

طراحی و کنترل توربین بادی سرعت متغیر مجهز به ژنراتور القایی

امین خزاعی^۱، رضا افشاری پور^۲، فرشید کی نیا^۳ و علیمراد خواجه زاده^۴

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات کرمان

۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات کرمان

۳- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات کرمان

۴- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات کرمان

Email: Amin_khazai@yahoo.com

چکیده:

توربین های بادی می توانند به عنوان محرک اولیه ژنراتورهای سنکرون و آسنکرون به کار روند. مدلسازی صحیح توربین، برای شبیه سازی و بررسی حالت گذرا و پایداری نیروگاه بادی امری ضروری است. در این مقاله، توربین بادی سرعت متغیر همراه با ژنراتور القایی روتور قفس سنجابی که از طریق مبدل های الکترونیک قدرت به شبکه بی نهایت متصل است، طراحی می شود و سپس یک کنترل کننده جامع مولد سیگنال مرجع به ازای سرعت های مختلف باد ارائه خواهد شد. اهداف کنترل کننده عبارتند از: کنترل ولتاژ پایانه خروجی ژنراتور، افزایش راندمان ژنراتور و افزایش توان استخراج شده از انرژی باد. شبیه سازی ها نشان می دهد که در سرعت های مختلف باد، کنترل کننده طراحی شده اهداف طراحی را به خوبی برآورده می سازد.

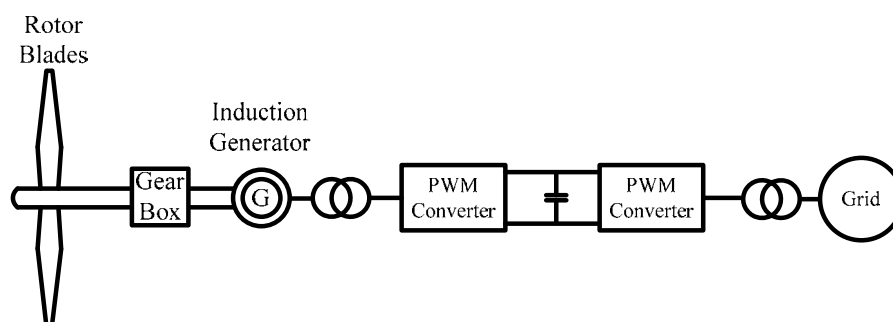
واژه های کلیدی: انرژی باد، توربین بادی سرعت متغیر، ژنراتور القایی، کنترل ولتاژ، کنترل سرعت روتور

۱- مقدمه

نیروگاه‌های بادی با ایجاد کمترین میزان تولید آلودگی با شاخص‌های اقتصادی موجه از جمله با اهمیت‌ترین نیروگاه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر است. نیروگاه‌های بادی از لحاظ هزینه نیز با دیگر انواع نیروگاه‌ها قابل رقابت هستند. در این نیروگاه‌های از انواع ژنراتورها برای تولید توان الکتریکی استفاده می‌شود. در میان ژنراتورهای مورد استفاده در نیروگاه بادی، استفاده از ژنراتور القایی به دلیل سادگی، مقاوم بودن، هزینه پایین آن نسبت به دیگر ژنراتورها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. اما اتصال مستقیم یک توربین بادی با ژنراتور القایی به خط انتقال بدون هیچ سیستم کنترلی می‌تواند دردسر آفرین باشد و منجر به عملکرد غیر بهینه توربین و ناپایداری سیستم گردد. مشکلات چنین اتصالی عبارتند از [۱]، [۲]:

