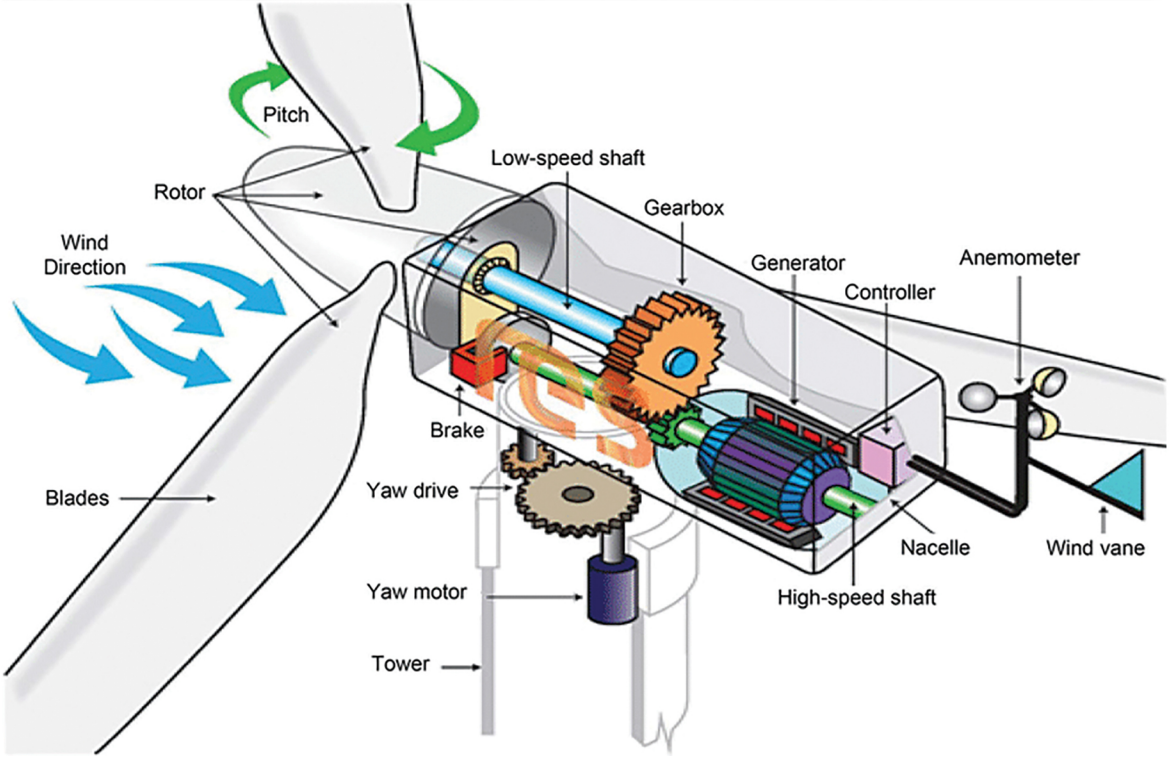


مقاله علمی-ترویجی

پیاده‌سازی روش کنترل مستقیم توان فازی در سیستم کنترل توربین بادی DFIG تحت سخت‌افزار FPGA

امین رحمانی*، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، Aminrahmani8294@yahoo.com
محمد حسین حسینی، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، smhh110@yahoo.com
*نویسنده مسئول

چکیده

یکی از روش‌های 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 می‌شود. از طرفی مدولاتور PWM جایگزین مقایسه کننده‌های هیسترزیس شده است. در این روش ارائه شده فرکانس سوئیچینگ ثابت است. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای روش ارائه شده در شرایط ثابت و گذار انجام گرفته است.

کلمات کلیدی: انرژی باد، توربین بادی، ژنراتور القایی دوسو تغذیه، کنترل مستقیم گشتاور، کنترل مستقیم 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 و Islamic 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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

Keywords: Wind energy, wind turbine, Bi-fed induction generator, direct torque control, Direct power control

