ICME2017
چهاردهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران
۲ تا ٤ آبان ۱۳۹٦
انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران
دانشگاه صنعتی اراک

مدلسازی و طراحی یک واحد کنترلی برای ژنراتور شار محوری آهنربای دایم تطبیق شونده با سرعت باد

علی جباری[آ*]، سمیه پیرزاد[ب]، علی اصغر قدیمی[ج]، امیرحسین ابوالمعصومی[د]

[آ] ایران، اراک، میدان بسیج (سردشت)، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، ۳۸۱۵۶۸۸۴۹، استادیار مهندسی مکانیک

[ب] ایران، اراک، میدان بسیج (سردشت)، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، ۳۸۱۵۶۸۸۴۹، کارشناسی ارشد مکاترونیک

[ج] ایران، اراک، میدان بسیج (سردشت)، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، ۳۸۱۵۶۸۸۴۹، دانشیار مهندسی برق

[د] ایران، اراک، میدان بسیج (سردشت)، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، ۳۸۱۵۶۸۸۴۹، استادیار مهندسی برق

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: *a-jabbari@araku.ac.ir*

چکیده

یکی از بهترین منابع تولید انرژی تجدیدپذیر، انرژی باد می‌باشد که در سالیان اخیر به‌طور وسیعی در دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا سیستم‌های بادی با ژنراتورها و توربین‌های بادی و سیستم‌های کنترل مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از انواع ژنراتورهای جدید مورد استفاده در سیستم‌های بادی، ژنراتورهای شارمحوری می‌باشند. این ژنراتورها به‌دلیل توانایی کار در سرعت کم باعث حذف گیربکس در سیستم و افزایش قابل توجه بازده و کاهش وزن سیستم می‌شوند. در این ژنراتورها با توجه به ساختار ماژولار بودن استاتور، امکان بهره‌برداری و کنترل هریک از ماژول‌ها بصورت مستقل فراهم است. لذا در این مقاله ضمن مدلسازی سیستم شامل توربین و ژنراتور، روش کنترلی جهت ورود و خروج بلوک‌های استاتور و همچنین سیستم کنترل زاویه گام در سرعت‌های مختلف باد و مقادیر مختلف بار به منظور حداکثر سازی بازده سیستم و تثبیت ولتاژ خروجی ژنراتور ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی روی یک ژنراتور واقعی نشان از کارآیی روش پیشنهادی دارد.

کلمات کلیدی: توربین بادی، بهینه‌سازی، ژنراتور آهنربای دائم شار محوری، سیستم کنترل، حذف گیربکس، کنترل زاویه گام.

---

۱. مقدمه

امروزه ژنراتورهای شار محوری آهنربای دایم AFPM با توجه به ویژگی‌هایی همچون بازده بالا، امکان کارکرد در سرعت‌های پایین، ماژولار بودن ساختار، چگالی توان و گشتاور بالاتری که نسبت به انواع ژنراتورهای شار شعاعی مرسوم دارند، مورد توجه قرارگرفته‌اند [۲].

تغییرات متناوب سرعت باد باعث عدم دستیابی به توان، ولتاژ و فرکانس ثابت می‌شود که معمولا برای تنظیم آنها از گیربکس، کنترل زاویه گام، کنترل درایو انحراف توربین و کنترل ژنراتورها استفاده می‌کنند. وجود گیربکس باعث افزایش تلفات و کاهش بازده سیستم می‌شود و همچنین حجم و وزن سیستم ژنراتور را افزایش می‌دهد. با حذف گیربکس علی‌رغم رفع مشکلات اشاره شده، بحث کنترل فرکانس و ولتاژ ژنراتور پیش می‌آید.

به منظور رسیدن به نقطه حداکثر توان (MPPT) در سیستم‌های تولید توان بادی، سرعت دوران توربین‌های بادی باید در زمان واقعی مطابق با سرعت باد تنظیم شود [۳]. سرعت توربین بادی ممکن است ثابت یا متغیر باشد، MPPT فقط با توربین‌های بادی سرعت متغیر امکان‌پذیر است. هدف الگوریتم‌های MPPT استخراج بیشترین توان در نواحی با سرعت ملایم است. در [۴] یک کنترل کننده ردیابی نقطه حداکثر توان برای توربین‌های بادی کوچک مقیاس پیشنهاد شده است. در [۵] مدلسازی یک توربین بادی کوچک براساس PMSG و کنترل بدون سنسور MPPT با پل دیودی انجام شده‌است.

روش مرسوم در کنترل ولتاژ و فرکانس توربین‌های بدون گیربکس استفاده از ساختار تمام مبدل یعنی یکسوسازی خروجی ژنراتور و مجددا تبدیل آن به ولتاژ و فرکانس دلخواه می‌باشد [۶]. استفاده از مبدل‌های چند سطحی، به علت مزایای آن در استفاده‌های توان بالا و ولتاژ بالا، کاربردهای توان بادی را به‌صورت قابل توجهی افزایش داده است [۷]. در ژنراتورهای شارمحوری بخاطر خاصیت ماژولار بودن امکان دسترسی به سیم‌پیچ‌های هر یک از دیسک‌های استاتور و بارگیری و کنترل آنها به‌صورت مستقل فراهم است. در [۸] یک روش براساس کنترل FOC برای رسیدن به بیشترین توان از سرعت متغیر باد پیشنهاد شده‌است. در [۹] یک روش برای به‌دست آوردن نسبت بهینه سیستم به منظور ردیابی نقطه حداکثر توان ارائه شده و سپس سیستم را براساس این نسبت کنترل می‌کند. در [۱۰] روشی برای کنترل خروجی ژنراتور مستقل از شبکه با قطع و وصل بلوک‌های استاتور براساس تغییرات سرعت باد ارائه شده‌است که این روش موجب دستیابی به انرژی الکتریکی با ولتاژ و فرکانس ثابت و توان متغیر در خروجی می‌شود. در این روش هریک از دیسک‌های استاتور دارای بار جداگانه‌ای می‌باشند که در شرایط باد مختلف وارد مدار می‌شوند یا از مدار خارج می‌شوند تا ولتاژ و فرکانس ثابت بماند. با این سیستم می‌توان در سرعت‌های بالا و پایین باد، با تغییر تعداد بلوک‌های استاتور متصل به بار، بازده بالایی داشت. اما با توجه به اینکه در هر تغییر بعضی از بارها کاملا از مدار قطع می‌شوند (درصورتی که ممکن است نیاز به توان داشته باشند) یا به ژنراتور وصل می‌شوند (در صورتی که ممکن است نیاز به توان نداشته باشند) این سیستم کارآیی مناسبی ندارد. لذا در این مقاله طرحی ارائه شده که یک بار مجتمع مستقل از شبکه (مثلا یک ساختمان مسکونی) که به یک ژنراتور شارمحوری متصل شده است در شرایط مختلف سرعت باد با ولتاژ و فرکانس ثابت تغذیه شود. در این طرح با تغییرات سرعت باد تعداد بلوک‌های موازی شده استاتور جهت تغذیه بار تغییر کرده تا ضمن دریافت حداکثر انرژی از باد ولتاژ و فرکانس بار نیز تثبیت شود. مدلسازی، طراحی کنترل‌کننده و شبیه‌سازی ژنراتور آهنربای دائم شارمحوری به منظور تأمین یک بار محلی با مشخصات کیفیت توان مناسب، همزمان با حداکثر بازده ارائه شده است و اثر ورود و خروج بلوک‌های استاتور و زاویه گام مورد بررسی قرار گرفته است. سپس طراحی کنترل کننده در دو حالت اتصال هر بلوک استاتور به یک بار محلی و تغذیه یک بار بزرگ محلی توسط ترکیب موازی بلوک‌های استاتور جهت برآورده شدن اهداف اشاره شده، انجام شده است. شبیه‌سازی و برنامه‌نویسی سیستم کنترلی، ژنراتور و سیستم توربین با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 2013b انجام شده‌است.

