

کنترل فازی جذب بیشینه توان در توربین های بادی مغناطیس دائم مجهز به مبدل ماتریسی غیر مستقیم

علیرضا ناطقی^۱، دانشجوی دکترای برق- قدرت، حسین کاظمی کارگر^۲، استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
A_Nateghi@sbu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران
H_kazemi@sbu.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک روش کنترلی جدید در جذب و تزریق توان به شبکه، در توربین بادی مغناطیس دائم مجهز به مبدل ماتریسی غیرمستقیم ارائه می‌شود. در این روش با استفاده از منطق فازی، دامنه و فاز ولتاژ خروجی مبدل، توان تزریق شده به شبکه و متناسب با آن سرعت توربین به نحوی کنترل می‌شوند که همواره در سرعت‌های مختلف باد، بیشترین توان ممکن تحت ضریب قدرت واحد از باد جذب شود. این فرایند با استفاده از الگوریتمی ساده و بدون نیاز به استفاده از مفاهیمی مانند کنترل برداری، با طراحی مدار قدرت مبدل و کنترل آن بر اساس روش مدولاسیون عرض پالس پیاده‌سازی می‌شود و نتایج شبیه‌سازی در محیط برنامه‌ریزی متلب مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: مبدل ماتریسی غیر مستقیم، کنترل جستجوی صعود، مولد سنکرون مغناطیس دائم، ردیابی نقطه جذب بیشینه توان.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۲/۱۲/۱۸

نام نویسنده‌ی مسئول : علیرضا ناطقی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده برق دانشگاه شهید بهشتی- اتاق ۲۲۱

۱. مقدمه

در مطالعات اخیر مبدل‌های ماتریسی، با دامنه، فرکانس و فاز قابل کنترل، بدون نیاز به المان ذخیره کننده و با ساختار ساده‌تر در دو شکل یک و دو طبقه طراحی و به عنوان مدار واسط بین توربین و شبکه به کار گرفته شده‌اند.

در مرجع [۷] از یک مبدل ماتریسی یک طبقه (مبدل ماتریسی مستقیم) جهت اتصال توربین به شبکه و کنترل توان استفاده شده است. این نوع مبدل نسبت به مبدل‌های متعارف به تعداد سوئیچ کمتری نیاز دارد اما روش کنترل کلیدزنی آن پیچیده‌تر می‌باشد.

در این مقاله، عملکرد یک توربین بادی مغناطیس دائم ۲ مگاواتی که توسط یک مبدل ماتریسی غیر مستقیم (یکسوساز - اینورتر) و از طریق یک ترانسفورماتور به شبکه توزیع ۲۰ کیلو ولتی متصل شده، مورد مطالعه قرار گرفته است. به نحوی که با کنترل اختلاف فاز بین ولتاژ خروجی مبدل و ولتاژ شبکه (زاویه انتقال) و از طریق راکتانس نشستی ترانسفورماتور، میزان تزریق توان اکتیو به شبکه و متناسب با آن گشتاور مغناطیسی و سرعت توربین کنترل شده است. در این راستا علاوه بر کنترل فرایند انتقال توان تحت ضریب قدرت واحد از بلوک کنترلر منطق فازی جهت تصحیح و کنترل زاویه ولتاژ خروجی مبدل و ردیابی جذب بیشینه توان استفاده شده و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

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 جذب شده 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، اجزاء آن در محیط متلب شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند.

۲. تابع تغییرات سرعت باد

در شبیه‌سازی و مطالعه عملکرد توربین‌های بادی، بررسی الگوی رفتاری سرعت باد ضروری می‌باشد. در اغلب تحقیقات صورت گرفته از مدل ون هون برای مدل‌سازی رفتار سرعت باد و بررسی تاثیر آن بر عملکرد توربین بادی استفاده می‌شود. در این مدل، تابع تغییرات سرعت باد، با اضافه کردن مولفه‌های نوسانی باد به مقدار متوسط آن، به صورت زیر تعیین می‌شود [۸].

$$v_w(t) = \bar{v} + \frac{v}{\pi} \sum_{i=1}^N v_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (1)$$

در این رابطه، \bar{v} 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.

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. در توربین‌های بادی انرژی باد توسط پرها جذب شده و به طور مستقیم و یا توسط گیربکس به ژنراتور منتقل می‌شود و در اغلب موارد انرژی تولید شده به شبکه توزیع برق تزریق می‌شود. میزان جذب انرژی در توربین‌های بادی شدیداً تحت تاثیر سرعت باد، سرعت دوران توربین و ماهیت دینامیکی پرها قرار دارد، لذا با توجه به هزینه‌های بالای طراحی، ساخت و نصب توربین‌های بادی، بهبود کیفیت توان تولیدی و جذب حداکثر توان ممکن از باد، امری ضروری است. در این راستا در پیاده‌سازی توربین‌های بادی، با توجه به غیر قابل کنترل بودن سرعت باد، تغییرات زاویه گام پره و سرعت دوران توربین باید به نحوی کنترل شوند که در گستره تغییرات سرعت باد (در محدوده سرعت شروع به کار توربین تا سرعت نامی نقطه کار توربین به حالت ایده‌آل نزدیک شده و بیشترین توان ممکن از باد جذب شود) [۱].

در طی سال‌های اخیر با توجه به مزیت‌های مولد سنکرون مغناطیس دائم، از جمله حجم و وزن کم، بازدهی بالا و قابلیت افزایش تعداد قطب‌ها و حذف جعبه دنده، استفاده از این نوع مولد در پیاده‌سازی توربین‌های بادی گسترش یافته است. در اغلب تحقیقات صورت گرفته با استفاده از مبدل‌های قدرت و کنترل مستقیم گشتاور [۲] و یا شار استاتور [۳]، سرعت توربین و فرایند جذب توان و تزریق آن به شبکه کنترل شده است.