- راندمان ماشین القایی به سرعت و شار روتور بستگی دارد. از آنجا که شار به ولتاژ و فرکانس شین بستگی دارد، در حالت معمولی، در یک سیستم مولد توربین بادی ساده، ماکزیمم راندمان در ژنراتور القایی بدست نمی‌آید.
- در یک سرعت معین باد، یک توربین بادی فقط زمانی می‌تواند ماکزیمم انرژی ممکن را تولید کند که روتور آن با یک سرعت به خصوص بچرخد. از آنجا که در یک سیستم ساده تولید انرژی از طریق باد، سرعت گردش روتور با توجه به فرکانس سیستم دیکته می‌شود، در حالت عادی ماکزیمم توان باد استحصال نمی‌شود.
- از دید پایداری ولتاژ، این ماشین‌ها مشابه موتور القایی، مصرف کننده توان راکتیو می‌باشند و تاثیر منفی روی پایداری ولتاژ کوتاه مدت سیستم دارند. همچنین این نوع توربین‌های بادی در برابر اتصال کوتاه بسیار آسیب پذیر می‌باشند. طی یک خطای اتصال کوتاه، ژنراتور القایی به خاطر افت ولتاژ مغناطیس زدایی می‌شود و سرعت روتور نیز به دلیل کاهش توان تحویلی به شبکه افزایش می‌یابد. بعد رفع خطا ماشین مقدار زیادی توان راکتیو برای مغناطیس کردن دوباره خود مصرف می‌کند. این مقدار زیاد توان راکتیو مورد نیاز ممکن است باعث فروپاشی ولتاژ شود. افزایش توان توربین در دوره خطا به خاطر افزایش سرعت محور توربین، نیز اوضاع را بدتر می‌کند.

در این مقاله برای کنترل سیستم مولد توربین بادی از مبدل‌های پشت به پشت با لینک DC مشترک برای اتصال نیروگاه بادی به شبکه به صورت شکل (۱) استفاده شده است. در این ساختار وظیفه مبدل سمت مولد توربین بادی کنترل ولتاژ و فرکانس مولد به منظور دستیابی به حداکثر راندمان و دریافت حداکثر توان از توربین بادی است و وظیفه مبدل سمت شبکه تزریق توان دریافتی از نیروگاه بادی به شبکه و بهبود ولتاژ شبکه می‌باشد.



شکل(۱): اتصال توربین بادی ژنراتور القایی به شبکه

۲- مدل سیستم

۲-۱- مدل توربین بادی

توان دریافتی از باد توسط پره های توربین بادی به صورت زیر بدست می آید.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (1)$$

با توجه به معادله (۱) توان خروجی توربین از طریق مساحت موثر تیغه های روتور (A)، سرعت باد (v) و ضریب عملکرد (C_p) تعیین می گردد. بنابراین، نیروی خروجی توربین را می توان از طریق تغییر مساحت موثر و یا تغییر ضریب عملکرد در توربین بادی، متغیر ساخت. معمولا ضریب عملکرد را به صورت تابعی از نسبت سرعت نوک پره رتور و زاویه پره توربین بادی به صورت رابطه (۲) بیان می کنند.

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2)$$

که در این رابطه β زاویه پره و λ سرعت نوک پره رتور به سرعت باد ورودی به پره می باشد که به صورت معادله (۳) است.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (3)$$

R: شعاع پره توربین (m)

ω : سرعت چرخش توربین (rad/sec)

مقدار λ با نقطه عملکرد توربین بادی برای استخراج حداکثر توان از باد در ارتباط می باشد و حداکثر ضریب عملکرد (C_p) نیز در یک λ خاص بدست می آید. در توربین های سرعت متغیر سرعت روتور با تغییر سرعت باد، تغییر خواهد کرد تا λ را در یک سطح بهینه حفظ نماید. که این امر باعث افزایش توان تولیدی در توربین های سرعت متغیر نسبت به توربین های سرعت ثابت شده است [۳].

