

ردیابی جذب بیشینه توان در توربین‌های بادی مغناطیس دائم مجهز به مبدل ماتریسی تحت ضریب قدرت واحد

علیرضا ناطقی و حسین کاظمی کارگر

توربین و با کمک منحنی تغییرات توان- سرعت محاسبه می‌شود و دقت این روش به اندازه‌گیری دقیق سرعت توربین و تلفات سیستم وابسته است.

در این راستا، روش جستجوی صعود که بر اساس ایده لغزش و مشاهده (O&P) پیاده‌سازی می‌شود، روشی ساده و کاربردی در کنترل جذب توان می‌باشد که با اعمال یک اغتشاش و بررسی پاسخ، به کنترل سیستم می‌پردازد و برای تعیین ناحیه کاری توربین ابتدا لازم است که به نحوی توربین بادی شتاب گیرد و یا کند شود تا با تحلیل تغییرات توان تولیدی بتوان عملکرد کنترل را تنظیم نمود. این روش ساده و کم‌هزینه‌تر از روش‌های دیگر است و برای پیاده‌سازی آن به اطلاعات سرعت باد، چگالی هوا و پارامترهای توربین نیازی نیست، اما پاسخ آن به تغییرات سرعت باد به خصوص در توربین‌های بادی با اینرسی بالا کند است.

در طی سال‌های اخیر مقالات متعددی پیرامون کاربرد مبدل‌های ماتریسی در کنترل عملکرد توربین‌های بادی ارائه شده است. در این راستا به توربین‌های بادی مغناطیس دائم به علت، افزایش تعداد قطب‌های مولد و حذف گیربکس، کاهش حجم و وزن و افزایش راندمان، توجه بیشتری شده است. در این نوع مولد، میدان تحریک ثابت و قابل کنترل نیست و اغلب با کنترل دامنه، فرکانس و یا فاز ولتاژ ترمینال‌های ماشین می‌توان میزان شارش توان و متناسب با آن گشتاور الکترومغناطیس و سرعت توربین را کنترل نمود.

در [۵] جذب بیشینه توان در یک توربین بادی مغناطیس دائم مجهز به مبدل ماتریسی مستقیم به روش جستجوی صعود پیاده‌سازی شده است بدین صورت که با تغییر فرکانس خروجی مبدل در پله‌های کوچک، تغییرات توان بررسی شده و تغییر سرعت صورت می‌گیرد. در این روش به علت کوچک بودن پله‌های تغییر فرکانس، تغییرات سرعت نیز به تدریج رخ می‌دهد لذا در هنگام تغییرات سریع سرعت باد، ردیابی توان با مشکل مواجه می‌شود.

در [۶] عملکرد یک توربین بادی مجهز به مبدل ماتریسی مستقیم بررسی شده است. در این مقاله با استفاده از روش سیگنال فیدبک توان، سرعت بهینه توربین محاسبه شده و با استفاده از معادلات دینامیک سیستم و پیاده‌سازی راهکار کنترلی V/f سرعت ژنراتور کنترل می‌شود. در این فرایند، فرکانس ترمینال‌های ژنراتور متناسب با سرعت بهینه توربین تغییر کرده و منجر به دوران ژنراتور تحت سرعت بهینه می‌شود. برای پیاده‌سازی این روش به معادلات دینامیک سیستم نیاز است.

در [۷] با استفاده از یک طبقه یک‌سوساز دودوی و کنترل سیکل کاری یک مدار مبدل DC/DC، میزان تزریق توان به باتری، گشتاور مغناطیسی و پیرو آن سرعت ژنراتور کنترل می‌شود. این فرایند با کمک توان خروجی مبدل و نمودار توان- سرعت توربین، پیاده‌سازی شده و به اطلاعات اولیه سیستم نیازی ندارد. در این مقاله جهت حفاظت توربین در برابر افزایش سرعت ژنراتور از حد نامی، از یک مقاومت متغیر کنترل‌شونده استفاده

چکیده: در این مقاله یک روش کنترلی جدید جهت حداکثر توان از توربین بادی مغناطیس دائم مجهز به مبدل ماتریسی ارائه می‌شود. در این روش با محاسبه سرعت بهینه دوران توربین و پیاده‌سازی روش جستجوی صعود، میزان جذب توان از باد در گستره تغییرات سرعت باد کنترل می‌شود. این فرایند بدون نیاز به کنترل دامنه و فرکانس ولتاژ ترمینال‌های ورودی مبدل، تخمین موقعیت روتور و استفاده از روش‌های کنترل برداری پیاده‌سازی می‌شود. در این روش با کنترل دامنه و فاز ولتاژ خروجی مبدل و از طریق راکتانس نشستی ترانسفورماتور، میزان تزریق توان به شبکه، گشتاور مغناطیسی و متناسب با آن سرعت توربین به طور غیر مستقیم کنترل می‌شود، به نحوی که همواره در سرعت‌های مختلف باد، بیشترین توان ممکن از باد، جذب و تحت ضریب قدرت واحد به شبکه تزریق گردد. در این راستا با طراحی مبدل ماتریسی مستقیم، الگوریتم کنترلی پیشنهادشده در محیط برنامه‌ریزی Matlab پیاده‌سازی شده و سپس نتایج حاصل مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند.

کلید واژه: مبدل ماتریسی، کنترل جستجوی صعود، کنترل سرعت سرپره، مولد سنکرون مغناطیس دائم، ردیابی نقطه جذب بیشینه توان.

۱- مقدمه

امروزه به علت کاهش منابع انرژی و آلودگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی، استفاده از انرژی باد به عنوان یک منبع انرژی پاک و ارزان در بسیاری از نقاط جهان مورد توجه قرار گرفته است. میزان انرژی جذب‌شده، شدیداً تحت تأثیر سرعت باد، سرعت دوران توربین و ماهیت دینامیکی پرها قرار دارد، لذا با توجه به هزینه‌های بالای طراحی، ساخت و نصب توربین‌های بادی، کنترل توربین جهت جذب حداکثر توان از باد امری ضروری است.

در این راستا و با توجه به غیر قابل کنترل بودن سرعت باد مطالعات گسترده‌ای بر روی روش‌های کنترل سرعت دوران توربین و زاویه پرها صورت گرفته است که به طور عمده می‌توان آنها را به سه دسته کنترل سرعت سرپره [۱]، فیدبک سیگنال توان [۲] و روش جستجوی صعود [۳] و [۴] تقسیم‌بندی نمود.

در روش کنترل سرعت سرپره با اندازه‌گیری سرعت باد، مقدار سرعت بهینه دوران توربین با کمک نمودار تغییرات توان- سرعت، محاسبه شده و به بلوک کنترل سرعت اعمال می‌گردد. پاسخ این روش کنترلی سریع است اما به ثبت اطلاعات سرعت باد با دقت بالا نیاز دارد.

در روش فیدبک سیگنال توان، مقدار توان بهینه با اندازه‌گیری سرعت

این مقاله در تاریخ ۲۹ بهمن ماه ۱۳۹۱ دریافت و در تاریخ ۲۶ شهریور ماه ۱۳۹۲ بازنگری شد.

علیرضا ناطقی، دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، (email: a_nateghi@sbu.ac.ir).