در مرجع [۴] از کنترلرهای PID جهت ردیابی توان استفاده است. طراحی این کنترلر متناسب با ورودی‌های سیستم و توپولوژی شبکه صورت می‌گیرد و کارایی آنها با نوسانات ورودی‌های کنترلر کاهش می‌یابد. لذا در طراحی‌های جدید تمایل زیادی به جایگزینی این کنترلرها با کنترلرهای مقاوم وجود دارد. یکی از این کنترلر کننده‌ها، کنترلرهای فازی است. جهت استفاده از این کنترلر نیازی به اطلاع دقیق از مدل دینامیکی سیستم نیست و همچنین در بسیاری از موارد کنترلی پاسخ بهتری نسبت به کنترلرهای خطی دارند [۵].

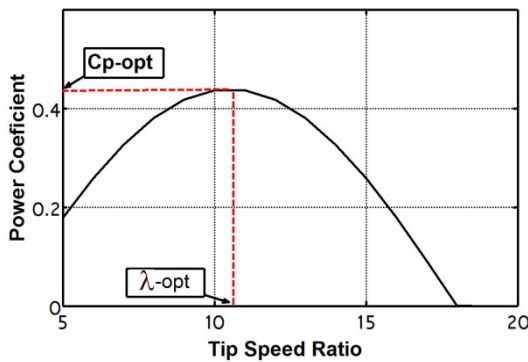
در مرجع [۶] با پیاده‌سازی روش سیگنال فیدبک توان و نمونه برداری از سرعت و توان خروجی یک ژنراتور مغناطیس دائم بیشینه توان تولیدی توربین با استفاده از کنترلر منطق فازی تخمین زده شده و با استفاده از یک مبدل قدرت پشت به پشت، میزان جذب توان از باد و تزریق آن به شبکه کنترل شده است. در طراحی این نوع مبدل‌ها از یک خازن استفاده می‌شود که گرم و بخار شدن الکترولیت درون آن، عملکرد مبدل را با گذشت زمان تحت تاثیر خود قرار می‌دهند.

توان، λ سرعت سرپره و β بیانگر زاویه انحراف پره بر حسب درجه است [۹].

همانطور که ملاحظه می‌گردد رابطه توان جذب شده به پارامتری بنام C_p که مقدار آن تابعی از λ و β وابسته می‌باشد. تحت این شرایط تغییرات سرعت باد منجر به تغییر λ و پیرو آن تغییر C_p و توان جذب شده می‌شود. در شکل (۲) نمودار ضریب بهره توان بر حسب سرعت سرپره (به ازاء زاویه گام پره صفر)، نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، بیشترین مقدار ضریب توان به ازاء مقدار مشخصی از سرعت سرپره رخ می‌دهد. لذا در سرعت‌های مختلف باد، کنترلر برای جذب بیشینه توان، باید همواره سرعت سرپره را در مقدار بهینه سرعت تنظیم کند. در این راستا با جایگزینی رابطه (۴) در (۷) و حل آن، رابطه λ_{opt} به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$\frac{\partial P}{\partial \lambda} = 0 \quad (7)$$

$$\lambda_{opt} = \frac{15 - 0.3\beta}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{0.0184\beta(15 - 0.3\beta)}{\pi \cdot 0.5 \rho^2 V^2 (0.44 - 0.167\beta)} \right) + 3 \quad (8)$$



شکل ۲. منحنی تغییرات ضریب توان

۴. مولد سنکرون مغناطیس دائم

معادلات ولتاژ و گشتاور مولد در دستگاه مرجع روتور به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۰].

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

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

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} [T_m - T_e - F\omega_r] \quad (11)$$

$$T_e = \frac{3p}{2} (\psi_{PM} i_q - (L_q - L_d) i_q i_d) \quad (12)$$

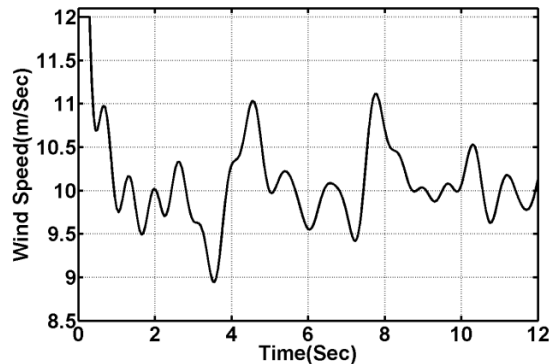
در رابطه (۲) دامنه مولفه‌های نوسان باد V_i بر اساس تابع چگالی طیف باد $S(\omega)$ محاسبه شده است.

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

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

که σ شدت اغتشاش، h ارتفاع توربین بر حسب متر و L بیانگر طول اغتشاش می‌باشد. در شکل (۱) تابع شبیه‌سازی شده سرعت باد بر اساس مدل ون هون با سرعت متوسط ۱۰ متر بر ثانیه و به ازاء مقادیر زیر نمایش داده شده است.

$\bar{v} = 10 \text{ m/s}$	$N = 100$	$\sigma = 2$	$\Delta f = 0.02 \text{ m}$	$L = 60 \text{ m}$
----------------------------	-----------	--------------	-----------------------------	--------------------



شکل ۱. نمودار شبیه سازی شده سرعت باد

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 (۴) تا (۶) میزان جذب توان را بیان می‌کنند.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (4)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.167\beta) \sin \left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} \right] - 0.0184(\lambda - 3)\beta \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (6)$$