۲. مدلسازی سیستم مورد مطالعه

آنچه در این مقاله مورد بحث می‌باشد کنترل یک سیستم تغذیه الکتریسیته در یک بار مستقل از شبکه توسط یک ژنراتور AFPM متصل به یک توربین بادی می‌باشد. این ژنراتور دارای n_b بلوک استاتور می‌باشد که هر بلوک سه فاز بوده و خروجی این بلوک‌ها می‌توانند توسط کلیدهایی بصورت موازی کار کنند تا بار را تغذیه نمایند.

۲,۱ مدل دینامیکی توربین بادی

در این بخش توان و گشتاور تولیدی از پره‌های توربین با حضور زاویه گام توربین و سیستم yaw محاسبه می‌گردد. گشتاور آیرودینامیکی تولیدی توربین بادی به صورت زیر است[۱۱] :

$$T_a = \frac{P_a}{\omega_r} = \frac{1}{2}\rho\,\pi R^2 \frac{C_p(\lambda,\beta)}{\omega_r} V_\omega^3 \cos(\theta) \quad (۱)$$

$C_p(\lambda,\beta)$ در رابطه‌ی (۱) معرف ضریب توان می‌باشد که وابسته به زاویه گام β و نسبت سرعت نوک λ است و در توربین‌های مختلف این ضرایب با هم متفاوت می‌باشند و $\cos(\theta)$ معرف اثر زاویه باد بر گشتاور آیرودینامیک است. همچنین در رابطه (۱) ، R شعاع پره‌های توربین، V_w سرعت باد، ρ چگالی هوای منطقه،ω_m سرعت مکانیکی توربین و P_{out} توان خروجی توربین می‌باشد و این پارامترها از روابط (۲) تا (۵) به‌دست می‌آیند [۱۲].

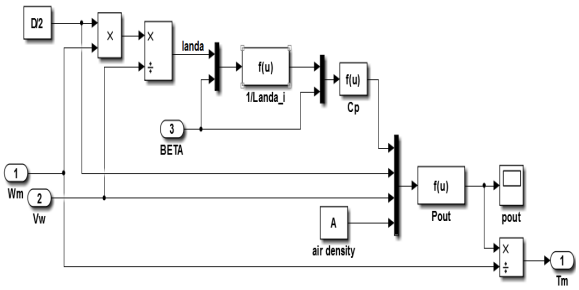
$$C_p(\lambda,\beta) = 0.22\left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5\right)e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \quad (۲)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (۳)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_\omega} \quad (۴)$$

$$P_{out,turbine} = \frac{1\pi}{24} D_{blade}^2\, \rho\, C_p V_{wind}^3 \quad (۵)$$

زمانی که باد با زاویه صفر درجه به پره‌های توربین برخورد می‌کند حداکثر گشتاور تولید می‌شود و زمانی که باد با زاویه‌ی ۹۰ درجه به پره‌ها برخورد می‌کند تقریبا گشتاور تولیدی توربین برابر صفر است. شکل ۱ نحوه پیاده‌سازی این معادلات در نرم‌افزار متلب را نشان می‌دهد.

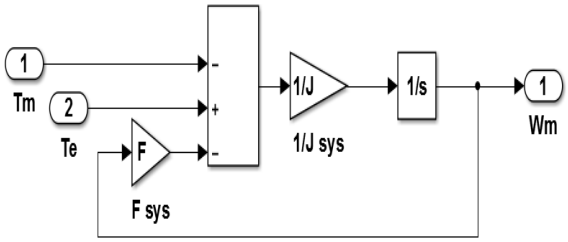


شکل ۱ مدلسازی توربین بادی در نرم افزار متلب

رفتار دینامیکی درایو ترین توسط معادله دیفرانسیل زیر تشریح می‌شود[۱۳] :

$$J_{sys}\frac{dw_{m,gen}}{dt} = T_{e,gen} - T_{m,turbine} - F_{sys}w_{m,gen} \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، J_{sys} ممان اینرسی کل سیستم، $T_{e,gen}$ گشتاور الکتریکی ژنراتور، $T_{m,turbine}$ گشتاور مکانیکی توربین، F_{sys} ضریب اصطکاک کل سیستم و $w_{m,gen}$ سرعت مکانیکی ژنراتور می‌باشد. شکل ۲ مدلسازی این بلوک را در نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد.



