



کنترل برداری ژنراتور القایی دو سو تغذیه در سیستم تبدیل انرژی باد

امیدرحمانی^{۱*}، پرویز امیری^۲

*omidrahmani533@yahoo.com

ارسال: بهمن ماه ۹۵ پذیرش: تیر ماه ۹۶

چکیده

یکی از روش‌های پرکاربرد جهت بهره‌برداری از انرژی باد استفاده از توربین‌های بادی می‌باشد. این توربین‌ها برای تولید برق از ماشین‌های الکتریکی مختلفی استفاده می‌کنند که در میان این ماشین‌ها، ژنراتور القایی دو سو تغذیه به دلیل مزایایی که دارد سهم بیشتری را به خود اختصاص داده است. روش‌های مختلفی برای کنترل ژنراتور القایی دو سو تغذیه وجود دارد، که یکی از رایج‌ترین و بهترین آنها روش کنترل برداری است. برای اینکه بتوانیم توان اکتیو تولید شده توسط ژنراتور را به راحتی کنترل کنیم در این مقاله روش کنترل برداری براساس کنترل بردا جهت شار روتور پیشنهاد شده است. عملکرد روش ارائه شده با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی و هم‌چنین نتایج عملی موردتجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در یک راه‌انداز آزمایشگاهی، بر اساس پردازنده‌های سیگنال دیجیتال، کنترل برداری است. در روش جهت‌یابی شار روتور برخلاف جهت‌یابی شار استاتور علاوه بر اینکه ۳.۲ ثانیه پس از شروع شبیه‌سازی سیستم به حالت پایدار می‌رسد؛ مجموع اعوجاج هارمونیک جریان THD نیز ۲٪ کاهش یافته است. سیستم کنترلی در محیط Matlab/Simulink مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است، این محیط برای مدل‌سازی همه‌ی انواع ساختارهای ژنراتورهای القایی مناسب می‌باشند.

کلمات کلیدی: کنترل برداری، ژنراتور دو سو تغذیه، مبدل پست به پست، انرژی باد.

۱. مقدمه

ظرفیت انرژی باد در سراسر جهان طی چند سال اخیر رشد چشمگیری داشته است. در سال ۲۰۰۸، ظرفیت جهانی با افزایش ۲۹٪ از ۹۳.۹ GB عبور کرده و به بیش از ۱۲۱ GB رسیده است [۱]. امروزه استفاده از ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه Doubly fed induction Generator (DFIG) به دلیل انعطاف‌پذیری، استحکام و چند ظرفیتی بودن تا حد بسیاری ایده‌آل بوده‌اند؛ بدین دلیل یکی از روش‌های پرکاربرد جهت بهره‌برداری از انرژی باد گردیده است. با این وجود، شبکه‌های متصل به سیستم تبدیل انرژی باد Wind Energy Conversion System (WECS) که بر اساس فن‌آوری DFIG کار می‌کنند. هنوز هم با چالش‌های متعدد و مهمی در طول مسیر همانند، ثبات و پایداری شبکه، کیفیت توان [۲، ۳]، ولتاژ پایین، خطاهای جریان، عدم تعادل فاز [۴] عملکرد بدون سنسور و دنبالگر نقطه حداکثر توان Maximum Power Point Tracker (MPPT) [۵]، روبه‌رو است. به هر حال نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد کنترل دستگاه توسط

خودش است. روش‌های متعددی جهت کنترل در مقالات ارائه شده‌اند، از کنترل‌کننده‌های ساده و تا حدی با لغزش و خطای زیاد تا کنترل‌کننده‌های پیچیده و در عین حال انعطاف‌پذیر [۶، ۷].

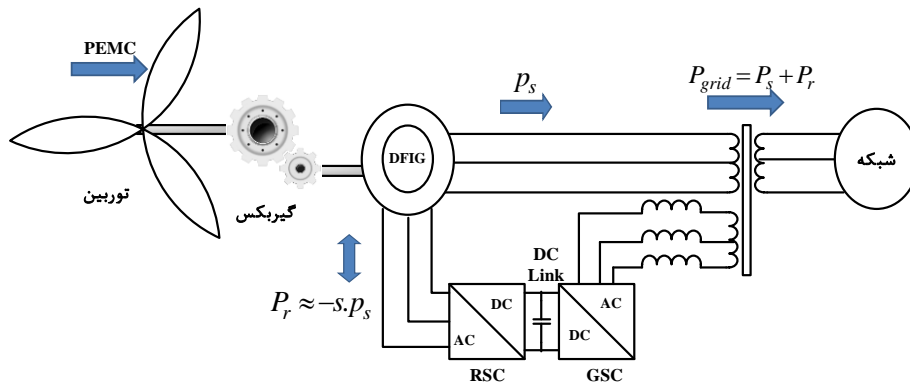
روش کلاسیک برای کنترل توان اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی دو سو تغذیه، روش کنترل برداری می باشد. که برای پیاده سازی روش کنترل برداری از کنترلر PI استفاده می شود [۸]. مطالعات و تحقیقات زیادی برای کنترل توان اکتیو و راکتیو توربین بادی DFIG، با استفاده از کنترل برداری صورت گرفته است. از کنترل برداری بر مبنای کنترل کننده های فازی گرفته تا تغییرات سرعت باد [۹ و ۱۰]. همچنین در برخی از مقالات برای اینکه بیشتر توان اکتیو و راکتیو با استفاده از روش کنترل برداری به شبکه اعمال شود از مدولاسیون های مختلفی مانند SVM و... استفاده شده است [۱۱]. اما در تمام تحقیقاتی که صورت گرفته است روش کنترل برداری بر مبنای جهت یابی شار استاتور است.