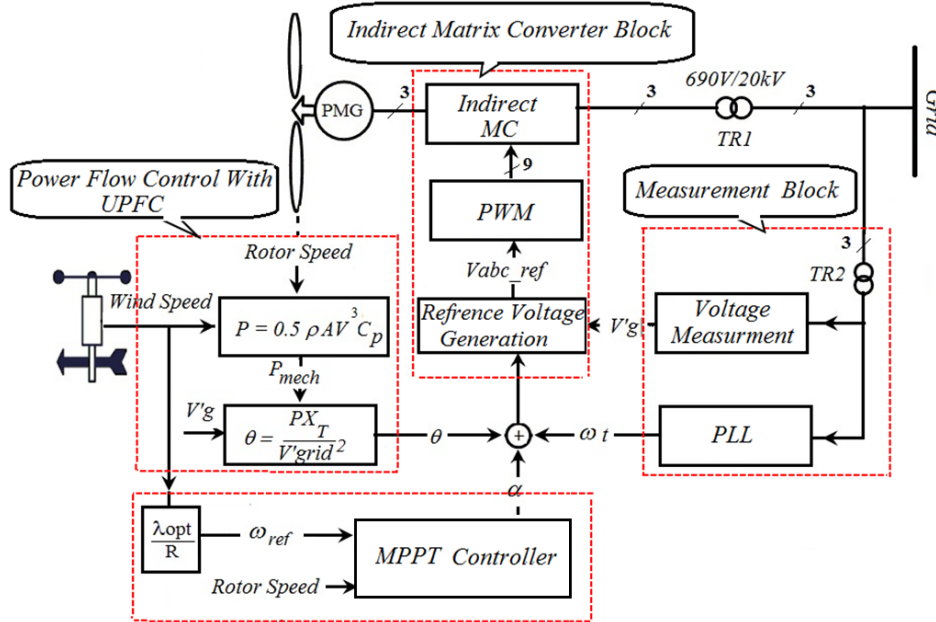
در این روابط P توان جذب شده بر حسب وات، ρ چگال هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، A سطح جارو شده توسط پره بر حسب متر مربع، V سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، C_p ضریب

J ممان اینرسی سیستم، F ضریب اصطکاک، T_m گشتاور مکانیکی توربین و T_e بیانگر گشتاور مغناطیسی ژنراتور می‌باشد.

در روابط (۹) تا (۱۲)، i_q و i_d مولفه‌های جریان استاتور، u_q و u_d مولفه‌های ولتاژ ترمینال ماشین، R مقاومت اهمی استاتور، L_d و L_q مولفه‌های اندوکتانس استاتور Ψ_{pm} شار میدان تحریک،

۵. طرح پیشنهادی

در شکل (۳) بلوک دیاگرام سیستم پیشنهادی ارائه شده است.



۳. بلوک دیاگرام کنترل جذب بیشینه توان

در این رابطه θ زاویه انتقال مبدل، T_e گشتاور مغناطیسی، ω_r سرعت دوران توربین، $P_{transfer}$ و P_{Tur} به ترتیب بیانگر توان جذب شده توسط توربین و توان تزریق شده به شبکه می‌باشند. با توجه به ارتباط بین زاویه انتقال مبدل و توان تزریق شده به شبکه، آهنگ تغییرات توان بر حسب زاویه انتقال مبدل را می‌توان به صورت رابطه (۱۴) نوشت.

$$\frac{dP_{transfer}}{d\theta} = \frac{V_{grid}^2}{X_T} > 0 \quad (14)$$

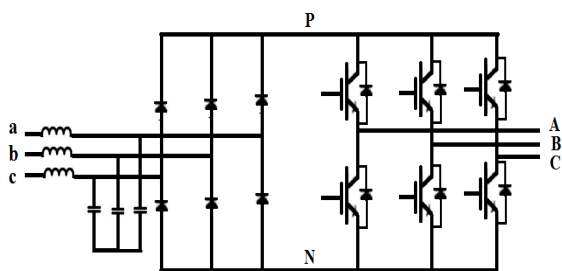
در رابطه (۱۳) آهنگ تغییرات گشتاور مغناطیسی نسبت به توان تزریق شده به شبکه از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$P_{transfer} = T_e \omega_e \Rightarrow \frac{dT_e}{dP_{transfer}} = \frac{1}{\omega_e} > 0 \quad (15)$$

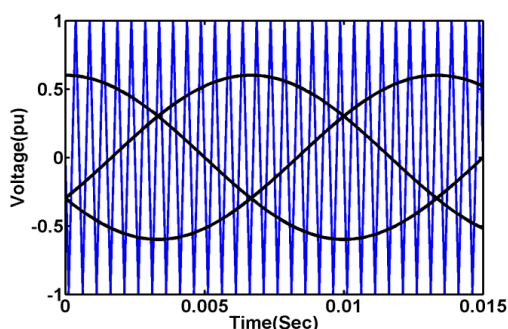
در توربین بادی افزایش گشتاور مغناطیسی منجر به کاهش سرعت دوران توربین و بالعکس کاهش آن سرعت دوران را افزایش می‌دهد، لذا تحت این شرایط، آهنگ تغییرات سرعت توربین نسبت به گشتاور مغناطیسی را می‌توان همواره منفی در نظر گرفت.

همانطور که ملاحظه می‌شود، ژنراتور مغناطیس دائم از طریق یک مبدل ماتریسی غیر مستقیم و یک ترانسفورماتور به شبکه متصل شده است. در این مقاله، سرعت توربین و جذب بیشینه توان، با کنترل اختلاف فاز بین ولتاژ خروجی مبدل (زاویه انتقال) و شبکه، کنترل می‌شوند. این فرایند با اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای ولتاژ شبکه (ωt) (در بلوک حلقه قفل فاز)، محاسبه توان مکانیکی توربین و زاویه (θ) مورد نیاز برای انتقال آن به شبکه (در بلوک کنترل تزریق توان) و محاسبه زاویه تصحیح خطا (α) (در بلوک کنترلر فازی) پیاده‌سازی شده است. در رابطه (۱۳)، ارتباط زنجیره‌ای بین زاویه انتقال مبدل با توان جذب شده توسط توربین نشان داده شده است. جهت بررسی عملکرد کنترلر و همگرایی نتایج در مقادیر بهینه، کافی است ثابت شود، که این رابطه به ازاء تغییرات زاویه انتقال توربین تنها یک نقطه حداکثر و منطبق بر نقطه کار بهینه دارد. لذا در این راستا در روابط (۱۴) تا (۱۷) به بررسی رفتار ترم‌های مشتق پرداخته می‌شود.

$$\frac{dP_{Tur}}{d\theta} = \frac{dP_{transfer}}{d\theta} \times \frac{dT_e}{dP_{transfer}} \times \frac{d\omega_r}{dT_e} \times \frac{dP_{Tur}}{d\omega_r} \quad (13)$$