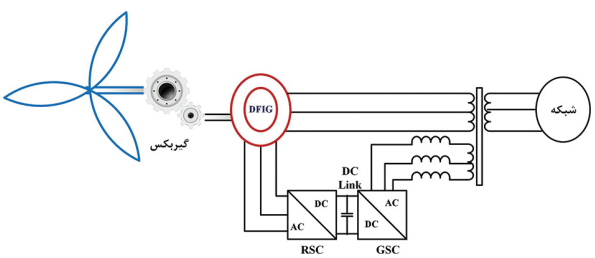
۱- مقدمه

امروزه با رشد روز افزون مصرف انرژی استفاده از سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها جهت تولید انرژی الکتریکی رو به افزایش است. با توجه به تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی توسط نیروگاه‌ها و نیاز روز افزون به انرژی الکتریکی ضرورت تولید انرژی الکتریکی با روش‌های نوین و بدون تولید آلاینده‌های زیست محیطی بیشتر مدنظر مدیریت کلان تولید انرژی قرار می‌گیرد. یکی از گونه‌های انرژی که جهت تولید نیروی الکتریسیته مورد استفاده قرار می‌گیرد انرژی بادی است. انرژی باد به منبع مهمی برای تولید برق در بسیاری از کشورها تبدیل شده است و انتظار می‌رود که انرژی باد در آینده انرژی الکتریکی بیشتری فراهم کند[۱،۲،۳].

سیستم‌های تبدیل انرژی باد با سرعت متغیر از دو روش ژنراتورهای دو سو تغذیه [۴] یا کانورترهای کامل قدرت پیاده‌سازی می‌شوند[۵،۶]. امروزه بسیاری از مزارع بادی بر مبنای فناوری DFIG با کانورترهای با نرخ ۲۰ تا ۳۰ درصد از توان ژنراتور، کار می‌کنند. در مقایسه با ژنراتورهای القایی سرعت ثابت در ژنراتور DFIG با استفاده از کنترل پارامترهای روتور می‌توان به محدوده وسیع، قابل انعطاف و سریع کنترل توان اکتیو و راکتیو دست یافت[۴،۷،۸]. شماتیک سیستم تبدیل انرژی باد مبتنی بر DFIG در شکل(۱) نشان داده شده است.

درحالی‌که روش کنترل بردار جریان روتور به‌عنوان یک روش مرسوم برای کنترل ژنراتور DFIG شناخته می‌شود[۷،۸،۹،۱۰،۱۱]. برای به کارگیری روش کنترل برداری، نیاز به استفاده از کنترل‌کننده‌های PI می‌باشد که عیب اصلی آنها مقاومت کنترل‌کننده به علت رفتار غیرخطی توربین بادی و نوسانات تیغه است و این امکان وجود دارد که پس از مدتی نیاز به تصحیح ضرایب کنترل‌کننده‌ها باشد .

امروزه روش‌های کنترل مستقیم به‌دلیل 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 می‌رساند و پیچیدگی الگوریتم‌های روش کنترل برداری را ندارد و فقط جهت تخمین شار، وابسته به مقاومت استاتور می‌باشد[۱۴،۱۵،۱۶] روش DTC به‌طور مستقیم گشتاور و شار ماشین را به‌وسیله انتخاب بردارهای ولتاژ مناسب از جدول کلیدزنی و با استفاده از موقعیت شار و گشتاور استاتور کنترل می‌کند[۱۷،۱۸].



شکل ۱: شماتیک سیستم تبدیل انرژی باد مبتنی بر DFIG

روش کنترل مستقیم توان DPC از روش کنترل مستقیم گشتاور DTC نشات گرفته است، که نسبت به روش کنترل برداری دارای مزایای زیادی می‌باشد. که از جمله آن می‌توان به سادگی 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 توان‌های اکتیو و راکتیو مرجع و مقادیر اندازه‌گیری شده و موقعیت زاویه ولتاژ انتخاب می‌شوند. 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 فرکانس کلیدزنی مبدل‌ها به‌دلیل تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو و پهنای باند هیسترزیس متفاوت است[۲۲،۲۳]. برای حل این موضوع راه‌های مختلفی پیشنهاد شده است. با توجه به مطالب گفته شده روش‌های کنترلی براساس جهت‌گیری شار استاتور بوده و الگوریتم‌های پیچیده‌ای دارند که آنها را برای اجرای عملی ناکارآمد می‌کند[۲۴]. طبق[۲۵] برای کم کردن ریپل توان روش Fuzzy و DSVM با هم ترکیب شده‌اند، که این عمل براساس جهت‌گیری 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 $Erdq$ جمع شده تا ولتاژهای روتور تولید شود، در حالی‌که در روش کنترل مستقیم توان تمام فازی ولتاژهای روتور به‌طور مستقیم توسط کنترل‌کننده فازی تولید می‌شوند. در هر دو روش ارائه شده مقادیر مرجع به‌دست آمده برای ولتاژهای روتور به مدولاتور PWM داده می‌شود[۲۶،۲۷]. به‌طورکلی استفاده از کنترل‌کننده فازی دارای مزایای زیر می‌باشد:

