

پیادهسازی روش کنتـرل مسـتقیم تـوان فـازی در سیسـتم کنتـرل توربین بـادی DFIG تحـت سـختافزار FPGA

چکیدہ

یکی از روش های پرکاربرد جهت بهره برداری 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. در این مقاله یک روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده فازی برای توربینهای بادی مجهز به ژنراتور DFIG ارائه شده است. در این روش ولتاژهای مورد نیاز مبدل سمت روتور بهطور مستقیم براساس کنترل کننده فازی، ولتاژ استاتور، سرعت روتور و برخی پارامترهای ماشین محاسبه می شود. از طرفی مدولاتور PWM جایگزین مقایسه کننده های هیسترزیس شده است. در این روش ارائه شده فر کانس سوئیچینگ ثابت است. شده ازی هرای مسورت گرفته برای روش ارائه شده در شرایط ثابت و گذار انجام گرفته است.

كلمات كليدى: انرژى باد، توربين بادى، ژنراتور القايى دوسو تغذيه، كنترل مستقيم گشتاور، كنترل مستقيم توان.

Implementation of Direct Phase Power Control Method in DFIG Wind Turbine Control System Under FPGA Hardware

Amin Rahmani*, Islamic Azad University South Tehran branch Faculty of Engineering, Aminrahmani8294@yahoo.com Mohammad hossein Hosseini JIslamic Azad University South Tehran branch Faculty of Engineering, smhh110@yahoo.com °Corresponding Author

Abstract

One of the most used methods for exploiting wind energy is the use of wind turbines, these turbines are used to generate electricity. They use different electric machines, and among these machines, the two-way induction generator has a greater share due to its advantages. In this article, a direct power control method based on fuzzy controller for wind turbines equipped with DFIG generators is presented. In this method, the required voltages of the converter on the rotor side are calculated directly based on the phase controller, stator voltage, rotor speed and some machine parameters.

On the other hand, PWM modulator has replaced hysteresis comparators. In this presented method, the switching frequency is fixed. The simulations for the presented method have been done in steady and transient conditions



۱ – مقدمه

امروزه با رشد روز افزون مصرف انرژی استفاده از سوختهای فسیلی در نیروگاه ها جهت تولید انرژی الکتریکی روبه افزایش است. با توجه به تولید آلاینده های زیستمحیطی توسط نیروگاه ها و نیاز روز افزون به انرژی الکتریکی ضرورت تولید انرژی الکتریکی با روش های نوین و بدون تولید آلاینده های زیست محیطی بیشتر مدنظر مدیریت کلان تولید انرژی قرار می گیرد. یکی از گونههای انرژی که جهت تولید نیروی الکتریسیته مورد استفاده قرار می گیرد انرژی بادی است. انرژی باد به منبع مهمی برای تولید برق در بسیاری از کشورها تبدیل شده است و انتظار میرود که انـرژی بـاد در آینـده انـرژی الکتریکی بیشـتری فراهم کنـد[۱،۲،۳]. سیستمهای تبدیل انرژی باد با سرعت متغیر از دو روش ژنراتورهای دو سو تغذیه [۴] یا کانورترهای کامل قدرت پیادهسازی می شوند [۵،۶]. امروزه بسیاری از مزارع بادی بر مبنای فناوری DFIG با کانور ترهای با نرخ ۲۰ تا ۳۰ درصد از توان ژنراتور، کار می کنند. در مقایسه با ژنراتورهای القایی سرعت ثابت در ژنراتور DFIG با استفاده از کنترل پارامترهای روتور می توان به محدوده وسيع، قابل انعطاف و سريع كنترل توان اكتيو و راكتيو دست یافت[۸،۷،۴]. شماتیک سیستم تبدیل انرژی باد مبتنی بر DFIG در شـکل(۱) نشـان داده شـده اسـت.

درحالی که روش کنترل بردار جریان روتور بهعنوان یک روش مرسوم برای کنترل ژنراتور DFIG شناخته می شود [۲،۸،۹،۱۰،۱۷]. برای به کارگیری روش کنترل برداری، نیاز به استفاده از کنترل کننده های PI می باشد که عیب اصلی آنها مقاومت کنترل کننده به علت رفتار غیرخطی توربین بادی و نوسانات تیغه است و این امکان وجود دارد که پس از مدتی نیاز به تصحیح ضرایب کنترل کننده ها باشد .

امروزه روش های کنترل مستقیم به دلیل سادگی و عملکرد پویا بالا برای کنترل ژنراتور DFIG ارائه شده است. روش DTC برای نخستین بار در اواسط دهه ۱۹۸۰ معرفی شد[۱۲،۱۳]. این روش استفاده از پارامترهای ماشین را به کمینه می رساند و پیچیدگی الگوریتم های روش کنترل برداری را ندارد و فقط جهت تخمین شار، وابسته به مقاومت استاتور می باشد[۱۴،۱۵،۱۶] روش DTC به طور مستقیم گشتاور و شار ماشین را به وسیله انتخاب بردارهای ولتاژ مناسب از جدول کلیدزنی و با استفاده از موقعیت شار و گشتاور استاتور کنترل می کند[۱۷،۱۸].