حسین کاظمی کارگر، استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، (email: h_kazemi@sbu.ac.ir).

۲- تابع تغییرات سرعت باد

در شبیه‌سازی و مطالعه عملکرد توربین‌های بادی بررسی الگوی رفتاری سرعت باد ضروری می‌باشد. در اغلب تحقیقات صورت گرفته تابع تغییرات سرعت باد با اضافه کردن مؤلفه‌های نوسانی به مقدار متوسط آن به صورت (۱) مدل شده است

$$V_w(t) = V_{wm} + \sum_{i=1}^N V_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

در این رابطه V_{wm} سرعت متوسط باد بر حسب متر بر ثانیه، V_i دامنه نوسانات باد با فرکانس گسسته ω_i ، N تعداد فرکانس‌های مورد مطالعه و φ_i بیانگر زاویه تصادفی نوسانات باد با توزیع یکنواخت بین زوایای $[-\pi, \pi]$ است. در (۲) دامنه مؤلفه‌های نوسان باد V_i بر اساس تابع چگالی طیف باد $S(\omega)$ محاسبه شده است [۱۱]

$$V_i(\omega_i) = \frac{2}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{2} S(\omega_i) + S(\omega_{i+1})\right) (\omega_{i+1} - \omega_i)} \quad (2)$$

$$S(\omega_i) = \frac{0.475 \sigma^2 \frac{L}{V}}{\left(1 + \left(\frac{\omega_i L}{V}\right)^2\right)^{\frac{5}{6}}} \quad (3)$$

$$L = \begin{cases} 2.0h & \text{if } h \leq 3.0m \\ 6.0 & \text{if } h > 3.0m \end{cases} \quad (4)$$

که σ^2 شدت اغتشاش، h ارتفاع توربین بر حسب متر و L بیانگر طول اغتشاش می‌باشد. در شکل ۱ تابع شبیه‌سازی شده سرعت باد با سرعت متوسط ۱۰ متر بر ثانیه نمایش داده شده است.

۳- جذب بیشینه توان

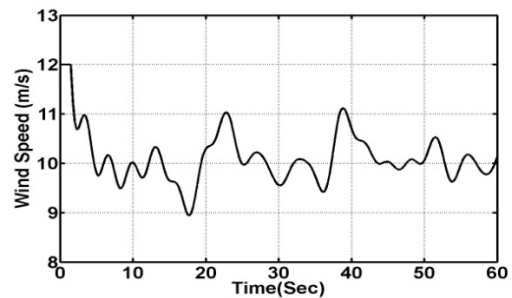
در توربین‌های بادی، انرژی باد توسط پرها به شفت توربین و سپس به ژنراتور انتقال یافته و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. روابط (۵) تا (۷) میزان جذب توان را بیان می‌کنند

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (5)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = \left(0.44 - 0.16\beta\right) \sin \frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} - 0.0184(\lambda - 3)\beta \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (7)$$

در این روابط P توان جذب‌شده بر حسب وات، ρ چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، A سطح جاروشده توسط پره بر حسب متر مربع، V سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، C_p ضریب توان، β بیانگر زاویه انحراف پره بر حسب درجه، λ سرعت سرپره، R شعاع پره بر حسب متر و ω سرعت زاویه چرخش پره بر حسب رادیان بر ثانیه است. همان طور که ملاحظه می‌گردد رابطه توان جذب‌شده به پارامتری به نام C_p وابسته است که مقدار آن نیز به λ و β وابسته می‌باشد. تحت این شرایط تغییرات سرعت باد منجر به تغییر λ و پیرو آن تغییر C_p و توان جذب‌شده می‌شود. لذا برای جذب حداکثر توان می‌بایست از روش‌های کنترلی استفاده کرد. در شکل ۲ نمودار تغییرات C_p بر حسب λ نشان داده شده است.



شکل ۱: نمودار شبیه‌سازی شده سرعت باد.

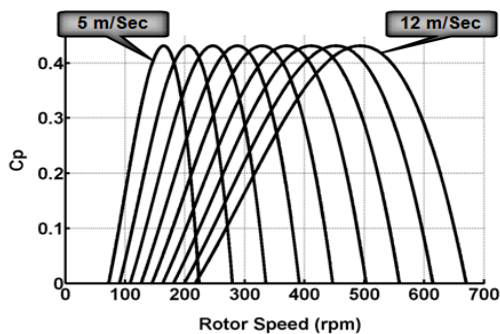
شده است.

در توربین‌های بادی توان بالا که در صنعت استفاده می‌شوند، خروجی توربین توسط یک ترانسفورماتور به شبکه متصل می‌شود. در [۸] جهت حذف ترانسفورماتور و کاهش بار مکانیکی در ناسل (ماشین‌خانه توربین) ایده استفاده از مبدل‌های ماتریسی چندسطحی مطرح شده است. این روش با سری کردن مبدل‌های ماتریسی منجر به افزایش دامنه ولتاژ در سطح ولتاژ شبکه (MV) می‌شود. در مراجع زیادی نحوه استفاده از کنترل برداری بررسی شده که در این مقاله به عنوان نمونه به دو مورد آن اشاره شده است. در این روش با کنترل دامنه، فرکانس و یا فاز ولتاژ ترمینال‌های ماشین، میزان شارش توان و متناسب با آن گشتاور مغناطیسی و سرعت ژنراتور کنترل می‌شود. این فرایند با استفاده از معادلات ماشین در مختصات dq صورت می‌گیرد [۹] و [۱۰]. در پیاده‌سازی این الگوریتم، تعیین دقیق موقعیت روتور، استفاده از معادلات پیچیده ماشین و تعیین پارامترهای آن از فاکتورهای مهم می‌باشد که خطا در تعیین موقعیت روتور و دسترسی نداشتن به تمام پارامترها باعث می‌شود که کنترل گشتاور، سرعت ژنراتور و توان ماشین با خطا روبه‌رو گردد.

در این مقاله عملکرد یک توربین بادی مغناطیس دائم ۲ مگاواتی مجهز به مبدل ماتریسی مستقیم مورد مطالعه قرار گرفته است. ورودی مبدل به توربین بادی و خروجی آن از طریق یک ترانسفورماتور به شبکه توزیع ۲۰ کیلوولتی متصل می‌شود و هدف، ارائه راهکار مناسبی است که بتواند کنترل توربین را بر عهده گیرد، به طوری که بدون نیاز به تعیین موقعیت روتور، معادلات ماشین در مختصات dq و شناخت پارامترهای ماشین بتوان سرعت ژنراتور را ساده و مؤثر کنترل نمود. در این راستا با کنترل اختلاف فاز بین ولتاژ خروجی مبدل و ولتاژ شبکه و از طریق راکتانس نشی ترانسفورماتور، میزان ترزیق توان اکتیو به شبکه و متناسب با آن گشتاور الکترومغناطیس و سرعت توربین به صورت بهینه و ساده‌تر کنترل می‌شود.

در این فرایند ناحیه کاری توربین بدون نیاز به اعمال اغتشاشات و با کمک مقدار محاسبه‌شده سرعت بهینه تعیین شده و با پیاده‌سازی روش جستجوی صعود، ردیابی جذب بیشینه توان صورت می‌گیرد.