- عدم نیاز به سیستم تحت کنترل
- عدم نیاز به سنسورهای دقیق برای اندازه گیری
- پیاده‌سازی آسان

روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر فازی به‌طور مستقیم توان‌های اکتیو و راکتیو براساس کنترل‌کننده فازی همراه با توان‌های اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده، ولتاژ استاتور و سرعت روتور را کنترل می کند. در حالی روش کنترل مستقیم توان تمام فازی فقط نیاز به مقادیر اندازه‌گیری شده و مرجع توان‌های اکتیو و راکتیو دارد. در روش‌های ارائه شده کنترل‌کننده‌های PI مقایسه‌کننده‌های هیسترزیس و جدول کلیدزنی حذف شده است.

روش‌های کنترلی پیشنهادی فقط برای مدل‌سازی‌های عملی به‌صورت تئوری مناسب بوده و برای مدل‌سازی‌های واقعی مناسب نبوده و دارای مشکلاتی از جمله تاخیر در محاسبات و تاخیر در ارسال خروجی اطلاعات می‌باشد. پس از بررسی‌های فراوان برای حل این مشکل و کارآمد بودن روش‌های ارائه شده در صنعت و کارهای عملی از یک بورد FPGA استفاده شده که تمامی روش‌های پیشنهادی در آن پیاده‌سازی شده است. علت استفاده از بورد FPGA سرعت پردازش بالای اطاعات و همچنین به‌روزرسانی کردن سخت‌افزار بوده است. شبیه‌سازی‌های فراوانی

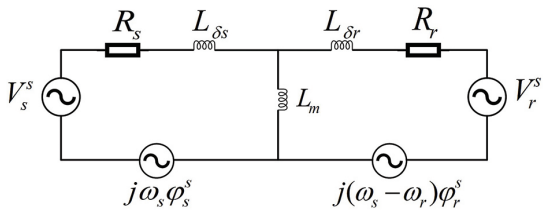
[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

برای روش‌های گفته شده انجام شده است که اثربخشی این روش‌ها را بر روی بورد FPGA تایید می‌کند.

۲- اصول توان اکتیو و راکتیو کنترل کننده‌های پیشنهادی

۲-۱- مدل‌سازی توربین بادی DFIG

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



شکل۲: مدل ژنراتور القایی دوسوتغذیه در دستگاه چرخان با سرعت سنکرون

با توجه به شکل(۲) معادلات ولتاژ مدار استاتور و روتور به صورت روابط زیر بیان می‌شود[۶].

$$V_s^s = R_s I_s^s + \frac{d\varphi_s^s}{dt} + j\omega_s\varphi_s^s \quad (۱)$$

$$V_r^s = R_r I_r^s + \frac{d\varphi_r^s}{dt} + j(\omega_s - \omega_r)\varphi_r^s \quad (۲)$$

$$\varphi_s^s = L_s I_s^s + L_m I_r^s \quad (۳)$$

$$\varphi_r^s = L_m I_s^s + L_r I_r^s \quad (۴)$$

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

$$P_s + jQ_s = -\frac{3}{2}V_s^s \times I_s^s \quad (۵)$$

بنابراین در شرایط عملکرد نرمال و متعادل شبکه، دامنه و سرعت شار ثابت است. در نتیجه $\frac{d|\varphi_s^s|}{dt} = 0$ می‌شود. اگر مولفه محور مستقیم ولتاژ استاتور را هم جهت با مولفه محور مستقیم دستگاه چرخان گردانیم، با صرف‌نظر کردن از مقاومت استاتور به رابطه (۶) دست پیدا می‌کنیم.

$$\begin{cases} V_{sdq} = V_{sd} \\ V_{sdq} = j\omega_s\varphi_{sdq} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \varphi_{sd} = 0 \\ \varphi_{sq} = -\frac{V_{sd}}{\omega_s} \end{cases} \quad (۶)$$

با توجه به معادلات (۳)، (۴) و (۶) به توان‌های اکتیو و راکتیو می‌رسیم.