شکل ۱: شمانیک سیستم نبدیل انرژی باد مبتنی بر DFIG روش کنتـرل مســتقیم تـوان DPC از روش کنترل مســتقیم گشــتاور DTC نشـات گرفتـه اسـت، کـه نسـبت بـه روش کنتـرل بـرداری دارای مزایـای زیـادی میباشـد. کـه از جملـه آن میتـوان به سـادگی

ساختار، پویایی سریع، مقاومت در برابر پارامترها و نوسانات ولتاژ شبکه اشاره کرد[۱۸،۱۹،۲۰]. حالتهای کلیدزنی مبدل در روش کنترل DPC، براساس خطای بین توان های اکتیو و راکتیو مرجع و مقادیر اندازه گیری شده و موقعیت زاویه ولتاژ انتخاب می شوند. در سالهای اخیر روش کنترل DPC برای کنترل موتورهای AC و ژنراتورهای DFIG پیشنهاد شده است. اگرچه این روش در عین حال ساده و در برابر تغییرات پارامترها مقاوم است[۲۱]، اما فركانس كليدزني مبدلها بهدليل تغييرات توانهاي اكتيو و راکتیو و پهنای باند هیسترزیس متفاوت است [۲۲،۲۳]. برای حل ایـن موضـوع راههـای مختلفـی پیشـنهاد شـده اسـت. بـا توجه به مطالب گفته شده روش های کنترلی براساس جهت گیری شار استاتور بوده و الگوریتمهای پیچیدهای دارند که آنها را برای اجرای عملي ناکارآمد مي کند[۲۴]. طبق [۲۵] براي کم کردن ريپل توان روش Fuzzy و DSVM با هم تركيب شدهاند، كه اين عمل براساس جهت گیری شار استاتور بوده و دارای قواعد زیادی است. همچنین در این روش از یک فرکانس سویچینگ بالا برای کاهش موثر ریپل توان استفاده شده است.

در این مقاله ابتدا یک مدل مجزا برای ژنراتور DFIG در دستگاه مرجع با سرعت سنکرون ارائه شده است. بعد از آن روشهای کنترل مستقیم توان مبتنی بر فازی و تمام فازی برای ژنراتور DFIG پیشنهاد شده است. خطاهای توانهای اکتیو و راکتیو و انتگرال آنها بهعنوان ورودی کنترلکننده فازی استفاده میشود. در روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر فازی خروجی کنترلکننده فازی با مقدار Erda جمع شده تا ولتاژهای روتور تولید شود، در حالی که در روش کنترل مستقیم توان تمام فازی ولتاژهای روتور به مور مستقیم توسط کنترل کننده فازی تولید می شود. در هر روش ارائه شده مقادیر مرجع به دست آمده برای ولتاژهای روتور به مدولاتور PWM داده می شود! [۲۶،۲۷]. به طور کلی استفاده از کنترل کننده فازی دارای مزایای زیر می باشد:

• عدم نیاز به سیستم تحت کنترل

• عدم نیاز به سنسورهای دقیق برای اندازه گیری

• پیادہسازی آسان

روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر فازی بهطور مستقیم توانهای اکتیو و راکتیو براساس کنترل کننده فازی همراه با توانهای اکتیو و راکتیو اندازه گیری شده، ولتاژ استاتور و سرعت روتور را کنترل می کند. در حالی روش کنترل مستقیم توان تمام فازی فقط نیاز به مقادیر اندازه گیری شده و مرجع توانهای اکتیو و راکتیو دارد. در روشهای ارائه شده کنترل کنندههای II مقایسه کنندههای هیسترزیس و جدول کلیدزنی حذف شده است.

روش های کنترلی پیشنهادی فقط برای مدل سازی های عملی روش های کنترلی پیشنهادی فقط برای مدل سازی های واقعی مناسب نبوده و دارای مشکلاتی از جمله تاخیر در محاسبات و تاخیر در ارسال خروجی اطلاعات میباشد. پس از بررسی های فراوان برای حل این مشکل و کارآمد بودن روش های ارائه شده در صنعت و کارهای عملی از یک بورد FPGA استفاده شده که تمامی روش های پیشنهادی در آن پیاده سازی شده است. علت استفاده از بورد FPGA سرعت پردازش بالای اطاعات و همچنین به روزرسانی کردن سخت افزار بوده است. شبیه سازی های فراوانی



نجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران-شاخه خراسان سال نهم/شماره۱۸/ زمستان ۱۴۰۱ برای روش های گفته شده انجام شده است که اثربخشی این نمونه برداری (۱+k) بدست می آید. روشها را بر روی بورد FPGA تایید میکند.

۲- اصول توان اکتیو و راکتیو کنترل کننده های پیشنهادی T-1- مدلسازی توربین بادی DFIG

در شکل(۲) مدل یک ژنراتور DFIG در دستگاه مرجع چرخان با سرعت سنكرون نشان داده شده است.



شکل۲: مدل ژنراتور القایی دوسوتغذیه در دستگاه چرخان با سرعت سنکرون با توجـه بـه شـكل(٢) معـادلات ولتـاژ مـدار اسـتاتور و روتـور بـه صورت روابط زيـر بيـان مىشـود[۶].

$$V_s^s = R_s I_s^s + \frac{d\varphi_s^s}{dt} + j\omega_s \varphi_s^s \tag{1}$$

$$V_r^s = R_r I_r^s + \frac{a\varphi_r^s}{dt} + j(\omega_s - \omega_r)\varphi_r^s \tag{7}$$

$$\varphi_s^s = L_s I_s^s + L_m I_r^s \tag{(7)}$$

$$\varphi_r^s = L_m I_s^s + L_r I_r^s \tag{(f)}$$

توان تزریقی به شبکه از رابطه (۵) بهدست میآید.

