



مطالعه روش‌های کنترل توربین بادی DFIG در سیستم تبدیل انرژی براساس مدل سازی، شبیه سازی و پیاده سازی عملی

امین رحمانی^{۱*}، محمد حسن حسینی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه آزاد تهران جنوب

۲- مدرس دانشگاه، دانشگاه آزاد تهران جنوب

*Aminrahmani8294@gmail.com

ارسال: اردیبهشت ماه ۱۴۰۱ پذیرش: خرداد ماه ۱۴۰۱

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 دو مورد از رایج‌ترین و بهترین آنها روش کنترل مستقیم گشتاور و روش مستقیم توان است. در این مقاله عملکرد این دو روش اساسی با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی و هم‌چنین نتایج عملی مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار می‌گیرند. نتایج بیان‌گر این نکته می‌باشد که، گرچه روش کنترل مستقیم توان قابلیت ردیابی نقطه حداکثر توان را ندارد ولی به دلیل کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی، وابستگی کمتر به پارامترهای ماشین، پیچیدگی کلی اجرای کمتر و همچنین بهبود عملکرد در زمان آشفستگی به نسبت روش کنترل مستقیم گشتاور، روش کنترلی مناسب‌تری می‌باشد.

کلمات کلیدی: انرژی باد، توربین بادی، ژنراتور القایی دو سو تغذیه، کنترل مستقیم گشتاور، کنترل مستقیم توان.

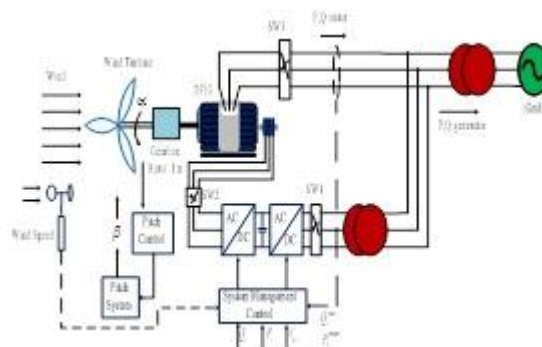
۱- مقدمه

در چند سال گذشته در میان تمام منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی باد به عنوان یکی از عوامل اصلی شناخته شده است. به طوری که ظرفیت کل انرژی باد نصب شده در سراسر جهان طبق آمارهای ارائه شده در حال رشد است [۱]. امروزه یکی از گسترده‌ترین فن‌آوری‌ها برای بهره‌برداری از انرژی باد توسط توربین‌های بادی استفاده از ژنراتور القایی دو سو تغذیه Doubly fed induction Generator (DFIG) است. این ژنراتور 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 [۲]. 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 [۳، ۴]، ولتاژ پایین، خطاهای جریان، عدم

تعداد فاز [۵] عملکرد بدون سنسور و دنبالگر نقطه حداکثر توان Maximum Power Point Tracker (MPPT) [۶]، روبه‌رو است. به هر حال نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد. 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 و همچنین کنترل برداری (VC) [۷, ۸]. تا به امروز، در تمام مقالات ارائه شده در زمینه توربین‌های بادی هیچ مقایسه‌ی برای الگوریتم‌های کنترل WECS بر اساس فن آوری ژنراتور القایی دو سو تغذیه DFIG صورت نگرفته است. در این مقاله یک مطالعه پایه‌ای و اساسی با دو روش کنترل مستقیم گشتاور DTC و کنترل مستقیم توان DPC که از روش‌های کنترل DFIG با عملکرد خوب می‌باشند؛ صورت گرفته است. در بخش دوم DFIG در سیستم تبدیل انرژی باد WECS است. سپس در بخش سوم روش‌های کنترل DFIG شامل کنترل DTC و کنترل DPC بررسی می‌گردد. پس از آن عملکرد استراتژی‌های کنترل و در انتها نیز نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- توربین بادی DFIG در سیستم تبدیل انرژی

توربین بادی DFIG شامل سه بخش توربین بادی، ژنراتور القایی و مبدل الکترونیک قدرت است (شکل ۱). در این نوع توربین، انرژی باد توسط پره‌ها دریافت شده، سپس جعبه دنده این انرژی را به ژنراتور القایی منتقل می‌کند. ژنراتور، انرژی مکانیکی دریافتی را به انرژی الکتریکی تبدیل کرده و به شبکه تزریق می‌کند. در این نوع ژنراتورها استاتور مستقیماً به شبکه با فرکانس ثابت متصل است و سیم پیچ روتور به واسطه مبدل الکترونیک قدرت به شبکه متصل است [۹, ۱۰]. توان لغزنده Slip power که وابسته به سرعت باد، آیرودینامیک توربین و نقطه کار ماشین است؛ از مدار روتور به واسطه مبدل پشت به پشت که متشکل از یک کنترل‌کننده سمت روتور Rotor Side Converter (RSC) جهت کنترل ماشین و کنترل‌کننده سمت شبکه Grid Side Converter (GSC) جهت تنظیم لینک DC و کنترل ضریب توان در نقطه اتصال Point of common coupling (PCC) می‌باشد؛ شارش می‌کند [۱۱, ۱۲].