در این مقاله یک مطالعه پایه‌ای و اساسی با روش کنترل برداری VC که یکی از روش‌های کنترل DFIG با عملکرد خوب می‌باشد؛ صورت گرفته است. در تمام مقالاتی که در زمینه کنترل برداری VC نوشته شده است، برای کنترل توان های اکتیو و راکتیو محاسبات بر اساس جهت یابی شار استاتور بوده است. که در این مقاله برای کنترل توان های اکتیو و راکتیو محاسبات بر مبنای جهت یابی شار روتور می باشد. در بخش دوم که DFIG در سیستم تبدیل انرژی باد WECS است؛ پس از بیان پیکربندی درایو شریوس Scherbius، الگوی DFIG معرفی می گردد. سپس در بخش سوم روش کنترلی VC شامل مقدمه‌ای بر روش کنترل برداری VC، شماتیک VC، نتایج شبیه‌سازی با VC و نتایج تجربی با VC بیان می گردد. بخش چهارم عملکرد استراتژی کنترل شامل ارزیابی عملکرد و توصیه‌ها و دستورالعمل‌های پیاده‌سازی است. در انتها نیز نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲. DFIG در سیستم تبدیل انرژی باد WECS

۲.۱. پیکربندی Scherbius

در [۷] برخی از نتایج تجربی در زمینه مدت زمان استفاده از DFIG در توربین بادی سرعت متغیر بیان گردیده است. در سیستمی که با مبدل پشت به پشت Back to Back توسط VC کنترل می‌شود؛ پیکربندی پیشنهادی راه‌انداز Scherbius قادر است، توان اکتیو و راکتیو را مستقیماً تنظیم کند. پیکربندی استاندارد Scherbius؛ که یک شبکه متصل به WECS بر مبنای DFIG است، در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد، توربین بادی؛ توان مکانیکی را از طریق گیربکس منتقل می‌کند. این گیربکس بر اساس سرعت اسمی توربین، تعداد ژنراتورهای دوقطبی و فرکانس شبکه کالیبره می‌شود.



شکل ۱- شبکه متصل شده به DFIG

سرعت باد، آیرودینامیک توربین و نقطه کار ماشین؛ توان الکتریکی تولیدی را تغییر می‌دهد. توان لغزنده Slip power که وابسته به سرعت باد، آیرودینامیک توربین و نقطه کار ماشین است؛ از/ به مدار روتور به واسطهٔ مبدل پشت به پشت که متشکل از یک کنترل‌کنندهٔ سمت روتور Rotor Side Converter (RSC) جهت کنترل ماشین و کنترل‌کنندهٔ سمت شبکه Grid Side Converter (GSC) جهت تنظیم لینک DC و کنترل ضریب توان در نقطهٔ اتصال Point of common coupling (PCC) می‌باشد؛ شارش می‌کند.

۲.۲. الگوی DFIG

DFIG دو دسته سیم‌پیچ سه فاز که شامل سیم‌پیچ‌های خودش و اندوکتانس‌های متقابل اش است، می‌باشد. مدل ریاضی متغیر با زمان ماشین از تغییر اندوکتانس‌های متقابل هنگام چرخش ماشین و تغییر زاویهٔ بین مدارهای روتور و استاتور با زمان حاصل می‌شود. وابستگی به زاویه در الگوی DFIG و همچنین پیچیدگی‌های مرتبط با آن توسط موارد زیر بر طرف می‌گردد.

(۱) انتقال مقادیر از سه فاز abc به مقادیر دو محوره $\alpha\beta$ (انتقال کلارک).

(۲) تبدیل مقادیر $\alpha\beta$ به مولفه‌های dq متعامد و مستقیم که به قاب گردان مرجع dq به طور سنکرون اشاره دارد (انتقال پارک).

طبق [۱۲] مدل DFIG در قاب مرجع سنکرون dq با استفاده از معادلات (۱-a) تا (۱-g) به دست می‌آید.

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + s \lambda_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} \quad (1-a)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + s \lambda_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} \quad (1-b)$$

$$v'_{qr} = R'_r i'_{qr} + s \lambda'_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda'_{dr} \quad (1-c)$$

$$v'_{dr} = R'_r i'_{dr} + s \lambda'_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \lambda'_{qr} \quad (1-d)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_M i'_{qr}; \quad \lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_M i'_{dr} \quad (1-e)$$

$$\lambda'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_M i_{qs}; \quad \lambda'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_M i_{ds} \quad (1-f)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (1-g)$$

که:

$$L_s = L_{ls} + L_M; \quad L'_r = L'_{lr} + L_M; \quad L_M = \frac{3L_{ms}}{2}$$

که در آن‌ها v_s و v'_r ولتاژهای استاتور و روتور، i_s و i'_r جریان‌های استاتور و روتور، λ_s و λ'_r شار استاتور و روتور، R_s و R'_r مقاومت‌های استاتور و روتور، ω_e و ω_r سرعت الکتریکی و مکانیکی روتور، L_s ، L'_r و L_M اندوکتانس استاتور، اندوکتانس روتور و اندوکتانس متقابل، T_e گشتاور الکترومغناطیسی، P_p ماشین دوقطبی، L_{ls} و L'_{lr} اندوکتانس نشی استاتور و روتور، L_{ms} اندوکتانس مغناطیسی استاتور و S عملگر مشتق می‌باشند.