شکل ۵. مبدل ماتریسی غیرمستقیم با یکسوساز دیودی



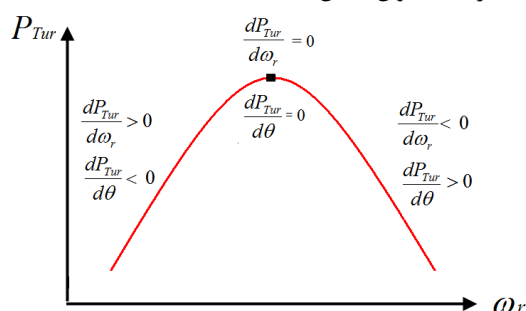
شکل ۶. موج ولتاژ مرجع و موج حامل

$$\frac{d\omega_r}{dT_e} < 0 \quad (16)$$

با توجه به شکل (۴)، آهنگ تغییرات توان توربین بر حسب سرعت دوران آن، در قله منحنی برابر صفر است، لذا با توجه به روابط (۱۳) تا (۱۶) می توان نتیجه گرفت که در این نقطه رابطه زیر نیز صادق است.

$$\frac{dP_{Tur}}{d\omega_r} = 0 \Rightarrow \frac{dP_{Tur}}{d\theta} = 0 \quad (17)$$

در این راستا در شکل (۴)، آهنگ تغییرات توان توربین به ازاء تغییرات سرعت دوران توربین و زاویه انتقال مبدل، جهت دستیابی به نقطه حداکثر جذب توان، نشان داده شده است.

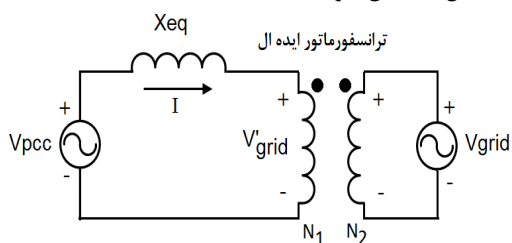


شکل ۴. منحنی تغییرات توان - سرعت توربین

۵-۲. 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.



شکل ۷. اتصال مبدل ماتریسی به شبکه

با توجه به این شکل، توان اکتیو و راکتیو تزریق شده به شبکه را می توان با کمک روابط زیر تعیین کرد.

$$\vec{V}_{pcc} = jX_{eq} \vec{I} + \vec{V}'_{grid} \quad (21)$$

$$\vec{S} = \vec{V}'_{grid} \cdot \vec{I}^* \quad (22)$$

$$\vec{S} = \vec{V}'_{grid} \left(\frac{\vec{V}_{pcc} - \vec{V}'_{grid}}{jX_{eq}} \right)^* \quad (23)$$

۵-۱. مدار قدرت مبدل ماتریسی غیرمستقیم

در شکل (۵) مدار قدرت مبدل ماتریسی غیرمستقیم نشان داده شده است. این مبدل بدون نیاز به خازن لینک DC، با یکسوسازی ولتاژ خروجی ژنراتور و کنترل مدولاسیون پهنای پالس اینورتر و فرایند کلیدزنی آن، ولتاژی سه فاز با دامنه و فرکانس قابل کنترل را در خروجی تولید می کند.

در شکل (۶) ولتاژ سه فاز مرجع و موج حامل نمایش داده شده است. کنترل فرایند کلیدزنی اینورتر مبدل با مقایسه این دو موج صورت می گیرد. در شکل (۳)، بلوک مولد سیگنال مرجع با استفاده از دامنه ولتاژ و سرعت زاویه ای شبکه و فاز خروجی کنترلرها موج سه فازی را تولید کرده و به بلوک مدولاسیون پالس اینورتر مبدل اعمال می کند. برای این منظور از روابط زیر استفاده شده است.

$$V_A = \sqrt{2} V'_{grid} \cos(\omega t + (\theta + \alpha)) \quad (18)$$

$$V_B = \sqrt{2} V'_{grid} \cos(\omega t + (\theta + \alpha + 2\pi/3)) \quad (19)$$

$$V_C = \sqrt{2} V'_{grid} \cos(\omega t + (\theta + \alpha - 2\pi/3)) \quad (20)$$

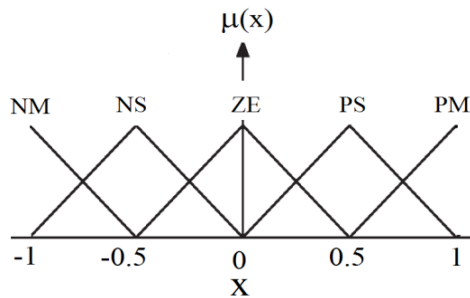
در این روابط V'_{grid} اندازه ولتاژ شبکه در ثانویه ترانسفورماتور TR2 و $(\theta + \alpha)$ بیانگر اختلاف فاز ولتاژ خروجی مبدل نسبت به شبکه است

۵-۳. کنترل فازی ردیابی جذب بیشینه توان

توابع فازی این قابلیت را دارند تا در محاسباتی که عدم قطعیت در داده ها، پارامترها و مدل سیستم وجود دارند، بدون نیاز به معادلات دینامیک سیستم به کار گرفته شوند. در اغلب مطالعات صورت گرفته، توابع فازی مثلثی و یا دوزنقه ای بر اساس شناخت پارامترهای سیستم و عملکرد آن انتخاب و به کار گرفته می شوند.

در شکل (۹) توابع عضویت سیگنال های ورودی و خروجی سیستم در کنترلی نشان داده شده است. در پیاده سازی کنترلهای فازی افزایش این توابع، دقت کنترل را افزایش داده ولی پیاده سازی آنرا پیچیده تر می کند.

در این راستا با توجه به این شکل برای تبدیل سیگنال های ورودی و خروجی کنترلر به سطوح فازی (متغیرهای زبانی) از پنج مجموعه فازی به صورت زیر استفاده شده است. (PS) مثبت کوچک، (PM) مثبت متوسط، (ZE) صفر و (NM) منفی متوسط، (NS) منفی کوچک.