لتقيم ولتاژ استاتور را هـم جهتت بـا مولفـه محـور مسـتقيم دسـتگاه چرخـان گردانيـم، بـا صرفنظـر كـردن از مقاومت اسـتاتور به رابطه (۶) دست پیدا می کنیم.

$$\begin{cases} V_{sdq} = V_{sd} \\ V_{sdq} = j\omega_s\varphi_{sdq} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \varphi_{sd} = \cdot \\ \varphi_{sq} = -\frac{v_{sd}}{\omega_s} \end{cases}$$
(۶)
 با توجه به معادلات (۳)، (۴) و (۶) به توان های اکتيو و راکتيو

$$P_s = K_\sigma V_{sd} \varphi_{rd} \tag{Y}$$

$$Q_{s} = -K_{\sigma}V_{sd}\left(\frac{L_{r}}{L_{m}},\frac{V_{sd}}{\omega_{s}} + \varphi_{rq}\right) \tag{(A)}$$

که در معادله (۲) و (۸) و $K_{\sigma} = \frac{r}{r} \frac{L_m}{\sigma L_{m-1}}$ (۸) و (۲) که در معادله (۲) معادلات (۲) و (۸)، در شرایطی که ولتاژ شبکه متعادل است (۸) می دامنه ولتاژ ثابت باقی میماند. یعنی با کنترل مولفههای شار روتور میتوان توانهای اکتیو و راکتیو را کنترل کرد.

> ۲-۲-کنترل توان اکتیو و راکتیو با تنظیم شار روتور با گسستهسازی معادله (۲) دوره به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{rdq}}{dt} &= \frac{\varphi_{rdq}(K+1) - \varphi_{rdq}(K)}{T_s} = V_{rdq}(K) - R_r I_{rdq}(K) - j(\omega_s - \omega_r)\varphi_{rdq}(K) \end{aligned} \tag{9}$$

جمن مهندسين برق و الكترونيك ايران-شاخه خراسان سال نهم/شیماره۱۸/ زمستان ۱۴۰۱

فصلنامه

$$\begin{cases} \varphi_{rd}(K+1) = \varphi_{rd}(K) + T_s V_{rd}(K) + T_s(\omega_s - \omega_r)\varphi_{rq}(K) \\ \varphi_{rd}(K+1) = \varphi_{rq}(K) + T_s V_{rq}(K) + T_s(\omega_s - \omega_r)\varphi_{rd}(K) \end{cases}$$

$$(1 \cdot)$$

با قرار دادن معادله (۱۰)، در معادلات (۷) و (۸)، مقادیر توانهای اکتيو و راکتيو در لحظه نمونه برداري ۱+K، به صورت معادله (۱۱) بەدىست مىآيد.

$$\begin{cases} P(K+1) = K_{\delta}V_{sd}(K+1)\varphi_{rd}(K+1) \\ P(K+1) \cong K_{\delta}V_{sd}(K+1)\varphi_{rd}(K+1) \\ Q(K+1) = -K_{\delta}V_{sd}(K+1)\left[\frac{L_{r}}{L_{m}}\cdot\frac{V_{sd}(K)}{\omega_{s}} + \varphi_{rd}(K+1)\right] \\ Q(K+1) \cong -K_{\delta}V_{sd}(K+1)\left[\frac{L_{r}}{L_{m}}\cdot\frac{V_{sd}(K)}{\omega_{s}} + \varphi_{rd}(K+1)\right] \end{cases}$$
(11)

مقادیر توانهای اکتیو و راکتیو در لحظه ۱+K همان مقادیر مرجع می باشند.

$$P(K + 1) = P_{ref}(K)$$

$$Q(K + 1) = Q_{ref}(K)$$
(117)

با قراردادن معادله (۱۲) و (۱۰) در (۱۱)، مقادیر مرجع ولتاژهای کنترلی روتور بهدست خواهند آمد.

$$\begin{cases} V_{rd}(K) = \frac{P_{ref} - P(K)}{T_s K_\delta V_{sd}(K)} + \frac{\omega_s - \omega_r}{K_\delta V_{sd}(K)} Q(K) + \frac{(\omega_s - \omega_r) L_r}{L_m \omega_s} V_{sd}(K) \\ V_{rd}(K) = \frac{Q_{ref} - Q(K)}{T_s K_\delta V_{sd}(K)} + \frac{\omega_s - \omega_r}{K_\delta V_{sd}(K)} P(K) \end{cases}$$
(17)

۳- روشهای کنترلی پیشنهادی برای کنترل مستقیم توان اکتیو و راکتیو ژنراتور DFIG

۳-۱- روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده فازی

با بررسی دقیقتر معادله (۱۳) این معادله را میتوان به صورت زيـر بازنويسـی کرد.