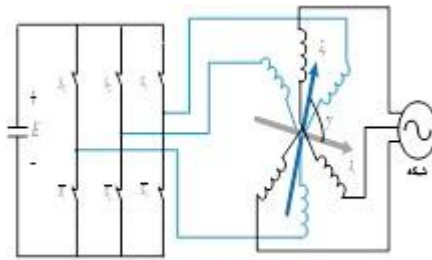
شکل ۱- شماتیک توربین بادی DFIG متصل به شبکه

۳- روش‌های کنترل DFIG

کنترل نقش بسیار مهمی در درایوها و همچنین فناوری توربین بادی ایفا می‌کند. کنترل DFIG در هنگام تولید انرژی در یک توربین بادی، لازم و اجتناب‌ناپذیر است. کنترل باعث می‌شود تا پارامترهای ژنراتور مانند گشتاور و توان اکتیو و راکتیو و هم چنین پارامترهای مبدل سمت شبکه مانند توان اکتیو و ولتاژ خط DC در مقدار بهینه نگه داشته شوند تا مقدار انرژی به دست آمده مناسب و حداکثر شود. به این منظور سیستم کنترلی، به همراه مدولاتور، وظیفه تولید پالس کلیدهای مبدل مطابق مرجع مطلوب را بر عهده دارد. تاکنون روش‌های مختلفی برای کنترل توربین بادی DFIG ارائه شده است که دو نمونه از مهم‌ترین آنها روش کنترل مستقیم گشتاور و کنترل مستقیم توان است. در این مقاله معایب و مزایای هر یک از این روش‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد [۹, ۱۳].

۳-۱- روش کنترل مستقیم گشتاور DTC

روش کنترل مستقیم گشتاور DTC نوعی روش کنترل برداری است که استفاده از پارامترهای ماشین را کم کرده و پیچیدگی الگوریتم کنترل برداری را کاهش می دهد. در این روش با استفاده از اطلاعات گشتاور و شار استاتور، بردارهای ولتاژ مناسب را از جدول کلیدزنی انتخاب کرده و با استفاده از آنها مستقیماً شار و گشتاور ماشین القایی را کنترل می کنند [۱۴-۱۵]. تکنیک‌های کنترل مستقیم، توانایی چشمگیری در اعمال ولتاژ خاص به سیستم توسط مبدل‌های کنترل کننده دیجیتال الکترونیک قدرت در کسر بسیار کوچکی از زمان را دارا می باشند. شکل ۲ مدار ساده استاتور و روتور DFIG که به ترتیب به شبکه و RSC متصل هستند، را نشان می دهد، که در آن از مقاومت های دستگاه چشم پوشی گردیده است. شار استاتور λ_s به طور مستقیم توسط ولتاژ شبکه ایجاد شده است و اندازه و زاویه شار روتور می تواند به صورت کامل توسط اعمال ولتاژ مناسب به مدار روتور با استفاده از RSC کنترل شود. گشتاور الکتریکی DFIG (T_e) و شار (به عنوان مثال توان اکتیو و راکتیو) بر اساس کنترل زاویه بین شار استاتور و روتور و بردار شار روتور γ و شار مغناطیسی روتور $|\lambda_r|$ به دست می آید.



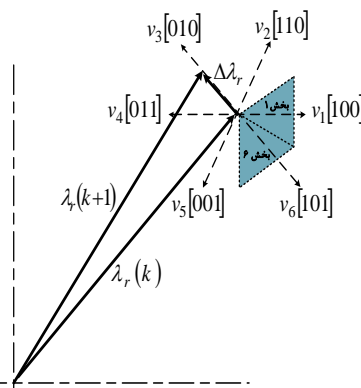
شکل ۲- مدار ساده استاتور و روتور DFIG

با چشم پوشی از مقاومت روتور، تغییرات شار روتور $\Delta\lambda_r$ در n امین بردار فضا V_n ، که در بازه زمانی کم Δt اعمال شده است از (۱) به دست می آید. در حالت گسسته، حالت بعدی شار روتور از (۲) تخمین زده می شود.

$$\Delta\lambda_r = \Delta t \cdot v_n \quad (1)$$

$$\lambda_r(k+1) = \lambda_r(k) + \Delta\lambda_r \quad (2)$$

شکل ۳، مطالب بیان شده را نمایش می دهد.