شکل ۲ بلوک Drive Train

۲,۲ مدلسازی ژنراتور *AFPM*

ژنراتور مورد نظر یک ژنراتور درایو مستقیم ماژولار روتور داخلی است. مقدار پارامترهای ژنراتور طراحی شده در این مقاله در جدول۲ آمده است. معادله ولتاژ سه فاز ژنراتور به‌صورت رابطه (۷) است:

$$v_{abc} = e_{abc} - R_{abc} i_{abc} - L_{abc}\frac{di_{abc}}{dt} \qquad (۷)$$

در رابطه (۷)، e_{abc}، نیروی محرکه الکتریکی (EMF) القایی و v_{abc} ولتاژ ترمینال استاتور می‌باشد. به منظور خطی‌سازی اندوکتانس L_{abc}، معادله دینامیکی سه فاز بالا می‌تواند با استفاده از تبدیل پارک به فرم مرجع سنکرون dq0 تبدیل شود. مانند زیر:

$$K_s = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta_{e,gen} & \cos(\theta_{e,gen} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{e,gen} + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta_{e,gen} & \sin(\theta_{e,gen} - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_{e,gen} + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \qquad (۸)$$

$$\theta_{e,gen} = \int w_{e,gen} * dt$$

در رابطه (۸)، $\theta_{e,gen}$ جابجایی زاویه‌ای الکتریکی ژنراتور است. بعد از تبدیل، معادلات دینامیکی ژنراتور بصورت رابطه (۹) هستند:

$$\begin{aligned} v_q &= e_q - R_s i_q - w_{e,gen} L_d i_d - L_q \frac{di_q}{dt} \\ v_d &= e_d - R_s i_d - w_{e,gen} L_q i_q - L_d \frac{di_d}{dt} \\ v_0 &= e_0 - R_s i_0 - L_0 \frac{di_0}{dt} \end{aligned} \qquad (۹)$$

از آنجایی که ژنراتور به صورت الکتریکی متعادل است، معادلات محور صفر می‌تواند حذف شود. بنابراین معادلات دینامیکی ژنراتور به‌صورت رابطه (۱۰) در می‌آیند:

$$\begin{aligned} v_q &= k_{emf} w_{e,gen} - R_s i_q - w_{e,gen} L_d i_d - L_q \frac{di_q}{dt} \\ v_d &= -R_s i_q - w_{e,gen} L_q i_q - L_d \frac{di_d}{dt} \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

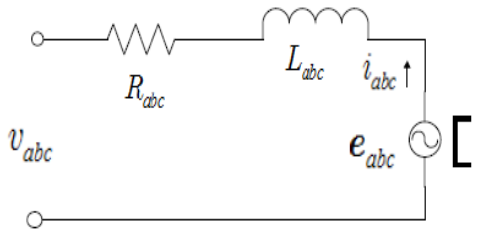
در رابطه (۱۰)، L_d اندوکتانس محور d ، L_q اندوکتانس محور q ، R_s مقاومت استاتور و K_{emf} ثابت emf ژنراتور است. توان الکتریکی ژنراتور از رابطه (۱۱) به‌دست می‌آید که در این رابطه n_b تعداد بلوک‌های استاتور و v_d و v_q به ترتیب ولتاژهای محورهای d و q می‌باشند. سرعت الکتریکی ژنراتور از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید که در این رابطه P تعداد قطب‌ها و $W_{m,gen}$ سرعت مکانیکی ژنراتور می‌باشد. رابطه (۱۳) گشتاور الکتریکی ژنراتور را نشان می‌دهد، تغییرات تعداد بلوک‌های ژنراتور روی مقدار این گشتاور رابطه مستقیم دارد. با افزایش تعداد بلوک‌های ژنراتور، گشتاور الکتریکی افزایش یافته که این افزایش گشتاور منجر به کاهش سرعت چرخش ژنراتور می‌شود.

$$P_{e,gen} = \frac{3}{2}[v_d i_d + v_q i_q] n_p \quad (۱۱)$$

$$W_{e,gen} = \frac{P}{2} W_{m,gen} \quad (۱۲)$$

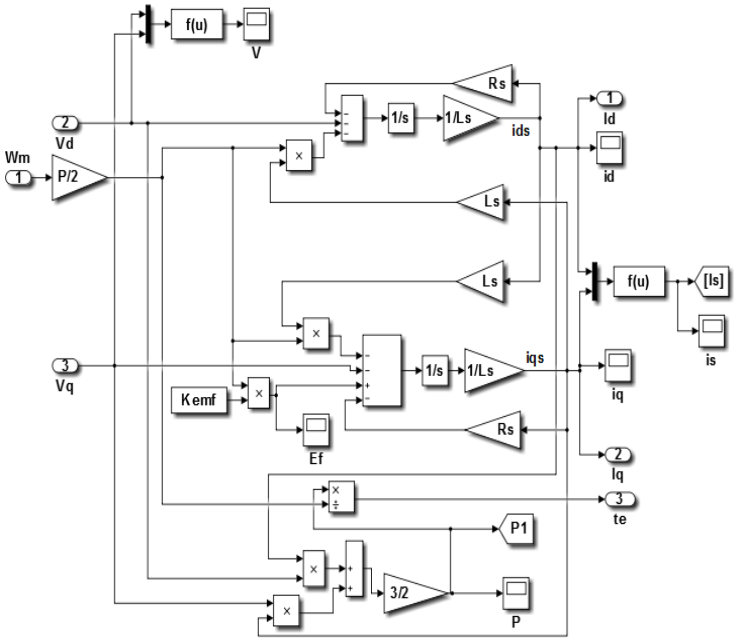
$$T_{e,gen} = \frac{P_{e,gen}}{W_{e,gen}} \quad (۱۳)$$

با پیاده‌سازی این روابط در سیمولینک متلب مدل دینامیکی ژنراتور به دست می‌آید. هر ماژول ژنراتور می‌تواند به‌صورت الکتریکی با استفاده از مدار معادل شکل ۳ تشریح شود [۱۳] :



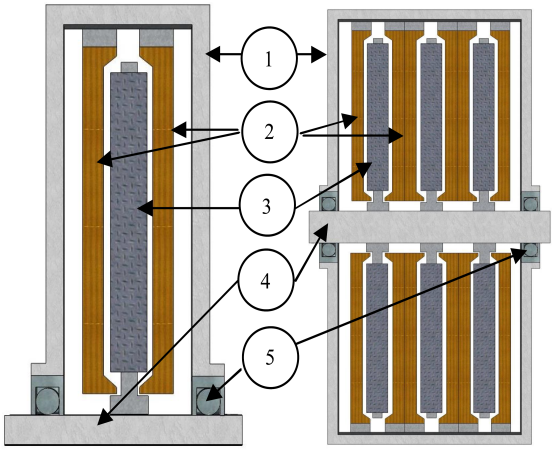
شکل ۳ مدار معادل ژنراتور AFPM [۱۳]