$$V_{rd} = U_{rd} + E_{rd} \tag{(15)}$$

$$V_{rq} = U_{rq} + E_{rq} \tag{14}$$

$$U_{rd} = K_n (P_{raf} - P) \tag{19}$$

که:

$$U_{rq} = -K_p (Q_{ref} - Q) \tag{117}$$

$$E_{rd} = \omega_{slip} \left(\frac{Q(K)}{K_{\delta} V_{sd}(K)} + \frac{L_r V_{sd}(K)}{L_m \omega_s} \right) \tag{1A}$$

$$E_{rq} = \omega_{slip} \frac{P(K)}{K_{\delta} V_{sd}(K)} \tag{19}$$

براساس معادلات(۱۶) تا (۱۹) می توان نتیجه گرفت که ولتاژهای مرجع روتور از دو جز تشکیل شده است. نخستین جز $\mathrm{K}_{\scriptscriptstyle \mathrm{D}}$ که خروجی کنترل کننده های تناسبی بوده که مقادیر Urdqو K_q ضرایب کنترل کنندهها می<اشند. جز دوم E_{rdq} که متناسب K با فركانس لغزش ميباشد.

 $\omega slip = \omega s - \omega r$

در این مقاله بیشتر به دو دلیل از کنترل کننده فازی استفاده شده است. نخست اینکه نیازی به اطلاعات و مدل ریاضی سیستم تحت کنترل ندارد. دوم به دلیل ساختار ساده برای پیاده سازی های عملی بسیار مناسب میباشند.

خطای توانهای اکتیو و راکتیو، $E_{rq} \in E_{rq}$ همچنین انتگرال این خطاها به عنوان ورودی های کنترل کننده فازی مورد استفاده قرار

 μ_p and μ_{fp} توابع عضویت هر ورودی است و $i_b \alpha_i$ توابع وزنی میباشد. در مرحله بعد این خروجی با تمام توابع عضویت میباشد. در مرحله بعد این خروجی با تمام σ_i متغیرهای خروجی مقایسه میشوند: $O_i \min \left\{ \alpha_i \ _p \mu_{vi} \right\}$

که در آن، $\mu_{vi} and O_i$ مقدار خروجی نهایی و تابع عضویت متغیر خروجی میباشند. براساس این اصل خروجی تمام قوانین با یکدیگر مقایسه شده و مقدار ماکزیمم انتخاب می گردد.

 $\mu_{v} = \max\{O_{i}\} i = 1.7...$

در آخر از روش نافازی سازی برای تولید ولت از خروجی استفاده می شود. به طور کلی می توان گفت که نافازی سازی فرآیند تبدیل متغیرها از محیط فازی به محیط قطعی می باشد. بلوک دیاگرام روش پیشنهادی کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده فازی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل۵: بلوک دیاگرام کنترلی روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترلکننده فازی

۳-۳- کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده تمام فازی

طبق معادلات (۱۴) و (۱۵) مقادیر مرجع روتور از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت دوم، نیروی الکترومغناطیس بازگشتی بوده که به مقادیر توانهای اکتیو و راکتیو، ولتاژ استاتور و تعدادی از پارامترهای ماشین وابسته می باشد. به عبارت دیگر این روش عملکرد دینامیکی DFIG را بهبود می بخشد. از طرفی چون این مولفه متناسب با فرکانس لغزش می باشد پس این مولفه در سرعت سنکرون برابر صفر می باشد. بنابراین این مولفه در کنترل کننده تمام فازی حذف شده و فقط کنترل کننده فازی برای تولید ولتاژ مرجع روتور مورد استفاده قرار می گیرد. ورودی ها و خروجی های سیستم کنترل کننده تمام فازی همانند سیستم کنترل کننده فازی است و فقط بازهی تغییرات این متغیرها متفاوت است. بلوک دیاگرام کنترلی روش کنترل مستقیم توان تمام فازی در شکل (۶) نشان داده شده است. در مقایسه با نمودار بلوک شکل (۵)، بلوک محاسبه E_{rdq} برداشته می شود که طراحی و اجرای آن را ساده تر می کند.

در هـر دو روش، هنگامی کـه ولتاژهـای روتـور محاسـبه شـد، ايـن



انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران-شاخه خراسان سال نهم/شعاره۱۸/ زمستان ۱۴۰۱ می گیرنـد. ساختار کنتـرل مسـتقیم تـوان مبتنـی بر کنترل کننـده فازی در شـکل (۳) نشـان داده شـده اسـت.



شکل۳: ساختار کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده فازی ۲-۳- منطق کنترل کننده فازی

همان طور که در شکل نشان داده شده است خطای توانهای اکتیو و راکتیو و همچنین انتگرال آنها به عنوان ورودی های کنترل کننده فازی استفاده شده است. خروجی کنترل کننده فازی به عنوان ولتاژ مرجع روتور استفاده می شود. از طرفی از دو کنترل کننده فازی مستقل برای کنترل توان های اکتیو و راکتیو استفاده شده است. همه ورودی ها و خروجی از ۲ تابع عضویت استفاده شده است که این توابع عضویت عبار تند از:

BN (Big Negative)⁶ MN (Medium Negative)⁶ SN (Small Negative)⁶ Z (Zero)⁶ PS (Positive Small)⁶ PM (Positive (Medium)⁶ PB (Positive Big

بهعنوان مثال توابع عضویت برای خطای توان اکتیو بهصورت شکل (۴) است.