$$P_s = K_\sigma V_{sd}\varphi_{rd} \quad (۷)$$

$$Q_s = -K_\sigma V_{sd}\left(\frac{L_r}{L_m}.\frac{V_{sd}}{\omega_s} + \varphi_{rq}\right) \quad (۸)$$

که در معادله (۷) و (۸) $K_\sigma = \frac{3}{2}\frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$ می‌باشد. با توجه به معادلات (۷) و (۸)، در شرایطی که ولتاژ شبکه متعادل است 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:

$$\frac{d\varphi_{rdq}}{dt} = \frac{\varphi_{rdq}(K+1)-\varphi_{rdq}(K)}{T_s} = V_{rdq}(K) - R_r I_{rdq}(K) - j(\omega_s - \omega_r)\varphi_{rdq}(K) \quad (۹)$$

با صرف‌نظر کردن از مقاومت روتور اجزای شار روتور در نقطه نمونه برداری (k+۱) بدست می‌آید.

$$\begin{cases} \varphi_{rd}(K+1)=\varphi_{rd}(K)+T_s V_{rd}(K)+T_s(\omega_s-\omega_r)\varphi_{rq}(K) \\ \varphi_{rd}(K+1)=\varphi_{rq}(K)+T_s V_{rq}(K)+T_s(\omega_s-\omega_r)\varphi_{rd}(K) \end{cases} \quad (۱۰)$$

با قرار دادن معادله (۱۰)، در معادلات (۷) و (۸)، مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو در لحظه نمونه‌برداری K+۱، به صورت معادله (۱۱) به‌دست می‌آید.

$$\begin{cases} P(K+1) = K_\delta V_{sd}(K+1)\varphi_{rd}(K+1) \\ P(K+1) \cong K_\delta V_{sd}(K+1)\varphi_{rd}(K+1) \\ Q(K+1) = -K_\delta V_{sd}(K+1)\left[\frac{L_r}{L_m}.\frac{V_{sd}(K)}{\omega_s} + \varphi_{rd}(K+1)\right] \\ Q(K+1) \cong -K_\delta V_{sd}(K+1)\left[\frac{L_r}{L_m}.\frac{V_{sd}(K)}{\omega_s} + \varphi_{rd}(K+1)\right] \end{cases} \quad (۱۱)$$

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

$$\begin{aligned} P(K+1) &= P_{ref}(K) \\ Q(K+1) &= Q_{ref}(K) \end{aligned} \quad (۱۲)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd}(K) = \frac{P_{ref}-P(K)}{T_s K_\delta V_{sd}(k)} + \frac{\omega_s-\omega_r}{K_\delta V_{sd}(K)}Q(K) + \frac{(\omega_s-\omega_r)L_r}{L_m\omega_s}V_{sd}(K) \\ V_{rd}(K) = \frac{Q_{ref}-Q(K)}{T_s K_\delta V_{sd}(k)} + \frac{\omega_s-\omega_r}{K_\delta V_{sd}(K)}P(K) \end{cases} \quad (۱۳)$$

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 به‌صورت زیر بازنویسی کرد.

$$V_{rd} = U_{rd} + E_{rd} \quad (۱۴)$$

$$V_{rq} = U_{rq} + E_{rq} \quad (۱۵)$$

که:

$$U_{rd} = K_p(P_{ref} - P) \quad (۱۶)$$

$$U_{rq} = -K_p(Q_{ref} - Q) \quad (۱۷)$$

$$E_{rd} = \omega_{slip}\left(\frac{Q(K)}{K_\delta V_{sd}(K)} + \frac{L_r V_{sd}(K)}{L_m\omega_s}\right) \quad (۱۸)$$

$$E_{rq} = \omega_{slip}\frac{P(K)}{K_\delta V_{sd}(K)} \quad (۱۹)$$

براساس معادلات(۱۶) تا (۱۹) می‌توان نتیجه گرفت که ولتاژهای مرجع روتور از دو جز تشکیل شده است. نخستین جز $Urdq$ که خروجی کنترل‌کننده‌های تناسبی بوده که مقادیر K_p و K_q ضرایب کنترل‌کننده‌ها می‌باشند. جز دوم E_{rdq} که متناسب با فرکانس لغزش می‌باشد.