۴. کنترل برداری DFIG

۴.۱. مقدمه ای بر کنترل برداری VC

در شبکه متصل شده به DFIG، با صرف نظر از اثر مقاومت استاتور و با فرض ولتاژهای شبکه، شار استاتور بایستی ثابت بوده و توسط ولتاژ شبکه اعمال گردد. بردار شار استاتور در مختصات استاتیکی $\alpha\beta$ از معادله (۲) به دست می آید [۱۳].

$$\lambda_{\alpha\beta s} = \int (v_{\alpha\beta s} - R_s i_{\alpha\beta s}) dt \quad (2)$$

با توجه به رابطه بالا می توان معادلات (۱-a) تا (۱-d) را به واسطه هماهنگ کردن بردار شار استاتور λ_s در معادله (۳) با محور مستقیم قاب مرجع گردان dq، ساده تر کرد در حالیکه:

$$\lambda_s = |\lambda_{\alpha\beta}| \angle(\lambda_{\alpha\beta}) \quad (3)$$

که در آن:

$$\angle(\lambda_{\alpha\beta}) = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_\alpha}{\lambda_\beta} \right); \quad |\lambda_{\alpha\beta}| = \sqrt{\lambda_\alpha^2 + \lambda_\beta^2}$$

مدل ساده برای DFIG از معادلات (۴-a) تا (۴-d) به دست می آید [۱۲].

$$v_{qs} = \omega_e \lambda_{ds} = v_s \quad (4-a)$$

$$v_{ds} = 0 \quad (4-b)$$

$$v'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \sigma L'_r s i'_{qr} + \omega_{slip} \left(\frac{L'_M}{L_s} I_{ms} + \sigma L'_r i'_{dr} \right) \quad (4-c)$$

$$v'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \sigma L'_r s i'_{dr} - \omega_{slip} \sigma L'_r i'_{qr} \quad (4-d)$$

که:

$$\lambda_{ds} = \lambda_s \cong L_M I_{ms}; \quad \lambda'_{qr} = \sigma L'_r i'_{qr}$$

$$\lambda'_{qr} = L_M^2 I_{ms} / L_s + \sigma L'_r i'_{dr}; \quad I_{ms} = \lambda_{ds} / L_M$$

$$\sigma = 1 - L_M^2 / (L_s L'_r)$$

که در آنها σ ضریب (شاخص) نشت، ω_{slip} و I_{ms} می باشند. با حل معادلات (۴-c) و (۴-d) عبارتی برای جریان های i'_{dr} و i'_{qr} از معادلات ولتاژ روتور v'_{dr} ، v'_{qr} و جزء EMF ناشی از زاویه سرعت لغزشی ω_s به دست می آید.

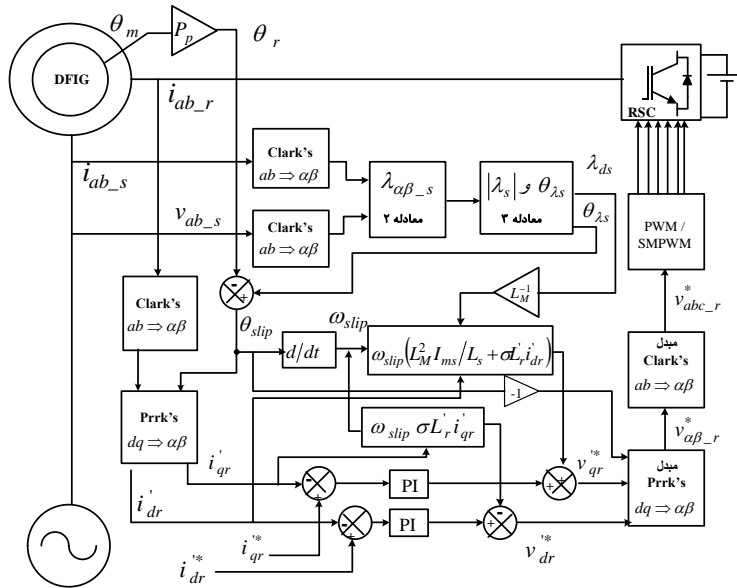
$$i'_{qr} = -\frac{R'_r}{\sigma L'_r} i'_{qr} + \frac{1}{\sigma L'_r} v'_{qr} - \omega_s i'_{dr} + v'_q \quad (5-a)$$

$$i'_{dr} = -\frac{R'_r}{\sigma L'_r} i'_{dr} + \frac{1}{\sigma L'_r} v'_{dr} - \omega_s i'_{qr} \quad (5-b)$$

$$v'_q = \frac{\omega_s L_M^2 I_{ms}}{\sigma L'_r L_s}$$

۲.۴. شماتیک VC برای DFIG

کنترل کننده VC در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می گردد، جریان روتور (i_{ab_r}) پس از اندازه گیری به قاب مرجع dq (i'_{dqr}) انتقال می یابد. سپس از جریان های مرجع (i'_{dqr}) کم می شود و سیگنال های خطا محاسبه می گردند. این سیگنال وظیفه راه اندازی دو کنترل کننده PI را به عهده دارد.