شكل ۴: توابع عضويت خطاى توان اكتيو

سیستم فازی دارای۴۹ قانون است که برای تصمیم گیری استفاده میشوند. این ۴۹ قانون در جدول(۱)، آورده شده است.برای نمونه یک قانون را میتوان به صورت زیر نوشت:

∫ e /e	РВ	PM	PS	Z	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	Ζ
PM	PB	PB	PB	PM	PS	Ζ	NS
PS	PB	PB	PM	PS	Z	NS	NM
Z	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
NS	PM	PS	Z	NS	NM	NB	NB
NM	PS	Ζ	NS	NM	NB	NB	NB
NB	Z	NS	NM	NB	NB	NB	NB

جدول ۱: قوانین کنترلکننده فازی

برای نمونه یک قانون را می توان به صورت زیر نوشت:

 $if(e_p(e_q \text{ is } X) \text{ AND} (\int e_p(\int e_q) \text{ is } y) \text{ then} (U_{rd}(U_{rq}) \text{ is } w))$ عملکرد سیستم فازی براساس قانون ممدانی میباشد [۲۸،۲۹]. وقتی مجموعهای از ورودیها خوانده میشود، هر کدام از قوانین



شكل^م: بلوك دیاگرام كنترلى روش كنترل مستقیمتوان مبتنى بر كنترل كننده تمام فازى ولتاژها بايد به قاب مرجع روتور تبديل شوند. اين با معادله زير حاصل مى شود.

$$V_r^r = V_r^s e^{j(\omega_s - \omega_r)t}$$

لازم به ذکر است که نیازی به محدود کننده ولتاژ مرجع نیست، از آنجا که سیستم کنترلکننده فازی بهطور ذاتی ولتاژهای مرجع تولید شده را در حالت گذرا محدود میکند. پس از محاسبه، میتوان از تکنیکهای پیشرفته مدولاسیون مانندSPWM (SPWM و ... برای تولید پالسها با یک فرکانس سویچینگ ثابت استفاده کرد.

۴- پیادهسازی روشهای پیشنهادی با استفاده از بورد FPGA

روشهای کنترلی پیشنهادی طوری طراحی شده است که برای کاربرهای صنعتی و عملی بسیار مناسب میباشند و از طرفی طرحهای پیشنهادی فقط برای سیستمهای آزمایشگاهی توربین بادی DFIG قابل استفاده است. زیرا دارای مشکلات از قبل تاخیر در محاسبات و تاخیر در ارسال خروجی اطلاعات میباشد. با بررسیهای فراوان برای حل این مشکل و پیادهسازی روشهای ارائه شده برای مدلهای صنعتی و واقعی از یک بورد FPGA استفاده شده است. بوردهای FPGA برای توسعه سختافزارهای

دیجیتالی پیچیده و اجتناب از ساخت بردهایی با تراشههای گسسته به وجود آمدهاند. با استفاده از تراشههای FPGA بوردهایی که پیشتر با تعداد زیادی از تراشههای دیجیتال ساخته می شدند در یک بورد FPGA با سرعت بالاتر و از همه مهمتر با امکان بهروزرسانی کردن سختافزار پیادهسازی می شوند. استفاده از بوردهای FPGA در اجرای سیستمهای می شوند. استفاده از بوردهای FPGA در اجرای سیستمهای دسترس بودن و قابلیت پیکربندی در حال گسترش می باشد. برای پیادهسازی روشهای ارائه شده از بورد FPGA فراد اندیش که در شکل (۷) نشان داده شده استفاده شده است (۲۰،۳۱،۳۲].



شکل۷ :نمایی از برد FPGA فراداندیش

بـرای پیادهسـازی روشهـای پیشـنهادی در بـورد FPGA ابتـدا هـر روش بـه بخشهـای مختلـف تقسـیم شـده و و در ادامـه روابـط هـر بخـش در نـرم افـزار ISE کـد زنـی میشـوند.

۵– شبيەسازى

به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی شبیهسازیهای گوناگونی در شرایط مختلف با استفاده از نرم افزار / Matlab Simulink انجام گرفته است. سیستم شبیهساز برای توربین بادی DFIG در شکل(۸) نشان داده شده است.

در شبیهسازیها از یک موتور القایی آسنکرون به عنوان ژنراتور القایی DFIG استفاده شده است. مشخصات ژنراتور در جدول(۲)



شکل۸: بخش قدرت توریین بادی DFIG

فصل فامه علمی انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران-شاخه خراسان ۸۵ سال نهه-(شمار ۱۴۰ ز ومستان ۱۴۰۱

آورده شده است.