شکل ۳- اعمال تغییرات شار روتور $\Delta\lambda_r$ به عنوان یک بردار ولتاژ در فضا V_3 به مدار روتور از طریق RSC

جدول ۱، ۳ ورودی و یک خروجی دارد. ورودی‌ها شامل تغییرات شار روتور (λ_{r+} یا λ_{r-})، تغییرات گشتاور (T_{e+} یا T_{e-} یا T_e) و بخش جریان که شار روتور از آن طریق شارش می کند. خروجی نیز بهبود بردار فضایی است که به RSC اعمال می گردد [۱۶]. تغییرات مورد نیاز روتور و گشتاور از (۳) و (۴) به دست می آید [۱۷].

$$\lambda_{r+} \rightarrow |\lambda_r^*| \geq |\lambda_r| + \Delta\lambda_r \quad (3-a)$$

$$\lambda_{r-} \rightarrow |\lambda_r^*| \leq |\lambda_r| - \Delta\lambda_r \quad (3-b)$$

$$T_{e+} \rightarrow T_e^* \geq (T_e + \Delta T_e) \quad (4-a)$$

$$T_{e-} \rightarrow T_e^* \leq (T_e - \Delta T_e) \quad (4-b)$$

$$T_{e=} \rightarrow (T_e + \Delta T_e) \geq T_e^* \geq (T_e - \Delta T_e) \quad (4-c)$$

اندازه شار روتور $|\lambda_r|$ و زاویه جهت گیری از (۵) به دست می آید. همچنین گشتاور الکتریکی از (۶) حاصل می گردد.

جدول ۱- انتخاب بردار بهینه DTC

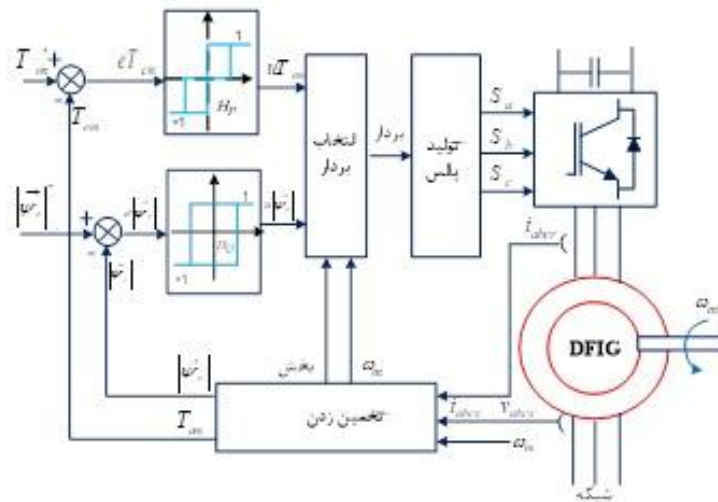
مرجع شار	مرجع گشتاور	بخش					
		۱	۲	۳	۴	۵	۶
λ_{r+}	T_{c+}	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_1
	$T_{c=}$	v_0	v_7	v_0	v_7	v_0	v_7
	T_{c-}	v_6	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
λ_{r-}	T_{c+}	v_3	v_4	v_5	v_6	v_1	v_2
	$T_{c=}$	v_7	v_0	v_5	v_0	v_7	v_0
	T_{c-}	v_5	v_6	v_1	v_2	v_3	v_4

$$|\lambda_r| = \sqrt{\lambda_{qr}^2 + \lambda_{dr}^2}; \angle(\lambda_r) = \tan^{-1}(\lambda_{qr}'/\lambda_{dr}') \quad (5)$$

$$\hat{T}_e = 3L_M (i_{qs}i_{dr}' - i_{ds}i_{qr}')/2 \quad (6)$$

۳-۱-۱- شمایک روش کنترل مستقیم گشتاور بر اساس سیستم تبدیل انرژی

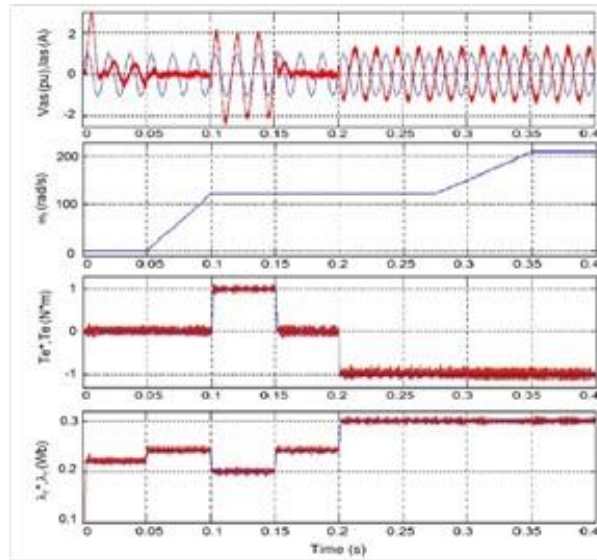
شکل ۴ استراتژی کامل DTC را نشان می دهد. خروجی جدول ۱ به طور مستقیم حالت های روشن/خاموش سوییچ های RSC را مشخص می کند و تنها یک مرجع انتقال برای جریان استاتور جهت تبدیل مولفه های ثابت abc به مولفه های گردان dq مورد نیاز است. در این مورد قاب مرجع گردان با زاویه الکتریکی روتور θ_r تراز شده است. (۳) و (۴) معادل یک زوج کنترل کننده هیستریزس هستند.



