

یک روش کنترلی جدید در ژنراتور القایی دو سیم پیچه استاتور در حالت اتصال مستقیم به شبکه با هدف جذب حداکثر انرژی باد

محمد رضا مرادیان^(۱,۲) - ابوالفضل سلطانی محمدی^(۳)

- (۱) استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
(۲) مرکز تحقیقات ریز شبکه های هوشمند، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
(۳) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نایین، دانشگاه آزاد اسلامی، نایین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۲۵

خلاصه: در این مقاله یک ساختار کنترلی جدید برای توربین های بادی و ژنراتورهای القایی سه فاز قفسه سنجایی با دو سیم پیچ استاتور، در شرایط اتصال مستقیم به شبکه و به منظور بهره مندی از حداکثر انرژی باد معرفی شده است. این ژنراتور از دو سیم پیچ سه فاز متقارن ایزوله بهره مند می باشد. اولین سیم پیچ سه فاز استاتور برای تأمین توان راکتیو مورد نیاز ماشین در نظر گرفته شده و می توان با تغذیه کنترل شده این سیم پیچ اهداف کنترلی مورد نظر در این مقاله را پیاده سازی نمود. سیم پیچ دوم استاتور نیز به عنوان ترمینال خروجی ژنراتور می باشد. این ژنراتور می تواند ولتاژی با فرکانس ثابت و مستقل از سرعت چرخش محور یا میزان بار را تولید و در خروجی خود تحویل نماید. علاوه بر ویژگی ذاتی فوق، در این مقاله با طراحی سیستم کنترلی مناسب، امکان بهره مندی از حداکثر انرژی باد را در سرعت های مختلف فراهم نموده و علاوه بر آن امکان کنترل دلخواه بر روی میزان تبادل توان اکتیو بین ژنراتور و شبکه فراهم شده است. به این منظور تغذیه سیم پیچ تحریک از طریق یک مبدل پشت به پشت کنترل شده ای صورت می گیرد که خود به عنوان تأمین کننده توان راکتیو ماشین و حتی شبکه از یکسو و مسیری برای خروج انرژی تبدیل یافته از ژنراتور به سمت بار از سوی دیگر تلقی می شود. سیستم کنترلی پیشنهادی به کمک یک برنامه نوشته شده به زبان ++C شبیه سازی گردیده و نتایج به دست آمده، مؤید عملکرد صحیح و مؤثر سیستم بوده است.

کلمات کلیدی: ژنراتورهای القایی با دو سیم پیچ استاتور، حداکثر جذب انرژی باد، توربین بادی.

A New Control System for a Dual Stator-Winding Cage Rotor Induction Generator in Direct Grid Connected Condition with Maximum Power point tracking of Wind Turbine

Mohamadrezza Moradian^(1,2) - Abolfazl Soltani Mohammadi⁽³⁾

- (1) Assistant Professor – Dept. of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, moradian@iaun.ac.ir.
(2) Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
(3) Msc – Dept. of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Naein Branch, Naein, Iran, soltani_mo100@yahoo.com

Abstract: In this research a new control system for MPPT in a grid connected three-phase squirrel cage induction wind turbo-generator is presented. This generator is consisted of two isolated three-phase windings. The first winding is considered to provide the reactive power required by the machine. Obviously, by a controlled feeding of the winding, the desired control goals in this research will be implemented. The second winding is introduced as the main output of the generator. The generator can produce electricity by constant frequency and independent of the axis rotation speed or load and deliver on its output. In addition to the intrinsic qualities above, in this research by designing the proper control system provides the possibility to use maximum wind energy at different speeds, besides that an arbitrary control over the amount of active power exchange between the generator and the grid is provided. For this purpose, feeding the stimulus winding is done by a controlled back-to-back convertor which itself is considered as the supplier of the reactive power of the machine and even the grid on the one hand and the path to the energy output turned from the generator to the load on the other. The proposed control system is simulated by a C++ computer program and the results show the capability and effectiveness of the proposed control method.

Index Terms: Double Stator Winding Induction Generator, Maximum Power Point Tracking, Wind Turbine.

نویسنده مسئول: محمد رضا مرادیان، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، moradian@iaun.ac.ir

۱- مقدمه

مصرف روز افزون انرژی در جوامع صنعتی امروزی از یکسو و محدودیت منابع فسیلی از سوی دیگر به همراه آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از آنها، محافل علمی جهان را به سوی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله انرژی باد سوق داده است [۱]. امروزه تحقیقات زیادی در زمینه بهبود عملکرد تجهیزات تبدیل انرژی باد به سایر انرژی‌ها از جمله ژنراتورهای الکتریکی در حال انجام می‌باشد [۲]. در این میان ژنراتورهای سنکرون یکی از پرکاربردترین ژنراتورها در سیستم‌های بادی بوده‌اند. از اواسط دهه ۹۰، ژنراتورهای القایی با توجه به سادگی ساختار، ارزانی، ابعاد کوچکتر، هزینه نگهداری کمتر و قابلیت اطمینان بالاتر، نظر بسیاری را بالاخص در شبکه‌های کوچک محلی به خود معطوف داشته است [۳]. از جمله ژنراتورهای القایی مورد استفاده در صنعت برق بادی، ژنراتورهای القایی خودتحریک بوده که تنظیم ولتاژ و فرکانس خروجی آنها در زمان تغییر بار به سختی صورت گرفته و از سوی دیگر نیازمند توان راکتیو برای تحریک سیستم مغناطیسی خود می‌باشند [۴].

