت تغییرات سرعت و بار فراهم می‌شود [۴ و ۱۲].

در این مقاله ساختار و نحوه کنترل ژنراتور DSWIG سرعت متغیر متصل به بار AC با قابلیت تنظیم توان تحت شرایط تغییرات بار و سرعت باد با استفاده از مبدل‌های تحریک استاتیکی^۷ (SEC) متصل به سیم‌پیچ‌های استاتور و مبدل DC/DC دوطرفه و اینورتر متصل به بار ارائه می‌شود. در [۱، ۴ و ۱۵] ساختارها و رویکردهای کنترلی برای اتصال ژنراتور DSWIG به شبکه AC و DC پیشنهاد شده است. از نقطه‌نظر اتصال توربین ژنراتورهای بادی DSWIG به بار مستقل تاکنون ساختارها و روش‌های کنترلی مختلفی برای اتصال آن‌ها به بار DC معرفی شده است [۲، ۴ و ۱۶]. اما برای اتصال آن‌ها به بار AC مستقل تاکنون مطالعه‌ای صورت نگرفته است.

در این مقاله با هدف اتصال ژنراتور DSWIG به بار مستقل AC و تأمین توان مورد نیاز بار تحت تغییرات بار و باد ابتدا ساختار مناسب طراحی و معرفی می‌شود و سپس حلقه‌های کنترلی متناظر نیز ارائه می‌گردد. ویژگی بارز ساختار پیشنهادی امکان شارش توان حقیقی از هر دو سیم‌پیچ استاتور و افزایش قابلیت اطمینان سیستم تبدیل انرژی باد و کاهش ریپل گشتاور الکترومغناطیسی در مقایسه با تغذیه بار جریان متناوب با استفاده از ژنراتور SCIG سرعت متغیر است. به‌منظور کنترل توان حقیقی مستقل از توان راکتیو، متغیرهای سه‌فاز ژنراتور به دستگاه مرجع سنکرون با جهت‌یابی شار روتور^۸ (RFO) ارجاع داده می‌شود.

۲. معرفی ساختار توربین ژنراتور DSWIG مستقل

در شکل (۱) منحنی‌های توان برحسب سرعت زاویه‌ای توربین بادی برای سرعت‌های مختلف باد نشان داده شده است. بدیهی است که به‌ازای هر سرعت باد یک نقطه توان بیشینه برای منحنی توان توربین بادی وجود دارد. در این شکل از اتصال همه نقاط توان بیشینه، منحنی P_{opt} که منحنی توان بیشینه است، به‌وجود می‌آید. با توجه به تغییرات و ناپایداری‌های سرعت باد به‌منظور استخراج بیشتر

5. Brushless Doubly Fed Induction Generator
6. Electromagnetic Compatibility
7. Static Excitation Converter
8. Rotor Flux Oriented

1. Squirrel Cage Induction Generator
2. Doubly Fed Induction Generator
3. Permanent Magnet Synchronous Generator
4. Dual Stator Winding Induction Generator

باتری شارژ می‌گردد و اگر توان مورد نیاز بار فراتر از توان تولیدی ژنراتور باشد عملکرد مبدل به صورت مبدل پوست بوده و باتری دشارژ می‌گردد. در این ساختار قابلیت شارش توان حقیقی توسط دو سیم پیچ استاتور وجود دارد که می‌تواند باعث کاهش دامنه و افزایش فرکانس ریبیل گشتاور الکترومغناطیسی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم توان بادی، نسبت به ژنراتورهای القایی سه فاز متداول گردد [۱].