جدول۲: مشخصات فنی ژنراتور DFIG

Asynchronous Machine	Pnom=2MW, Vnom=690V, Fnom=50 Hz		
DClink Cpacitor	16000e-6 F		
Grid Side Filter	4e-3 H +0 .01 Ω0.		
Network	,Vnom=690V Fnom=50 Hz		

از دو مبدل بهعنوان مبدل های سمت روتور و سمت شبکه در توربین بادی DFIG استفاده شده است. این مبدل ها از طریق یک لینک CD به یکدیگر متصل می شوند، وظیفه مبدل سمت شبکه ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک CD می باشد. روش های گوناگونی برای کنترل مبدل سمت شبکه ارائه شده که در این مقاله از روش گفته شده در [۹] استفاده شده است. همچنین در روش پیشنهادی ولتاژ لینک CD بر روی مقدار V 2001 تنظیم شده است[۲۰،۱۱]. از طرفی یک فیلتر CR نیز در محل اتصال استاتور به ترانسفور ماتور استفاده شده است. وظیفه این فیلتر حذف هارمونیک های فرکانس بالای ناشی از کلیدزنی مبدل ها می باشد.در شبیه سازی های انجام شده فرکانس نمونه برداری روش کنترل مستقیم توان بر مبنای جدول کلید زنی ZSKHz انتخاب شده است.



فرکانس نمونه برداری و کلیدزنی مبدل سمت روتور برای روش

شکل۹: عملکرد حالت پایدار روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترلکننده فازی (MWa)) توان اکتیو b ((MW)) توان راکتیو ((MW)) جریان روتور (KA)

کنتـرل مسـتقیم توان پیشـنهادی به ترتیب 4KHz و 2KHz اسـت. از طرفـی در روش پیشـنهادی از یـک مدولاتـور PWM بـه روش SVM اسـتفاده شـده است.

برای بررسی عملکرد پویا تغییرات پلهای گوناگون در توانهای اکتیو و راکتیو اعمال شده که در شکل(۹) و (۱۰) نشان داده شده است. در این حالت سرعت روتور در مقدار ۱۹۱ از خارج اعمال شده و در این مقدار ثابت میماند. همان طور که در شکل نشان داده شده است، در ابتدا توانهای اکتیو و راکتیو به ترتیب در مقدارهای ۷۸۵ و ۲۸۵- تنظیم شدهاند، سپس در زمان 2.50 تغییر پلهای افزایش در مقدار توان اکتیو از مقدار 0 به ۷۸۷ داده شده است. همچنین در زمان 4.5 تغییر پلهای افزایش در شده است. هرچنین در زمان 4.5 تغییر پلهای افزایش در شده است. هر دو روش کنترلی پیشنهادی دارای پاسخ حالت پویای سریعی بوده و در زمانی در حدود چند میلی ثانیه مقادیر مرجع را دنبال می کند. به منظور بررسی دقیق تر، تغییر پلهای کاهشی از مقدار ۱۸۳ به ۷۸۷ در مرجع توان اکتیو اعمال شده است. هر دو روش کنترل پیشنهادی سریع واکنش نشان شده است. هر دو روش کنترل پیشنهادی سریع واکنش نشان

برای تایید اینکه تغییرات پارامتره ای ژنراتور DFIG ناچیز بوده و تأثیر قابل ملاحظه ای بر عملکرد روش کنترلی ندارد شبیه سازی با ۴۰% خطا در مقدار اندوکتانس متقابل ۲ و تغییرات سرعت روتور انجام گرفته است که نتایج را در شکلهای (۱۱) و (۱۲) مشاهده میکنیم. روشه ای کنترلی پیشنهادی عملکرد طبیعی خود را حتی با تغییر سرعت باد هم زمان با تغییرات پله ای در



شکل ۱۰: عملکرد حالت پویا روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترلکننده تمام فازی a) توان اکتیو b ((MW) توان راکتیو c ((Mvar) جریان استاتور b ((KA) جریان روتور (KA)



نجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران–شاخه خراسان سال **نه_م/شمار ۱۸۰ زمستان ۱۴۰۱ <mark>۵۹</mark>**



شکل ۱۲: عملکرد روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترلکننده تمام فازی تحت تغییرات سرعت روتور و ۴۰٪ خطا در مقدار اندوکتانس متقابل a Lm) جریان استاتور KAb) توان اکتیو CMW) توان راکتیو MVard)جریان روتور KA

doubly fed induction generator based wind turbines under both symmetrical and asymmetrical grid faults." IET renewable power generation 10.8 (2016): 1114-1122.

- [5] Tremblay, Etienne, Sergio Atayde, and Ambrish Chandra. "Comparative study of control strategies for the doubly fed induction generator in wind energy conversion systems: A DSP-based implementation approach." IEEE Transactions on sustainable energy 2.3 (2011): 288-299.
- [6] Bektache, A., and B. Boukhezzar. "Nonlinear predictive control of a DFIG-based wind turbine for power capture optimization." International journal of electrical power & Energy systems 101 (2018): 92-102.
- [7] Ngamroo, Issarachai. "Review of DFIG wind turbine impact on power system dynamic performances." IEEJ Transactions on electrical and electronic engineering 12.3 (2017): 301-311.
- [8] Benbouhenni, Habib. "Comparative study between different vector control methods applied to DFIG wind turbines." Majlesi Journal of Mechatronic Systems 6.4 (2018): 15-23.
- [9] Bouderbala, Manale, et al. "Direct and indirect vector control of a doubly fed induction generator based in a wind energy conversion system." International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) 9.3 (2018): 1531-1540.
- [10] Houcine, Becheri, et al. "Vector control of wind turbine conversion chain variable speed based on DFIG Using MPPT strategy." International Journal of Applied Engineering Research 13.7 (2018): 5404-5410.
- [11] Kumhar, Asha Ram. "Vector Control Strategy to Control Active and Reactive Power of Doubly Fed Induction Generator Based Wind Energy Conversion System." 2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). IEEE, 2018.
- [12] Boudjema, Zinelaabidine, et al. "Anovel direct torque control using second order continuous sliding mode of a doubly fed induction generator for a wind energy conversion system." Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences 25.2 (2017): 965-975.
- [13] Sahri, Younes, Salah Tamalouzt, and Sofia Lalouni Belaid. "Direct torque control of DFIG driven by wind turbine system connected to the grid." 2018 International Conference on Wind Energy and