۲-۲- مدل ژنراتور القایی قفسه سنجابی

مدل پریونیت ژنراتور القایی با در نظر گرفتن تلفات هسته در دستگاه d-q سنکرون به صورت زیر بدست می آید [۴]:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \omega_e \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt}$$

$$0 = R_r i_{dr} + \omega_s \lambda_{qr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt}$$

$$0 = R_r i_{qr} + \omega_s \lambda_{dr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt}$$

$$0 = R_{fe} i_{dfe} - \omega_e \lambda_{qs} - \frac{d\lambda_{dm}}{dt}$$

$$0 = R_{fe} i_{qfe} - \omega_e \lambda_{ds} - \frac{d\lambda_{qm}}{dt}$$

(۴)

معادلات شارهای پیوندی نیز به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + \lambda_{dm}$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + \lambda_{qm}$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr} i_{dr} + \lambda_{dm}$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr} i_{qr} + \lambda_{qm}$$

$$\lambda_{dm} = L_m i_{dm}$$

$$\lambda_{qm} = L_m i_{qm}$$

$$i_{ds} = i_{dfe} + i_{dm} - i_{dr}$$

$$i_{qs} = i_{qfe} + i_{qm} - i_{qr}$$

(۵)

در معادلات فوق V معرف ولتاژ، R مقاومت، i جریان، ω_e و $\omega_s = \omega_e - \omega_r$ به ترتیب سرعت زاویه‌ای استاتور و لغزش می‌باشند، ω_r سرعت زاویه‌ای رتور است. L_m اندوکتانس متقابل، L_{ls} و L_{lr} به ترتیب اندوکتانس‌های نشتی استاتور و رتور می‌باشد، زیرنویس s ، r و fe به ترتیب بیانگر کمیت‌های استاتور، رتور و تلفات هسته می‌باشند. توان اکتیو و راکتیو الکتریکی تولیدی ژنراتور به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \quad , \quad Q_s = V_{ds} i_{qs} - V_{qs} i_{ds}$$

(۶)

۳- محاسبه سرعت و شار بهینه توربین بادی ژنراتور القایی

توان دریافتی از باد به سرعت چرخش پره بستگی دارد. حداکثر توان دریافتی از باد در $\beta=0$ و C_p ماکسیمم حاصل می‌شود. بنابراین به منظور دریافت حداکثر توان از باد، λ_{opt} با مشتق گیری از رابطه C_p و در $\beta=0$ به صورت زیر محاسبه می‌شود. در نتیجه سرعت زاویه‌ای بهینه به صورت رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$\frac{dC_p}{d\lambda}=0 \rightarrow \lambda_{opt}=8.08 \quad (7)$$

$$\omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt} V_W}{R} \quad (8)$$

گرچه عملکرد توربین بادی ژنراتور القایی در سرعت ω_{opt} باعث افزایش توان خورجی ژنراتور القایی می‌شود ولی با کاهش تلفات ژنراتور القایی عملکرد بهینه ماشین می‌تواند بهبود یابد. تلفات ماشین القایی ناشی از تلفات سیم پیچی و تلفات هسته است. تلفات سیم پیچی رابطه مستقیم با مجذور جریان دارند و تلفات هسته وابسته به فرکانس و شار ماشین هستند. بنابراین با تعیین سرعت بهینه می‌توان شار ماشین را به منظور مینیمم کردن تلفات بدست آورد. به منظور محاسبه شار بهینه در ابتدا تلفات ماشین با توجه به تفاضل توان ورودی و خروجی و با استفاده از روش میدان گردان محاسبه می‌شود در این روش وقتی ماشین با ورودی سینوسی تحریک می‌شود، قاب شار روتور با سرعت سنکرون ولی با زاویه متفاوت از شار استاتور می‌گردد. لذا اگر محور d منطبق با شار روتور در نظر گرفته شود، مولفه q شار روتور صفر می‌شود. در نتیجه تلفات ماشین در این حالت به صورت زیر بدست می‌آید [۵].