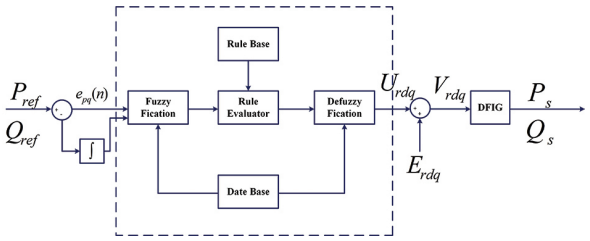
$$\omega slip = \omega s - \omega r$$

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

خطای توان‌های اکتیو و راکتیو، E_{rq} و E_{rd} همچنین انتگرال این خطاها به عنوان ورودی‌های کنترل‌کننده فازی مورد استفاده قرار

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

می‌گیرند. ساختار کنترل مستقیم توان مبتنی برکنترل‌کننده فازی در شکل (۳) نشان داده شده است.



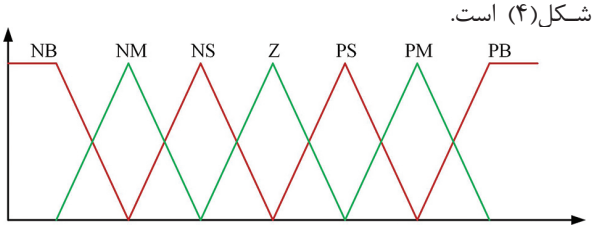
شکل۳: ساختار کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده فازی

۳-۲- منطق کنترل کننده فازی

همان‌طورکه در شکل نشان داده شده است خطای توان‌های اکتیو و راکتیو و همچنین انتگرال آنها به‌عنوان ورودی‌های کنترل‌کننده فازی استفاده شده است. خروجی کنترل‌کننده فازی به عنوان ولتاژ مرجع روتور استفاده می‌شود. از طرفی از دو کنترل‌کننده فازی مستقل برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو استفاده شده است. همه ورودی‌ها و خروجی از ۷ تابع عضویت استفاده شده است که این توابع عضویت عبارتند از:

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

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



شکل۴: توابع عضویت خطای توان اکتیو

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

جدول۱: قوانین کنترل‌کننده فازی

$\int e$ / e	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	Z
PM	PB	PB	PB	PM	PS	Z	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	Z	NS	NM	NB	NB	NB
NB	Z	NS	NM	NB	NB	NB	NB

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

$$\text{if}\left(e_p(e_q\ is\ X)\ AND\ (\int e_p(\int e_q)\ is\ y)\ then\ (U_{rd}(U_{rq})\ is\ w)\right)$$

عملکرد سیستم فازی براساس قانون ممدانی می‌باشد[۲۸،۲۹]. وقتی مجموعه‌ای از ورودی‌ها خوانده می‌شود، هر کدام از قوانین خروجی خود را تولید می‌کنند. به‌عنوان مثال برای کنترل‌کننده فازی توان اکتیو خروجی به‌صورت زیر می‌باشد.

$$\alpha_i \min\left\{\mu_p(e_p)\ و\ \mu_{\int p}(\int e_p)\right\}$$

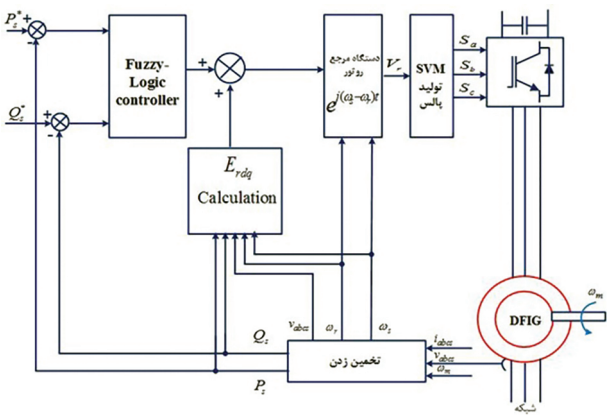
μ_p and $\mu_{\int p}$ توابع عضویت هر ورودی است و α_i ضریب وزنی می‌باشد. در مرحله بعد این خروجی با تمام توابع عضویت متغیرهای خروجی مقایسه می‌شوند:

$$O_i \min\left\{\alpha_i\ و\ \mu_{vi}\right\}$$

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

$$\mu_v = \max\{O_i\}\ i = ۱،۲،...$$

در آخر از روش نافازی‌سازی برای تولید ولتاژ خروجی استفاده می‌شود. به‌طورکلی می‌توان گفت که نافازی‌سازی فرآیند تبدیل متغیرها از محیط فازی به محیط قطعی می‌باشد. بلوک دیاگرام روش پیشنهادی کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل‌کننده فازی در شکل(۵) نشان داده شده است.