شکل ۴- شمایک روش کنترل مستقیم گشتاور

۳-۱-۲- نتایج شبیه سازی با روش کنترل مستقیم گشتاور

شکل ۵ نتایج شبیه سازی را برای استراتژی DTC نشان می دهد. شبیه سازی در مرجع dq انجام گرفته است.



شکل ۵- نتایج شبیه سازی روش کنترل مستقیم گشتاور DTC

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود ژنراتور DFIG در زمان ۰ تا ۰/۵ ثانیه دارای سرعت صفر است. که در این حالت ژنراتور در حال مصرف توان راکتیو است. از زمان ۰/۵ تا ۰/۱ ثانیه ژنراتور DFIG کم سرعت می گیرد که این افزایش سرعت باعث تغییر شار روتور براساس گشتاور می شود. ژنراتور DFIG در زمان ۰/۱ تا ۰/۱۵ ثانیه بصورت موتوری کار می کند. و از زمان ۰/۲ تا ۰/۴ ثانیه ژنراتور DFIG به حالت اولیه باز می گردد و به صورت ژنراتوری شروع به کار میکند. در فاصله زمانی بین عملکرد موتوری و ژنراتوری گشتاور نیز صفر می باشد.

۳-۲- روش کنترل مستقیم توان DPC

به علت تغییرات پارامترهای ماشین در زمان کار، غیر خطی بودن اینورترها و همچنین محدودیت حالت های کلیدزنی؛ روش های کنترلی غیرخطی از قبیل کنترل مستقیم توان (DPC) در دهه های اخیر ارائه شده است [۱۳، ۱۸]. در این روش به منظور کنترل لحظه ای گشتاور الکترومغناطیسی یا توان اکتیو و همچنین اندازه شار یا توان راکتیو، بر پایه انتخاب یک بردار ولتاژ و یک سیگنال کنترل میانگین استوار است. در کل روش DPC مقدمه تئوری خود را از روش DTC می گیرد. بدین صورت که در این روش نیز از روابط هندسی بین شارهای استاتور و روتور استفاده کرده و در حقیقت RSC کاملاً شار روتور را کنترل می کند.

در روش DPC به جای اینکه به طور مستقیم T_e و λr کنترل گردد، تاثیری که این مقادیر بر توان اکتیو و راکتیو استاتور دارند کنترل می گردد. این تغییرات نامحسوس در روش کنترلی DPC سبب ایجاد تاثیر قابل توجهی در استحکام و سهولت این استراتژی دارد. ویژگی های اصلی این روش شامل (۱) مستقل بودن از پارامترهای ماشین (۲) کاهش مقادیر الکترونیکی اندازه گیری شده (۳) نیاز نداشتن به تغییرات قاب مرجع؛ می باشد.

به طور کلی روش DPC از (۷-۱۰) و جداول ۳ تا ۵ بهره می گیرد. از (۷) و (۸) در قاب مرجع $\alpha\beta$ برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو استفاده می شود [۱۹، ۲۰].

$$P_s = 3/2(v_{\beta s}i_{\beta s} + v_{\alpha s}i_{\alpha s}) \quad (7)$$

$$Q_s = 3/2(v_{\beta s}i_{\alpha s} - v_{\alpha s}i_{\beta s}) \quad (8)$$

با محاسبه سیگنال کنترلی خطا $P_s \text{ error} = P_s^* - P_s$ و $Q_s \text{ error} = Q_s^* - Q_s$ (۹) و (۱۰) جهت تغییرات توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز، مورد استفاده قرار می گیرند. آستانه توان اکتیو ΔP و راکتیو ΔQ سیگنال های خطا به منظور محدود کردن فرکانس سوئیچینگ RSC مورد استفاده قرار می گیرد [۲۱].

$$Q_+ \Rightarrow Q_s \text{ error} \geq \Delta Q \quad (9)$$

$$Q_- \Rightarrow Q_{s_error} \leq -\Delta Q$$

$$P_+ \Rightarrow P_{s_error} \geq \Delta P$$

$$P_- \Rightarrow P_{s_error} \leq -\Delta P$$

(۱۰)

$$P_+ \Rightarrow \Delta P > P_{s_error} > -\Delta P$$

زمانی که تغییرات مناسب توان اکتیو (P_+ یا P_-) و راکتیو (Q_+ یا Q_-) که وابسته به موقعیت شار روتور است اعمال می‌گردد. با استفاده از جدول ۳ بردار فضای مطلوب جهت اعمال به روتور انتخاب می‌گردد. همچنین موقعیت شار روتور به وسیله جدول ۴ و ۵ تخمین زده می‌شود.