۳. مدل سازی ژنراتور DSWIG در دستگاه مرجع

سنکرون با جهت یابی شار روتور

در ژنراتور DSWIG سیم پیچ های استاتور و روتور شار یکسانی را در فاصله هوایی به اشتراک می‌گذارند. بنابراین با تنظیم شار روتور، شار فاصله هوایی و در نتیجه شار سیم پیچ های استاتور تنظیم می‌شوند. بدین منظور مبدل های SEC با تنظیم دامنه شار روتور در مقدار مرجع، توان راکتیو متغیر ژنراتور را تأمین خواهند کرد. در حوزه پروینیت و با فرض جهت موتوری (جهت جریان‌ها به طرف داخل سیم پیچ های ماشین القایی با سیم پیچ استاتور دوگانه) معادلات حاکم بر این ماشین به دست خواهند آمد. بنابراین معادلات ولتاژ سیم پیچ های استاتور و سیم پیچ روتور در دستگاه مرجع سنکرون RFO به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \bar{v}_{1dq} = \bar{R}_s \bar{i}_{dq} + j\bar{\omega}_s \bar{\psi}_{1dq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\bar{\psi}_{1dq}}{dt} \\ \bar{v}_{2dq} = \bar{R}_s \bar{i}_{2dq} + j\bar{\omega}_s \bar{\psi}_{2dq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\bar{\psi}_{2dq}}{dt} \\ \bar{v}_{rdq} = \bar{R}_r \bar{i}_{rdq} + j(\bar{\omega}_s - \bar{\omega}_r) \bar{\psi}_{rdq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\bar{\psi}_{rdq}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

که متغیرهای \bar{v} , \bar{i} , $\bar{\omega}_b$, $\bar{\omega}_s$, $\bar{\omega}_r$ و $\bar{\psi}$ به ترتیب سرعت زاویه ای روتور، سرعت زاویه ای دستگاه مرجع سنکرون، سرعت زاویه ای مبنای ولتاژ، جریان و شار پیوندی برحسب پروینیت می‌باشند و اندیس های p , C و r نمایانگر پارامترها و متغیرهای سیم پیچ های اول و دوم استاتور و سیم پیچ روتور هستند و از آنجاکه روتور از نوع قفسی بوده، مؤلفه های ولتاژ روتور برابر با صفر می‌شوند.

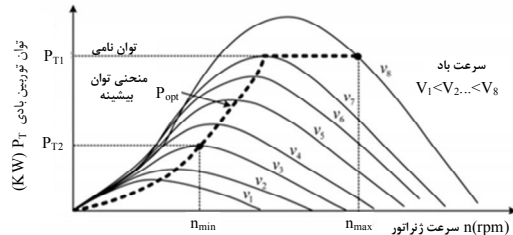
۴. استراتژی کنترلی برای ژنراتور DSWIG سرعت

متغیر

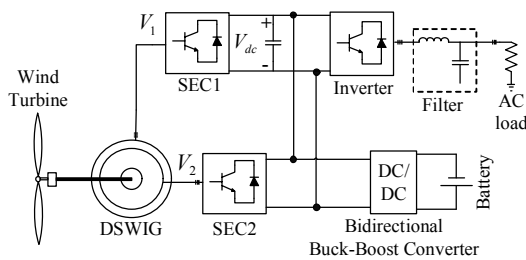
۱.۴. کنترل مبدل های SEC

برای عملکرد توربین در مود (MPPT) مقدار مرجع سرعت (ω_r^*)

انرژی باد، استراتژی ردیابی توان بیشینه^۱ (MPPT) برای سیستم های توان بادی در نظر گرفته می‌شود تا منحنی توان توربین بادی وی منحنی P_{opt} قرار گیرد [۴]. بدین منظور بایستی قابلیت عملکرد سرعت متغیر برای سیستم تبدیل انرژی باد در نظر گرفته شود که این امر توسط مبدل های الکترونیک قدرت انتخابی در ساختار پیشنهادی و به کارگیری روش کنترل مناسب محقق می‌شود.



شکل (۱): منحنی توان-سرعت توربین بادی



شکل (۲): سیستم تولید توان بادی سرعت متغیر متصل به بار مستقل AC با به کارگیری ژنراتور DSWIG

در شکل (۲) ساختار پیشنهادی تولید توان بادی DSWIG متصل به بار مستقل AC نشان داده می‌شود. ژنراتور به کار گرفته شده در این ساختار ژنراتور القایی قفسی با دو سیم پیچ توزیع شده استاتور با تعداد قطب‌ها و تعداد دورهای برابر است که در شیارهای استاتور جاسازی شده‌اند. در این سیستم امکان عملکرد ژنراتور در محدوده وسیع تغییرات سرعت باد با قابلیت تثبیت شار در سرعت های کمتر و مساوی سرعت نامی محقق می‌شود. با کنترل مبدل های SEC توان راکتیو مصرفی و توان حقیقی تولیدی ژنراتور کنترل می‌شود. توان تولیدی ژنراتور از طریق اینورتر متصل به بار AC منتقل می‌گردد. برای عملکرد پایدار مبدل های SEC و اینورتر متصل به بار AC تثبیت دامنه ولتاژ لینک DC ضروری است، بنابراین با کنترل مبدل DC/DC دوطرفه بین باتری و لینک DC دامنه ولتاژ لینک DC تحت تغییرات باد و بار تثبیت می‌شود؛ به طوری که اگر توان تولیدی ژنراتور از توان مصرفی بار بیشتر باشد عملکرد آن به صورت مبدل باک بوده و