شکا ۱۱: عملکرد روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترلکننده فازی تحت تغییرات سرعت روتور و ۴۰٪ خطا در مقدار اندوکتانس متقابل na جریان داستاتور KA b (هرای اکتیو MWr توان راکتیو (MVar)جریان روتور KA

توانهای اکتیو و راکتیو حفظ می کند.

۶- نتیجهگیری

در این مقاله دو روش برای کنترل مستقیم توان پیشنهاد شده است. در ابتدا مدل ریاضی ژنراتور DFIG در دستگاه مرجع چرخان با سرعت سنکرون پیادهسازی شده است. در ادامه با استفاده از این مدل ولتاژهای مرجع روتور بهوسیله کنترل کننده فازی محاسبه میشود. در روش ارائه شده یه مدولاتور PWM جایگزین مقایسه کنندههای هیسترزیس و جدول کلیدزنی شده است. روشهای پیشنهادی جهت پیادهسازی بر روی سختافزار مشکل و کارایی روشهای پیشنهادی فوق برای کاربردهای منعتی از بورد PPGA استفاده شده است. شیهسازیهای م مختلفی بر روی روشهای سیستم کنترلی پیشنهادی تحت بورد PGA انجام شده است، که طبق این شبیهسازیها عملکرد سیستم در شرایط پایدار و همچنین پارامترهای دستگاه و تغییرات سرعت روتور مورد تایید است.

۷- منابع

- World Wind Energy Association (online), Available: http://www. wwindea.org
- [2] Soued, Salah, H. S. Ramadan, and Mohamed Becherif. "Effect of Doubly Fed Induction Generator on Transient Stability Analysis under Fault Conditions." Energy Procedia 162 (2019): 315-324.
- [3] Zhao, Hongshan, and Liangliang Cheng. "Open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of DF wind turbine." IET Renewable Power Generation 11.4 (2017): 417-424.
- [4] Mohammadi, Jafar, et al. "Improved fault ride through strategy for



نجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران–شاخه خراسان <mark>۶۰</mark> س<mark>یال نهم/شیمار ۱۸۵/ زمستان</mark> ۱۴۰۱ 🏎 ادامه از صفحه ۵۳

- [67] Pang Z, Zhu D, Chen D, Li L, Shao Y. A computer-aided diagnosis system for dynamic contrast-enhanced MR images based on level set segmentation and ReliefF feature selection. Comput. Math. Methods Medicine. 2015 Jan 6;2015:450531-1.
- [68] Chen Z, Zhang X, Zhang Z. Clinical risk assessment of patients with chronic kidney disease by using clinical data and multivariate models. International urology and nephrology. 2016 Dec;48:2069-75.
- [69] Tazin N, Sabab SA, Chowdhury MT. Diagnosis of Chronic Kidney Disease using effective classification and feature selection technique. In2016 international conference on medical engineering, health informatics and technology (MediTec) 2016 Dec 17 (pp. 1-6). IEEE.
- [70] Bhattacharya M, Jurkovitz C, Shatkay H. Chronic Kidney Disease stratification using office visit records: Handling data imbalance via hierarchical meta-classification. BMC Medical Informatics and Decision Making. 2018 Dec;18:35-44.
- [71] Akben SB. Early stage chronic kidney disease diagnosis by applying data mining methods to urinalysis, blood analysis and disease history. Irbm. 2018 Nov 1;39(5):353-8.
- [72] Almasoud M, Ward TE. Detection of chronic kidney disease using machine learning algorithms with least number of predictors. International Journal of Soft Computing and Its Applications. 2019;10(8).
- [73] Senan EM, Al-Adhaileh MH, Alsaade FW, Aldhyani TH, Alqarni AA, Alsharif N, Uddin MI, Alahmadi AH, Jadhav ME, Alzahrani MY. Diagnosis of chronic kidney disease using effective classification algorithms and recursive feature elimination techniques. Journal of Healthcare Engineering. 2021 Jun 9;2021.
- [74] Qin J, Chen L, Liu Y, Liu C, Feng C, Chen B. A machine learning methodology for diagnosing chronic kidney disease. IEEE Access. 2019 Dec 30;8:20991-1002.
- [75] Segal Z, Kalifa D, Radinsky K, Ehrenberg B, Elad G, Maor G, Lewis M, Tibi M, Korn L, Koren G. Machine learning algorithm for early detection of end-stage renal disease. BMC nephrology. 2020 Dec;21:1-0.
- [76] Polat H, Danaei Mehr H, Cetin A. Diagnosis of chronic kidney disease based on support vector machine by feature selection methods. Journal of medical systems. 2017 Apr;41:1-1.
- [77] Sharma S, Sharma V, Sharma A. Performance based evaluation of various machine learning classification techniques for chronic kidney disease diagnosis. arXiv preprint arXiv:1606.09581. 2016 Jun 28.
- [78] Mohammed Siyad B, Manoj M, Mohammed Siyad B, Manoj M. Fused features classification for the effective prediction of chronic kidney disease. International Journal. 2016 Mar;2:44-8.
- [79] Ani R, Sasi G, Sankar UR, Deepa OS. Decision support system for diagnosis and prediction of chronic renal failure using random subspace classification. In2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI) 2016 Sep 21 (pp. 1287-1292). IEEE.
- [80] Subasi A, Alickovic E, Kevric J. Diagnosis of chronic kidney disease by using random forest. InCMBEBIH 2017: Proceedings of the International Conference on Medical and Biological Engineering 2017 2017 (pp. 589-594). Springer Singapore.
- [81] Padmanaban KA, Parthiban G. Applying machine learning techniques for predicting the risk of chronic kidney disease. Indian Journal of Science and Technology. 2016 Aug;9(29):1-6.
- [82] https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.php/UCI Archive, Machine Learning Repository
- [83] https://www.mathworks.com