شکل ۹. توابع عضویت متغیر نرمالیزه شده (x) در منطق فازی

با توجه به جدول شماره (۲)، توربین مورد مطالعه در گستره تغییرات سرعت باد (از سرعت شروع به کار توربین تا سرعت قطع آن) با سرعتی برابر (۲ - ۱ rad/sec) و حداکثر شتاب زاویه ای (۲۵/۰ rad/sec) دوران می کند. تغییرات سرعت باد، علاوه بر تغییر سرعت دوران توربین، نقطه کار بهینه و متناسب با آن سیگنال خطای سرعت دوران توربین و آهنگ تغییرات آن را نیز تحت تاثیر خود قرار می دهد. در این راستا جهت اطمینان از پاسخگوئی توابع در حوزه تعریف شده، در هر سرعت باد، سیگنال خطای سرعت و آهنگ تغییرات آن، نرمالیزه شده و سپس به کنترلر اعمال می شوند. در این راستا حوزه تغییرات سیگنال خطای سرعت و آهنگ تغییرات آن و زاویه انتقال مبدل، به عنوان ورودی های خروجی کنترلر بر اساس اطلاعات سرعت و شتاب نامی توربین و نحوه عملکرد سیستم در دستیابی به نقطه کار بهینه تعیین می شوند. در جدول (۱) قوانین فازی تعیین شده جهت تصحیح و کنترل زاویه انتقال سیستم، نمایش داده شده است.

$$\vec{S} = \frac{V_{pcc} V'_{grid}}{X_{eq}} e^{j(\theta - \theta)} - j \frac{V'^2_{grid}}{X_{eq}} \quad (24)$$

$$P = \text{Re}(\vec{S}) = \frac{V_{PCC} V'_{grid}}{X_{eq}} \sin(\theta) \quad (25)$$

$$Q = \text{Im}(\vec{S}) = \frac{V'_{grid}}{X_{eq}} (V_{PCC} \cos(\theta) - V'_{grid}) \quad (26)$$

در این روابط، S توان ظاهری، P توان اکتیو، Q توان راکتیو و θ توان راکتیو V_{pcc} و V'_{grid} به ترتیب ولتاژ خروجی مبدل و ولتاژ شبکه در اولیه ترانسفورماتور، X_{eq} راکتانس معادل ترانسفورماتور و θ بیانگر اختلاف فاز بین ولتاژ خروجی مبدل و ولتاژ شبکه می باشد که به آن زاویه انتقال مبدل گفته می شود. با توجه به روابط (۲۴) تا (۲۶)، توان تزریق شده به شبکه را می توان به صورت شکل (۹-الف)، با دایره ای به شعاع و مرکز نمایش داد. در شرایط کارکرد توربین بادی هدف این است که با کنترل ولتاژ خروجی مبدل تحت شرایط $V_{pcc} = V'_{grid} = 1/0 \text{ pu}$ حداکثر توان حقیقی $P = 1/0 \text{ pu}$ به شبکه منتقل گردد، در این صورت رابطه (۲۵) را می توان به صورت زیر نوشت.

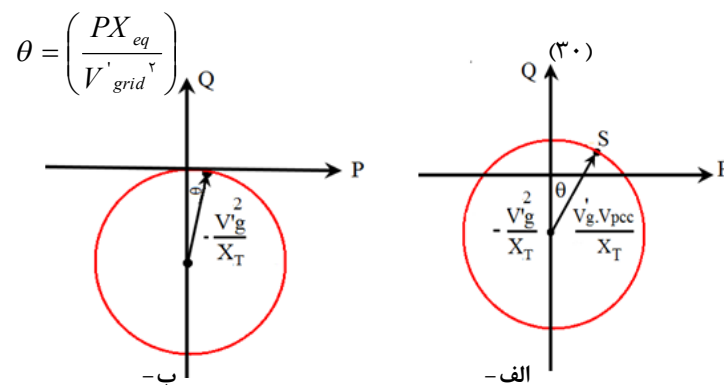
$$\theta = \sin^{-1}(X_{eq}) \quad (27)$$

از آنجائی که مقدار X_{eq} کوچکتر از (۰/۱ Pu) می باشد، می توان نتیجه گرفت که مقدار θ نیز کوچک بوده، لذا روابط (۲۵) و (۲۶) به صورت زیر ساده می شوند.

$$P = \left(\frac{V_{PCC} V'_{grid}}{X_{eq}} \right) \theta \quad (28)$$

$$Q = \frac{V'_{grid}}{X_{eq}} (V_{PCC} - V'_{grid}) \quad (29)$$

همانطور که در شکل (۸) نمایش داده شده است، در صورتی که در رابطه (۲۹) دامنه ولتاژ خروجی مبدل برابر ولتاژ شبکه گردد، تزریق توان راکتیو به شبکه از لحاظ تئوری صفر شده و در این صورت با کنترل زاویه θ می توان میزان تزریق توان اکتیو به شبکه را کنترل نمود. در رابطه (۳۰) زاویه مورد نیاز برای تزریق توان جذب شده به شبکه نشان داده شده است.



شکل ۸. منحنی Q/P توربین، الف - $V'_{g} > V_{pcc}$ ، ب - $V'_{g} = V_{pcc}$

جدول ۱. مجموعه قوانین کنترل کننده فازی سرعت توربین

de/dt \ e	NM	NS	ZE	PS	PM
NM	NM	NM	NM	NM	PM
NS	NM	NS	NS	NS	ZE
ZE	NS	NS	ZE	PS	PM
PS	NS	ZE	PS	PS	PM
PM	PS	PM	PM	PM	PM

در این مقاله سیگنال خروجی کنترلر (α) با استفاده از رابطه زیر و بر اساس روش میانگین وزنی تمام خروجی های قوانین تعیین می شود.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (31)$$

$$w_i = \min(\mu(e), \mu(\Delta e / \Delta t)) \quad (32)$$

در این رابطه Z_i سطح تراز خروجی هر قانون، N تعداد قوانین سیستم استنتاج فازی، w_i خروجی عملگرهای فازی و $\mu(e)$ و $\mu(\Delta e / \Delta t)$ به ترتیب بیانگر توابع عضویت ورودی های کنترلر می باشند. در شکل (۱۰) بلوک دیاگرام کنترل فازی جذب بیشینه توان، نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، ابتدا از اطلاعات سرعت باد و سرعت دوران ژنراتور در بازه های زمانی Δt نمونه برداری شده و سرعت بهینه دوران توربین محاسبه می گردد. سپس سیگنال خطای سرعت ($e(k)$) و آهنگ تغییرات آن ($\Delta e(k) / \Delta t$) به صورت زیر تعیین شده و به بلوک کنترلر فازی اعمال می شوند.