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} = \omega_r T_e - (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \quad (9)$$

$$P_{loss} = \frac{R_s + R_m}{M^2 + \left(\frac{R_m}{\omega}\right)^2} \lambda_{dr}^2 + \left(\frac{2 \frac{R_m}{\omega} R_s}{M^2 + \left(\frac{R_m}{\omega}\right)^2} \right) \frac{T_e}{P} + \left(\left(\frac{R_s \left(L_r^2 + \left(\frac{R_m}{\omega}\right)^2 \right) + L_r^2 R_m}{M^2 + \left(\frac{R_m}{\omega}\right)^2} + R_r \right) \frac{T_e^2}{P^2} \lambda_{dr}^{-2} \right) \quad (10)$$

با مشتق گرفتن از توان تلفاتی در ژنراتور نسبت به شار رتور و مساوی صفر قرار دادن رابطه، شار بهینه بدست می‌آید [۶].

$$\frac{dP_{loss}}{d\lambda_{dr}} = 2 \frac{R_s + R_m}{M^2 + a^2} \lambda_{dr} - 2 \left(\frac{R_s (L_r^2 + a^2) + L_r^2 R_m}{M^2 + a^2} + R_r \right) T_e^2 \lambda_{dr}^{-3} = 0 \quad (11)$$

$$\lambda_{dr}^{opt} = \sqrt{\sqrt{\frac{R_s (L_r^2 + a^2) + L_r^2 R_m + R_r (M^2 + a^2)}{R_s + R_m}}} \sqrt{\frac{T_e}{P}}$$

۴- استراتژی کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت

۴-۱- استراتژی کنترل مبدل الکترونیک قدرت سمت ژنراتور القایی

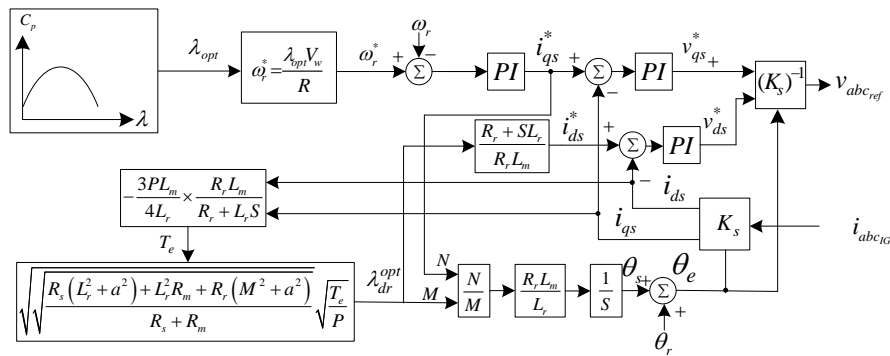
سیستم بلوک دیاگرام سیستم کنترل مبدل سمت ژنراتور در شکل (۲) نشان داده شده است. به منظور طراحی سیستم کنترل مبدل سمت ژنراتور از روش کنترل میدان گردان استفاده شده است. بنابراین با صفر قرار دادن λ_{qr} در معادلات ژنراتور القایی و با صرف نظر کردن از تلفات هسته i_{ds} برحسب شار روتور و فرکانس زاویه‌ای لغزش نیز برحسب i_{qs} بدست می‌آید. همچنین گشتاور الکترومغناطیسی در این روش به صورت رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود [۷]، [۸].

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_{sl} \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \rightarrow \frac{d}{dt} \lambda_{dr} = -R_r i_{dr} \\ \lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \rightarrow i_{ds} = \frac{R_r + \frac{d}{dt} L_r}{R_r L_m} \lambda_{dr} \end{cases} \quad (۱۳)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_{sl} \lambda_{dr} + P \lambda_{qr} = 0 \rightarrow \omega_{sl} = \frac{R_r L_m}{L_r \lambda_{dr}} i_{qs} \quad (۱۴)$$

$$T_e = \left(\frac{3P}{4} \right) (\lambda_{qr} i_{dr} + \lambda_{dr} i_{qr}) = -\frac{3PL_m}{4L_r} i_{qs} \lambda_{dr} \quad (۱۵)$$