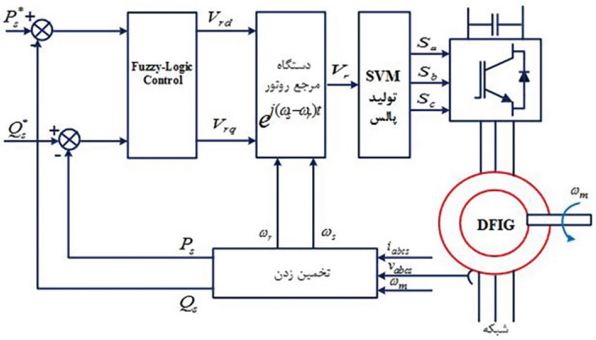
شکل۵: بلوک دیاگرام کنترلی روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل‌کننده فازی

۳-۳- کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل‌کننده 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 می‌باشد. به عبارت دیگر این روش عملکرد دینامیکی DFIG را بهبود می‌بخشد. از طرفی چون این مولفه متناسب با فرکانس لغزش می باشد پس این مولفه در سرعت سنکرون برابر صفر می‌باشد. بنابراین این مولفه در کنترل‌کننده تمام فازی حذف شده و فقط کنترل‌کننده فازی برای تولید ولتاژ مرجع روتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم کنترل‌کننده تمام فازی همانند سیستم کنترل‌کننده 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 می‌شود که طراحی و اجرای آن را ساده تر می‌کند.

در هر دو روش، هنگامی‌که ولتاژهای روتور محاسبه شد، این

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]



شکل۶: بلوک دیاگرام کنترلی روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده تمام فازی

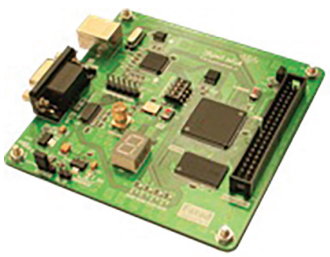
ولتاژها باید به قاب مرجع روتور تبدیل شوند. این با معادله زیر حاصل می‌شود.

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

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، SVPWM 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 می‌شدند در یک بورد FPGA با سرعت بالاتر و از همه مهمتر با امکان به‌روزرسانی کردن سخت‌افزار پیاده‌سازی می‌شوند. استفاده از بوردهایFPGA در اجرای سیستم‌های کنترلی به‌دلیل مزایایی که دارد از جمله هزینه کمتر، قابل دسترس بودن و قابلیت پیکربندی در حال گسترش می‌باشد. برای پیاده‌سازی روش‌های ارائه شده از بورد FPGA فراد اندیش که در شکل (۷) نشان داده شده استفاده شده است[۳۰،۳۱،۳۲]. تراشه این برد SPARTAN6SLX9 می‌باشد.