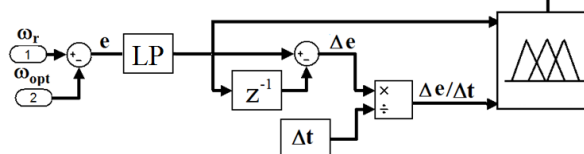
$$e(k) = \omega_r(k) - \omega_{opt}(k) \quad (33)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (34)$$

$$\frac{\Delta e(k)}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (e(k) - e(k-1)) \quad (35)$$

با استفاده از تبدیل Z ، می توان رابطه (۳۵) را به صورت زیر نوشت.

$$\frac{\Delta e(k)}{\Delta t} = \frac{(1 - z^{-1}) e(k)}{\Delta t} \quad (36)$$



شکل ۹. بلوک دیاگرام کنترلر فازی

۶. نتایج شبیه سازی

در این بخش برای بررسی صحت عملکرد روش پیشنهادی، اجزاء سیستم متناسب با پارامترهای درج شده در جدول (۲) در محیط نرم افزار متلب پیاده سازی شده است. به نحوی که ابتدا زاویه انتقال و توان تزریق شده به شبکه تحت ضریب قدرت واحد و متناسب با توان

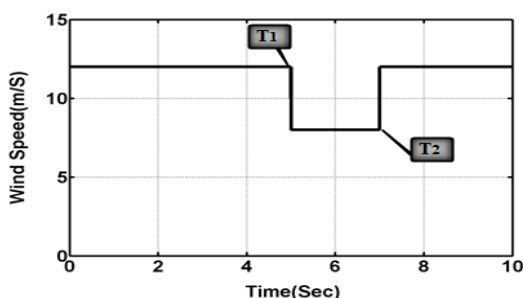
ورودی کنترلر می شوند و سپس با اعمال خطای سرعت و آهنگ تغییرات آن به کنترلر فازی و تصحیح زاویه انتقال مبدل، میزان تاثیر گذاری کنترلر فازی در ردیابی جذب بیشینه توان و بهبود عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از دو روش با یکدیگر مقایسه می گردند.

در این راستا برای بررسی دقیق تر عملکرد سیستم پیشنهادی از دو الگوی مختلف باد استفاده شده است. در مدل اول همانطور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، در زمان های زمانی T_1 و T_2 در رفتار سرعت باد، تغییراتی از ۱۲ به ۸ و ۸ به ۱۲ متر بر ثانیه مشاهده می شود. با اعمال این مدل به سیستم، عملکرد کنترلر مورد بررسی قرار می گیرد.

در شکل های ۱۲- (ب) و (ج) نمودار تغییرات سرعت توربین و زاویه انتقال مبدل نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ها مشاهده می شود، کنترلر بعد از راه اندازی توربین در ثانیه (۳) وارد مدار شده و با افزایش تدریجی زاویه انتقال مبدل از θ_1 به θ_2 سرعت توربین را در مقدار بهینه خود، تثبیت می کند.

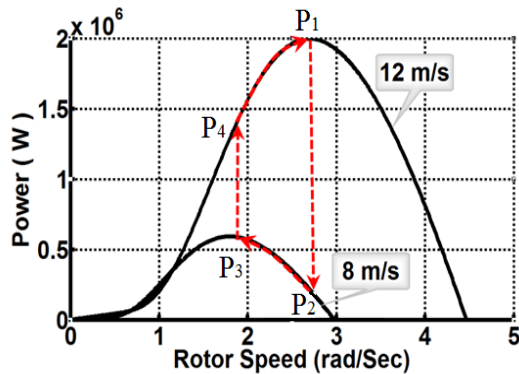
در لحظه (T_1) همزمان با کاهش سرعت باد و توان جذب شده، سیستم کنترلر انتقال توان، متناسب با رابطه (۲۹)، زاویه انتقال مبدل را از θ_1 به θ_2 کاهش می دهد. همانطور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، در طی این فرایند سرعت توربین ثابت مانده و توان تزریق شده به شبکه از نقطه P_1 به P_2 کاهش پیدا می کند.

در این مرحله کنترلر فازی متناسب با خطای سرعت و آهنگ تغییرات آن، زاویه انتقال توان را به مقدار θ_3 افزایش داده و منجر به افزایش گشتاور مغناطیسی و کاهش سرعت دوران توربین تا مقدار بهینه می شود. با توجه به شکل های ۱۲- (ج) و (د) تحت این شرایط ضریب توان بهبود یافته و با توجه به شکل (۱۳) توانی برابر P_3 از باد جذب و به شبکه تزریق می شود. در لحظه (T_2) همزمان با افزایش سرعت باد و قابلیت جذب توان بیشتر، سیستم کنترلر انتقال توان، با افزایش زاویه انتقال مبدل از θ_3 به θ_4 و کنترلر فازی با کنترل زاویه انتقال تا θ_1 ، منجر به ردیابی سرعت بهینه، بهبود ضریب توان و انتقال توانی برابر ۲ مگاوات به شبکه می شوند. این فرایند در شکل (۱۳) با گذاری از P_3 تا P_1 نشان داده شده است.



شکل ۱۱. مدل پله ای باد سرعت باد

در شکل (۱۳) خط سیر سیستم کنترلی در ردیابی نقاط بهینه جذب توان، نمایش داده شده است.