با توجه به روابطه بالا فرکانس زاویه‌ای لغزش برحسب جریان محور q استاتور و شار رتور محاسبه می‌شود و با انتگرال‌گیری از آن، زاویه لغزش تعیین خواهد شد. جریان مرجع i_{ds}^* نیز با توجه به شار بهینه و براساس روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود. به منظور محاسبه i_{qs}^* در ابتدا λ_{opt} با توجه به منحنی C_p و با استفاده از رابطه (۷) بدست می‌آید. در نتیجه سرعت زاویه‌ای بهینه توسط رابطه (۸) تعیین می‌شود. سپس خطای ناشی از سرعت زاویه‌ای مرجع و سرعت زاویه‌ای رتور به کنترل کننده PI داده شده و خروجی کنترل کننده، تعیین کننده i_{qs}^* است. سپس خطای ناشی از جریان‌های مرجع و جریان‌های اندازه‌گیری شده به کنترل کننده PI داده می‌شود و خروجی کنترل کننده، تعیین کننده ولتاژ مرجع ژنراتور القایی است.



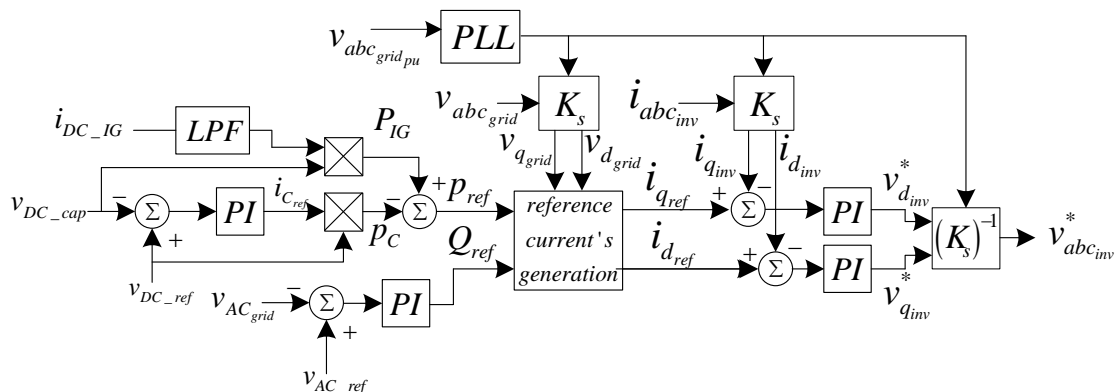
شکل (۲): سیستم کنترل مبدل سمت ژنراتور

۲-۴- استراتژی کنترل مبدل الکترونیک قدرت سمت شبکه

سیستم کنترل مبدل سمت شبکه در شکل (۳) نشان داده شده است. توان اکتیو تزریقی توسط مبدل سمت شبکه براساس توان DC جذب شده توسط مبدل سمت ژنراتور و توان اکتیو مرجع بدست آمده از کنترل کننده PI با توجه به اختلاف ولتاژ مرجع و ولتاژ اندازه گیری شده لینک DC تعیین می‌شود. برای تعیین توان راکتیو تزریقی مبدل سمت شبکه ابتدا خطای ناشی از ولتاژ مرجع و ولتاژ اندازه گیری محاسبه می‌شود و به کنترل کننده PI داده می‌شود و خروجی کنترل کننده تعیین کننده توان راکتیو است. در نهایت توان اکتیو و راکتیو مرجع با توجه به رابطه (۱۶) و (۱۷) جریان‌های (i_q^*, i_d^*) را تعیین می‌کنند. در نهایت خطای جریان مرجع مبدل سمت شبکه و جریان خروجی مبدل به کنترل کننده PI رفته و خروجی آن ولتاژ مرجع مبدل را تعیین می‌کند [۹].