امروزه استفاده از ساختار ماشین‌های چند فاز به علت مزایایی همچون کاهش ریبیل گشتاور و کاهش توان هر فاز بسیار افزایش یافته است [۵]. در میان ماشین‌های چند فاز، ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه (DFIG) دارای مزایایی همچون کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو، کنترل ولتاژ خروجی، کنترل فرکانس در حالت ایزوله از شبکه، عدم نیاز به تأمین توان راکتیو خارجی و همچنین عدم نیاز به مبدل توان کامل می‌باشد [۶-۹]. از مشکلات این ژنراتورها نیز وجود رتور سیم‌پیچی شده و همچنین حلقه‌های لغزان بوده که سبب افزایش قیمت و استهلاک سیستم و نیاز بیشتر به تعمیرات و نگهداری آنها می‌شود. علاوه بر آن سیستم‌های کنترلی DFIG دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به سایر ژنراتورهای قابل استفاده می‌باشد. برای حل این مشکل، ژنراتورهای دو سو تغذیه بدون جاروبک (BDFIG) معرفی شده‌اند [۱۰]. این ژنراتورها نیز مزایایی همچون کاهش توان مبدل تحریک و عدم وجود حلقه‌های لغزان را دارا بوده اما به دلیل تعداد نابرابر قطب‌های دو سیم‌پیچ استاتور، ارتباط مغناطیسی آنها از طریق سیم‌پیچی خاصی در روتور فراهم می‌گردد که این خود از مقبولیت این ژنراتور کاسته است [۱۱]. یکی دیگر از ساختارهای مبتنی بر ماشین‌های القایی، ماشین‌های القایی با استاتور دو گانه (DSIG) بوده که در آن از یک ماشین القایی سه فاز روتور قفسی کاملاً معمولی استفاده می‌شود. یکی از کارآمدترین ساختارهای DSIG در [۱۲-۱۴] پیشنهاد شده که در آن استاتور ماشین القایی از دو دسته سیم پیچ سه فاز متقارن ایزوله و مشابه تشکیل یافته است. سیم‌پیچ اول به عنوان سیم پیچ تحریک معرفی گردیده و با اتصال به یک منبع توان راکتیو متغییر، شرایط تحریک کامل ژنراتور را در وضعیت‌های مختلف تضمین می‌کند. در این ژنراتور سیم‌پیچ دوم به عنوان سیم‌پیچ قدرت معرفی گردیده است. در مقاله [۱۲] یک روش کنترلی جدید برای این خانواده از ژنراتورها پیشنهاد شده است. در این سیستم، ژنراتور برای تغذیه یک بار ایزوله محلی کنترل می‌شود. بدیهی است که ماهیت بار محلی با حداکثر جذب توان باد سازگار نبوده و به

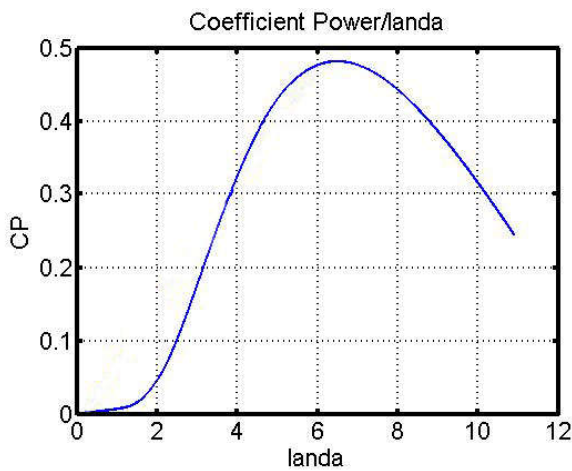
همین دلیل برقراری توازن بین توان مصرفی بار و توان تبدیل یافته در ژنراتور از طریق کنترل زاویه پیچ پره‌های توربین بادی انجام می‌گیرد. سرعت مرجع محور بگونه‌ای کنترل می‌گردد که هیچ توان اکتیوی با سیم‌پیچ تحریک مبادله نشود. در این مقاله کنترل‌کننده‌های سنتی PID^۱ برای پیاده‌سازی اهداف کنترلی، مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که کنترل‌کننده‌های PID سنتی در برابر تغییرات پارامترهای سیستم و نامعینی‌های موجود مقاوم نبوده و می‌تواند منجر به ناپایدار نمودن سیستم گردد، ساختار پیشنهادی در [۱۲] به کمک کنترل‌کننده‌های غیرخطی مود لغزشی در [۱۳] اصلاح و پایداری سیستم تضمین شده است. از مهمترین ویژگی‌های ژنراتور پیشنهادی فوق‌الذکر می‌توان به قابلیت‌های آن در شرایط عملکرد نامتقارن اشاره کرد. از این رو در [۱۴] ژنراتور DSIG در اتصال به بار محلی نامتقارن بررسی شده است. کنترل پیشنهاد شده در شرایط عدم تقارن سه فازه بار قادر بوده که علاوه بر تنظیم ولتاژ ترمینال‌های خروجی ژنراتور یکی از سه حالت زیر را برای خروجی ژنراتور رقم بزند. جریان خروجی ژنراتور سه فاز متقارن بوده و فاقد توالی منفی باشد. ۲- ولتاژ خروجی ژنراتور سه فاز متقارن بوده و فاقد توالی منفی باشد. ۳- گشتاور تولیدی فاقد نوسانات دو برابر فرکانس حاصل از کارکرد نامتقارن باشد.

اگر چه هر سه مرجع [۱۲-۱۴] در حالت ایزوله از شبکه مطرح بوده و در این شرایط بهره‌مندی از حداکثر انرژی باد بواسطه میزان بار موجود، ممکن است کمتر مورد توجه باشد ولی مشکل اساسی موجود در آنها را می‌توان عدم پیاده‌سازی الگوریتم‌های بهره‌مندی از حداکثر انرژی باد (MPPT)^۵ دانست. این مهم از آنجا ایجاد می‌شود که برای ممانعت از تبادل توان اکتیو با سیم‌پیچ تحریک، از کنترل لغزش و تنظیم سرعت محور توربوژنراتور استفاده شده است و امکان تنظیم سرعت محور مبنا الگوریتم MPPT وجود ندارد. شایان ذکر است که قابلیت‌های ژنراتور مورد بحث در حالت متصل به شبکه به استناد آخرین تحقیقات مروری صورت گرفته بر روی این نوع ژنراتور [۱۵-۱۶] کمتر مورد توجه بوده است، حال آنکه این ژنراتور می‌تواند در حالات اتصال به شبکه متقارن یا نامتقارن به صورتی بسیار کارآمد ظهور نماید.