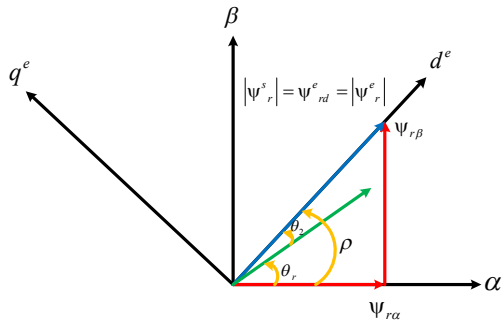
RFO (abc به dqe) و بالعکس (dqe به abc) نشان داده شده است. که $\alpha\beta$ دستگاه ساکن استاتور بوده و $\psi_{r\beta}$ و $\psi_{r\alpha}$ مؤلفه‌های شار روتور در این دستگاه هستند. dq^e دستگاه مرجع سنکرون RFO است که ψ_{rd}^e مؤلفه محور d شار روتور در این دستگاه بوده و ψ_{rq}^e به عنوان مؤلفه q شار روتور در این دستگاه، برابر با صفر می‌باشد. مطابق با شکل (۷) برای انتقال متغیرهای ژنراتور DSWIG به دستگاه مرجع سنکرون RFO (تبدیل abc به dq^e)، محاسبه موقعیت بردار فضایی شار روتور (ρ) ضرورت دارد که با توجه به این شکل، این زاویه مجموع زوایای روتور نسبت به محور α (θ_r) و اختلاف موقعیت روتور با بردار شار روتور در فاصله هوایی می‌باشد که زاویه لغزش (θ_2) نامیده می‌شود. با استفاده از (۱) فرکانس لغزش ω_2 ($\omega_2 = \omega_s - \omega_r$) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\bar{\omega}_2 = \frac{\bar{L}_m}{T_r \omega_b} \frac{(\bar{i}_q + \bar{i}_{2q})}{\bar{\psi}_{rd}} \quad (6)$$

بنابراین با اندازه‌گیری سرعت روتور و اندازه‌گیری جریان‌های استاتور و محاسبه فرکانس لغزش، سرعت چرخش دستگاه مرجع سنکرون (ω_s) مطابق با (۷) به دست می‌آید.

$$\bar{\omega}_2 + \bar{\omega}_r = \bar{\omega}_s \quad (7)$$

با عبور ω_s از انتگرال‌گیر، موقعیت شار روتور در فاصله هوایی حاصل می‌شود و برای انتقال متغیرها از دستگاه ساکن سه فاز به دستگاه مرجع سنکرون به کار گرفته می‌شود.

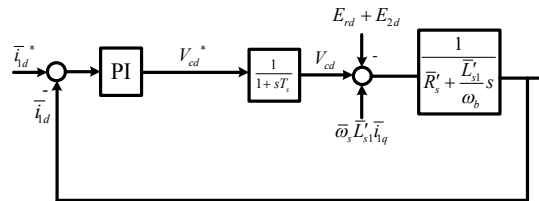


شکل (۶): دیاگرام برداری موقعیت مکانی شار روتور در دستگاه‌های $\alpha\beta$ و مرجع سنکرون با جهت یابی شار روتور