مدل شبیه‌سازی شده یک ماژول ژنراتور در محیط سیمولینک



شکل ۴ مدل سیمولینک یک بلوک ژنراتور

مدل دو بعدی این طرح پیشنهادی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ مدل ژنراتور AFPM بدون هسته:۱-قاب،۲-دو استاتور بدون هسته سیم‌پیچی شده،۳-آهنرباهای دائم (روتور بدون هسته)،۴-شفت،۵-تکیه‌گاه

۲,۳ *مدلسازی بار*

در اینجا برای سادگی، بار اهمی فرض شده است.

$$V_{Load} = R.i_{Load}\begin{cases} V_{Lq} = R.i_q \\ V_{Ld} = R.i_d \end{cases} \quad (۱۴)$$

۲,۴ پیاده‌سازی کامل سیستم در نرم‌افزار متلب

مدل کلی سیستم شبیه‌سازی شده در محیط سیمولینک نرم‌افزار MATLAB که شامل توربین بادی، درایو ترین، ژنراتور و سیستم کنترلی می‌باشد در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

۳. پیاده‌سازی روش کنترلی

فرض کنیم ژنراتور در سرعت ثابت W در حال کار باشد که یک یا چند بلوک به خروجی وصل هستند و ولتاژ ترمینال آن Vo باشد. با اتصال یک بلوک جدید، جریان جاری شده در این بلوک:

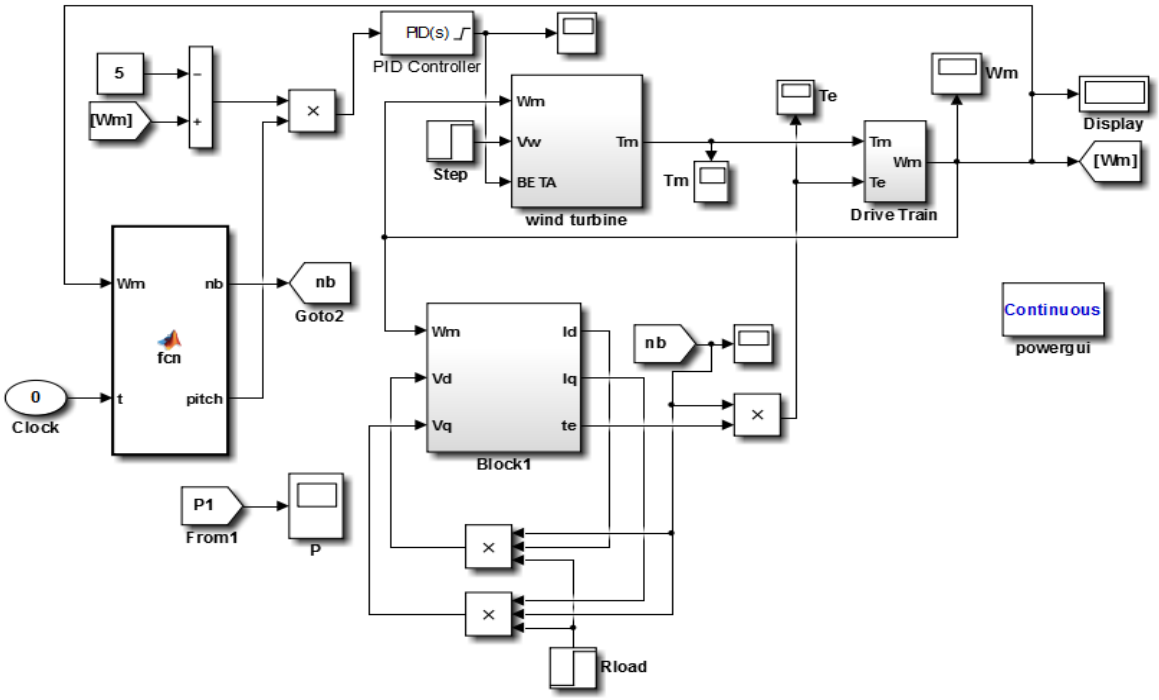
$$I = \frac{E - V_0}{R_S} \quad (۱۵)$$

خواهد شد. لذا توان:

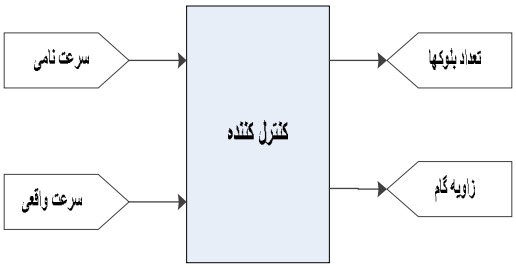
$$P = V_0 . I \quad (۱۶)$$

توسط این بلوک جدید تولید می‌شود. این توان اضافی تعادل توان تولیدی (توسط باد) و مصرفی (توسط بار) را به هم می‌زند و در این حالت باعث کاهش سرعت ژنراتور می‌شود. از طرف دیگر در صورتی که سرعت باد افزایش یابد، طبق رابطه (۵) توان تولیدی زیاد شده و سرعت افزایش می‌یابد و مطابق توضیحات بالا ورود یک بلوک جدید باعث افزایش توان خروجی و تثبیت سرعت خواهد شد. از آنجاییکه تغییر سرعت مستقیما تغییر فرکانس و ولتاژ خروجی را در پی خواهد داشت، لذا تثبیت سرعت ژنراتور در حالتی که به یک بار محلی متصل می‌باشد، هدف اصلی سیستم کنترل خواهد بود.

لذا ایده کلی روش کنترلی براین اساس است که در سرعت‌های پایین باد تعداد بلوک کمتر و در سرعت‌های باد بالا تعداد بلوک بیشتری وارد مدار شده تا بتوانند تعادل توان تولیدی باد و مصرفی بارها را در یک سرعت مناسب (ولتاژ و فرکانس دلخواه) ایجاد نمایند. بلوک دیاگرام سیستم کنترلی بصورت شکل ۷ می‌باشد.