ساختار نوشتاری این مقاله به نحوی است که در بخش ۲ الگوی رفتار تغییرات سرعت باد مورد بررسی قرار گرفته و در بخش ۳ با بررسی روابط حاکم بر توان جذب‌شده از باد، وابستگی آن به سرعت باد و سرعت دوران توربین در دستیابی به شرط جذب حداکثر توان از باد مطرح می‌شود. در بخش ۴ برای تحلیل رفتار مولد مغناطیسی، روابط حاکم بر مولد مغناطیسی مطرح می‌گردد و در نهایت در بخش‌های ۵ تا ۷ با بررسی تئوری حاکم بر طرح پیشنهادی، اجزای آن در محیط Matlab شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند.



شکل ۳: منحنی تغییرات ضریب توان.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_m - T_e - F\omega_r) \quad (12)$$

در (۹) تا (۱۲) i_d و i_q مؤلفه‌های جریان استاتور، u_d و u_q مؤلفه‌های ولتاژ ترمینال ماشین، R مقاومت اهمی استاتور، L_d و L_q مؤلفه‌های اندوکتانس استاتور، ψ_{PM} شار میدان تحریک، δ زاویه انتقال مولد، ω_r سرعت زاویه چرخش روتور، J اینرسی سیستم، F ضریب اصطکاک، T_m گشتاور مکانیکی توربین و T_e بیانگر گشتاور مغناطیسی ژنراتور است.

۵- طرح پیشنهادی

در شکل ۴ بلوک دیاگرام سیستم پیشنهادی ارائه شده و همان طور که ملاحظه می‌شود، ژنراتور مغناطیس دائم از طریق مبدل ماتریسی و یک ترانسفورماتور به شبکه متصل می‌شود و با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان سه‌فاز در نقطه اتصال به شبکه، مقدار توان خروجی ژنراتور (Pout)، اندازه ولتاژ $|V_{grid}|$ و فرکانس شبکه (f) به دست می‌آید. در این شکل ورودی مبدل ماتریسی به ترمینال‌های ژنراتور و خروجی آن به شبکه متصل شده است. با توجه به (۲۴) با کنترل زاویه خروجی، می‌توان میزان تزریق توان اکتیو به شبکه و گشتاور مغناطیسی ولتاژ خروجی و همچنین مطابق (۱۲) سرعت توربین را کنترل نمود.

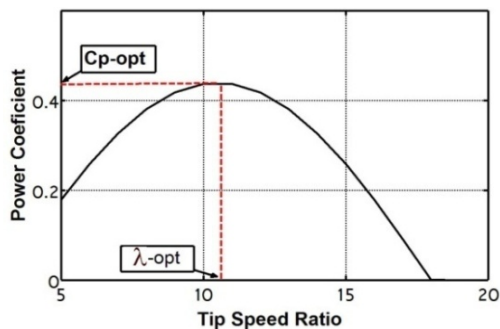
از طرف دیگر اگر اندازه ولتاژ خروجی مبدل ماتریسی با اندازه ولتاژ شبکه برابر شود، در این صورت نشان داده می‌شود که تزریق توان راکتیو به حداقل می‌رسد. برای این منظور نمونه‌گیری ولتاژ شبکه برای کنترل مبدل ماتریسی انجام شده و اثبات این موضوع در بخش ۵-۲ به طور کامل بیان می‌شود.

۵-۱ مدار قدرت مبدل ماتریسی

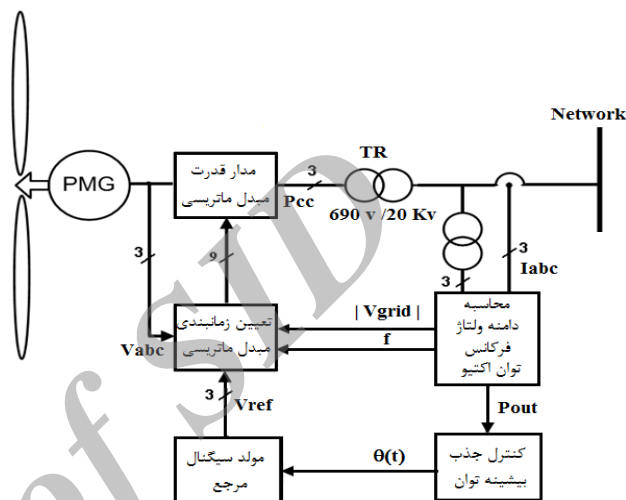
توربین‌های بادی اغلب مجهز به مبدل‌های قدرت پشت به پشت می‌باشند که در آنها ردیابی جذب حداکثر توان از طریق کنترل مستقیم گشتاور و یا شار استاتور، به همراه تعیین سرعت بهینه دوران توربین انجام می‌شود. این نوع مبدل به عنوان مدار واسط بین مولد و شبکه در دو طبقه یک‌سوساز-اینورتر طراحی شده و کلیدزنی هر طبقه به مجزا و بر اساس مدولاسیون پهنای پالس و یا مدولاسیون برداری کنترل می‌گردد.

طبقه یک‌سوساز، گشتاور مغناطیسی و سرعت توربین را تحت کنترل دارد و طبقه اینورتر، دامنه، فاز و فرکانس ولتاژ خروجی مبدل را کنترل می‌کند. در این روش از یک مدار boost برای افزایش ولتاژ لینک DC و دستیابی به حداقل ولتاژ لازم برای انتقال توان استفاده می‌شود. در طراحی این مبدل از یک خازن استفاده می‌شود [۱۳] و [۱۴].

وجود خازن منجر به افزایش حجم و وزن مبدل شده و اثر گرمایی و بخارشدن الکترولیت درون آن، طول عمر مبدل، کارایی و کیفیت توان



شکل ۲: منحنی تغییرات ضریب بهره توان توربین بر حسب سرعت سرپره.



شکل ۴: بلوک دیاگرام کنترل جذب بیشینه توان.

با توجه به این شکل مقدار بهره توان در نقطه بهینه سرعت سرپره از لحاظ تئوری و طبق اصل بتز حداکثر برابر $59/3$ درصد است در حالی که در عمل تغییراتی در رنج ۲۵ تا ۴۵ درصد را دارد. در (۸) ارتباط بین مقدار بهره‌ینه سرعت سرپره بر حسب λ و β بیان شده است [۸]

$$\lambda_{opt} = \frac{15 - 0.3\beta}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{0.184\beta(15 - 0.3\beta)}{\pi(0.44 - 0.167\beta)} + 3 \right) \quad (8)$$

در شکل ۳ نمودار ضریب بهره توان بر حسب سرعت دوران توربین و به ازای سرعت‌های مختلف باد نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با تغییر سرعت باد نیاز است که سرعت توربین نیز تغییر کند تا بتوان به مقدار حداکثر C_p رسید.