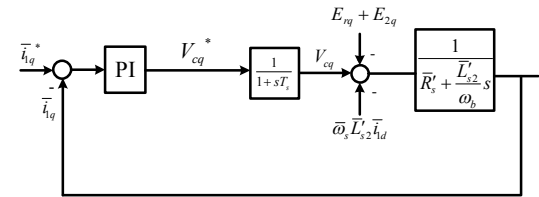
۲.۴. کنترل مبدل DC/DC دو طرفه

در شکل (۷) ساختار و بلوک دیاگرام کنترلی مبدل DC/DC دو طرفه نشان داده می‌شود. در رویکرد کنترلی معرفی شده، مقدار مرجع ولتاژ لینک DC متناظر با سطح ولتاژ سیم پیچ‌های استاتور ژنراتور انتخاب می‌شود و کنترل‌کننده حلقه خارجی کنترل ولتاژ مقدار مرجع جریان عبوری از سلف متصل به باتری را تعیین نموده و بسته به سرعت باد

SECI نشان داده می‌شود که این حلقه‌های کنترلی به عنوان حلقه‌های کنترلی داخلی مبدل SECI شناخته می‌شوند. که E_r و E_2 ولتاژهای القاشده (ضد محرکه) روی سیم پیچ اول استاتور به ترتیب توسط جریان سیم پیچ‌های روتور و سیم پیچ دوم استاتور هستند و V_c ولتاژ تولیدی کانورتور است. همچنین T_s ثابت زمانی ناشی از تاخیر کلدزنی^۱ و نمونه برداری^۲ تجهیزات اندازه‌گیری است.



(الف)



(ب)

شکل (۵): حلقه‌های داخلی کنترل مبدل SECI (الف) حلقه کنترل مؤلفه d جریان، (ب) حلقه کنترل مؤلفه q جریان

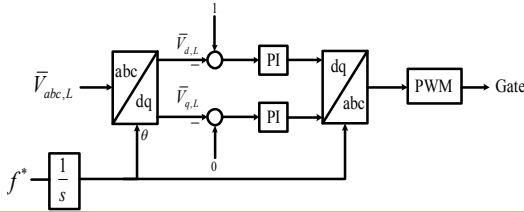
انتقال متغیرها از دستگاه‌های ساکن سه فاز abc استاتور و چرخان روتور به دستگاه مرجع سنکرون با جهت یابی شار روتور به روش مستقیم و غیرمستقیم می‌تواند انجام شود. روش مستقیم کنترل برداری بر پایه تخمین شار روتور یا اندازه‌گیری شار فاصله هوایی با استفاده از سیم پیچ‌های جست‌وجوی^۳ جاسازی شده یا حسگرهای اثر هال، استوار می‌باشد که در این روش در فرکانس‌های پایین، انحراف انتگرال‌گیری مربوط به سیم پیچ‌های جست‌وجوی مشکلاتی را ایجاد می‌کند. حسگرهای اثر هال نیز شکننده و حساس به درجه حرارت هستند؛ بنابراین اندازه‌گیری مستقیم شار دارای مشکلاتی نظیر نصب دشوار و مشکلات تعمیر و نگهداری است. پس گزینه رایج در این حالت، کنترل برداری غیرمستقیم^۴ است که از تخمین شار یا اندازه‌گیری مستقیم شار فاصله هوایی استفاده نمی‌کند [۱].

در دیاگرام برداری شکل (۵) نحوه انتقال متغیرهای ماشین القایی با سیم پیچ استاتور دوگانه^۵ (DSWIM) به دستگاه مرجع سنکرون

1. Switching
2. Sampling
3. Search Coils
4. Indirect Vector Control
5. Dual Stator Induction Machine

۳.۴. کنترل اینورتر سه فاز متصل به بار AC

در شکل (۱۰) نحوه کنترل اینورتر سه فاز متصل به بار AC نشان داده می شود. در این روش کنترلی با انتقال ولتاژ سه فاز بار به دستگاه مرجع سنکرون منطبق بر ولتاژ بار^۲ (LVO) و ولتاژ AC با دامنه و فرکانس مطلوب توسط اینورتر برای بار سه فاز ساخته می شود.



شکل (۱۰): کنترل اینورتر متصل به بار AC

۵. طراحی فیلتر پسیو LC متصل به بار سه فاز

با استفاده از معادلات (۷) و (۸) پارامترهای فیلتر پسیو با هدف تضعیف هارمونیک های تولیدی اینورتر سه فاز طراحی می شوند [۱۷].

$$L = \frac{1}{8} \frac{V_{dc}}{\Delta_{ripple} f_{sw}} \quad (۷)$$

$$C = \frac{\alpha P}{2\pi f V_{ph-n}^2} \quad (۸)$$

که V_{dc} دامنه ولتاژ لینک DC، Δ_{ripple} درصد ریبیل مجاز جریان، f_{sw} فرکانس کلیدزنی مبدل، α میزان توان راکتیو تولیدی خازن در هارمونیک اصلی، P توان اکتیو نامی ژنراتور، f فرکانس پایه و V_{ph-n} ولتاژ نامی بار AC می باشند.