مقاله حاضر نیز در همین راستا و برای عملکرد سیستم در شرایط اتصال مستقیم به شبکه متقارن و با هدف بهره‌مندی از حداکثر انرژی باد مطرح گردیده است. در چنین شرایطی سرعت مرجع محور از روی سرعت باد و الگوریتم جذب حداکثر انرژی باد تعیین شده و ممکن است بخشی از توان تبدیل شده در ژنراتور با سیم‌پیچ تحریک مبادله گردد. بر این اساس سیم‌پیچ تحریک را با یک مبدل پشت به پشت کنترل شده‌ای تغذیه نموده که از یکسو با تزریق توان راکتیو به سیم‌پیچ تحریک، ژنراتور را تحریک نموده و از سوی دیگر امکان انتقال توان اکتیو جذب شده توسط سیم‌پیچ تحریک را به شبکه فراهم می‌نماید. بدیهی است که می‌توان با کنترل مناسب مبدل سمت شبکه، علاوه بر تزریق توان اکتیو فوق‌الذکر به شبکه، توان راکتیو را نیز می‌توان به میزان دلخواه و کنترل شده‌ای به شبکه تحویل نمود. سیستم کنترلی پیشنهادی می‌تواند علاوه بر تزریق توان راکتیو فوق، توان راکتیو دلخواهی را نیز از طریق سیم‌پیچ قدرت به

ب- جذب حداکثر توان از انرژی باد

به منظور بهره‌مندی از حداکثر انرژی باد موجود در هر لحظه کافی است مقدار C_p در رابطه (۳) بیشینه گردد. از سوی دیگر زاویه پیچش پره‌ها را باید در وضعیت صفر درجه در نظر گرفت تا انرژی جذب شده توسط توربین ماکزیمم شود. بر این اساس جذب حداکثر انرژی باد فقط با تنظیم بهینه مقدار λ ممکن خواهد شد که طبق رابطه (۲) متناسب با هر سرعت باد، باید سرعت چرخش محور تنظیم گردد [۱۷]. بر همین اساس منحنی تغییرات C_p نسبت به λ با استفاده از رابطه (۳) و با فرض $\beta=0^\circ$ بدست آمده و در شکل (۲) نمایش داده شده است. بدیهی است که بر اساس شکل حاصل برای توربین انتخابی، نقطه بهینه منحنی قابل شناسایی بوده و در بخش ۳-الف قابل استفاده خواهد بود.



شکل (۲): ارتباط ضریب قدرت توربین بادی با سرعت جاروب

Fig. (2): Wind turbine power coefficient in relation with tip speed ratio

ج- ژنراتور القایی DSIG

در این بخش مدل دینامیکی ژنراتور القایی DSIG به کمک بردارهای فضایی مطرح می‌گردد. یک بردار فضایی دلخواه \bar{f}_i^s را که می‌توان معرف کمیت‌های ولتاژ، جریان یا شار دانست و برای استاتور ($i=S$) و روتور ($i=R$) می‌باشد در چهارچوب مرجع ساکن به صورت معادله (۴) تعریف می‌شود [۱۸].

$$\bar{f}_i^s = 2/3(f_{ai} + af_{bi} + a^2 f_{ci}) = f_{di}^s + jf_{qi}^s, a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (4)$$

$$\bar{f}_i^e = f_{di}^e + jf_{qi}^e = \bar{f}_i^s e^{-j\omega_e t} \quad (5)$$

بردار فضایی \bar{f}_i^s در دستگاه مرجع سنکرون به صورت معادله (۵) قابل تعریف خواهد بود.

معادلات ولتاژ-جریان ماشین به کمک بردارهای فضایی در (۶) تا (۸) آمده است. در این روابط S_1 معرف سیم‌پیچ تحریک و S_2 مشخص‌کننده سیم‌پیچ قدرت و R معرف روتور می‌باشد.

$$\bar{V}_{S1}^e = \bar{\lambda}_{S1}^e + R_{S1} \bar{I}_{S1}^e + j\omega_e \bar{\lambda}_{S1}^e \quad (6)$$

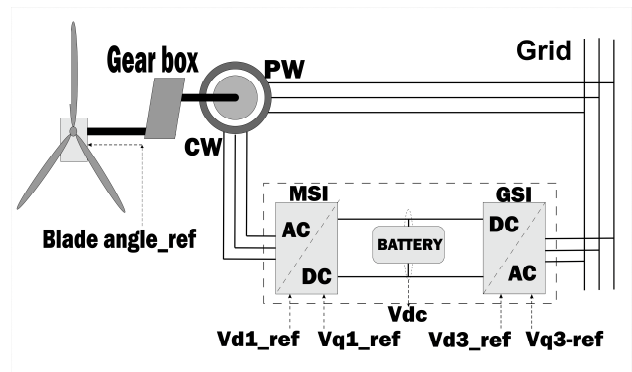
$$\bar{V}_{S2}^e = \bar{\lambda}_{S2}^e + R_{S2} \bar{I}_{S2}^e + j\omega_e \bar{\lambda}_{S2}^e \quad (7)$$

$$\bar{V}_R^e = \bar{\lambda}_R^e + R_r \bar{I}_R^e + j(\omega_e - \omega_r) \bar{\lambda}_R^e \quad (8)$$

شبکه تحویل نماید. شایان توجه است که وقتی هیچ توان راکتیوی بین شبکه و سیم‌پیچ قدرت مبادله نشود، از یک سو کل ظرفیت سیم‌پیچ قدرت برای توان اکتیو منظور شده و از سوی دیگر ظرفیت مبدل پشت به پشت استفاده شده را بی‌جهت افزایش نداده‌ایم. سیستم کنترل پیشنهادی فوق‌الذکر توسط یک برنامه کامپیوتری به زبان ++C شبیه سازی شده است. در این برنامه از روش عددی رانگ کوتای مرتبه چهار برای حل معادلات دیفرانسیل استفاده گردیده است. نتایج بدست آمده، عملکرد صحیح، موثر و کامل سیستم پیشنهادی را تأیید می‌نماید. ساختار مقاله حاضر در ادامه بگونه‌ای تدوین گردیده است که در بخش ۲ مدل‌سازی کلی سیستم مطرح گردیده و در بخش ۳ نیز سیستم کنترلی پیشنهادی بصورت مسوط توضیح داده شده است. بخش‌های ۴ و ۵ نیز به ترتیب به شبیه‌سازی کامپیوتری و نتایج حاصل از آن می‌پردازند.

۲- مدل سیستم پیشنهادی

شکل (۱) نمای کلی سیستم ژنراتور القایی معرفی شده را نشان می‌دهد. مدل‌سازی اجزای مختلف این سیستم در ادامه آمده است.