۴- مولد مغناطیس دائم

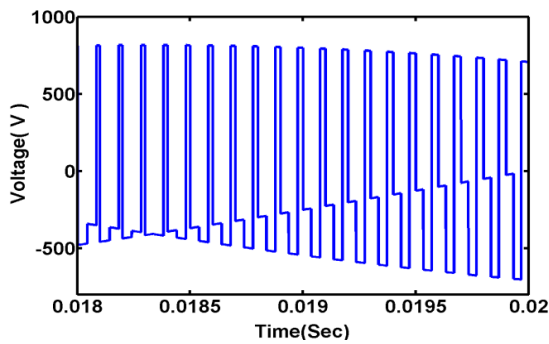
معادلات ولتاژ و گشتاور مولد در دستگاه مرجع روتور به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۲]

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_d & \omega_r L_{sq} \\ \omega_r L_{sd} & R_s + PL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_r \psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

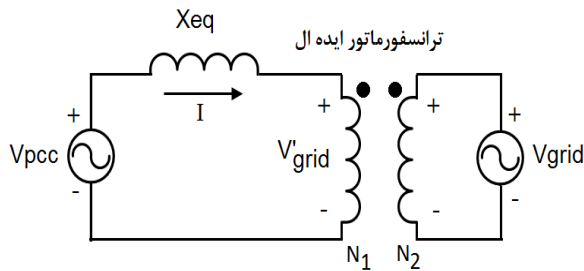
$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = -R_s i_d + \omega_r L_{sq} i_q + u_d \\ L_q \frac{di_q}{dt} = -R_s i_q - \omega_r L_{sd} i_d + u_q - \omega_r \psi_{PM} \end{cases} \quad (10)$$

$$T_e = \frac{3P\psi_{PM}}{4L_d L_q} (\psi_{PM} L_q \sin \delta - \psi_s (L_q - L_d) \sin 2\delta) = \quad (11)$$

$$\frac{3P}{2} (\psi_{PM} L_q - (L_q - L_d) i_q i_d)$$



شکل ۶: ولتاژ خروجی مبدل ماتریسی.



شکل ۷: اتصال مبدل ماتریسی به شبکه.

که T_s دوره تناوب سوئیچ‌زنی مبدل بر حسب ثانیه و t_{ij} بیانگر مدت زمان نمونه‌برداری فاز خروجی j از ولتاژ ورودی فاز i است. در این روش کلیدزنی، تابع $V_{out-j}(t)$ رفتار ولتاژ خروجی مبدل را تعیین می‌کند. لذا با توجه به این نکته، بلوک مولد سیگنال مرجع با استفاده از اطلاعات فرکانس، دامنه ولتاژ شبکه و فاز خروجی بلوک کنترل جذب بیشینه توان، ولتاژی سه‌فاز با دامنه و فرکانس شبکه و با فاز کنترل شده را تولید می‌کند و برای این منظور از روابط زیر استفاده می‌گردد

$$V_A = \sqrt{2} V'_{grid} \cos(2\pi ft + \theta(t)) \quad (14)$$

$$V_B = \sqrt{2} V'_{grid} \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{3} + \theta(t)) \quad (15)$$

$$V_C = \sqrt{2} V'_{grid} \cos(2\pi ft - \frac{2\pi}{3} + \theta(t)) \quad (16)$$

در این روابط V'_{grid} اندازه ولتاژ شبکه در اولیه ترانسفورماتور، f فرکانس شبکه و $\theta(t)$ بیانگر اختلاف فاز ولتاژ محل اتصال توربین در نقطه PCC نسبت به شبکه می‌باشد که به آن زاویه انتقال گفته می‌شود.

۲-۵ کنترل تزریق توان به شبکه تحت ضریب قدرت واحد

برای بیان ایده کنترلی پیشنهاد شده لازم است که ابتدا مبدل ماتریسی، فیلتر خروجی و ترانسفورماتور (TR) به صورت یک مدار ساده به شکل ۷ مدل شوند.

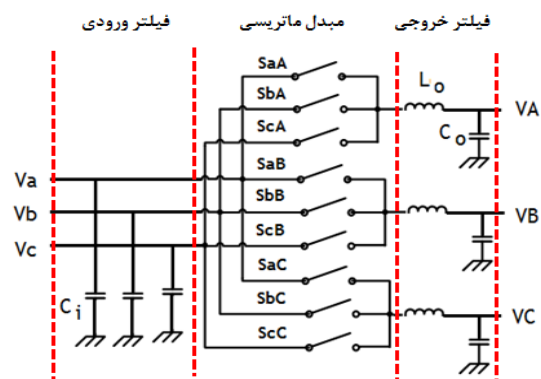
در این مدار توان اکتیو (P) و راکتیو (Q) تزریق شده به شبکه را می‌توان با کمک روابط زیر تعیین کرد

$$\vec{V}_{pcc} = jX_{eq} \vec{I} + \vec{V}'_{grid} \quad (17)$$

$$\vec{S} = \vec{V}'_{grid} \cdot \vec{I}^* \quad (18)$$

$$\vec{S} = V'_{grid} \left(\frac{\vec{V}_{pcc} - \vec{V}'_{grid}}{jX_{eq}} \right)^* \quad (19)$$

تولیدی را کاهش می‌دهد. از طرفی دیگر با توجه به فرار گرفتن مبدل در



شکل ۸: مدار قدرت مبدل ماتریسی.

ناسل (ماشین‌خانه) توربین و مشکل دسترسی به آن لازم است که از طرح‌های کم‌حجم‌تر و سبک‌تر نسبت به مبدل‌های پشت به پشت استفاده کرد که هزینه‌های تعمیر و نگهداری توربین افزایش نیابد. لذا در این مقاله، ایده استفاده از مبدل‌های ماتریسی که نسبت به مبدل‌های پشت به پشت کم‌حجم‌تر و سبک‌تر بوده و به المان ذخیره‌کننده انرژی نیازی ندارد، مد نظر قرار گرفته است.

مبدل‌های ماتریسی با قابلیت کنترل مستقل دامنه، فرکانس و فاز ولتاژ خروجی و ضریب توان ورودی، بدون نیاز به المان ذخیره‌کننده و با حجم و وزن کمتر از مبدل‌های متعارف، در دو شکل یک و دو طبقه طراحی و به کار گرفته می‌شوند. مبدل ماتریسی یک طبقه (مبدل ماتریسی مستقیم) نسبت به مبدل‌های متعارف از ساختار ساده‌تری برخوردار بوده و به تعداد کلید کمتری نیاز دارد [۱۵].

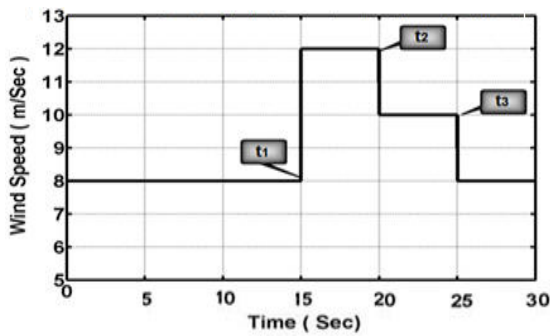
یکی از مشکلات فراروی این مبدل‌ها، احتمال وقوع کموتاسیون بین کلیدها است. در این فرایند، در بازه زمانی خاموش شدن یک کلید و روشن شدن کلیدی دیگر، دو فاز خروجی به یکدیگر متصل شده و منجر به اتصال کوتاه و سوختن کلیدها می‌شود. برای رفع این مشکل در طراحی مبدل از کلیدهای دوطرفه استفاده می‌کنند که می‌توان با کنترل فرایند خاموش و یا روشن شدن هر کلید، در طی چند مرحله مانع از وقوع این پدیده و صدمه دیدن کلیدها شد و این فرایند کنترل مبدل را پیچیده می‌کند [۱۶].