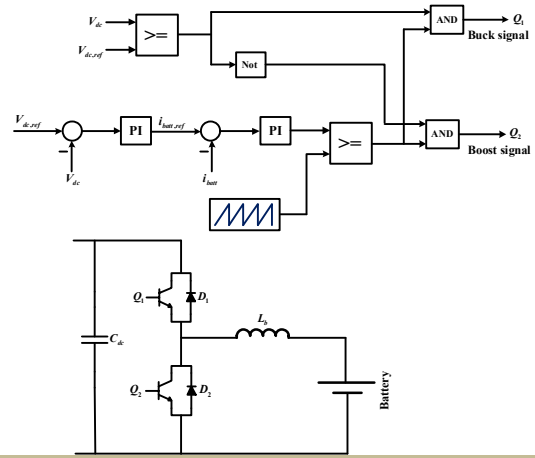
با انتخاب مقدار α معادل با ۵٪ توان نامی (توان نامی ژنراتور) و Δ_{ripple} مجاز برابر با ۵٪ جریان نامی و با استفاده از مقادیر نامی سیستم ($f_{sw}=2\text{KHz}$, $f=50\text{Hz}$, $V_{ph-n}=300\text{V}$, $V_{dc}=1200\text{V}$)، مقادیر المان های فیلتر LC به دست آورده می شوند.

۶. نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج شبیه سازی ژنراتور DSWIG، 2MW و 690V/690V ارائه می شود. پارامترهای ژنراتور مطابق با مرجع [۱۸] و با در نظر گرفتن اینکه سیم پیچ های استاتور دارای پارامترهای مشابه هستند و توان نامی ژنراتور به ازای سرعت باد 12m/s حاصل می گردد، در نظر گرفته شده اند.

نتایج شبیه سازی تحت پروفیل تغییرات سرعت باد که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، ارائه می شوند. در شکل (۱۲) شکل موج سرعت ژنراتور نشان داده می شود؛ بنابراین در ساختار پیشنهادی عملکرد سرعت متغیر ژنراتور محقق شده است. در شکل (۱۳) توان

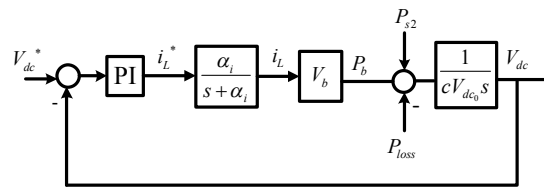
و میزان توان مصرفی بار کنترل کننده حلقه داخلی کنترل جریان نسبت وظیفه مبدل در دو مود باک و بوست را تنظیم می کند.



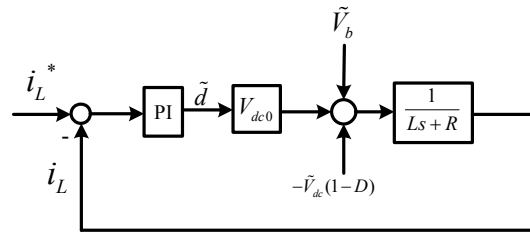
شکل (۷): ساختار و بلوک-دیگرام کنترل مبدل DC/DC دو طرفه (باک-بوست)

در شکل (۸) حلقه خارجی کنترل ولتاژ لینک DC نشان داده شده است که α_i ، i_L ، V_b ، P_b ، P_{loss} ، P_{s2} و V_{dc0} به ترتیب پهنای باند حلقه حلقه بسته حلقه داخلی کنترل جریان، جریان عبوری از سلف، ولتاژ نامی باتری، توان تلف شده حول نقطه کار، توان تولید شده در سیم پیچ دوم استاتور و مقدار ولتاژ خازن لینک DC در نقطه کار هستند.