شکل (۱): سیستم ژنراتور القایی متصل به شبکه

Fig. (1): Grid-connected induction generator system

الف- توربین بادی

میزان انرژی جذب شده از انرژی باد P_{wind} تابع رابطه (۱) می‌باشد [۴].

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 C_p(\lambda, \beta) V_{wind}^2 \quad (1)$$

در این رابطه ρ چگالی حجمی هوا با واحد Kg/m^3 ، شعاع پره‌های توربین بادی با واحد متر m ، V_{wind} سرعت لحظه‌ای باد با واحد m/s و C_p و پارامترهای زاویه پیچش پره‌ها (β) و سرعت جاروی نوک پره‌ها (λ) که به صورت معادله (۲) تعریف می‌شود، وابسته می‌باشد.

$$\lambda = \omega_m R / V_{wind} \quad (2)$$

یکی از متداول‌ترین توابعی که برای مدل نمودن ارتباط C_p و λ و β استفاده می‌شود در رابطه (۳) آمده است [۱۷].

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 * \left(\frac{116}{z1} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(-\frac{12.5}{z1} \right) \quad (3)$$

$$z1 = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1}$$

الف- جذب حداکثر انرژی باد

بر اساس رابطه (۱) مقدار توان جذب شده توسط توربین از باد در هر لحظه وابسته به مقدار $C_p(\lambda, \beta)$ می باشد. در شرایطی که سرعت باد کمتر از سرعت نامی باشد، با انتخاب $\beta = 0^\circ$ شرایط اولیه را برای جذب بیشترین توان فراهم می نماییم. سپس برای ماکزیمم نمودن C_p مقدار $\lambda_{opt} = 6.4$ را از تابع تغییرات ضریب توان توربین بادی (رابطه (۳)) و به کمک مختصات نقطه ماکزیمم شکل (۲) به دست آورده و به کمک آن از رابطه (۱۹) متناظر با هر سرعت دلخواه باد، مقدار سرعت مرجع محور توربوژنراتور تعیین می شود. این سیستم کنترلی در بلوک MPPT شکل (۳) انجام می پذیرد.

$$\omega_m = \frac{\lambda_{opt}}{R} * V_{wind} \quad (19)$$

ب- جذب توان ثابت

در شرایطی که سرعت باد از مقدار نامی تجاوز نماید، در صورت تداوم عملکرد الگوریتم MPPT توان جذب شده از باد بسیار بیشتر از تحمل مجموعه توربین و ژنراتور خواهد بود. در چنین شرایطی، از مقایسه توان قابل دریافت از باد با قدرت نامی ژنراتور و گذراندن سیگنال خطای بدست آمده از یک کنترل کننده PI، مقدار مرجع زاویه پیچ پره های توربین بادی، ساخته شده و این سیگنال مرجع برای تغذیه مناسب موتور چرخاننده پره های توربین بادی مورد استفاده قرار می گیرد. بدیهی است که کنترل کننده استفاده شده، تثبیت مقدار توان اکتیو جذب شده از باد و تبدیل یافته توسط ژنراتور را بر روی مقدار نامی در حالت پایدار تضمین می نماید. سیستم کنترلی پیشنهادی در شکل (۳) نشان داده شده است.

ج- کنترل توان راکتیو

بر خلاف ژنراتورهای القایی خودتحریک که نیازمند یک منبع تأمین کننده توان راکتیو می باشند، این ژنراتور قادر است حتی توان راکتیو دلخواهی را به شبکه تحویل نماید. بر این اساس سیستم کنترلی شکل (۳) قادر خواهد بود با کنترل ولتاژ محور d مبدل سمت شبکه، مقدار توان راکتیو تزریق شده از این مبدل را تنظیم می نماید. به همین منظور، مقدار توان راکتیو تحویلی به شبکه با رابطه (۱۸) و به ازای $i=3$ محاسبه شده و با مقدار مرجع انتخابی مقایسه می شود. سیگنال خطای حاصل از این قیاس ضمن عبور از کنترل کننده PI مناسب، مقدار مرجع ولتاژ محور d مبدل سمت شبکه را تعیین می نماید. از سوی دیگر برای کنترل مقدار توان راکتیو تحویلی به شبکه از طریق سیم پیچ قدرت، مطابق شکل (۳) و با کمک رابطه (۱۸) و $i=2$ توان راکتیو فوق الذکر محاسبه و با مقدار مرجع انتخابی مقایسه و به کمک کنترل کننده PI به ولتاژ مرجع محور d خروجی ژنراتور تبدیل می گردد. در مرحله بعد، ولتاژ واقعی محور d خروجی ژنراتور با مقدار مرجع بدست آمده مقایسه شده و خطای حاصل به کمک یک کنترل کننده PI سیگنال مرجع ولتاژ محور d مبدل سمت ماشین را تولید می نماید.

د- تنظیم ولتاژ لینک DC

از آنجایی که سرعت محور در سیستم پیشنهادی توسط الگوریتم MPPT تعیین می شود، امکان تبادل توان اکتیو با سیم پیچ تحریک وجود دارد

در این معادلات $\bar{\lambda}_i^e$ بردار فضایی شار مغناطیس کننده ماشین، \bar{I}_i^e بردار فضایی جریان های ماشین هر دو در دستگاه مرجع سنکرون بوده و R مقاومت سیم پیچ های ماشین را مشخص می نماید. معادلات شار-جریان ماشین در فرم بردارهای فضایی سنکرون در معادلات (۹) تا (۱۱) آمده است.

$$\bar{\lambda}_{s1}^e = L_{s1} \bar{I}_{s1}^e + L_m \bar{I}_{s2}^e e^{j\alpha} + L_m \bar{I}_r^e \quad (9)$$

$$\bar{\lambda}_{s2}^e = L_m \bar{I}_{s1}^e e^{-j\alpha} + L_{s2} \bar{I}_{s2}^e + L_m \bar{I}_r^e e^{-j\alpha} \quad (10)$$

$$\bar{\lambda}_r^e = L_m \bar{I}_{s1}^e + L_m \bar{I}_{s2}^e e^{j\alpha} + L_r \bar{I}_r^e \quad (11)$$