در [۱۷] جهت حفاظت مبدل ماتریسی در برابر اضافه ولتاژ ناشی از قطع آنی جریان بارهای سلفی از یک مدار کلمپ بین ترمینال‌های ورودی و خروجی مبدل استفاده شده است. در این فرایند هم‌زمان با قطع مسیر جریان، مدار کلمپ مسیری را برای تخلیه انرژی سلف ایجاد می‌کند.

در شکل ۵ مدار قدرت مبدل ماتریسی نشان داده شده است. در این تحقیق از این مبدل جهت اتصال توربین به شبکه و کنترل تزریق توان، استفاده می‌شود. این مبدل دارای ۹ کلید است که با نمونه‌برداری از ولتاژ فازهای ورودی، ولتاژی سه‌فاز با دامنه و فرکانس دلخواه را در خروجی تولید می‌کند که نمونه آن در شکل ۶ نشان داده شده است. ولتاژ خروجی مبدل ماتریسی دارای هارمونیک‌های زیادی است که می‌بایست توسط یک فیلتر LC به شبکه متصل شود.

کنترل زمان نمونه‌برداری هر کلید متناسب با مقادیر لحظه‌ای ولتاژ فازهای ورودی $V_{in-i}(t)$ و خروجی $V_{out-j}(t)$ مورد نظر و بر اساس مدل و نتورنی تعیین می‌شود [۱۸]

$$t_{ij} = \frac{1}{3} \left(1 + 2 \frac{V_{in-i}(t) \cdot V_{out-j}(t)}{(V_{in-i})_{Peak}^2} \right) \times T_s \quad (13)$$



شکل ۹: نمودار تغییرات سرعت باد.

از آنجایی که مقدار X_T کوچک‌تر از ۱ pu است، لذا مقدار θ نیز کوچک بوده و می‌توان (۲۱) و (۲۲) را به صورت زیر نوشت

$$P = \frac{V_{PCC} V'_{grid}}{X_{eq}} \theta \quad (24)$$

$$Q = \frac{V_{grid}}{X_{eq}} (V_{PCC} - V'_{grid}) \quad (25)$$

با توجه به (۲۲) در صورتی که با کنترل ولتاژ خروجی مبدل، V'_{grid} برابر V_{PCC} گردد، تزریق توان راکتیو به شبکه صفر می‌شود و در این صورت با کنترل زاویه θ می‌توان میزان تزریق توان اکتیو به شبکه را کنترل نمود.

۵-۳ طرح پیشنهادی کنترل سیستم

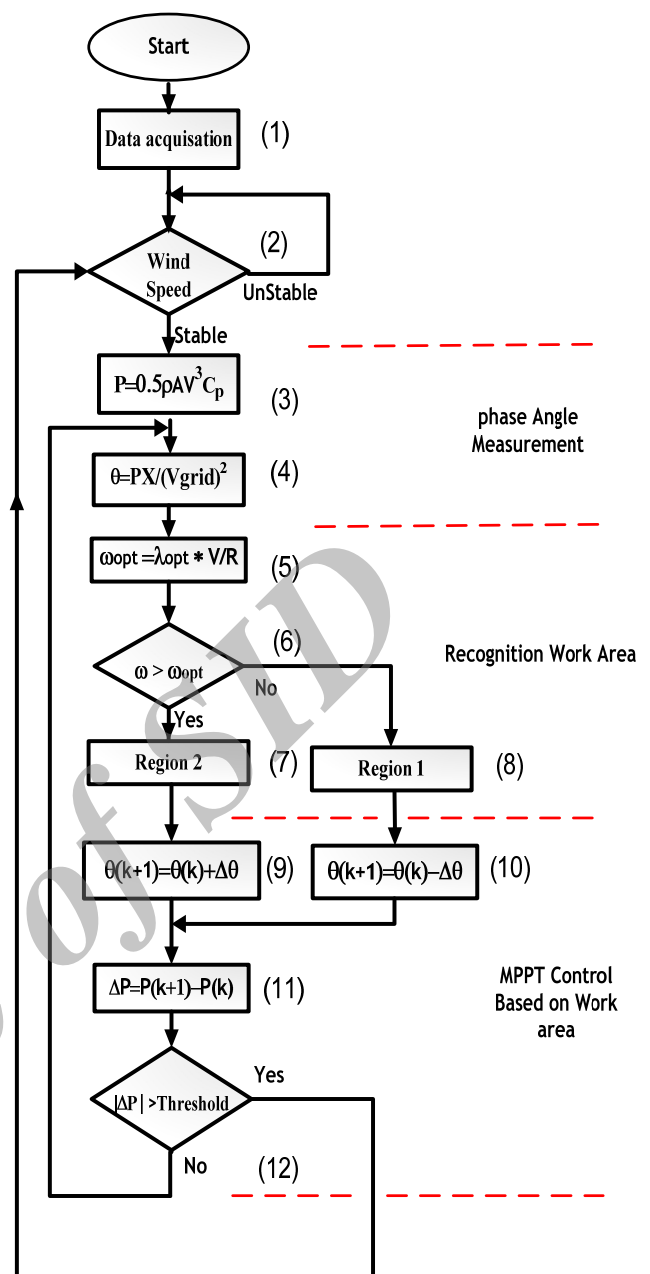
طبق بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۹، عملکرد سیستم طراحی شده به نحوی است که بعد از راه‌اندازی توربین و تثبیت سرعت آن، وارد عمل شده و از آن زمان به بعد، کنترل جذب بیشینه توان را با طی مراحل زیر به عهده می‌گیرد.

ابتدا در بلوک ۱ اطلاعات لحظه‌ای سرعت باد، فرکانس و دامنه ولتاژ شبکه و توان تولیدی ثبت شده و سپس توسط بلوک ۲ برای کاهش اثر نوسانات سریع باد بر عملکرد سیستم کنترلی، در بازه‌های زمانی که سرعت باد پایدار است، ردیابی توان صورت می‌گیرد. در بلوک‌های ۳ و ۴ با محاسبه توان جذب شده، زاویه مورد نیاز برای تزریق توان به شبکه طبق (۲۶) به دست می‌آید

$$\theta = \frac{PX_{eq}}{(V'_{grid})^2} \quad (26)$$

در روش جستجوی صعود، هم‌زمان با تغییر سرعت باد، با تغییر سرعت توربین و بررسی رفتار توان، ناحیه کاری توربین مشخص می‌شود. در این مقاله برای بالابردن سرعت پاسخ‌دهی سیستم به تغییرات سرعت باد، این فرایند (در بلوک‌های ۵ تا ۸) با نمونه‌برداری از سرعت توربین و مقایسه آن با مقدار بهینه تعیین شده است.