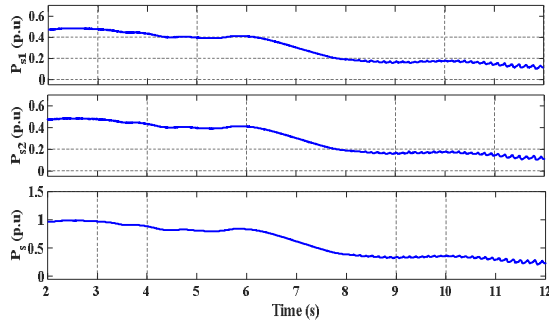
در شکل (۹) حلقه داخلی کنترل جریان مبدل DC/DC دو طرفه نشان داده شده است که \vec{d} ، \vec{V}_b و R به ترتیب تغییرات نسبت وظیفه و ولتاژ باتری حول نقطه کار، مقاومت اهمی و اندوکتانس مبدل هستند.



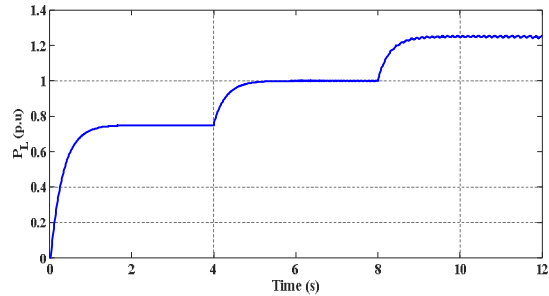
شکل (۸): حلقه خارجی کنترل ولتاژ لینک DC مبدل DC/DC دو طرفه (باک-بوست)



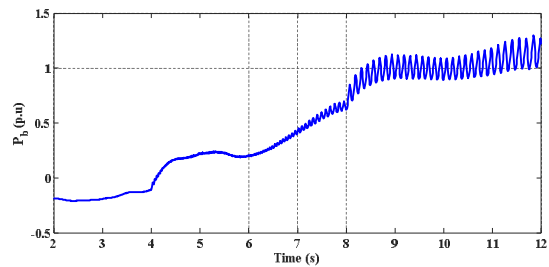
شکل (۹): حلقه داخلی کنترل جریان مبدل DC/DC دو طرفه



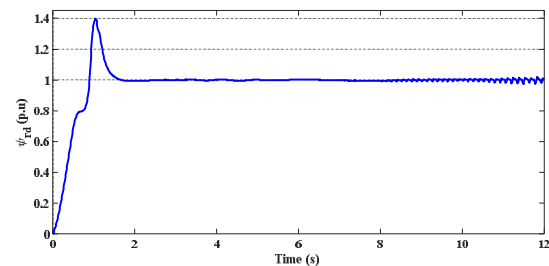
شکل (۱۳): توان‌های تولیدی سیم‌پیچ‌های دوگانه استاتور و کل استاتور