Applications in Algeria (ICWEAA). IEEE, 2018.

- [14] Bourouina, Ahmed, et al. "High order sliding mode direct torque control of a DFIG supplied by a five-level SVPWM inverter for the wind turbine." Elektrotehniski Vestnik 85.5 (2018): 263-270.
- [15] Kouadria, Selman, et al. "Improved control strategy of DFIGbased wind turbines using direct torque and direct power control techniques." Journal of Renewable and Sustainable Energy 10.4 (2018): 043306.13
- [16] Benbouhenni, Habib, Zinelaabidine Boudjema, and Abdelkader Belaidi. "Direct vector control of a DFIG supplied by an intelligent SVM inverter for wind turbine system." Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering 15.1 (2019): 45-55.
- [17] Patel, Ranjan Kumar, and Giribabu Dyanamina. "Direct torque control of doubly fed induction generator for wind energy conversion system." 2017 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). IEEE, 2017.
- [18] Taleb, M., M. El Haroussi, and A. Ba-Razzouk. "Improved Direct Torque Control of a Doubly Fed Induction Generator in a Wind Energy Conversion System." 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). IEEE, 2018.
- [19] Xiong, Linyun, et al. "Fractional order sliding mode based direct power control of grid-connected DFIG." IEEE Transactions on Power Systems 33.3 (2017): 3087-3096.
- [20] Sun, Dan, et al. "A sliding-mode direct power control strategy for DFIG under both balanced and unbalanced grid conditions using extended active power." IEEE Transactions on Power Electronics 33.2 (2017): 1313-1322.
- [21] Heydari, É., M. Rafiee, and M. Pichan. "Fuzzy-genetic algorithmbased direct power control strategy for DFIG." Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering 14.4 (2018): 353-361.
- [22] Zhang, Yongchang, Jian Jiao, and Donglin Xu. "Direct power control of doubly fed induction generator using extended power theory under unbalanced network." IEEE Transactions on Power Electronics 34.12 (2019): 12024-12037.
- [23] Benbouhenni, Habib. "A comparison study between fuzzy PWM and SVM inverter in NSMC control of stator active and reactive power control of a DFIG based wind turbine systems." International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE) 8.1 (2019): 78-92.
- [24] Mazouz, F, et al. "Direct power control of DFIG by sliding mode control and space vector modulation." 2018 7th International Conference on Systems and Control (ICSC). IEEE, 2018.
- [25] Amrane, Fayssal, Azeddine Chaiba, and Bruno Francois. "Suitable power control based on type-2 fuzzy logic for wind-turbine dfig under hypo-synchronous mode fed by multi-level converter." 2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B). IEEE, 2017.
- [26] Heydari, E., M. Rafiee, and M. Pichan. "Fuzzy-genetic algorithmbased direct power control strategy for DFIG." Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering 14.4 (2018): 353-361.
- [27] Zamzoum, Othmane, et al. "Power control of variable speed wind turbine based on doubly fed induction generator using indirect field-oriented control with fuzzy logic controllers for performance optimization." Energy Science & Engineering 6.5 (2018): 408-423.
- [28] Lee CC. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. Part I. IEEE Trans Syst Man Cybern 1990;20:404e18.
- [29] Lee CC. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. Part II. IEEE Trans Syst Man Cybern 1990;20:419e35
- [30] Ed-dahmani, Chafik, et al. "FPGA Based Variable Structure Control of Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Power." Smart Application and Data Analysis for Smart Cities (SADASC'18) (2018).
- [31] Nahilia, Houssam, et al. "Doubly fed induction wind generators model and field orientation vector control design and implementation on FPGA." International Journal of Dynamics and Control 7.3 (2019): 1005-1014.
- [32] Mahmoudi, Hassane, Marouane El Azzaoui, and Chafik Ed-Dahmani. "ZedBoard-FPGA Control of the DFIG Based Wind Power System." Modeling, Identification and Control Methods in Renewable Energy Systems. Springer, Singapore, 2019. 333-355.



انجمن مهندسین برق و الحترونیک ایران–ساحه حراسن س**ال نهـم/شیمار ۱۸**۵/ **زمسیقان ۱۴۰۱**