شکل ۲- شماتیک کنترل برداری WESC بر مبنای DFIG

دو عبارت $\omega_{slip}(L_M^2 I_{ms}/L_s + \sigma L'_r i'_{dr})$ و $-\omega_{slip}\sigma L'_r i'_{qr}$ به خروجی کنترل کننده های PI جهت جبران سازی اضافه می گردد تا یک چهارم منابع ولتاژ (v_{qr}^*) و مستقیم (v_{dr}^*) را ترکیب کند، سپس ولتاژهای v_{qr}^* و v_{dr}^* جهت اعمال به مدار روتور توسط RSC، به ولتاژهای سه فاز Vabc تبدیل می شوند.

برای تبدیلات ضروری قاب مرجع دو موقعیت زاویه ای مورد نیاز است: ۱- زاویه مکانیکی روتور θ_m ۲- موقعیت زاویه ای شار استاتور $\theta_e = \angle \lambda_{\alpha\beta}$ که از معادلات (۲) و (۳) می توان به دست آورد.

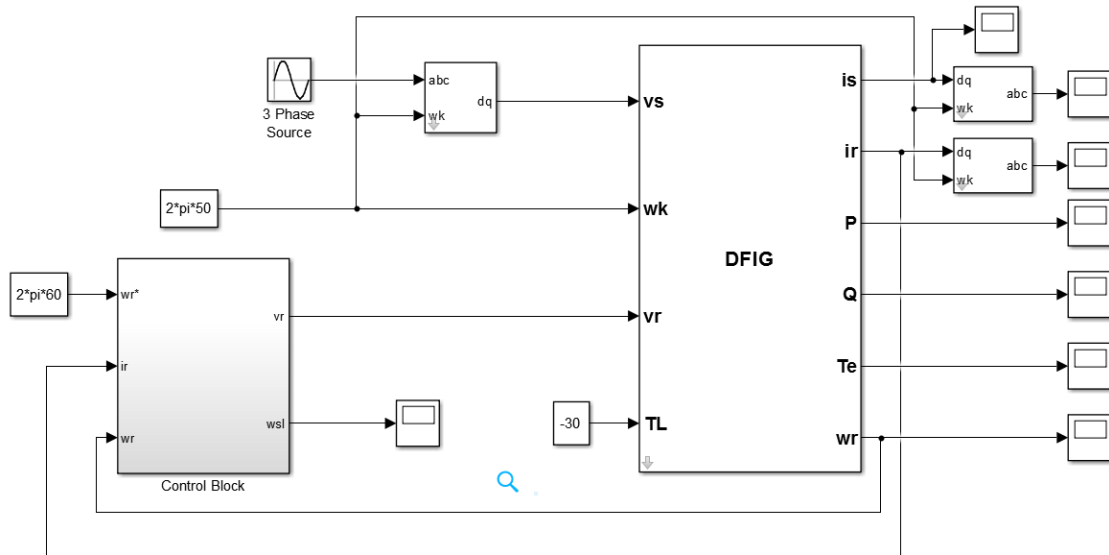
جریان های مرجع i'_{dr} و i'_{qr} به ترتیب به گشتاور الکتریکی و ضریب قدرت در بخش استاتور مربوط می شوند. جریان i'_{dr} را می توان با توجه به ضریب قدرت واحد (یعنی $i_{ds}=0$) از معادله (۴-ا) و جریان i'_{qr} را از حل معادله (۱-ع) برای i_{dq} و سپس با جایگذاری در معادله (۱-گ) به دست آورد.

$$i'_{dr} = v_{qs}/(\omega_e L_M) \tag{۶}$$

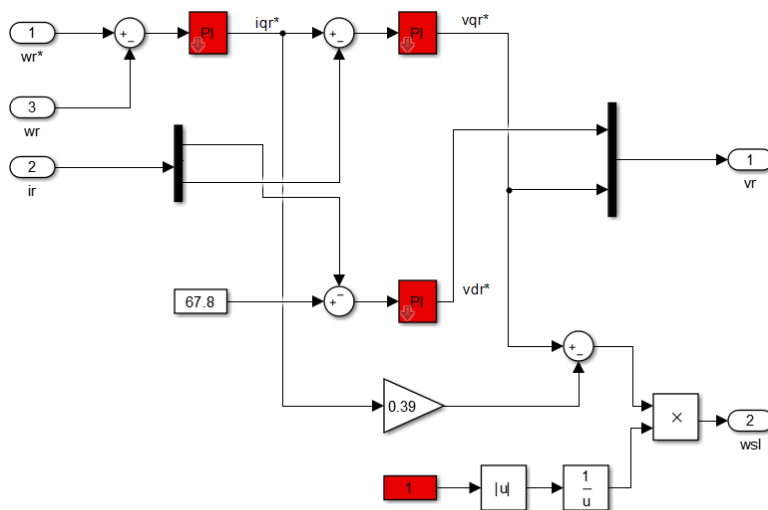
$$i'_{qr} = -2 T_e L_s / (3 P_p L_M^2 i'_{dr}) \tag{۷}$$