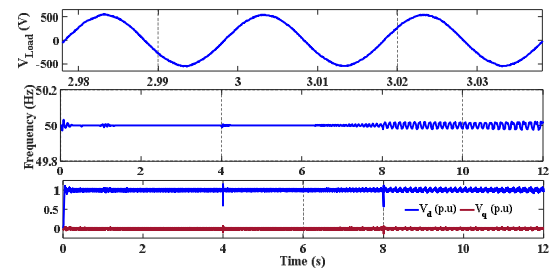
شکل (۱۴): توان مصرفی بار AC



شکل (۱۵): توان مبادله‌شده توسط باتری

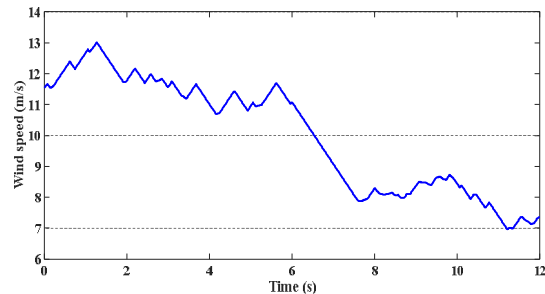


شکل (۱۶): دامنه شار روتور

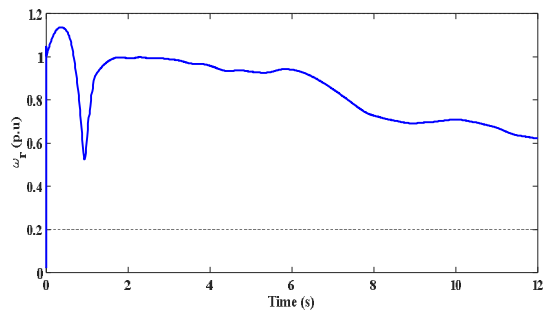


شکل (۱۷): مشخصات ولتاژ بار AC

تولیدی سیم‌پیچ‌های اول و دوم ژنراتور و توان تولیدی مجموعه سیم‌پیچ‌های استاتور نشان داده می‌شود. بنابراین با انتخاب $K=0.5$ در حلقه‌های کنترلی مبدل‌های SEC میزان مشارکت سیم‌پیچ‌ها در توان اکتیو تولیدی استاتور یکسان می‌شود. توان مصرفی بار AC سه‌فاز که شامل سه وضعیت $P_L < S_{rated}$ و $P_L > S_{rated}$ ، $P_L = S_{rated}$ می‌باشد به‌همراه توان مبادله‌شده توسط باتری به‌ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده می‌شود. با مقایسه شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) نتیجه حاصل می‌شود که در زمان‌هایی که توان تولیدی ژنراتور از توان مصرفی بار بیشتر باشد توان مازاد در باتری ذخیره شده و در زمان‌هایی که توان مصرفی بار از توان تولیدی ژنراتور بیشتر باشد کمبود توان به‌وسیله آن جبران می‌گردد. در شکل (۱۶) دامنه شار روتور را نشان داده می‌شود؛ بنابراین در دستگاه مرجع سنکرون RFO تمامی دامنه شار روتور بر مؤلفه d منطبق گردیده و با کنترل مناسب مبدل‌های SEC مقدار آن تحت شرایط مختلف در مقدار مرجع تثبیت می‌گردد. در شکل (۱۷) مشخصات ولتاژ بار سه‌فاز شامل مقدار مؤثر ولتاژ خط، فرکانس و مؤلفه‌های d و q آن در دستگاه مرجع سنکرون LVO نشان داده می‌شود؛ بنابراین مشاهده می‌شود ولتاژ AC با دامنه و فرکانس مطلوب برای بار AC مستقل تولید و هارمونیک‌های غالب تولیدی اینورتر توسط فیلتر پسیو حذف شده‌اند.



شکل (۱۱): پروفیل سرعت باد



شکل (۱۲): سرعت ژنراتور DSWIG

DC/DC دوطرفه باک-بوست کمبود توان جبران می‌شود و در صورتی که توان تولیدی از توان مصرفی کمتر باشد توان مازاد در باتری ذخیره می‌شود. در نهایت برای اعتبارسنجی مطالعات تئوری و ارزیابی عملکرد سیستم پیشنهادی نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. در شرایط عدم تطابق بین توان تولیدی ژنراتور و بار مستقل، حفاظت باتری از شارژ یا دشارژ بیش از حد یکی از موضوعات مهم است. برای بررسی این موضوع بایستی سطح شارژ باتری^۱ (SOC) به‌عنوان یک متغیر کنترلی در حلقه‌های کنترلی در نظر گرفته شود. در مطالعه آینده بر روی ساختار پیشنهاد شده در این مقاله متغیر SOC باتری نیز بررسی خواهد شد و حلقه‌های کنترلی با در نظر گرفتن این متغیر کنترلی طراحی خواهند شد.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم توربین ژنراتور بادی سرعت متغیر مبتنی بر DSWIG در حالت متصل به بار AC سه‌فاز به‌صورت مستقل از شبکه معرفی شده است. ساختار به‌کار گرفته‌شده دارای قابلیت مشارکت هر دو سیم‌پیچ استاتور در توان تولیدی ژنراتور است که موجب افزایش قابلیت اطمینان و کاهش ریپل گشتاور الکترومغناطیسی می‌شود. در این سیستم مبدل‌های SEC متصل به سیم‌پیچ‌های استاتور وظیفه کنترل سرعت ژنراتور در دستگاه مرجع سنکرون RFO را بر عهده داشته و ولتاژ مطلوب بار توسط اینورتر متصل به آن تولید می‌شود. تحت تغییرات باد و بار در صورتی که توان مصرفی بار از توان تولیدی ژنراتور بیشتر باشد به‌وسیله مبدل