در بلوک‌های ۹ تا ۱۲ با کمک ناحیه کاری توربین، سرعت توربین جهت جذب بیشینه توان کنترل می‌شود. در سرعت‌های بالاتر از سرعت بهینه (ناحیه ۲)، کنترلر با افزایش تدریجی زاویه θ ، سرعت توربین را کم کرده و باعث بهبود توان تولیدی می‌شود. این فرایند تا زمانی که ΔP از حد آستانه کمتر شود، تکرار می‌گردد. اما در سرعت‌های کمتر از سرعت بهینه (ناحیه ۱)، برای کنترل سرعت توربین بادی و رسیدن به توان P_{max} ، کنترلر با کاهش زاویه θ ، شرایط شتاب‌گیری سیستم را فراهم نموده و هم‌زمان با افزایش سرعت توربین و قابلیت جذب توان بیشتر از باد، زاویه θ و سرعت سیستم تا زمان رسیدن به نقطه بهینه کنترل می‌شود.



شکل ۸: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی. (شکل ۸ ارجاع ندارد)

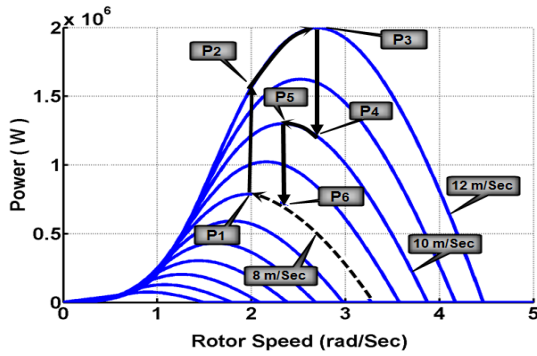
$$\bar{S} = \frac{V_{pcc} V'_{grid}}{X_{eq}} e^{j(\alpha - \theta)} - j \frac{(V'_{grid})^2}{X_{eq}} \quad (20)$$

$$P = \text{Re}(\bar{S}) = \frac{V_{PCC} V'_{grid}}{X_{eq}} \sin(\theta) \quad (21)$$

$$Q = \text{Im}(\bar{S}) = \frac{V'_{grid}}{X_{eq}} (V_{PCC} \cos(\theta) - V'_{grid}) \quad (22)$$

در این روابط V_{PCC} اندازه ولتاژ محل اتصال مبدل به ترانسفورماتور، X_{eq} امپدانس معادل ترانسفورماتور و θ بیانگر اختلاف فاز ولتاژ محل اتصال توربین در نقطه PCC نسبت به شبکه می‌باشد که به آن زاویه انتقال گفته می‌شود. در شرایط کارکرد توربین بادی هدف این است که حداکثر توان یعنی $P = 1 \text{ pu}$ تحت شرایط $V_{PCC} = V_{grid} = 1 \text{ pu}$ به شبکه منتقل گردد. در این صورت می‌توان (۲۱) را به صورت زیر نوشت

$$\theta = \sin^{-1}(X_{eq}) \quad (23)$$



شکل ۱۱: نمودار تغییرات زاویه ولتاژ خروجی مبدل ماتریسی.

$$\Delta\theta(k) = K \frac{\Delta P}{\Delta\omega} \quad (27)$$

که در آن $K > 0$ برای ناحیه ۱ و $K < 0$ برای ناحیه ۲ است.

۶- نتایج شبیه‌سازی

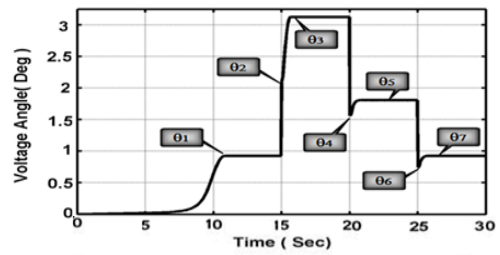
در این بخش برای بررسی صحت عملکرد روش پیشنهادی، اجزای آن در نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی شده و برای تحلیل رفتار سیستم، تجزیه و تحلیل نتایج متناسب با تغییر سرعت باد و سرعت دوران توربین در چند مرحله مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۹ منحنی تغییرات سرعت باد نشان داده شده است به طوری که در لحظه t_1 سرعت باد از ۸ به ۱۲ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد و در لحظات t_2 و t_3 در طی دو مرحله از ۱۲ به ۱۰ و سپس از ۱۰ به ۸ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل ۱۰-الف بعد از راه‌اندازی توربین، کنترلر پیشنهادی وارد عمل شده و با افزایش تدریجی زاویه انتقال از صفر به θ_1 سرعت توربین را با توجه به شکل ۱۰-ب در مقدار بهینه خود، تثبیت می‌کند. لذا همان‌طور که در شکل‌های ۱۰-ج و ۱۰-د نشان داده شده است، تحت این شرایط ضریب توان بهبود یافته و توانی برابر P_1 از باد جذب و به شبکه تزریق می‌شود.

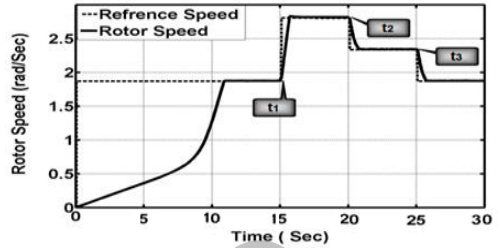
در لحظه t_1 و هم‌زمان با افزایش سرعت باد، سیستم کنترلی متناسب با (۲۶) زاویه لازم برای انتقال توان جذب‌شده به شبکه را محاسبه کرده و به سیستم اعمال می‌کند. حال اگر کسری از انرژی باد در اینرسی سیستم ذخیره شده و مابقی به شبکه تزریق گردد، هم‌زمان با انتقال توان به شبکه، سرعت توربین نیز افزایش می‌یابد. اثر این فرایند در شکل ۱۰-ب و ۱۰-ج با افزایش سرعت و توان جذب‌شده نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰-د، تغییر توان با تأخیری برابر t_d صورت گرفته که مقدار آن به مقدار H (ثابت اینرسی توربین بادی) بستگی دارد که در جدول ۱ آورده شده است. کاهش سرعت باد در لحظات t_2 و t_3 قابلیت تولید توان را در توربین کاهش می‌دهد، لذا با توجه به شکل ۱۰-الف و ۱۰-د، در این لحظات کنترلر با کاهش سریع فاز و کاهش درخواست توان برای تزریق به شبکه، سیستم را پایدار و سرعت توربین را ثابت نگه می‌دارد و سپس با افزایش تدریجی زاویه انتقال و جذب بیشتر توان، سرعت توربین را کم و میزان جذب توان را بهبود می‌بخشد.

در شکل ۱۱ عملکرد سیستم کنترلی در ردیابی نقاط بهینه جذب توان به ازای تغییرات سرعت باد و متناسب با ناحیه کاری توربین، نمایش داده شده است.

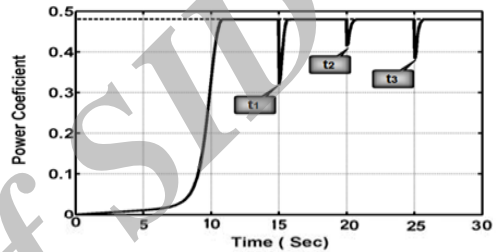
یکی دیگر از اهداف روش پیشنهادی علاوه بر افزایش جذب توان از توربین بادی، کاهش مقدار توان راکتیو تزریقی به شبکه بود. در شکل ۱۰-و تغییرات توان راکتیو تزریقی به شبکه نشان داده شده است.