شکل ۶ مدل کلی سیستم شبیه‌سازی شده

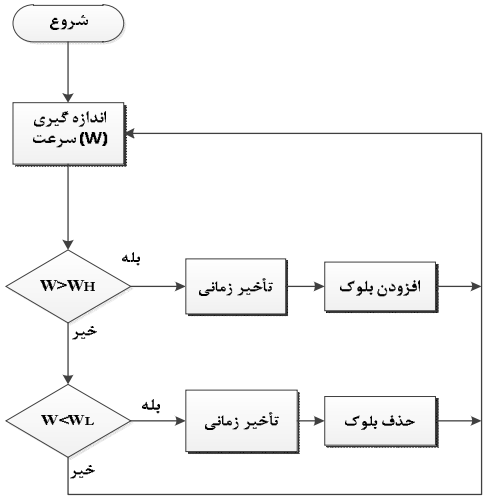


شکل ۷ بلوک دیاگرام سیستم کنترل

۳,۱ کنترل تعداد بلوک‌ها جهت کنترل سرعت

مطابق آنچه گفته شد هدف سیستم کنترل تثبیت سرعت ژنراتور جهت تضمین فرکانس و ولتاژ ثابت و دلخواه بار می‌باشد. این کار در مرحله اول توسط ورود و خروج بلوک‌های استاتور و در مرحله دوم فعالسازی سیستم کنترل زاویه گام پره انجام می‌شود. به این صورت که وقتی سرعت ژنراتور در اثر افزایش سرعت باد یا کاهش میزان بار خروجی به مقدار حد بالای W_H (۵٪ بیشتر از سرعت نامی) رسید، بلوک جدیدی وارد مدار می‌شود. اگر بعد از وصل شدن این بلوک همچنان سرعت بزرگتر از W_H بود، بلوک بعدی وارد مدار می شود و به همین ترتیب بلوک‌های بعدی تا زمانی که سرعت به کمتر از W_H برسد متصل می‌شوند. در جهت برعکس درصورتی که با کاهش سرعت باد یا افزایش بار خروجی، سرعت ژنراتور به حد پایین W_L (۵٪ کمتر از سرعت نامی) برسد، یک بلوک از مدار خارج می‌شود، اگر سرعت باز هم کمتر از W_L بود، بلوک بعدی از مدار خارج می‌شود

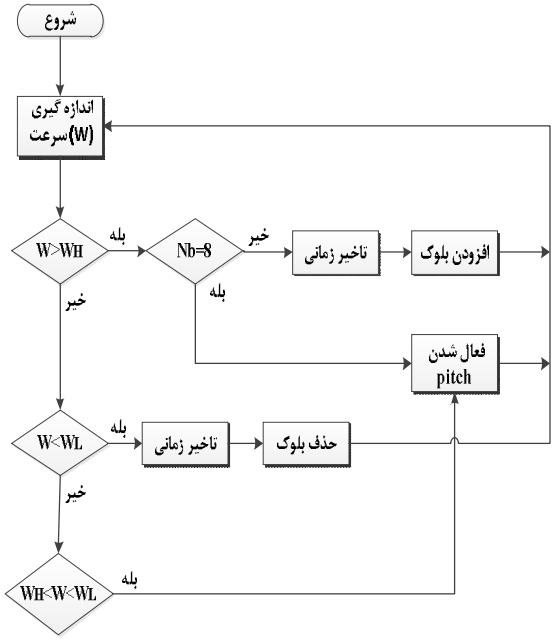
تا اینکه سرعت در محدوده نرمال (بین W_H و W_L) قرار گیرد. لازم به ذکر است مقادیر حد بالا و پایین سرعت تنظیمی بستگی به تعداد بلوک‌های استاتور دارد. هرچه تعداد بلوک‌ها بیشتر باشد امکان تنظیم سرعت توسط بلوک‌ها راحتتر خواهد بود و می‌توان محدوده تغییرات سرعت را کاهش داد. فلوچارت این سیستم کنترلی در شکل ۸ آمده است. لازم به ذکر است جهت پایدارشدن سیستم بعد از هر تغییر در بلوک‌ها یا سیستم کنترل گام، اندازه‌گیری سرعت بعد از گذشت زمانی متناسب با دینامیک سیستم انجام می‌شود.



شکل ۸ فلوچارت سیستم کنترل بلوک‌ها

۳,۲ کنترل تعداد بلوک‌ها و زاویه گام

در این سیستم از کنترل زاویه گام یا پیچ کنترل نیز استفاده می‌شود. به این صورت که هنگامی که همه بلوک‌ها وارد مدار شدند، اگر باز هم سرعت بالاتر از W_H بود، این بار پیچ کنترل وارد مدار می‌شود و با افزایش زاویه گام پره سرعت ژنراتور را کاهش می‌دهد. همچنین در صورتی که سرعت کمتر از W_L باشد و با قطع یک بلوک به بیشتر از W_H برسد، در این حالت نیز پیچ کنترل عمل کرده و با تغییر زاویه گام سرعت را کاهش می‌دهد و برعکس اگر سرعت ژنراتور بالاتر از W_H باشد و با وصل یک بلوک به کمتر از W_L برسد، پیچ کنترل وارد مدار می‌شود و به جای وصل شدن بلوک به بار، با افزایش زاویه گام سرعت را کاهش می‌دهد. فلوچارت این سیستم کنترلی در شکل ۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۹. فلوچارت سیستم کنترل بلوک‌ها و زاویه گام

۴. شبیه‌سازی

جهت بررسی صحت عملکرد سیستم کنترل یک نمونه ژنراتور ۳۰ کیلووات (بخش۲-۲) به همراه کنترل کننده طراحی شده و در محیط سیمولینک نرام افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. در جدول ۱ مشخصات توربین بادی و در جدول ۲ مشخصات یک بلوک ژنراتور شبیه‌سازی شده آمده است. ژنراتور مذکور از نوع روتور داخلی بوده و دارای ۸ بلوک استاتور می‌باشد.

جدول ۱: پارامترهای توربین بادی

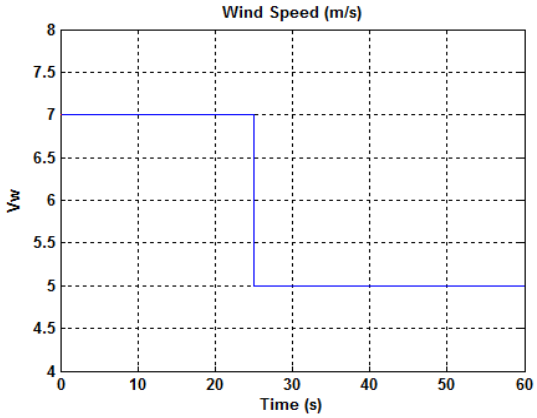
پارامتر	نماد	مقدار
توان خروجی نامی توربین	$P_{out,turbine}$	90 kw
سرعت نامی باد	V_{wind}	12 m/s
قطر روتور توربین	D_{Blade}	15m
چگالی هوای منطقه	ρ	1.01605 kg/m^3
ارتفاع مکان توربین از دریا	E	1750 m
ممان اینرسی کل سیستم	J_{sys}	74.22 kg.m^2
ضریب اصطکاک کل سیستم	F_{sys}	0.001189