مراجع

- [1] Chinmaya, K. A. and Singh, G. K., "Performance evaluation of multiphase induction generator in stand-alone and grid-connected wind energy conversion system", IET Renewable Power Generation, Vol. 12, No. 7, pp. 823-831, May 2018.
- [2] Bu, F., Hu, Y., Huang, W., Zhuang, S. and Shi, K., "Wide-Speed-Range-Operation Dual Stator-Winding Induction Generator DC Generating System for Wind Power Applications", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, No. 2, pp. 561-573, Feb. 2015.
- [3] Shi, K. et al., "Grid-connected dual stator-winding induction generator wind power system for wide wind speed ranges", Journal of Power Electronics, Vol. 16, No. 4, pp. 1455-1468, 2016
- [4] Kavousi, A., Fathi, S. H., Milimonfared, J. and Soltani, M. N., "Application of Boost Converter to Increase the Speed Range of Dual-Stator Winding Induction Generator in Wind Power Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 11, pp. 9599-9610, Nov. 2018.
- [5] Bu, F., Huang, W., Hu, Y. and Shi, K., "An Excitation-Capacitor-Optimized Dual Stator-Winding Induction Generator With the Static Excitation Controller for Wind Power Application", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, No. 1, pp. 122-131, Mar. 2011.
- [6] Blaabjerg, F. and Ma, K., "Future on Power Electronics for Wind Turbine Systems", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 1, No. 3, pp. 139-152, Sep. 2013.
- [7] Chen, Z., Guerrero, J. M. and Blaabjerg, F., "A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 8, pp. 1859-1875, Aug. 2009.
- [8] Yaramasu, V., Wu, B., Sen, P. C., Kouro, S. and Narimani, M., "High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies", Proceedings of the IEEE, Vol. 103, No. 5, pp. 740-788, May 2015.
- [9] Nian, H. and Song, Y., "Direct Power Control of Doubly Fed Induction Generator Under Distorted Grid Voltage" IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 2, pp. 894-905, Feb. 2014.
- [10] Li, H. and Chen, Z., "Overview of different wind generator systems and their comparisons", IET Renewable Power Generation, Vol. 2, No. 2, pp. 123-138, Jun. 2008.
- [11] Basak, S. and Chakraborty, C., "A New Optimal Current Control Technique for Dual Stator Winding Induction Generator", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 5, No. 2, pp. 820-832, Jun. 2017.
- [12] Barrado-Rodrigo, J. A. Talpone, J. I. and Martinez-Salamero, L., "Variable-speed wind energy conversion system based on a dual stator-winding induction generator", IET Renewable Power Generation, Vol. 11, No. 1, pp. 73-80, Aug. 2017.
- [13] Basak, S. and Chakraborty, C., "Dual Stator Winding Induction Machine: Probes, Progress, and Future Scope", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 7, pp. 4641-4652, Jul. 2015.
- [14] Basak, S., Chakraborty, C., and Pal, B. C., "A New Configuration of Dual Stator Induction Generator Employing Series and Shunt Capacitors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 33, No. 2, pp. 762-772, Jun. 2018.
- [15] Safaiejad, A. and Rahimi, M., "Control and performance analysis of grid-connected variable speed wind turbine with dual stator-winding induction generator for the contribution of both stator windings in active power transmission", IET Renewable Power Generation, Vol. 14, No. 5, pp. 2348-2358, October 2020.
- [16] Hamitouche, K., Chekkal, S., Amimeur, H. and Aouzellag, D., "A new control strategy of dual stator induction generator with power regulation", Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol. 53, No. 4, pp. 469-478, Sept 2020.
- [17] Reznik, A., Simões, M. G., Al-Durra, A. and Muyeen, S. M., "\$LCL\$ Filter Design and Performance Analysis for Grid-Interconnected Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, No. 2, pp. 1225-1232, March-April 2014.
- [18] Bin, Y. L., Zargari, N. and Kouro, S., "Appendix B: Generator Parameters", Power Conversion and Control of Wind Energy Systems 1st ed. ed. Hoboken, NJ, USA, Wiley-IEEE Press, pp. 319-326, 2011.

1. State Of Charge