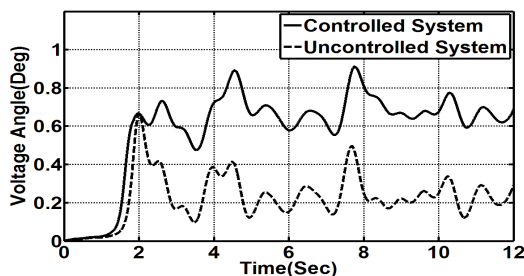


شکل ۱۳. نمودار تغییرات توان - سرعت توربین

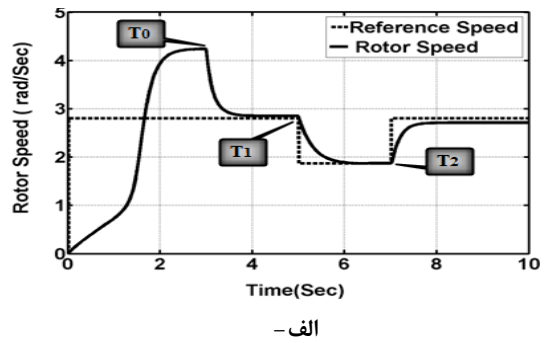
در این مرحله برای بررسی پاسخ سیستم به رفتار نوسانی سرعت باد، تابع تغییرات سرعت باد، پیرو رابطه (۱)، به سیستم اعمال شده و نتایج آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این راستا با توجه به شکل (۱۴) سیستم کنترلی در گستره تغییرات سرعت باد، اختلاف زاویه بین ولتاژ خروجی مبدل و شبکه را به نحوی کنترل می‌کند که ژنراتور، سرعت بهینه را ردیابی کند. در شکل ۱۵-الف) نمودار تغییرات سرعت دوران توربین تحت کنترل فرایند تزریق توان به شبکه و اصلاح زاویه انتقال مبدل توسط کنترلر فازی نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۱۵-ب) و ج) مشاهده می‌شود، کنترل سرعت دوران توربین، منجر به بهبود ضریب توان و جذب حداکثر توان ممکن از باد شده است.

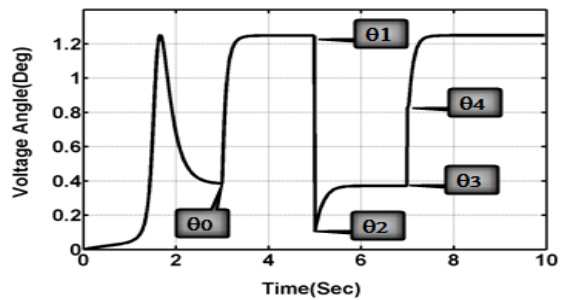
مقایسه شکل‌های ۱۵-ج) و د) نشان می‌دهد که روش پیشنهادی موفق شده ضمن دریافت حداکثر توان از توربین بادی، مقدار توان راکتیو تزریقی به شبکه را در حد مقدار ناچیزی در مقایسه با توان نامی توربین بادی نگه دارد. لذا با توجه به شکل ۱۵-ه) تحت این شرایط مقدار ضریب قدرت در حدود (۱) ثابت نگه داشته شده و این بدان معنی است که کنترلر پیشنهادی از توربین بادی تحت ضریب قدرت واحد بهره‌برداری می‌کند.



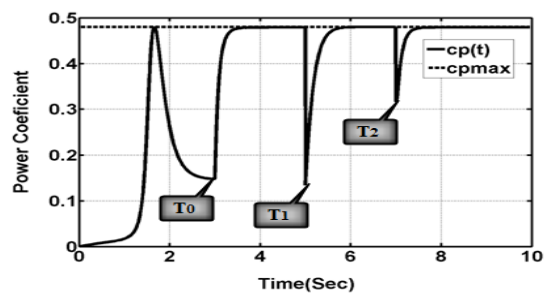
شکل ۱۴. نمودار تغییرات زاویه ولتاژ خروجی مبدل ماتریسی



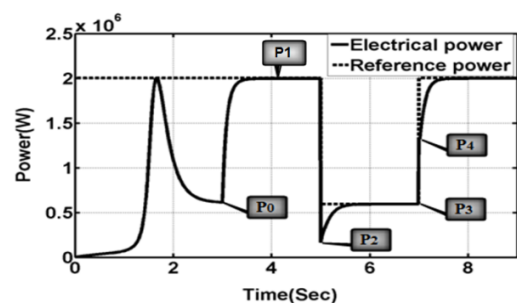
الف -



ب -



ج -



د -

شکل ۱۲. نتایج شبیه سازی سیستم کنترلی با مدل پله ای باد، نمودارهای: الف- سرعت زاویه‌ای توربین، ب-زاویه انتقال مبدل، ج- ضریب جذب توان توربین، د- توان تزریق شده به شبکه.

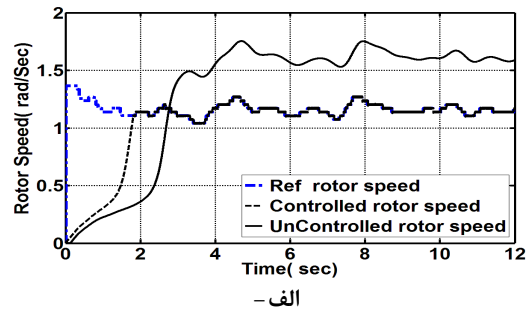
۷. نتیجه گیری

در این مقاله روشی ساده و موثر برای کنترل توربین های بادی از نوع مغناطیس دائم و مجهز به مبدل ماتریسی ارائه شده است. در روش پیشنهادی با استفاده از مدل باد شبیه سازی شده سرعت باد و کنترل زاویه بهینه بین ولتاژ خروجی اینورتر و شبکه، میزان انتقال توان به شبکه، گشتاور مغناطیسی و متناسب با آن سرعت توربین و جذب بیشینه توان تحت نوسانات سرعت باد کنترل گردید. این فرایند با استفاده از الگوریتم کنترل فازی، بلوک قفل حلقه فاز و شرط انتقال توان تحت ضریب قدرت واحد پیاده سازی شد و به ازاء تغییرات سرعت باد، نشان داده شد که عملکرد سیستم کنترلی در برآورده سازی اهداف تعیین شده، رضایت بخش است. بطوریکه تغییرات سریع باد توسط روش پیشنهادی با دقت و سرعت پاسخ مناسب دنبال شده و ضمن تزریق حداکثر توان به شبکه، ضریب قدرت توربین در حد (۱) تنظیم می گردد.