جدول ۲: مشخصات یک بلوک ژنراتور

پارامتر	مقدار/جنس	واحد
تعداد زوج قطب‌ها	۳۲	-
جنس آهنربای دائم	NdFeB	-
چگالی شار مغناطیسی (مقدار پیک در فاصله هوایی)	۰/۶۵۳	T
تعداد فازها	۳	-
قطر خارجی ژنراتور	۱/۵۹۶	M
قطر داخلی ژنراتور	۰/۹۲۲	M
ولتاژ خط (اتصال ستاره)	۸۴۰	V
مقاومت استاتور	۰/۴۳۵	Ω
اندوکتانس استاتور	۰/۰۰۱۳	H
شار مغناطیسی القا شده توسط آهنربای دائم	۰/۰۰۸۶	Wb
ثابت EMF	۳/۲۳۵	V/Sec.
ممان اینرسی	۵/۹۹	Kg/m^2
سرعت زاویه‌ای نامی ژنراتور	۲۵	Rpm
توان خروجی نامی	۹۰	KW

۴,۱ شبیه‌سازی در حالت بدون PitchControl

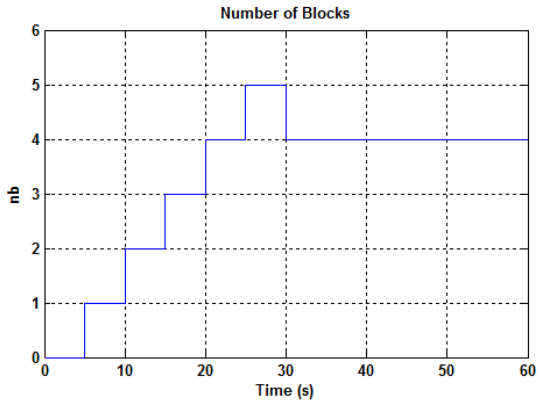
در این مدل، همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، سرعت باد در ۲۵ ثانیه اول ۷ متر بر ثانیه می‌باشد و سپس مقدار آن به ۵ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد.



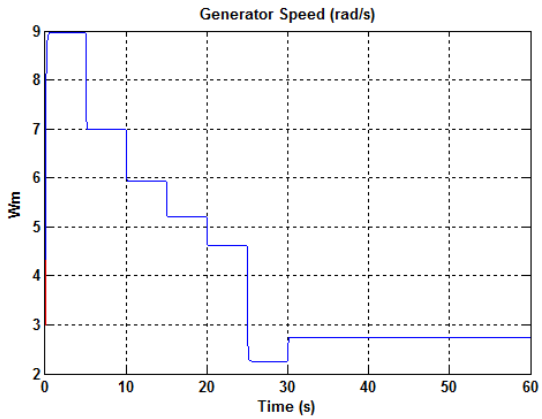
شکل ۱۰ سرعت باد

در نمودار شکل ۱۱ نحوه ورود و خروج بلوک‌ها نشان داده شده است. در این مدل بعد از گذشت زمان چند ثانیه (در این طرح با توجه به دینامیک سیستم نتیجه شد که ۵ ثانیه مناسب است) ، چون سرعت بالاتر از W_H می‌باشد، اولین بلوک وارد مدار می‌شود و به‌دلیل بالا بودن سرعت ژنراتور، ۵ بلوک با فاصله ۵ ثانیه از هم وصل می‌شوند. سپس در ثانیه ۲۵ سرعت باد کاهش می‌یابد و سرعت ژنراتور به کمتر از W_L می‌رسد، در نتیجه بعد از گذشت ۵ ثانیه یک بلوک قطع می‌شود تا سرعت ژنراتور به بالاتر از W_L برسد. در نهایت با ۴ بلوک سرعت سیستم ثابت می‌شود.

شکل ۱۲ نمودار سرعت ژنراتور را نشان میدهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در ابتدا سرعت ژنراتور بالاتر از W_H است، پس سیستم کنترلی پس از گذشت ۵ ثانیه عمل کرده و اولین بلوک ژنراتور وارد مدار می‌شود، با وصل شدن اولین بلوک، به دلیل افزایش گشتاور سیستم، سرعت ژنراتور اندکی کاهش می‌یابد ولی باز هم بالاتر از W_H است، پس بعد از گذشت ۵ ثانیه بلوک دوم وصل می‌شود و به همین ترتیب بلوک‌ها تا زمانی که سرعت ژنراتور به کمتر از سرعت نامی برسد، یکی پس از دیگری با فاصله‌ی زمانی ۵ ثانیه وصل می‌شوند و با وصل شدن بلوک‌ها همانطور که در نمودار نیز قابل مشاهده است، سرعت ژنراتور کاهش می‌یابد. پس از آن با کم شدن سرعت باد و قطع بلوک‌ها، همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، گشتاور سیستم کاهش یافته و سرعت ژنراتور افزایش می‌یابد تا اینکه با ثابت ماندن سرعت باد و تعداد بلوک‌ها، در مقداری بین W_H و W_L ثابت می‌شود.