جدول ۳- انتخاب بردار بهینه DPC

توان راکتیو	توان اکتیو	بخش					
		1	2	3	4	5	6
Q_+	P_+	v_2	v_2	v_4	v_5	v_6	v_1
	P_-	v_0	v_7	v_0	v_7	v_0	v_7
	P_-	v_6	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
Q_-	P_+	v_2	v_4	v_5	v_6	v_1	v_2
	P_-	v_7	v_0	v_7	v_0	v_7	v_0

جدول ۴- تغییر توان راکتیو استاتور، ΔQ_s

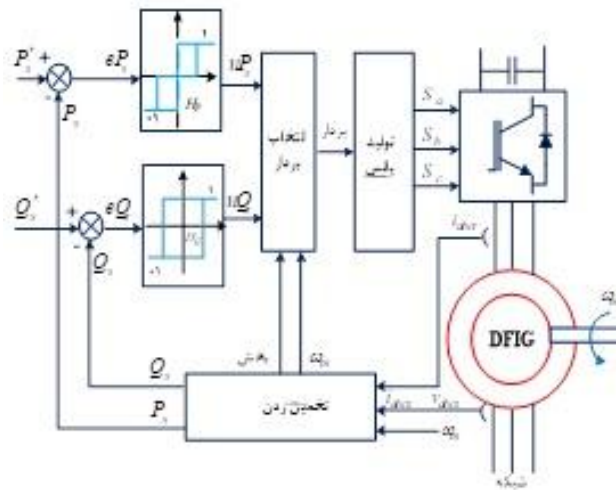
	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
بخش ۱	=	-	-	+	+	+	-	=
بخش ۲	=	-	-	-	+	+	+	=
بخش ۳	=	+	-	-	-	+	+	=
بخش ۴	=	+	+	-	-	-	+	=
بخش ۵	=	+	+	+	-	-	-	=
بخش ۶	=	-	+	+	+	-	-	=

۳-۲-۱- شمانیک روش کنترل مستقیم توان بر اساس سیستم تبدیل انرژی

بلوک دیاگرام روش کنترل توان (DPC) در شکل ۶ قابل مشاهده است. ابتدا کمیت‌های ورودی، مرجع توان اکتیو و راکتیو (P_s^* , Q_s^*)، با مقادیر واقعی خود که از روی جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده، محاسبه می‌گردند، مقایسه می‌شوند تا مقادیر خطا ایجاد گردند. سپس با استفاده از این خطاها مقادیر مناسب پالس تعیین شده و به کلیدهای قدرت اعمال می‌گردد. در ادامه بلوک-های مختلف و وظایف آن‌ها شرح داده خواهد شد. رابطه‌های (۹) و (۱۰) با کنترل کننده‌های هیستریزس مطابقت دارد که خروجی‌های تایید شده (آنالوگ با قسمت شار به روز شده) جدول ۳ را ایجاد می‌کند.

جدول ۵- تولید پالس

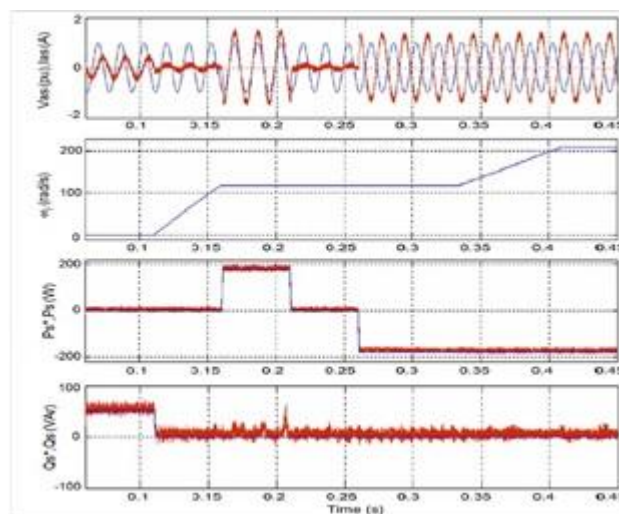
	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
بخش ۱	0	0	-1	1	0	-1	1	0
بخش ۲	0	1	0	-1	1	0	-1	0
بخش ۳	0	-1	1	0	-1	1	0	0
بخش ۴	0	0	-1	1	0	-1	1	0
بخش ۵	0	1	0	-1	1	0	-1	0
بخش ۶	0	-1	1	0	-1	1	0	0



شکل ۶- شماتیک روش کنترل مستقیم توان

۳-۲-۲- نتایج شبیه سازی با روش کنترل مستقیم توان

شکل ۵ نتایج شبیه سازی را برای استراتژی DPC نشان می دهد. شبیه سازی در مرجع dq انجام گرفته است. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود ژنراتور DFIG در زمان ۰ تا ۰/۱۱ ثانیه دارای سرعت صفر است. که در این حالت ژنراتور در حال مصرف توان راکتیو است. از زمان ۰/۱۱ تا ۰/۱۶ ثانیه ژنراتور DFIG کم سرعت می گیرد که این افزایش سرعت باعث می گردد تا توان راکتیو بر روی مقدار صفر نگه داشته شود. ژنراتور DFIG در زمان ۰/۱۶ تا ۰/۲۱ ثانیه بصورت موتوری کار می کند. و از زمان ۰/۲۶ تا ۰/۴۵ ثانیه ژنراتور DFIG به حالت اولیه باز می گردد و به صورت ژنراتوری شروع به کار میکند. در فاصله زمانی بین عملکرد موتوری و ژنراتوری توان اکتیو نیز صفر می باشد.