۳.۴. نتایج شبیه سازی با VC

شکل ۳ نمای کلی شبیه سازی روش کنترل برداری بر مبنای جهت یابی شار روتور در محیط Matlab/Simulink را نشان می دهد. مجموعه معادلات (۷-۱) برای پیاده سازی روش کنترل برداری ژنراتور القایی DFIG استفاده شده است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود گشتاور مکانیکی، ولتاژ و روی روتور و استاتور و سرعت سنکرون به عنوان ورودی ها و گشتاور الکترومغناطیسی، جریان روتور و استاتور و سرعت روتور به عنوان خروجی های سیستم شبیه سازی ما هستند. این سیستم شبیه سازی می تواند در هر دو مد زیر سنکرون و فوق سنکرون عمل کند. شکل ۴ روش پیاده سازی کنترل برداری را نشان می دهد، که در آن حلقه کنترل داخلی از سیگنال های توان اکتیو و راکتیو مطلوب، فرمان ولتاژ روتور v_d و v_q را محاسبه می کند. خروجی حلقه کنترل داخلی به فرمان گیت مبدل سمت روتور (اینورتر PWM) برای کنترل جریان های روتور که توان اکتیو و راکتیو استاتور را به صورت مستقل کنترل می کند به کار برده می شود. در شکل ۵ نتایج شبیه سازی کنترل کننده VC ارائه شده است. که در ابتدا شبیه سازی توربین بادی DFIG در نرم افزار Matlab جدا از شبکه می باشد. مقادیر پارامترهای ژنراتور القایی دو سو تغذیه شبیه سازی شده در این مقاله در جدول ۱ آورده شده است.