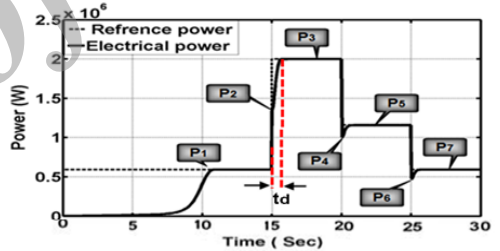
(الف)



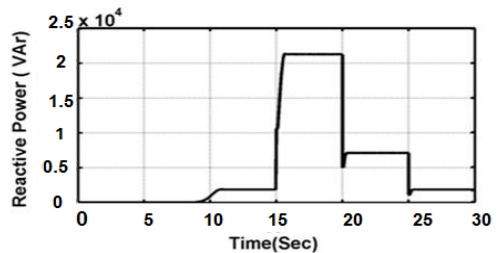
(ب)



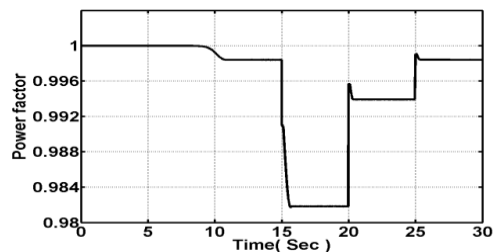
(ج)



(د)



(ه)

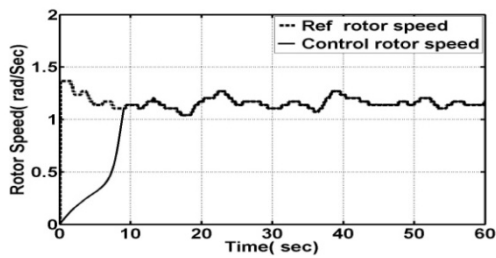


(و)

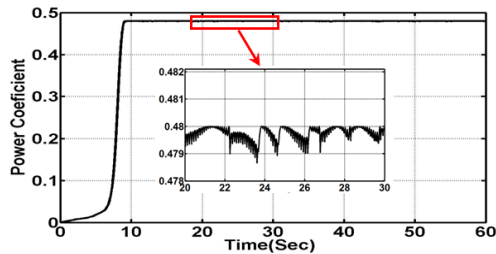
شکل ۱۰: نمودار تغییرات، (الف) زاویه ولتاژ خروجی مبدل ماتریسی، (ب) سرعت زاویه‌ای توربین، (ج) ضریب توان، (د) توان راکتیو تزریق‌شده به شبکه، (ه) توان راکتیو تزریق‌شده به شبکه و (و) ضریب قدرت توان خروجی توربین.

در فرایند فوق، اندازه تغییرات زاویه $\Delta\theta$ در هر دو ناحیه با کمک

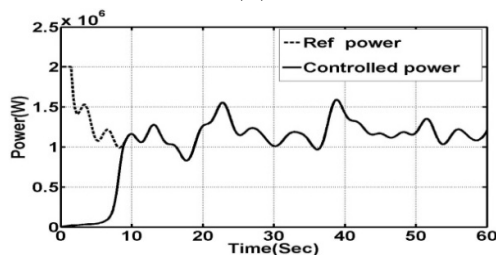
(۲۷) تعیین شده است



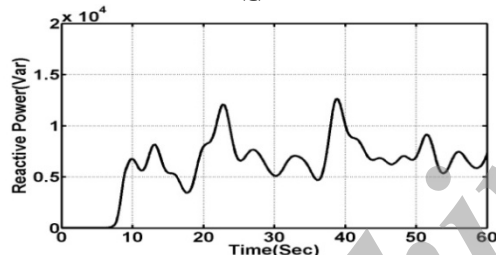
(الف)



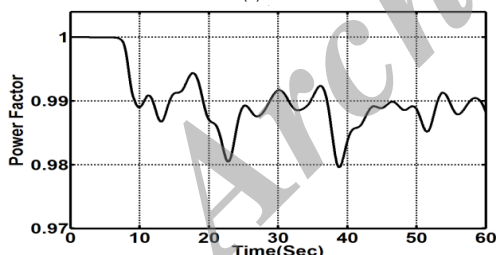
(ب)



(ج)



(د)

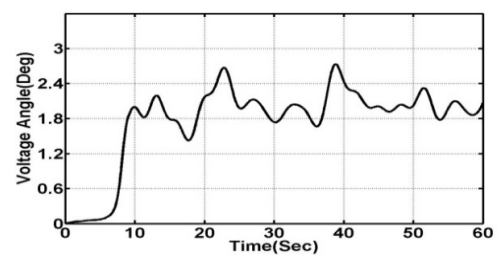


(ه)

شکل ۱۳: نمودار تغییرات، (الف) سرعت زاویه‌ای توربین، (ب) ضریب توان، (ج) توان اکتیو تزریق شده به شبکه، (د) توان راکتیو تزریق شده به شبکه و (ه) ضریب قدرت توان خروجی توربین.

بهینه را ردیابی کند. این فرایند منجر به بهبود راندمان جذب توان شکل ۱۳-ب و توان تولیدی شکل ۱۳-ج می‌گردد.

مقایسه شکل ۱۳-ج و ۱۳-د نشان می‌دهد که روش پیشنهادی موفق شده (همانند بررسی رفتار سیستم به ازای سرعت باد ثابت) ضمن دریافت حداکثر توان از توربین بادی، مقدار توان راکتیو تزریقی به شبکه را در حد مقدار ناچیزی در مقایسه با توان نامی توربین بادی نگه دارد. لذا تحت این شرایط مقدار ضریب قدرت در حدود ۱ ثابت نگه داشته شده (شکل ۱۳-ه) و این بدان معنی است که کنترلر پیشنهادی از توربین بادی تحت ضریب قدرت واحد بهره‌برداری می‌کند.



شکل ۱۲: نمودار تغییرات زاویه ولتاژ خروجی مبدل ماتریسی. (با ۱۱ یکسیتی)

جدول ۱: مشخصات توربین بادی.

Wind Turbine		
Blade radius	R	۳۹ m
Air density	ρ	۱,۲۲۵ Kg/m ^۳
Rate wind speed	$V_{w-rated}$	۱۲ m/s
Pmsg		
Rated output power	P_g	۲ MW
Resistance	R_g	۵۰ $\mu\Omega$
d axis inductance	L_d	۰,۱۰۵۵ H
q axis inductance	L_q	۰,۰۳۷۵ H
Number of pair pole	pp	۱۱
Field flux	K	۱۳۶,۲۵
Inertia time constant	H	۳,۵ Sec
Matrix Converter		
Switching frequency	f_s	۱۰ KHz
Output capacitor	C_o	۱ mF
Input capacitor	C_i	۰,۱۵ mF
Output inductance	L_o	۱۰ mH
Transformer		
Equivalent impedance	X_T	۰,۱۰۶ pu
Nominal power	P_{nom}	۲ MW
Primary voltage	V_p ??	۶۹۰ V
Secondary voltage	V_s ??	۲۰ Kv

مقایسه شکل ۱۰-د و ۱۰-ه نشان می‌دهد که روش پیشنهادی موفق شده تا ضمن دریافت حداکثر توان از توربین بادی، مقدار توان راکتیو تزریقی به شبکه را در حد مقدار ناچیزی در مقایسه با توان نامی توربین بادی نگه دارد، به طوری که در شکل ۱۰-و مقدار ضریب قدرت در حدود ۱ ثابت نگه داشته شده و این بدان معنی است که کنترلر پیشنهادی از توربین بادی تحت ضریب قدرت واحد بهره‌برداری می‌کند.