که در آن اندوکتانس های دو سیم پیچ استاتور و اندوکتانس روتور در (۱۲) تا (۱۴) تعریف شده است.

$$L_{s1} = L_{l_{s1}} + L_m \quad (12)$$

$$L_{s2} = L_{l_{s2}} + L_m \quad (13)$$

$$L_r = L_{l_r} + L_m \quad (14)$$

در این معادلات L_m اندوکتانس مغناطیس کننده و $L_{l_{s1}}$ و $L_{l_{s2}}$ و L_{l_r} اندوکتانس های پراکنده ماشین مربوط به سیم پیچ های استاتور و روتور می باشد. شایان ذکر است که معادلات مکانیکی ماشین برطبق معادلات (۱۵) و (۱۶) می باشد.

$$j\dot{\omega}_m = T_{turb} - T_e - B\omega_m \quad (15)$$

$$T_e = 2/3(\lambda_{ds2}^e i_{qs2}^e - \lambda_{qs2}^e i_{ds2}^e) \quad (16)$$

در این معادلات T_{turb} گشتاور توربین بادی، T_e گشتاور الکترومغناطی سیژنراتور، ω_m سرعت زاویه ای روتور، J ممان اینرسی محور و B ضریب اصطکاک ماشین می باشد. توان اکتیو و راکتیو سیم پیچ های قدرت، تحریک و مبدل سمت شبکه از طریق معادلات (۱۷) و (۱۸) به دست می آید.

$$P_i = -3/2 * (V_{dsi} * i_{dsi} + V_{qsi} * i_{qsi}) \quad (17)$$

$$Q_i = -3/2 * (V_{qsi} * i_{dsi} - V_{dsi} * i_{qsi}) \quad (18)$$

در این معادلات ($i=1$) برای سیم پیچ تحریک، ($i=2$) برای سیم پیچ قدرت و ($i=3$) برای مبدل سمت شبکه قابل استفاده می باشند.

۳- سیستم کنترل

شمای کلی سیستم کنترلی پیشنهادی در این مقاله در شکل (۳) آمده است. بطور کلی اهداف تعریف شده برای سیستم کنترلی را می توان در موارد زیر به طور خلاصه بیان نمود.

جذب حداکثر انرژی باد

جذب توان ثابت در محدوده سرعت های بالاتر از نامی به کمک تنظیم زاویه پیچ پره های توربین

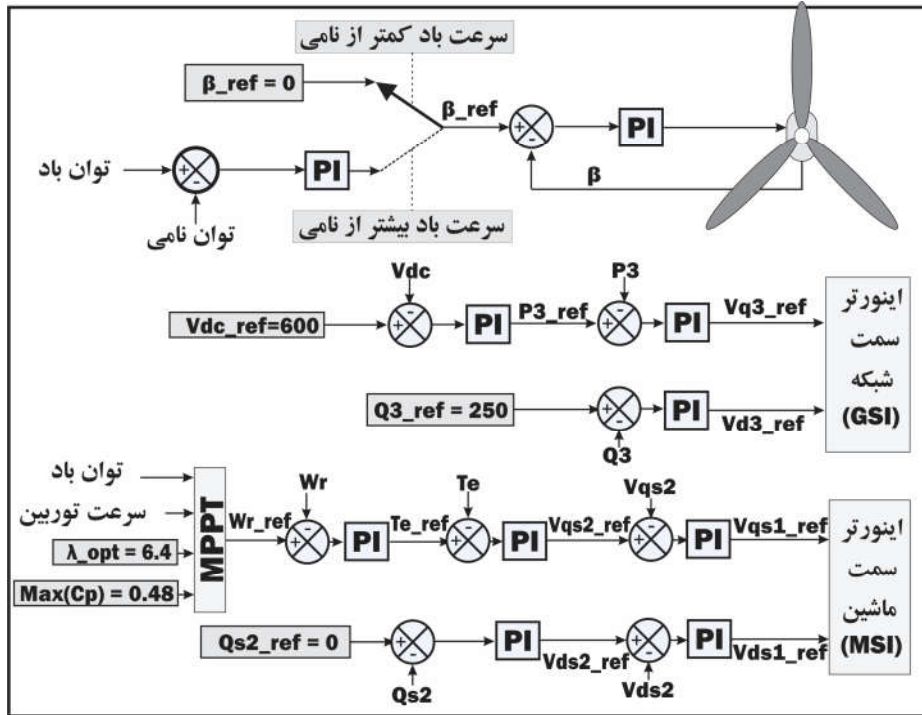
تنظیم میزان تبادل توان راکتیو از طریق سیم پیچ اصلی و تحریک با شبکه در حالت پس فاز و پیش فاز

تنظیم ولتاژ لینک DC مبدل پشت به پشت

شایان ذکر است که اهداف کنترلی فوق به کمک کنترل کننده های کلاسیک PI با ضرایبی که به روش سعی و خطا تنظیم شده اند عملیاتی شده است. چگونگی دستیابی به اهداف کنترلی فوق الذکر را به تفصیل در ادامه بررسی می نماییم.

اکتیو تحویلی به شبکه از طرف مبدل سمت شبکه، از قیاس ولتاژ لینک DC با مقدار ثابت مرجع آن و به کمک یک کنترل کننده PI تعیین می‌گردد. تنظیم توان خروجی بر روی مقدار مرجع بدست آمده نیز با تنظیم مناسب ولتاژ محور q مبدل سمت شبکه از طریق کنترل کننده PI تضمین می‌گردد.