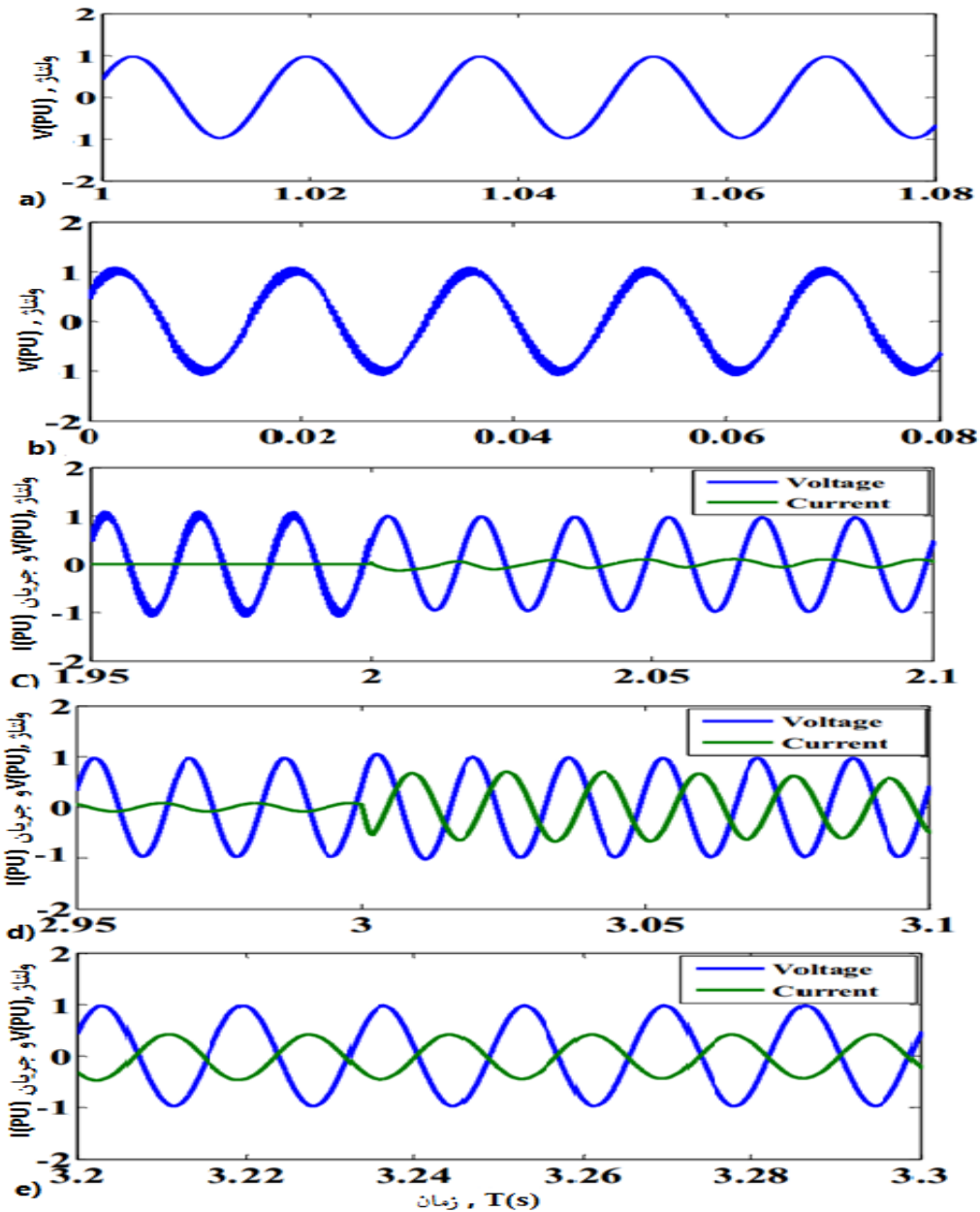
شکل ۳- پیاده سازی توربین بادی DFIG



شکل ۴- پیاده سازی روش کنترل برداری بر مبنای جهت یابی شار روتور

جدول ۱- مقادیر پارامترهای ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شبیه سازی شده

توان نامی ژنراتور القایی	۳ کیلووات
فرکانس شبکه	هرتز ۵۰-۰
مقاومت استاتور	$R_s = 12.5 \Omega$
اندوکتانس نشتی استاتور	$L_s = 23.3 \text{ mH}$
مقاومت اهمی رتور	$R_r = 3.9 \Omega$
اندوکتانس نشتی رتور	$L_r = 23.3 \text{ mH}$
اندوکتانس مغناطیس کنندگی	$L_m = 477 \text{ mH}$
ماشین دوقطبی	$P_p = 2$
ولتاژ خط	DC=120 V
حداکثر توان	$P_{MAX} = 0.75 \text{ kw}$



شکل ۵- (a) ولتاژ شبکه (b) ولتاژ پایانه ژنراتور (c) ولتاژ و جریان ژنراتور در زمان اتصال به شبکه (d) ولتاژ و جریان ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (e) ولتاژ و جریان ژنراتور در حالت دائم

در این شبیه‌سازی سرعت ماشین از ۰ تا ۲۱۰ rad/s متغیر می‌باشد.

(۱) $0 \leq t \leq 2$ ژنراتور به شبکه وصل نمی‌باشد.

(۲) $2 \leq t \leq 3$ در زمان ۲ ژنراتور به شبکه وصل شده در این حالت توان خروجی ژنراتور روی صفر تنظیم شده

است، همچنین از زمان ۲ تا ۳ مقداری کمی جریان با شبکه مبادله می‌کند.

(۳) $3 \leq t \leq 3.2$ در زمان ۳ ژنراتور توان اکتیو را به شبکه تزریق می‌کند که در این زمان مقدار توان اکتیو بر روی

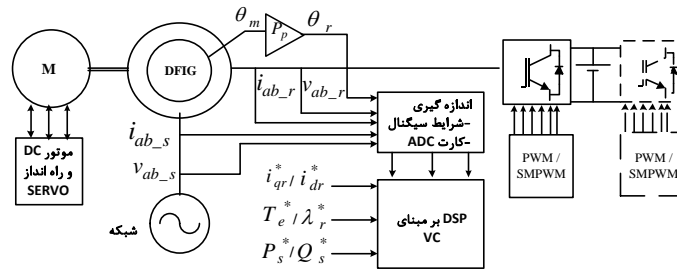
صفر تنظیم شده است. از زمان ۳ تا ۳.۲ این تغییر توان باعث بروز حالت گذرا در سیستم می‌شود.

(۴) $3.2 \leq t$ ژنراتور به حالت پایدار می‌رسد.

عملکرد قابل توجه کنترل‌کننده را می‌توان در سراسر شبیه‌سازی مشاهده نمود.

۴.۴ نتایج تجربی با VC

شکل ۶ بلوک دیاگرام سیمولاتور واقعی DFIG جهت پیاده‌سازی روش کنترل برداری را نشان می‌دهد. که این روش سیمولاتور واقعی بر پایه پردازنده‌های سیگنال دیجیتال DSP است. [۱۳].



شکل ۶- بلوک دیاگرام سیمولاتور واقعی DFIG

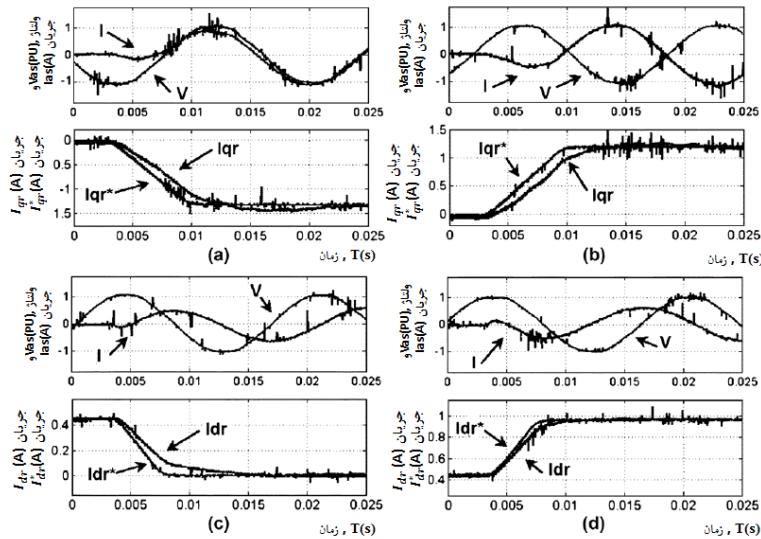
در این روش موتور DC جایگزین توربین بادی که برای راه‌اندازی DFIG مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ گردیده است.