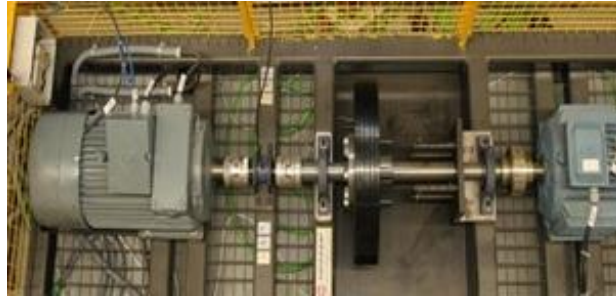


شکل ۷- نتایج شبیه سازی روش کنترل مستقیم توان DPC

۴- سیمولاتور توربین بادی DFIG

شکل ۸ نمایی از یک سیمولاتور واقعی را نشان می دهد. که برای تایید روش های کنترلی ذکر شده از آن استفاده شده است. و نتایج تجربی را با استفاده از آن بدست می آوریم. این سیمولاتور از یک ژنراتور القایی 11 KW و یک موتور القایی که نقش سیستم شبیه ساز توربین باید را ایفا می کند تشکیل شده است. که با استفاده از یک تاکومت به یکدیگر کوپل شده اند. پارامترهای ژنراتور القایی 11 KW در جدول ۶ ذکر شده است. هم چنین از یک انکودر برای اندازه گیری موقعیت روتور/ سرعت استفاده شده است. در این سیمولاتور استاتور به طور مستقیم به شبکه متصل است. آزمایش های مختلفی با استفاده از این

سیمولاتور برای بررسی عملکرد روش های کنترلی ارائه شده، صورت گرفته است. که تنها برخی از نتایج عملی ارائه شده است. سپس نتایج عملی با نتایج شبیه سازی مورد بررسی قرار می گیرد.



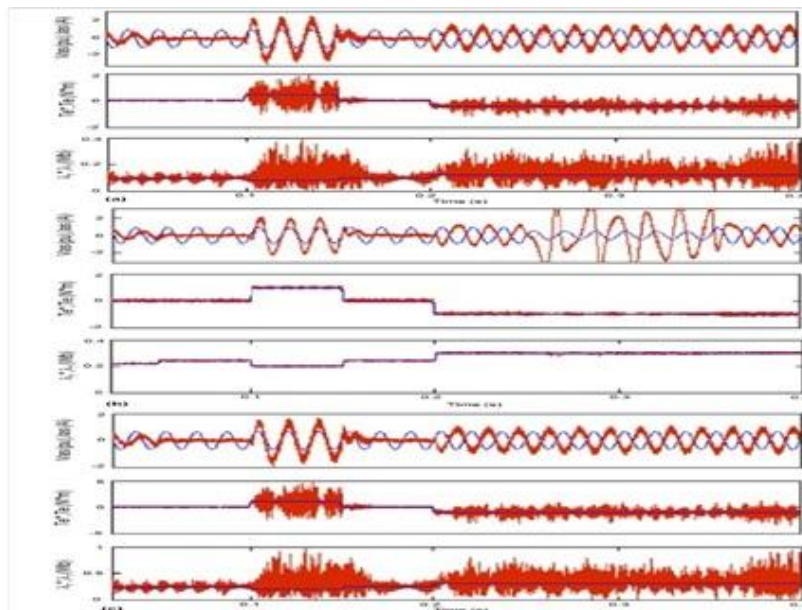
شکل ۸- نمای کلی سیمولاتور آزمایشگاهی توربین بادی DFIG

جدول ۶- پارامترهای ژنراتور القایی دو سو تغذیه

Rared Power	11KW
Statro Voltage	190V
R_s	0.03pu
R_r	0.06pu
L_m	3.362pu
L_{ls}	0.1677pu
L_{lr}	0.0864pu
Number of Pole Pairs	3