[۱۲-۱۴]. توان اکتیو وارد شده به مبدل پشت به پشت از سوی سیم‌پیچ تحریک، منجر به افزایش ولتاژ لینک DC و ناپایداری سیستم خواهد شد. برای اجتناب از این مهم، سیستم کنترلی مطابق شکل (۳)، با کنترل توان اکتیو تحویلی به شبکه از طریق مبدل سمت شبکه می‌تواند توان جذب شده توسط سیم‌پیچ تحریک را به شبکه تخلیه نموده و امکان تثبیت ولتاژ لینک DC را فراهم نماید. بر این اساس مقدار مرجع توان



شکل (۳): بلوک دیاگرام سیستم کنترلی
Fig. (3): Control system block diagram

Table (1): Technical parameters of simulated wind turbine and induction generator

جدول (۱): پارامترهای ژنراتور القایی و توربین بادی شبیه‌سازی شده [۱۴]

۲۲۰۰	قدرت ژنراتور (W)	۰/۰۱۱	اندوکتانس پراکندگی روتور (H)
۲	تعداد قطب	۰/۳۷۴	اندوکتانس مغناطیس کننده هسته (H)
۴۰۰	ولتاژ استاتور (V)	۱/۱	اینرسی روتور
۲/۴	مقاومت سیم‌پیچ‌های استاتور (Ω)	۱/۲	شعاع پره (m) توربین
۴/۱	مقاومت روتور (Ω)	۶	نسبت تبدیل گیر بکس
۰/۰۱۱	اندوکتانس پراکندگی سیم-پیچ‌های استاتور (H)	۱/۲۲۵	چگالی هوا (Kg/m ³)

شکل (۴-b) چگونگی تغییرات سرعت مرجع و سرعت واقعی محور توربوژنراتور بادی را نشان می‌دهد. بدیهی است که سرعت مرجع، توسط الگوریتم MPPT حاصل شده و همانگونه که دیده می‌شود، سرعت محور توانسته است مقدار مرجع فوق را دقیقاً دنبال نماید.

۴- شبیه‌سازی سیستم

به منظور شبیه‌سازی سیستم فوق‌الذکر، یک برنامه کامپیوتری به زبان ++C نوشته شده که از روش رانگ کوتای مرتبه چهار برای حل معادلات دیفرانسیل استفاده می‌نماید. نتایج بدست آمده از این برنامه توسط نرم‌افزار متلب ترسیم و نمایش داده شده است. ژنراتور القایی ۲/۲ کیلو وات به همراه توربین بادی متناسبی که مشخصات آنها در جدول (۱) آمده، در این برنامه مدل شده است [۱۴]. به منظور آزاد نمودن ظرفیت سیم‌پیچ قدرت برای تحویل توان اکتیو به شبکه، مقدار $Q_{s2-ref} = 0$ اختیار شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۴) آمده است. شکل (۴-a) فرم تغییرات سرعت باد را نمایش می‌دهد. تغییرات سرعت بصورت پله‌ای و بگونه‌ای اعمال شده است که سیستم کنترلی در محدوده زمانی ۴ تا ۷ ثانیه، مطابق آنچه در بخش ۳ ذکر گردیده، ناچار به تنظیم زاویه پیچ پرها برای تثبیت توان جذب شده بر روی حداکثر قابل تحمل گردد.

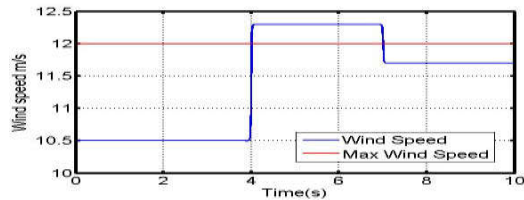
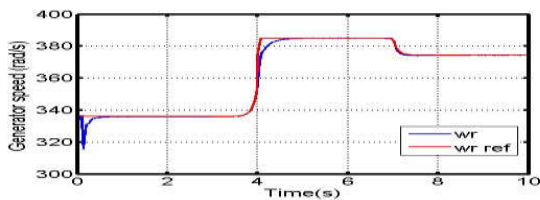
بادی را بر روی مقدار بهینه آن تنظیم نماید. این امر به منزله جذب حداکثر توان توسط توربوژنراتور می باشد. منحنی تغییرات سرعت نوک پره های توربین بادی در شکل (۴-j) نمایش یافته و همانگونه که انتظار می رود، تنها در بازه کنترل زاویه آتش از مقدار بهینه کمتر بوده است. شکل (۴-k) تغییرات زاویه پیچ پره های توربین بادی را نمایش داده است. مقدار صفر برای زاویه پیچ پره، مقداری بهینه بوده و تنها در سرعت های بیش از حد باد این زاویه به نحو مناسب تغییر می یابد. افزایش بیشتر سرعت باد می تواند مقدار بیشتری را برای زاویه پیچ پره ها به دنبال داشته باشد. شکل (۴-l) نیز تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی ژنراتور را به همراه مقدار مرجع آن نمایش می دهد. دنبال شدن گشتاور مرجع توسط گشتاور تولیدی ژنراتور، تضمین گر تنظیم سرعت بر روی مقدار مرجع خود می باشد.

۵- نتیجه گیری

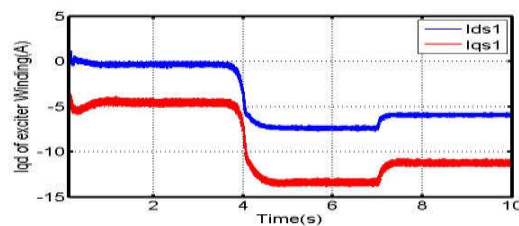
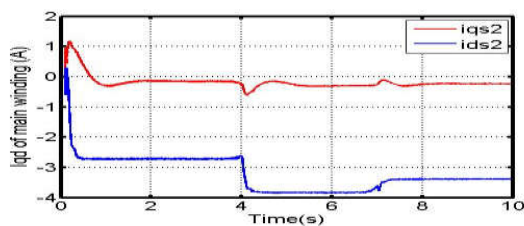
در این مقاله، یک روش کنترلی جدید جهت اتصال مستقیم ژنراتورهای القایی با دو سیم پیچ استاتور به شبکه و دستیابی به ماکزیمم توان از انرژی باد پیشنهاد شده است. ژنراتور القایی مورد نظر، از دو سیم پیچ سه فاز ایزوله در استاتور و یک روتور قفسه سنجایی تشکیل شده که سیم پیچ اول استاتور از طریق یک جفت مبدل پشت به پشت کنترل شده به شبکه متصل و نقش تحریک ژنراتور و تثبیت فرکانس برق تولیدی را دارد. سیم پیچ دوم استاتور، بعنوان ترمینال خروجی ژنراتور، بطور مستقیم به شبکه متصل و وظیفه انتقال توان به شبکه را بر عهده خواهد داشت. در سیستم پیشنهادی، امکان تنظیم میزان توان راکتیو تزریقی به شبکه از طرف هر دو سیم پیچ استاتور وجود داشته و بیشترین توان قابل جذب از باد نیز، پس از کسر تلفات های داخلی سیستم، به شبکه تحویل می گردد. سیستم کنترل زاویه پیچ پره های توربین بادی نیز برای سرعت های باد بالاتر از نامی نیز در نظر گرفته شده است. شبیه سازی کامپیوتری سیستم به کمک برنامه های به زبان ++C انجام شده و نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد صحیح و موثر روش کنترلی پیشنهادی برای دریافت بیشترین توان از انرژی باد و سایر اهداف کنترلی تعریف شده می باشد.