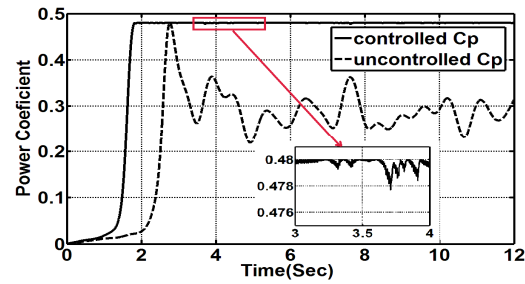
۸. ضمیمه

جدول ۲. مشخصات توربین بادی

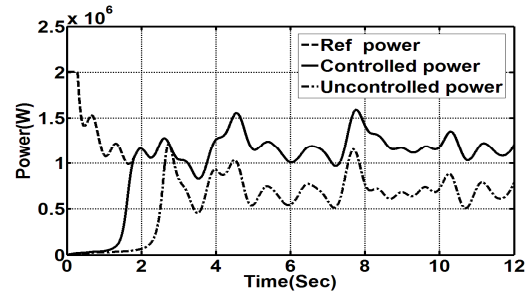
پارامترهای توربین بادی		
Blade radius	R	۳۹ m
Air density	ρ	$1/255 \text{ kg/m}^3$
Cutin Wind Speed	V_c	۵ m/s
Rate wind speed	$V_{w-rated}$	۱۲ m/s
Rotor Speed	ω_r	۱-۲ rad/sec
Acceleration rotor speed	α	$0/25 \text{ rad/sec}^2$
پارامترهای مولد مغناطیس دائم		
Rated output power	P_g	۲ MW
Resistance	R_a	$50 \mu\Omega$
d axis inductance	L_d	$0/055 \text{ H}$
q axis inductance	L_q	$0/0275 \text{ H}$
number of pair pole	PP	۱۱
Field flux	K	۱۳۶/۲۵
Inertia time constant	H	۳/۵ Sec
مبدل ماتریسی		
Switching frequency	f_s	۲ kHz
Output Capacitor	C_o	۱ μF
Input Capacitor	C_i	$0/15 \mu\text{F}$
Output inductance	L_o	۱۰ mH
پارامترهای ترانسفورماتور		
equivalent impedance	X_T	$0/15 \text{ pu}$
Nominal apparent power	S_{nom}	۲۰۰۰ kVA
primery voltage	V_p	۶۹۰ V
Secondary voltage	V_s	۲۰ kV



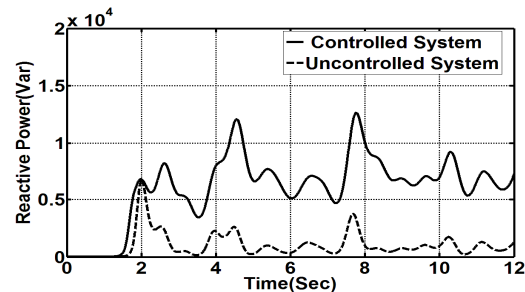
الف -



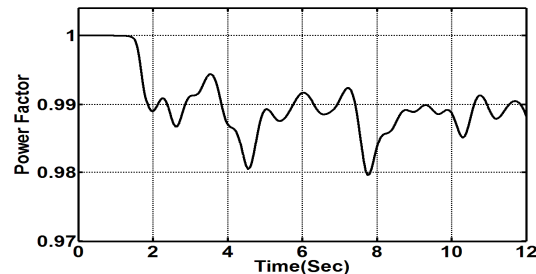
ب -



ج -



د -



ه -

شکل ۱۵. نتایج شبیه سازی سیستم کنترلی با مدل نوسانی باد، نمودارهای تغییرات: الف - سرعت دوران توربین، ب - ضریب جذب توان توربین، ج - توان تزریق شده به شبکه، د - توان راکتیو تزریق شده به شبکه، ه - ضریب قدرت توربین.

۹. مراجع

- [۱] Q. Wang and L. Chang, "An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter based variable speed wind turbine systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. ۱۹, no. ۵, pp. ۱۳۴۳-۱۳۴۹, Sept. ۲۰۰۴.
- [۲] C. Patsios, A. Chaniotis, and A. Kladas, "A Hybrid Maximum Power Point Tracking System for Grid-Connected Variable Speed Wind-Generators," in Proc. IEEE PESC ۲۰۰۸, Rhodes, , pp. ۱۷۴۹-۱۷۵۴, ۱۵-۱۹, June, ۲۰۰۸.
- [۳] Busca, C., et al., et al. "Vector control of PMSG for wind turbine applications" Dept. of Energy Techno, Aalborg Univ., aalborg, Denmark, Industrial Electronics (ISIE), pp. ۳۸۷۱ - ۳۸۷۶, ۲۰۱۰.
- [۴] we-Lee Gaing, "A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System", IEEE Transaction On Energy Conversion, Vol. ۱۹, NO. ۲, pp. ۳۸۴-۳۹۱, June ۲۰۰۴.
- [۵] V. Galdi, A. Piccolo, and P. Siano, "Designing an adaptive fuzzy controller for maximum wind energy extraction," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. ۲۳, no. ۳, pp. ۵۵۹-۵۶۹, June ۲۰۰۸.
- [۶] G. Hua and Y. Geng, "A novel control strategy of MPPT taking dynamics of the wind turbine into account," Proc. of ۳۷th IEEE Power Electronics specialist Conf., PESC'۰۶, pp. ۱-۶, ۱۸-۲۲ June ۲۰۰۶.
- [۷] A. Nateghi, H.K. Kargar, Sh. Bagheri, "Design and Implementation of Matrix Converter to Reduce the Effects of Wind Speed Fluctuations in PMSG Wind Turbine Generation System", IEEE conference , Developments in renewable energy technology (ICDRET), pp. ۱-۴, jan ۲۰۱۲.
- [۸] H. Kazemi Kargar, A. Nateghi, A. Khodamoradi "A New Approach for Wind Speed Behavior Prediction" International Journal Of Advanced Renewable Energy Research, Vol. ۱, Issue. ۲, pp. ۹۹-۱۰۲, ۲۰۱۲.
- [۹] A John Wiley and Sons, Ltd Publication "Wind Energy Generation Modelling and Control" published ۲۰۰۹.
- [۱۰] Chinchilla, M; Arnaltes, S; Burgos, J.C, "Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. ۲۱, no. ۱, pp. ۱۳۰-۵, March ۲۰۰۶.