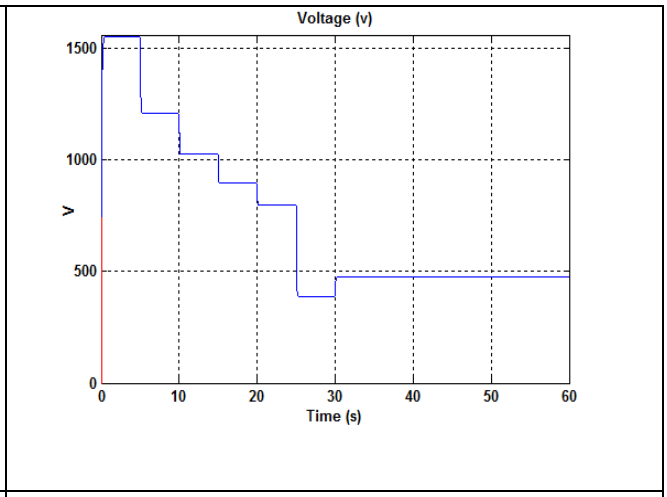
شکل ۱۱ تعداد بلوک‌ها



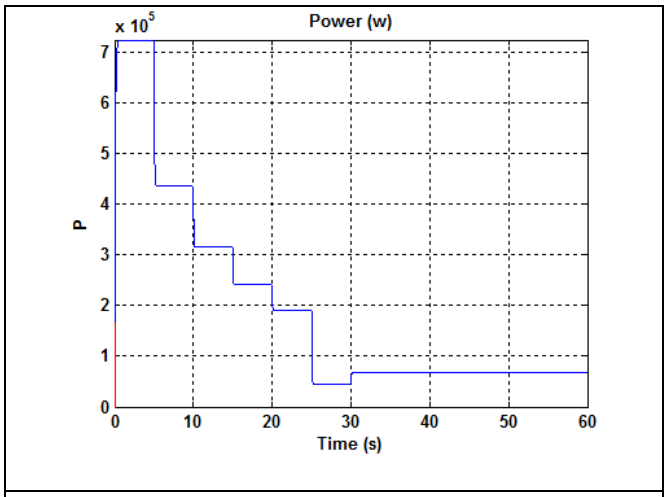
شکل ۱۲ نمودار سرعت ژنراتور

در شکل۱۳ نمودار ولتاژ یک بلوک ژنراتور مشاهده می‌شود، که با توجه به نمودار با وصل شدن بلوک‌ها و کاهش سرعت ژنراتور، ولتاژ افزایش می‌یابد و با قطع بلوک‌ها و افزایش سرعت ژنراتور، ولتاژ کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۴ نمودار توان یک بلوک ژنراتور با وجود سیستم کنترلی مشاهده می‌شود. از این شکل نیز نتیجه می‌شود که با وارد کردن بلوک‌ها و کاهش سرعت ژنراتور، توان یک بلوک کاهش می‌یابد و برعکس. لازم به ذکر است که در این طرح سرعت نامی ژنراتور ۲/۶۱۸ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده و مقدار W_H، ٪۵ بیشتر از سرعت نامی و مقدار W_L ، ٪۵ کمتر از سرعت نامی است.



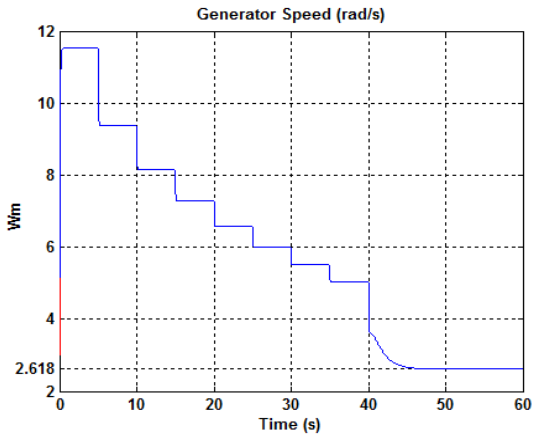
شکل ۱۳. نمودار ولتاژ یک بلوک ژنراتور



شکل۱۴. نمودار توان یک بلوک ژنراتور

۴,۲ شبیه‌سازی با PitchControl

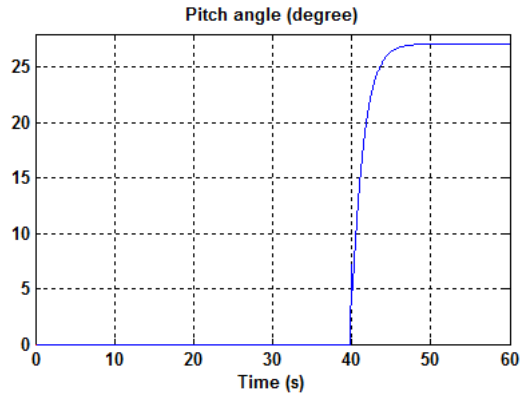
در این حالت علاوه بر تعداد بلوک‌های استاتور، زاویه گام پره نیز کنترل می‌شود. نحوه عملکرد پیچ کنترل در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همانطور که از نمودار مشخص است، با افزایش سرعت ژنراتور ابتدا بلوک ها وارد مدار می‌شوند، پس از وارد شدن همه بلوک‌ها، چون همچنان سرعت ژنراتور بیشتر از W_H است، پیچ کنترل عمل کرده و با تغییر زاویه گام، سرعت ژنراتور را در سرعت نامی ثابت نگه می‌دارد.



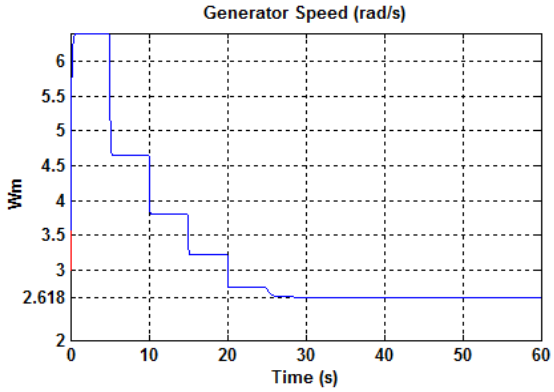
شکل۱۵ سرعت ژنراتور با pitch control، سرعت باد 9m/s

شکل ۱۶ زاویه گام پره‌های توربین را نشان می‌دهد که همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در این توربین پس از وصل شدن همه‌ی بلوک‌های ژنراتور، چون همچنان سرعت بالاتر از سرعت نامی است، سیستم کنترل زاویه گام پره‌ها فعال شده و با تغییر زاویه گام و رساندن آن به

۲۸ درجه، سرعت ژنراتور را به مقدار مطلوب می‌رساند. شکل ۱۷ نحوه عملکرد سیستم کنترل زاویه گام (pitch control) را در حالتی نشان می‌دهد که سرعت ژنراتور از W_L بزرگتر و از W_H کوچکتر باشد.