مشخصات سخت‌افزاری و پارامترهای ماشین در جدول ۲ بیان شده است [۱۳].

جدول ۲- پارامترهای DFIG آزمایشگاهی

-DFIG $P_m=0.2[kW]$, $P_p=2$, $L_{lr}=23.3[mH]$, $L_{ls}=23.3[mH]$, $L_M=477[mH]$, $R_s=12.5[\Omega]$, $R_r=3.9[\Omega]$
- مبدل پشت به پشت FSwitching(0-20[Khz]), $P_{max}=0.75[kW]$, $DCLink=120[V]$ IRAMS10UP60B و GSC بر مبنای ماژول یکسوساز بین‌المللی
- کنترل‌کننده دیجیتال کارت EZ-DSP F2812 با TI'Z TMS320F2812@ 150 Mhz
- درایو موتور DC درایو موتور AC-DC SECO 1.5 Kw و ماشین DC 2.5 Kw

شکل ۷؛ پاسخ حالت گذرا و دائمی در زمان تغییرات جریان i_{qr}^* که به منظور کارکردن DFIG در حالت موتوری (a-۵) و ژنراتوری (b-۵) را نشان می‌دهد. در هر دو حالت جریان i_{dr}^* برای داشتن ضریب توان واحد در استاتور تعیین (Set) شده است. کنترل جریان i_{dr}^* در شکل‌های ۵.c و ۵.d نشان داده می‌شود [۱۳].



شکل ۷- شکل موج ولتاژ و جریان برای VC در (a) حالت موتوری (b) حالت عملکرد ژنراتوری. رفتار کنترلی DFIG برای توان راکتیو (c) Sink یا (d) منبع

در این حالت جریان i_{qr}^* به سبب درک بهتر تعامد بین شکل موج ولتاژ و جریان مساوی صفر قرار داده شده است.

۵. بیان عملکرد استراتژی کنترل

۵.۱. ارزیابی عملکرد

پس از معرفی ویژگی‌های اصلی و شبیه‌سازی تجربی کنترل‌کننده مورد نظر، مزایا و معایب این روش در هنگام استفاده در DFIG بیان می‌گردد. داده‌های گزارش شده براساس آزمایش‌های تجربی، تحت شرایط نیمه آشفته بدست آمده است. در جدول ۳ پارامترها و متغیرهای ضروری ماشین جهت اجرای استراتژی کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۳- متغیرهای ماشین و پارامترهای لازم برای انجام استراتژی VC

پارامترهای مغناطیسی	VC
V_{abc_r}	-
V_{abc_s}	✓
i_{abc_r}	✓
i_{abc_s}	✓
ω_r	✓
θ_r	✓
L_M	✓
L_{lr}	✓
L_{ls}	✓

VC به دلیل استفاده از تغییرات فریم و مرجع و ساختار مبتنی بر حل آن، یکی از پیچیده‌ترین استراتژی‌های کنترلی است. مقادیر پاسخ گذرا در جدول ۴ با اعمال مراجع مختلف پله‌ای در استراتژی کنترلی زمان، به دست آمده است.

جدول ۴- پاسخ گذرا برای VC

مرجع	پاسخ گذرا VC برای [ms](transistroy)
پاسخ مرجع منفی: $i_{qr}^*/T_e^*/P_s^*$	۱۰
پاسخ مرجع مثبت: $i_{qr}^*/T_e^*/P_s^*$	۱۰
پاسخ مرجع منفی: $d_r^*/\lambda_r^*/Q_s^*$	۱۰
پاسخ مرجع مثبت: $d_r^*/\lambda_r^*/Q_s^*$	۵

جدول ۵ جزئیات بیشتری از محدودیت‌های روش کنترلی در زمان پیاده‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۵- ویژگی‌های تجربی استراتژی VC

ویژگی	VC
حداقل زمان کنترل چرخه	۴۲ μs
حداکثر زمان کنترل چرخه	۲۰۰ μs
زمان کنترل چرخه واقعی	۵۰ μs
تعداد سیگنال‌های نمونه	۷
حداقل پهنای باند سنسور جریان	۲ kHz
نوع ماژول RSC	PWM
انکدر مورد نیاز	ω_r و θ_r
مجموع اعوجاج هارمونیک جریان THD	۲% ↓

توجه می‌گردد، اگرچه پیچیدگی در ساختار اجرای VC محدودیت استفاده از ابزار را کمتر می‌کند با این وجود کیفیت شکل موج جریان به نسبت سایر روش‌های کنترلی خوب است.