در این مرحله برای بررسی رفتار سیستم به ازای مدل واقعی سرعت باد، تابع تغییرات سرعت باد (رابطه (۱)) به سیستم اعمال شده و نتایج آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۱۱ تغییرات زاویه انتقال سیستم نمایش داده شده و با توجه به این شکل سیستم کنترلی اختلاف زاویه بین ولتاژ خروجی مبدل و شبکه را به نحوی کنترل می‌کند که ژنراتور، سرعت بهینه را ردیابی کند. اثر این رفتار سیستم کنترلی بر سایر پارامترهای سیستم در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۳-الف سیستم کنترلی با تعیین سرعت بهینه دوران ژنراتور، زاویه انتقال و متناسب با آن توان تزریق شده به شبکه را به نحوی کنترل نموده که توربین در گستره تغییرات سرعت باد همواره سرعت

۷- نتیجه گیری

در این مقاله روشی ساده و مؤثر برای کنترل توربین‌های بادی از نوع مغناطیس دائم و مجهز به مبدل ماتریسی ارائه شده است. در شیوه پیشنهادی با استفاده از روش جستجوی صعود و محاسبه سرعت بهینه توربین، و بدون نیاز به تحلیل سیستم در مختصات dq ، اعمال تغییر در سرعت توربین و مشاهده رفتار توان جذب‌شده، فرایند جذب توان کنترل گردید و به ازای تغییرات سرعت باد در الگوهای متفاوت نشان داده شد که عملکرد سیستم کنترلی در برآورده‌سازی اهداف تعیین‌شده، رضایت‌بخش است به طوری که تغییرات سریع باد توسط روش پیشنهادی با دقت و سرعت پاسخ مناسب دنبال شد.

مراجع

- [10] C. Busca, A. I. Stan, T. Stanciu, and D. I. Stroe, "Control of permanent magnet synchronous generator for large wind turbines," in *Proc. Int'l Symp. on Industrial Electronics*, vol. ???, pp. 3871-3876, Jul. 2010.
- [11] H. Kazemi Kargar, A. Nateghi, and A. Khodamoradi, "A new approach for wind speed behavior prediction," *Int. J. of Advanced Renewable Energy Research*, vol. 1, no. 2, pp. 99-102, ???, 2012.
- [12] M. Aner and E. Nowicki, "Two-level backward operation of a VSMC for PMSG grid - connected variable speed wind turbine systems," in *Proc. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf.*, vol. ???, pp. 1100-1106, ???, 2011.
- [13] N. Mendis, K. M. Muttaqi, and S. Sayeef, "Stand alone operation of wind turbine - based variable speed generators with maximum power extraction capability," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 27, no. 4, pp. ???-???, Dec. 2012.
- [14] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, and A. M. Knight, "A review of power converter topologies for wind generators," in *Proc. IEEE Int. Conf. in Electric Machines and Drives*, vol. ???, pp. 458-465, May 2005.
- [15] P. W. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham, and A. Weinstein, "Matrix converters: a technology review," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 2, pp. 276-288, Apr. 2002.
- [16] L. Empringham, P. W. Wheeler, and J. C. Clare, "Intelligent commutation of matrix converter bi-directional switch cells using novel gate drive techniques," in *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, vol. 1, pp. 707-713, ???, 1998.
- [17] C. Klumpner and F. Blaabjerg, "Experimental evaluation of ride-through capabilities for a matrix converter under short power interruptions," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 2, pp. 315-324, ???, 2002.
- [18] A. Nateghi, H. Kazemi Kargar, and S. Bagheri, "Design and implementation of matrix converter to reduce the effects of wind speed fluctuations in PMSG wind turbine," in *Proc. 2nd Int. Conf. on the Developments in Renewable Energy Technology, ICDRET'12*, vol. ???, pp. 299-302, Jan. 2012.
- علیرضا ناطقی** در سال ۱۳۷۲ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید ستاری و در سال ۱۳۷۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی را از دانشگاه صنعتی شریف دریافت نمود. ایشان در حال حاضر دانشجوی دکتری در رشته مهندسی برق از دانشگاه شهید بهشتی است و هم‌اکنون به عنوان عضو هیات علمی دانشگاه شهید ستاری تهران مشغول به خدمت می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده عبارتند از: انرژی‌های نو، الکترونیک قدرت و الگوریتم‌های کنترل هوشمند.
- حسین کاظمی کارگر** به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۷۲، ۱۳۷۵ و ۱۳۸۰ موفق به اخذ مدارک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در مهندسی برق-قدرت به‌ترتیب از دانشگاه صنعتی شریف، دانشگاه علم و صنعت و دانشگاه امیرکبیر گردید. در حال حاضر به عنوان عضو هیات‌علمی دانشگاه شهید بهشتی مشغول به خدمت می‌باشد. زمینه‌های مورد علاقه ایشان عبارتند از: انرژی‌های نو، الکترونیک قدرت و حفاظت سیستم‌های قدرت و ریزشیکه.
- [1] R. D. Shukla and R. K. Tripathi, "Maximum power extraction schemes & power control in wind energy conversion system," *Int. J. of Scientific & Engineering Research*, vol. 3, no. 6, pp. 1-7, Jun. 2012.
- [2] I. K. Buehring and L. L. Freris, "Control policies for wind - energy conversion systems," in *Generation, Transmission, and Distribution, IEE Proc. C*, vol. 128, no. 5, pp. 253-261, Sep. 1981.
- [3] S. M. Reza Kazmi, H. Goto, G. Hai - Jiao, and O. Ichinokura, "Review and critical analysis of the research papers published till date on maximum power point tracking in wind energy conversion system," in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE'10*, vol. ???, pp. 4075-4082, Sep. 2010.
- [4] Q. Wang and L. Chang, "An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter - based variable speed wind turbine systems," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1242-1249, Sep. 2004.
- [5] G. Yang and Y. Zhu, "Application of a matrix converter for PMSG wind turbine generation system," in *Proc. 2nd IEEE Int. Symp. on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG'10*, vol. ???, pp. 185-189, ???, 2010.
- [6] S. M. Barakati, M. Kazerani, and J. D. Aplevich, "Maximum power tracking control for a wind turbine system including a matrix converter," in *Proc. IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 24, pp. 705-713, Sep. 2009.
- [7] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy conversion applications," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 2, pp. 486-494, Apr. 2006.
- [8] J. Rzaa, "Capacitor clamped multilevel matrix converter controlled with venturini method," in *Proc. 13th Power Electron. Motion Control Conf.*, vol. ???, pp. 357-364, ???, 2008.
- [9] M. Chinchilla, S. Arnaltes, and J. C. Burgos, "Control of permanent - magnet generators applied to variable speed wind-energy systems connected to the grid," *Energy Conversion, IEEE Trans. on*, vol. 21, no. 1, pp. 130-135, Mar. 2006.