دو شکل (۴-c) و (۴-d) منحنی تغییرات جریان های دو محوری سیم پیچ های تحریک و قدرت استاتور را در دستگاه دوار سنکرون نمایش می دهند. شکل (۴-e) توان راکتیو تزریقی به ژنراتور از سوی سیم پیچ تحریک را نمایش می دهد. از آنجاییکه در شبیه سازی انجام شده، با هدف کاهش ظرفیت مبدل های استفاده شده از یکسو و اختصاص کل ظرفیت سیم پیچ قدرت به تبدیل انرژی اکتیو از سوی دیگر، مقدار مرجع توان راکتیو تحویلی به شبکه از طریق سیم پیچ قدرت صفر انتخاب شده است، شکل حاضر در حقیقت فرم تغییرات توان راکتیو مصرفی خود ژنراتور را نمایش داده است. فرم تغییرات توان اکتیوی که از طریق سیم پیچ تحریک به شبکه تحویل می گردد نیز در شکل (۴-f) نمایش داده شده است. این توان از لغزش لحظه ای ماشین و مقدار توان جذب شده از باد تبعیت می نماید. توازن توان اکتیو جذب شده در سیم پیچ تحریک با توان تحویلی به شبکه از طریق مبدل سمت شبکه، تضمین کننده تثبیت ولتاژ لینک DC می باشد.

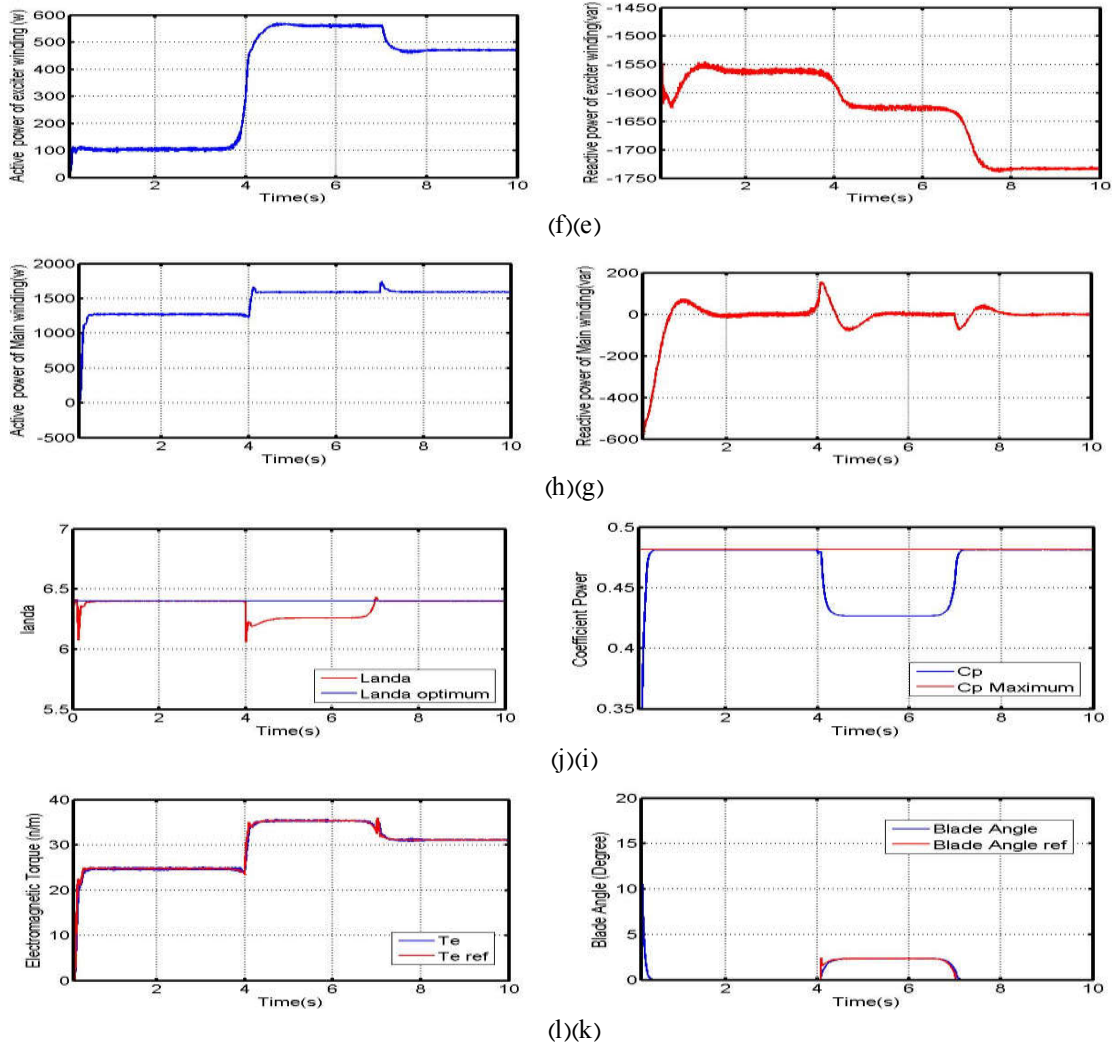
توان های اکتیو و راکتیو تحویلی از سیم پیچ قدرت به شبکه در شکل های (۴-g) و (۴-h) نمایش داده شده است. از آنجایی که ژنراتور القایی ذاتاً مصرف کننده توان راکتیو می باشد، مقدار مرجع توان راکتیو تحویلی به شبکه از طریق سیم پیچ قدرت برابر صفر در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که می توان با تزریق توان راکتیو مازاد بر مصرف ژنراتور از طریق سیم پیچ تحریک، شرایط تولید توان راکتیو توسط ژنراتور را نیز فراهم نمود، هر چند این مورد به قیمت افزایش ظرفیت مبدل پشت به پشت تحریک و اختصاص بخشی از ظرفیت سیم پیچ قدرت به توان راکتیو صورت خواهد گرفت. همانگونه که از مجموع شکل های (۴-f) و (۴-h) برمی آید، کل توان اکتیو تحویلی به شبکه از طریق دو سیم پیچ استاتور در طول مدت ۳ تا ۷ ثانیه برابر کل ظرفیت ماشین بوده و در خارج از این بازه زمانی نیز حداکثر توان قابل دریافت از باد برابری دارد. شکل (۴-i) نمایشی از تغییرات ضریب توان بهینه و واقعی توربین بادی می باشد. بدیهی است در مدت ۳ تا ۷ ثانیه که سرعت باد از حداکثر مجاز تجاوز نموده و سیستم کنترلی با تنظیم زاویه پره ها، ضریب توان توربین را کاهش داده تا مقدار توان جذب شده را محدود نماید. در خارج از این بازه زمانی، سیستم کنترلی توانسته است مقدار ضریب توان واقعی توربین