۲.۵. توصیه‌ها و دستورالعمل‌های پیاده‌سازی

چند توصیه و دستورالعمل جهت پیاده‌سازی نهایی قابل ذکر است:

- در استراتژی کنترلی، بیشتر بخش‌ها که شامل تغییرات دینامیکی و مشخصات کنترلی می‌باشد همانند تنظیم کنترل‌کننده با تغییر مشخصات باد (MPPT) که به منظور پایداری سیستم انجام می‌گیرد نشان داده می‌شود.
- در شرایط عملیاتی متفاوت، کنترل‌کننده سطوح مختلفی از عملکرد را از خود بروز می‌دهد. برای کاربرد حساس THD، کنترل‌کننده VC برای تولید هارمونیک گزینه بسیار مناسبی است. کنترل‌کننده VC تحت شرایط اغتشاش عملکرد مناسبی را ارائه می‌دهد.
- فرآیندهای انتگرال VC با تغییرات زمان (یعنی تنظیم‌کننده PI و ناظر شار) می‌توانند به عنوان فرآیندهایی که تا حدی نویز توزیع نرمال اندازه‌گیری شده را محدود می‌کند، عمل کنند.
- محدودیت‌های پیاده‌سازی به سنجش و شرایط سیگنال (یعنی ابزار دقیق) و همچنین توان محاسباتی مربوط می‌گردند. کنترل‌کننده VC نیاز به قدرت پردازنده بسیار بالایی دارد به عنوان پیشنهاد این نکته قابل ذکر است که با استفاده از دستگاه‌هایی همانند FPGA می‌توان با انجام محاسبات موازی در زمان پردازش سیگنال، بار محاسبات را کاهش داد.

۶. نتیجه گیری

همانگونه که مشاهده شد؛ VC به دلیل استفاده از تغییرات فریم و ساختار مبتنی بر مدل آن، یکی از پیچیده‌ترین استراتژی‌های کنترلی است اما کیفیت شکل موج جریان خوب می‌باشد. این کنترل‌کننده عملکرد قابل توجهی برای هر دو پاسخ دائمی و گذرا دارد. این روش، سرعت متوسطی در پاسخ گذرا دارد و این بیانگر این نکته است که نتایج ارائه شده برای طیف گسترده‌ای از DFIG به لحاظ کیفی بیان می‌گردد. در آزمایش تجربی انجام گرفته؛ مجموع اعوجاج هارمونیک جریانی THD کاهش یافته است. در نهایت به دلیل ارائه تئوری کنترل‌کننده، شبیه‌سازی و کار تجربی؛ بیان مزایا و معایب این استراتژی کنترلی بسیار کارا است.

۷. منابع

1. World Wind Energy Association (WWEA) Report 2009 [Online], Available: <http://www.wwindea.org/home/index.php> (accessed on March 2, 2011).
2. M. Nunes, J. Lopes, and H. Zurn, "Influence of the variable-speed wind generators in transient stability margin of the conventional generators integrated in electrical grids," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 692–701, December 2004.
3. E. Tremblay, A. Chandra, and P. Lagace, "Grid-side converter control of DFIG wind turbines to enhance power quality of distribution network," in *Proc. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting (PES 2006)*, Montreal, QC, Canada, June 2006.
4. D. Xiang, L. Ran, P. J. Tavner, and S. Yang, "Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 652–662, September 2006.
5. B. Shen, B. Mwinyiwiwa, Y. Zhang, and B. T. Oo, "Sensorless maximum power point tracking of wind by DFIG using rotor position phase lock loop (PLL)," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 4, pp. 942–951, April 2009.
6. F. Blaschke, "Method for Controlling Asynchronous Machines," U.S. Patent 3 824 437, 1974.
7. R. Pena and J. C. Clare, "Doubly fed induction generator using back to back PWM converters and its application to variable-speed wind energy generation," *Proc. IEEE, Electric Power Applications*, vol. 143, no. 3, pp. 231–241, May 1996.
8. J. Mohammadi, S. Vaez-Zadeh, S. Afsharnia, E. Daryabeigi, "A Combined Vector and Direct Power Control for DFIG-Based Wind Turbines," *Proc. IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 767–775, February 2014.
9. H. M. Jabr, D. Lu, N. C. Kar, "Design and Implementation of Neuro-Fuzzy Vector Control for Wind-Driven Doubly-Fed Induction Generator," *Proc. IEEE, Electric Power Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 404–413, Oct 2011.
10. S. Li, S. Member, T. A. Haskew, S. Member, K. A. Williams, and Richard P. Swatloski, "Control of DFIG Wind Turbine With Direct-Current Vector Control Configuration," *Proc. IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 1–11, Jan 2012.
11. P. Cheng, H. Nian, C. Wu, Z. Q. Zhu, "Direct Stator Current Vector Control Strategy of DFIG Without Phase-Locked Loop During Network Unbalance," *Proc. IEEE, Electric Power Applications*, vol. 1, no. 32, pp. 284–297, Jan 2016.
12. P. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Hoboken, NJ: Wiley, 2002.
13. E. Tremblay, S. Atayde, A. Chandra, "Comparative Study of Control Strategies for the Doubly Fed Induction Generator in Wind Energy Conversion Systems: A DSP-Based Implementation Approach," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 2, no. 3, pp. 288–299, July 2011.