$$i_q = \frac{P v_q + Q v_d}{v_q^2 + v_d^2} \quad (16)$$

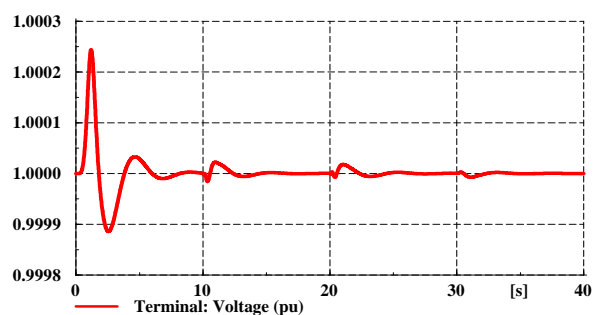
$$i_d = \frac{P v_d + Q v_q}{v_q^2 + v_d^2} \quad (17)$$



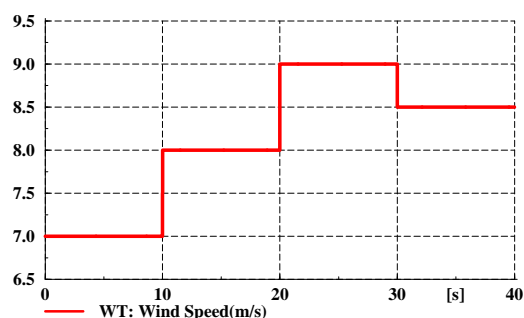
شکل (۳): سیستم کنترل مبدل سمت شبکه

۵- شبیه سازی

در قست قبل سیستم کنترل مبدل های الکترونیک قدرت ارائه شد. در این قسمت به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل ارائه شده، طراحی و مدل سازی در نرم افزار Digsilent صورت گرفته است و مطابق شکل (۱) نیروگاه بادی توسط مبدل های الکترونیک قدرت به شبکه متصل شده است. در شکل (۴) ولتاژ شبکه نشان داده شده است. به منظور بررسی عملکرد کنترل کننده ها تغییرات باد به صورت پله در نظر گرفته شده است و مطابق با شکل (۵) می باشد.

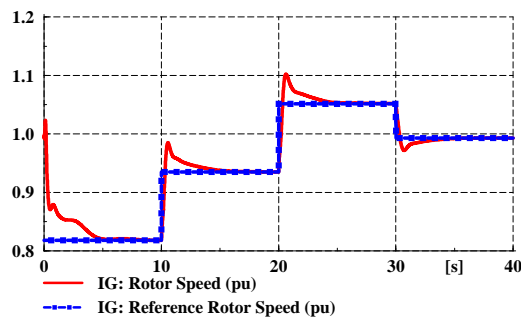


شکل (۴): ولتاژ شبکه



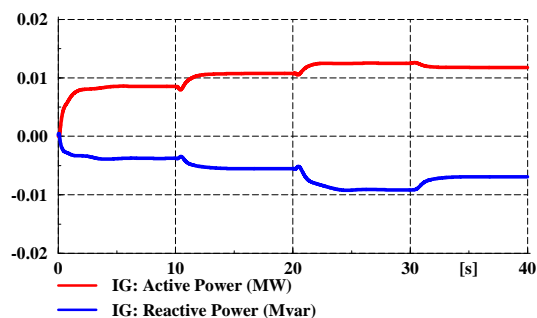
شکل (۵): تغییرات باد

همان طور که ذکر شده با تغییر باد سیستم کنترل مبدل سمت ژنراتور، سرعت ژنراتور را در مقدار بهینه مطابق شکل (۶) قرار می دهد.