(b) (a)



(d) (c)



شکل (۴): نتایج شبیه سازی

(a) تغییرات سرعت باد (b) سرعت مرجع و سرعت واقعی محور (c) جریان‌های دومحوری تحریک (d) جریان‌های دو محوری سیم‌پیچ قدرت (e) توان راکتیو تحریک (f) توان اکتیو مبادلاتی با سیم‌پیچ تحریک (g) توان راکتیو سیم‌پیچ قدرت (h) توان اکتیو سیم‌پیچ قدرت و واقعی توربین بادی (j) سرعت جاروی نوک پره در حالت بهینه و واقعی (k) مقدار مرجع و واقعی زاویه پیچ پره توربین (l) گشتاور مرجع و واقعی ژنراتور

Fig. (4): Simulation results

(a) Wind speed variation (b) Reference and actual shaft speed (c) Two axis excitation currents (d) Two axis power winding currents (e) Excitation reactive power (f) Exchanged active power with excitation winding (g) Power winding reactive power (h) Power winding active power (i) The maximum and actual value of wind turbine power coefficient (j) The optimum and real value of tip speed ratio (k) The reference and actual value of turbine blades pitch angle (l) The reference and real value of generator torque

پی‌نوشت:

1. Double Fed Induction Generator
2. Brushless Doubly Fed Induction Generator
3. Double Stator Induction Generator
4. Proportional Integration Derivative
5. Maximum Power Point Tracking

References

1. G. Shahgholian, K. Khani, M. Moazzami, "Frequency control in autonomous microgrid in the presence of DFIG based wind turbine", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 6, No. 23, pp. 3-12, Dec. 2015 (in Persian).
2. H. Polinder, J.A. Ferreira, B.B. Jensen, A.B. Abrahamsen, K. Atallah, "Trends in wind turbine generator systems", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 1, No. 3, pp. 174-185, Sep. 2013.
3. S. Basak, C. Chakraborty, "Dual stator winding induction machine: Problems, Progress, and Future Scope", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 7, pp. 4641-4652, July 2015.

4. J. Bjornstedt, F. Sulla, O. Samuelsson, "Experimental investigation on steady-state and transient performance of a self-excited induction generator", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 5, No. 12, pp. 1233-1239, Dec. 2011.
5. H.S. Che, E. Levi, M. Jones, M.J. Duran, W. Hew, N.A. Rahim, "Operation of a six-phase induction machine using series-connected machine-side converters", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 1, pp. 164-176, Jan. 2014.
6. Y. Hu, W. Huang, Y. Li, "A novel instantaneous torque control scheme for induction generator systems", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 25, No. 3, pp. 795-803, Sep. 2010.
7. M. Tavoosi, B. Fani, E. Adib, "Stability analysis and control of DFIG based wind turbine using FBC strategy", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 4, No. 15, pp. 31-42, Dec. 2013 (in Persian).
8. M. Fooladgar, E. Rok-Rok, B. Fani, Gh. Shahgholian, Evaluation of the trajectory sensitivity analysis of the DFIG control parameters in response to changes in wind speed and the line impedance connection to the grid DFIG", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 5, No. 20, pp. 37-54, March 2015 (in Persian).
9. S. Jenab, B. Fani, H. Ghasvari, "Transient performance improvement of wind turbines with doubly fed induction generators using fractional order control strategy", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 4, No. 16, pp. 17-28, March 2014 (in Persian).
10. S. Shao, T. Long, E. Abdi, RE.A. McMahon, "Dynamic control of the brushless doubly fed induction generator under unbalanced operation", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 6, pp. 2465-2476, Jun. 2013.
11. B. Singh, S.S. Murthy, S. Gupta, "A stand-alone generating system using self-excited induction generators in the extraction of petroleum products", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 46, No. 1, pp.94-101, Jan./Feb. 2010.
12. M. Moradian, J. Soltani, "A novel control method for an isolated three-phase induction generator with constant frequency and adjustable output voltage", *International Trans. on Electrical Energy Systems*, Vol. 26, No. 10, pp. 2074-2086, Oct. 2016.
13. M. Moradian, J. Soltani, "Sliding mode control of a new wind-based isolated three-phase induction generator system with constant frequency and adjustable output voltage", *Journal of Power Electronics*, Vol. 16, No. 2, pp. 675-684, March 2016.
14. M. Moradian, J. Soltani, "An Isolated three-phase induction generator system with dual stator winding sets under unbalanced load condition", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 31, No. 2, pp. 531-539, Jan. 2016.
15. F. Bu, H. Liu, W. Huang, H. Xu, Y. Hu, "Recent advances and developments in dual stator-winding induction generator and system", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 33, No. 3, pp. 1431-1442, Jan. 2018.
16. K.A. Chinmaya, G.K. Singh, "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.
17. G. Semrau, "Dynamic modeling and characterization of a wind turbine system leading to controls development", M.Sc. Thesis in Mechanical Engineering, Kate Gleason College of Engineering, Rochester New York, August 2010.
18. Vas P. *Electrical machines and drives: A space-vector theory approach*. Clarendon Press; Oxford, United Kingdom. 1992.