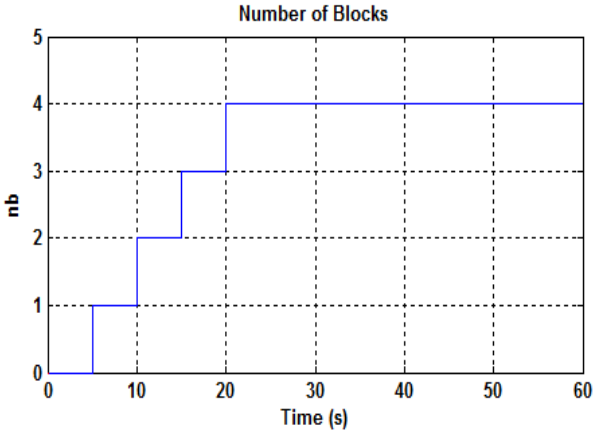


شکل۱۶ زاویه گام پره

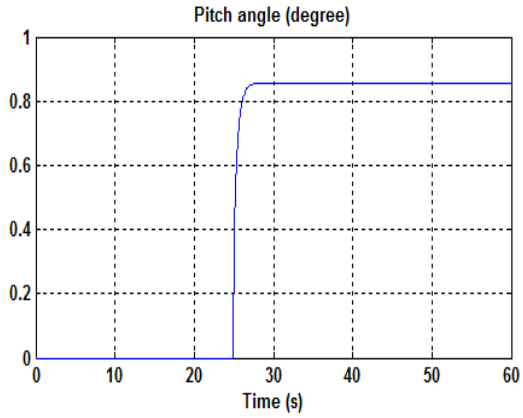


شکل ۱۷ سرعت ژنراتور با Pitch control، سرعت باد 5m/s

همانطور که از نمودار شکل ۱۸ پیداست ابتدا در ۲۰ ثانیه اول ۴بلوک وارد مدار می‌شوند، پس از وارد شدن این۴ بلوک، سرعت ژنراتور از W_L بزرگتر و از W_H کوچکتر می‌شود، پس مطابق شکل ۱۹پیچ کنترل در ثانیه ۲۵ فعال شده و با تغییر زاویه گام پره‌های توربین، سرعت ژنراتور را مطابق شکل ۱۷ در سرعت نامی ثابت نگه می‌دارد.



شکل ۱۸ تعداد بلوک‌ها



شکل۱۹ زاویه گام پره

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه طراحی و شبیه‌سازی یک ژنراتور آهنربای دائم شار محوری بیان شد. بلوک‌ها روتور و استاتور همگی روی یک شفت قرار می‌گیرند، به عبارت دیگر از ۸ بلوک ژنراتور آهنربای دائم شار محوری ساخته شده است که می‌توانند انرژی الکتریکی را با محدودیت‌های سرعت دورانی روتور و تغییرات سرعت باد تولید کنند. همچنین یک سیستم کنترلی برای ژنراتور معرفی شد. این سیستم کنترلی بلوک‌های استاتور را براساس تغییرات سرعت باد، به بار وصل و یا قطع می‌کند، که در نتیجه انرژی الکتریکی با ولتاژ و فرکانس ثابت و توان متغیر در خروجی بوجود می‌آورد. همچنین در این طرح از سیستم کنترل زاویه گام نیز استفاده شده است.

این سیستم می‌تواند با تغییر تعداد بلوک‌های استاتور متصل به بار، در هردو سرعت بالا و پایین باد، بیشترین بازده ممکن را داشته باشد.

مراجع

1. S.H. Chung and H.K. Chan "A two-level genetic algorithm to determine production frequencies for economic lot scheduling problem," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 1, pp. 611-619, Jan. 2012.
2. O. P. Mahela, and A. G. Shaik, "Comprehensive overview of grid interfaced wind energy generation systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 57, pp. 260-281, 2016.
3. S. S. Baptista, A. Kothandaraman, and S. Vijay, "Axial Flux Permanent Magnet Generator," Artificial Intelligent Systems and Machine Learning, vol .2 ,no. 12, 2010.
4. W-M. Lin, and C-M. Hong, "Intelligent approach to maximum power point tracking control strategy for variable-speed wind turbine generation system". Energy 2010, Vol.35(6), pp. 2440–7, 2010.
5. M. Narayana, G. Putrus, M. Jovanovic, P. S. Leung ,and S. McDonald, "Generic maximum power point tracking controller for small-scale wind turbines," Renewable Energy, vol. 44, pp. 72-79, 2012.
6. A. Urtasun, P. Sanchis, I. San Martín, J. López, and L. Marroyo, "Modeling of small wind turbines based on PMSG with diode bridge for sensorless maximum power tracking," Renewable energy, vol. 55, pp. 138-149, 2013.
7. N. Taran, and M. Ardebili, "Efficiency optimization of an Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator for low speed wind power applications, " 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 539-544, 2014.
8. F. Merahi, and EM. Berkouk, "Back-to-back five-level converters for wind energy conversion system with dc-bus imbalance minimization". Renew Energy 2013, Vol.60, pp.137–49, 2013.
9. V. Behjat, and M. Hamrahi, "Dynamic modeling and performance evaluation of axial flux PMSG based wind turbine system with MPPT control," Ain Shams Engineering Journal, vol. 5, no. 4, pp. 1157-1166, 2014.
10. Y. Xia, K. H. Ahmed, and B. W. Williams, "A new maximum power point tracking technique for permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion system," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 12, pp. 3609-3620, 2011.
11. O. Kalender, Y. Ege, Ö .Eskidere, I. Karen, O. Gürdal, C. Ünal, E. Yürüklü, S. Nazlıbilek, H. Çıtak, and M. Çoramık, "A new axial flux permanent magnet synchronous alternator autonomously adapted to wind speeds," Measurement, vol. 69, pp. 87-94, 2015.
12. S. Theodoropoulos, D. Kandris, M. Samarakou, and G. Koulouras, "Fuzzy regulator design for wind turbine yaw control," The Scientific World Journal, vol. 2014, 2014.
13. T. Thomas, E. Cheriyan, "Wind energy system for a laboratory scale micro-grid," IEEE students conference on electrical, electronics and computer science (SCEECS), pp.1–5, 2012.

14. D. Ahmed, and A. Ahmad, “An optimal design of coreless direct-drive axial flux permanent magnet generator for wind turbine, ” IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series, vol.439, p. 012039, 2013.

هوالصانع

دانشگاه صنعتی اراک

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

گواهی ارائه مقاله

بدینوسیله گواهی میگردد که مقاله با عنوان

مدلسازی و طراحی یک واحد کنترلی برای ژنراتور شار محوری آهنربای دایم تطبیق شونده با سرعت باد

به نویسندگی علی جباری، سمیه پیرزاد، علی اصغر قدیمی، امیرحسین ابوالمعصومی

در چهاردهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران (ICME2017) که در تاریخ ۲ تا ۴ آبان ماه ۱۳۹۶ به میزبانی

دانشگاه صنعتی اراک برگزار گردید پذیرفته و ارائه شده است.

دکتر حامد دیلمی عضدی — دبیر علمی کنفرانس

دکتر حمیدرضا رضایی آشتیانی — دبیر کنفرانس

ISC

کد اختصاصی: ۹۶۱۷۰-۵۰۳۰۲