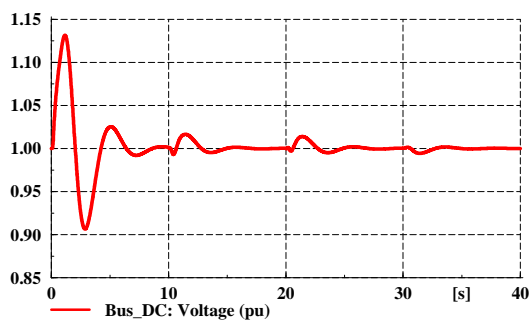
شکل (۶): تغییرات سرعت روتور

در نتیجه تغییرات باد توان خروجی از ژنراتور نیز تغییر می‌کند و با توجه به عملکرد توربین بادی ژنراتور القایی در سرعت بهینه در تمامی زمان‌های حداکثر توان از باد دریافت می‌شود. در شکل (۷) توان دریافتی از ژنراتور القایی نشان داده شده است.

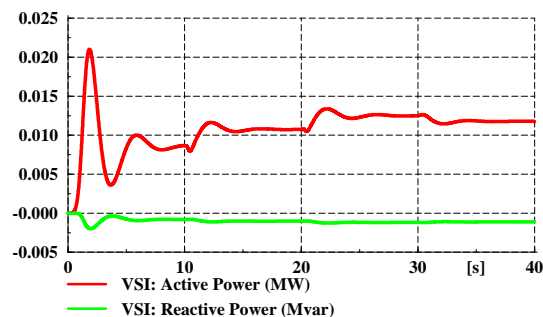


شکل (۷): توان خروجی از ژنراتور القایی

با جذب توان توسط مبدل سمت ژنراتور ولتاژ لینک DC به صورت شکل (۸) تغییر می‌کند. همان‌طور که ذکر شد وظیفه تثبیت توان لینک DC به عهده مبدل سمت شبکه می‌باشد در نتیجه مبدل سمت شبکه با تزریق توان اکتیو جذب شده ولتاژ لینک DC را کنترل می‌کند. در شکل (۹) توان تزریقی توسط مبدل سمت شبکه نشان داده شده است.



شکل (۸): ولتاژ لینک DC



شکل (۹): توان تزریقی توسط مبدل سمت شبکه

۶- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا مدل مناسبی برای قسمتهای مختلف توربین بادی سرعت متغیر ارائه شد و سپس کنترل کننده مولد سیگنال مرجع برای سیستم مولد توربین بادی طراحی شد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد، سیستم کنترلی ارائه شده علاوه بر افزایش راندمان در نیروگاه بادی دارای سرعت بالای در برابر تغییرات باد می‌باشد و باعث دریافت حداکثر توان از باد توسط توربین بادی شده است.

منابع

- [1] R. Jayashri, R.P. Kumudini Devi, "Effect of tuned unified power flow controller to mitigate the rotor speed instability of fixed-speed wind turbines", *Renewable Energy* 34 (2009) 591–596
- [2] K.S. Salman, A.L.J. Teo, "Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator," *IEEE Trans. Power Syst.* 18 (2003) 793–802.
- [3] J.G. Sloopweg, "Wind power: modeling and impact on power system dynamics", PhD dissertation, Dept. Elect. Eng., Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2003.
- [4] M. Kalantar, S.M. Mousavi, "Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage", *Applied Energy* 87 (2010) 3051–3064.
- [5] A.H.M.A. Rahim, M. Ahsanul Alam, M.F. Kandlawala, "Dynamic performance improvement of an isolated wind turbine induction generator", *Computers and Electrical Engineering* 35 (2009) 594–607.
- [6] Tomonobu Senjyu, Yasutaka Ochi, "Sensor-less maximum power point tracking control for wind generation system with squirrel cage induction generator", *Renewable Energy* 34 (2009) 994–999
- [7] Hao Chen, Dionysios C, "Analysis of Squirrel-Cage Induction Generator With Vienna Rectifier for Wind Energy Conversion System", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 26, No. 3, September 2011
- [8] Udaya K. Madawala, Tobias Geyer, "Modeling and Analysis of a Novel Variable-Speed Cage Induction Generator", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 2, February 2012
- [9] Greg Asher, Patrick Wheeler, "Control of a Switched Reluctance Generator for Variable-Speed Wind Energy Applications", *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 20, NO. 4, DECEMBER 2005