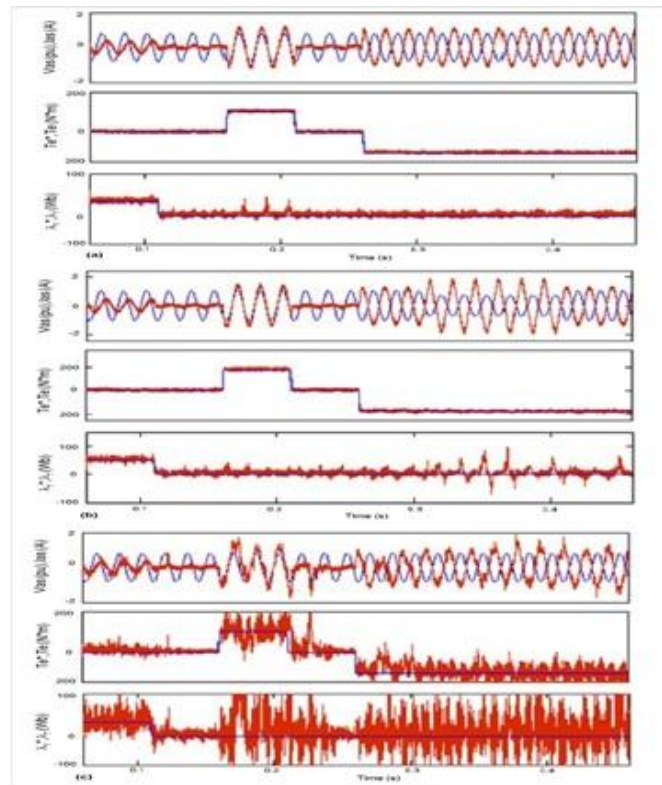
برای انجام شبیه سازی تجربی برخی از مقادیر پارامترهای ماشین را تغییر می دهیم. این مقادیر مربوط به L_m و R_s نسبت به است که مقادیر آنها را ۵۰٪ نسبت به مقادیر اولیه شان کاهش می دهیم. که این تغییر پارامتر باعث می گردد که میرایی فرکانس اصلی ژنراتور القایی DFIG کاهش پیدا کند. از طرفی در طول شبیه سازی ها یک افت ولتاژی را در نظر می گیریم. که این افت ولتاژ از نوع سه فاز متعادل می باشد. ژنراتور القایی DFIG در طول این افت ولتاژ قابل استفاده باقی می ماند. هدف از این افت ولتاژ چگونگی رفتار شکل موج جریان استاتور تحت شرایط وقوع تغییرات ولتاژ و اغتشاشات در شار استاتور است. همچنین در شبیه سازی های صورت گرفته با سیمولاتور واقعی برای بررسی مقدار واقعی سیگنال از یک سیگنال نویز در شبیه سازی ها استفاده شده است.

۴-۱- نتایج تجربی روش کنترل مستقیم گشتاور



شکل ۹- نتایج شبیه سازی عملی روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC : a) تحت شرایط تغییرات پارامتر (b) تحت شرایط افت ولتاژ استاتور (c) تحت شرایط نویز ورودی به جریان و ولتاژ اندازه گیری شده

۲-۴- نتایج تجربی روش کنترل مستقیم توان



شکل ۱۰- نتایج شبیه سازی عملی روش کنترل مستقیم توان (DPC: a) تحت شرایط تغییرات پارامتر (b) تحت شرایط افت ولتاژ استاتور (c) تحت شرایط نویز ورودی به جریان و ولتاژ اندازه گیری شده

۵- مقایسه عملکرد روش های کنترلی ارائه شده

پس از بررسی نتایج شبیه سازی روش های کنترل DTC و DPC، و همچنین تست های عملی ارائه شده با استفاده از سیمولاتور آزمایشگاهی توربین DFIG به مزایا و معایب هر کدام از این روش ها در هنگام استفاده در توربین بادی DFIG پرداخته می شود. که پس از انجام شبیه سازی ها و تست های مختلف انجام شده خلاصه ای از نتایج بدست آمده در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷- مقایسه عملکرد کیفی

معیار عملکرد	DTC	DPC
پیچیدگی محاسبات	زیاد	کم ✓
وابستگی به پارامترهای ماشین	زیاد	کم ✓
محدودیت زمان نمونه برداری	زیاد	زیاد
پاسخ گذرا	متوسط	زیاد ✓
زمان نشست	کم ✓	کم ✓
محتویات هارمونیک	متوسط	متوسط
(سنسور) محدودیت های ابزار دقیق	زیاد	زیاد
پیچیدگی کلی اجرا	زیاد	متوسط ✓
عملکرد در زمان آشفتنگی	متوسط	زیاد ✓
MPPT	زیاد ✓	کم

از طرفی محدودیت های اجرایی که توسط روش های کنترلی بیان شده در این مقاله تحمیل می شود در جدول ۸ آمده است.

جدول ۸- محدودیت های اجرایی روش DTC, DPC

ویژگی	DTC	DPC
حداقل کنترل سیکل زمانی	33 μ s	19 μ s
حداکثر کنترل سیکل زمانی	50 μ s	50 μ s
کنترل واقعی سیکل زمانی	40 μ s	40 μ s
تعداد سیگنال نمونه برداری	6	4
حداقل پهنای باند سنسور جریان	25KHZ	25KHZ
نوع RSC مدولاسیون	بردار	بردار
الزامات مورد نیاز انکدر	6 \times 6	6 \times
اعوجاج هارمونیک جاری	5% ↓	3% ↓

همچنین از نتایج تست های عملی نتایجی استخراج گردیده که می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- (۱) با وجود بهبود DTC به نسبت روش های قبل این روش هنوز نیاز به برآورد دقیق شار روتور و اندازه گیری شش مقدار فیزیکی دارد. بنابراین DTC از نظر پیچیدگی محاسباتی به نسبت DPC، پیچیده تر می باشد.
- (۲) با وجود اینکه در روش DPC ابزار دقیق جهت سنجش جایگاهی ندارد اما چالش اصلی نمونه برداری سریع از شکل موج های ولتاژ و جریان است.
- (۳) DPC متکی به چند سیگنال است که دقت در اندازه گیری آن ها بسیار مهم و حیاتی است.

۶- نتیجه

در این مقاله دو مورد از مهم ترین روش های کنترل توربین بادی DFIG ارائه شده است. که عملکرد هر کدام از این روش ها در حالت پایدار و پاسخ گذرا بررسی گردیده است. پس از انجام شبیه سازی های مختلف و ست های عملی مزایا و معایب هر یک از این روش ها بیان گردیده است. روش کنترل مستقیم توان ۴ برابر پاسخ گذرای بهتری نسبت به روش کنترل مستقیم گشتاور دارد. همچنین از لحاظ پیاده سازی عملی روش کنترل مستقیم توان شرایط بهتری نسبت به روش کنترل مستقیم گشتاور دارد. هدف از این مقاله بیان روش های کنترلی، تجزیه و تحلیل عملی و شبیه سازی ها بوده است. تا محققان و مهندسان دید مناسبی در مورد ویژگی ها و محدودیت های اجرایی روش های کنترل توربین بادی DTC و DPC داشته باشند.

۷- مراجع

1. Blaabjerg, F., et al., Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. IEEE Transactions on industrial electronics, 2006. 53(5): p. 1398-1409.
۲. یونسی, et al, بیشینه سازی بازده ژنراتور القایی دو تحریکه با در نظر گرفتن تلفات هسته و کنترل توان راکتیو با استفاده از روش کنترل تطبیقی مدل مرجع بهینه. مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۲۰۱۶.
3. Tremblay, E., A. Chandra, and P.J. Lagacé. Grid-side converter control of DFIG wind turbines to enhance power quality of distribution network. in Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE. 2006. IEEE.
4. Nunes, M.V., et al., Influence of the variable-speed wind generators in transient stability margin of the conventional generators integrated in electrical grids. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004. 19(4): p. 692-701.
5. Xiang, D., et al., Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006. 21(3): p. 652-662.
6. Shen, B., et al., Sensorless maximum power point tracking of wind by DFIG using rotor position phase lock loop (PLL). IEEE Transactions on Power Electronics, 2009. 24(4): p. 942-951.
7. Pena, R., J. Clare, and G. Asher, Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1996. 143(3): p. 231-241.
8. Blaschke, F., Method for controlling asynchronous machines. 1974, Google Patents.

9. Karaagac, U., et al., Coordinated control of wind energy conversion systems for mitigating subsynchronous interaction in DFIG-based wind farms. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014. 5(5): p. 2440-2449.
10. Kanjiya, P., B.B. Ambati, and V. Khadkikar, A novel fault-tolerant DFIG-based wind energy conversion system for seamless operation during grid faults. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014. 29(3): p. 1296-1305.
11. Naidu, N.S. and B. Singh, Grid-Interfaced DFIG-Based Variable Speed Wind Energy Conversion System With Power Smoothing. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017. 8(1): p. 51-58.
۱۲. رحیمی، م. and اسماعیلی، طراحی کنترل کننده توان و بهبود میرایی نوسانات پیچشی در توربین بادی DFIG-710 kW نصب شده در سایت بینالود. *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*, ۲۰۱۶. ۴۶(۴): p. 123-134.
13. Errouissi, R., et al., Offset-Free Direct Power Control of DFIG Under Continuous-Time Model Predictive Control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017. 32(3): p. 2265-2277.
14. Chen, S., et al., Integral variable structure direct torque control of doubly fed induction generator. *IET renewable power generation*, 2011. 5(1): p. 18-25.
15. Hu, J., et al., Predictive direct virtual torque and power control of doubly fed induction generators for fast and smooth grid synchronization and flexible power regulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013. 28(7): p. 3182-3194.
16. Casadei, D., et al., FOC and DTC: Two viable schemes for induction motors torque control. *IEEE transactions on Power Electronics*, 2002. 17(5): p. 779-787.
17. Arnalte, S., J. Burgos, and J. Rodriguez-Amenedo, Direct torque control of a doubly-fed induction generator for variable speed wind turbines. *Electric power components and systems*, 2002. 30(2): p. 199-216.
18. Bourdoulis, M.K. and A.T. Alexandridis, Direct power control of DFIG wind systems based on nonlinear modeling and analysis. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014. 2(4): p. 764-775.
19. Singh, B. and N.S. Naidu, Direct power control of single VSC-based DFIG without rotor position sensor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014. 50(6): p. 4152-4163.
20. Nian, H., P. Cheng, and Z. Zhu, Direct power control of doubly fed induction generator without phase-locked loop in synchronous reference frame during frequency variations. *IET Renewable Power Generation*, 2015. 9(6): p. 576-586.
21. Sun, D. and X. Wang, Low-complexity model predictive direct power control for DFIG under both balanced and unbalanced grid conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016. 63(8): p. 5186-5196.