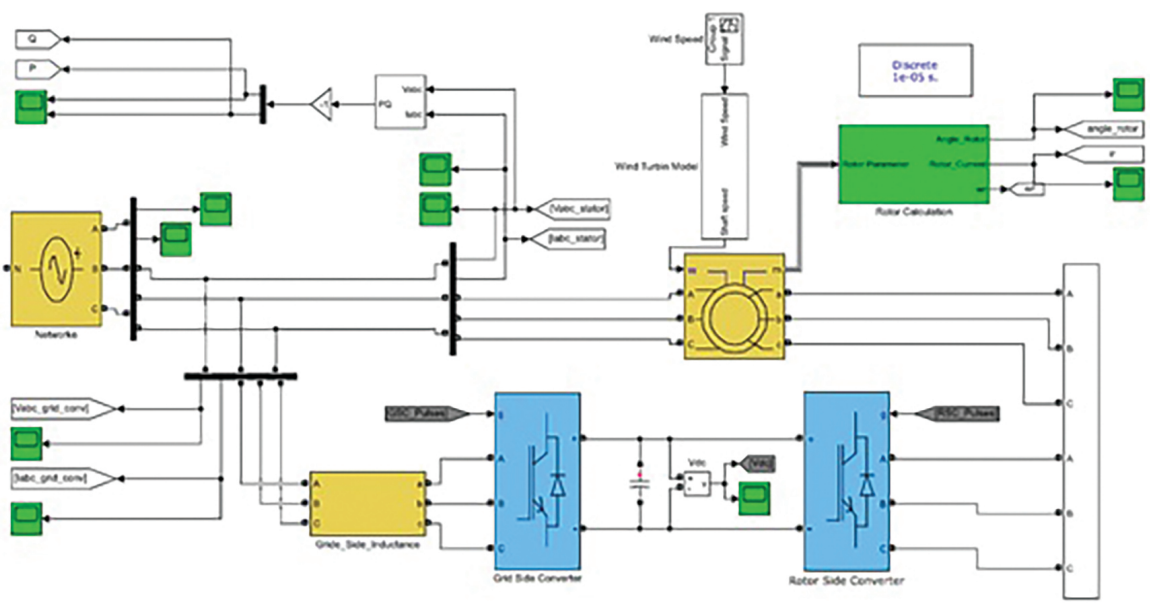


شکل۷ :نمایی از برد FPGA فراداندیش

برای پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی در بورد FPGA ابتدا هر روش به بخش‌های مختلف تقسیم شده و و در ادامه روابط هر بخش در نرم افزار ISE کد زنی می‌شوند.

۵- شبیه‌سازی

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 به‌عنوان ژنراتور القایی DFIG استفاده شده است. مشخصات ژنراتور در جدول(۲)



شکل۸: بخش قدرت توربین بادی DFIG

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

آورده شده است.

جدول۲: مشخصات فنی ژنراتور DFIG

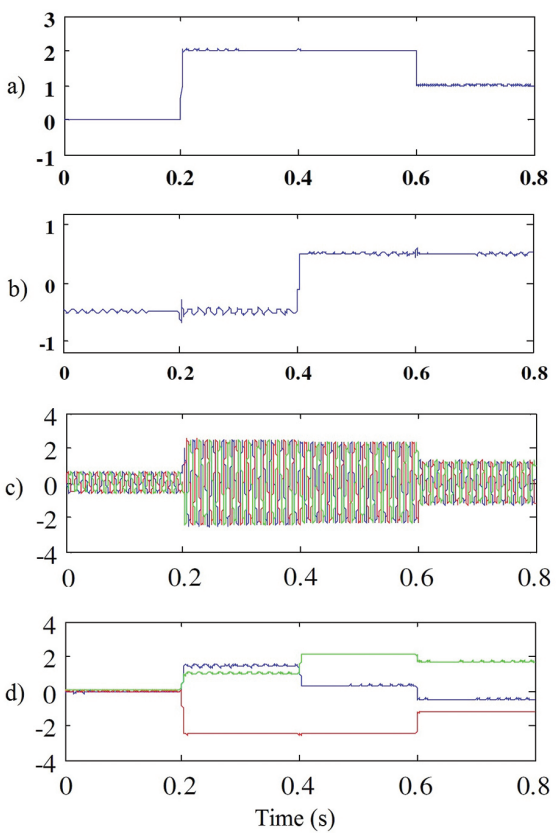
Asynchronous Machine	Pnom=2MW, Vnom=690V, Fnom=50 Hz
DClink Cpacitor	16000e-6 F
Grid Side Filter	4e-3 H +0 .01 Ω0.
Network	,Vnom=690V Fnom=50 Hz

از دو مبدل به‌عنوان مبدل‌های سمت روتور و سمت شبکه در توربین بادی DFIG استفاده شده است. این مبدل‌ها از طریق یک لینک DC به یکدیگر متصل می‌شوند، وظیفه مبدل سمت شبکه ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک DC می‌باشد. روش‌های 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 DC بر روی مقدار 1200 V تنظیم شده است[۱۰،۱۱]. از طرفی یک فیلتر RC نیز در محل اتصال استاتور به ترانسفورماتور استفاده شده است. وظیفه این فیلتر حذف هارمونیک‌های فرکانس بالای ناشی از کلیدزنی مبدل‌ها می‌باشد.در شبیه‌سازی‌های انجام شده فرکانس نمونه‌برداری روش کنترل مستقیم توان بر مبنای جدول کلید زنی 25KHz انتخاب شده است.

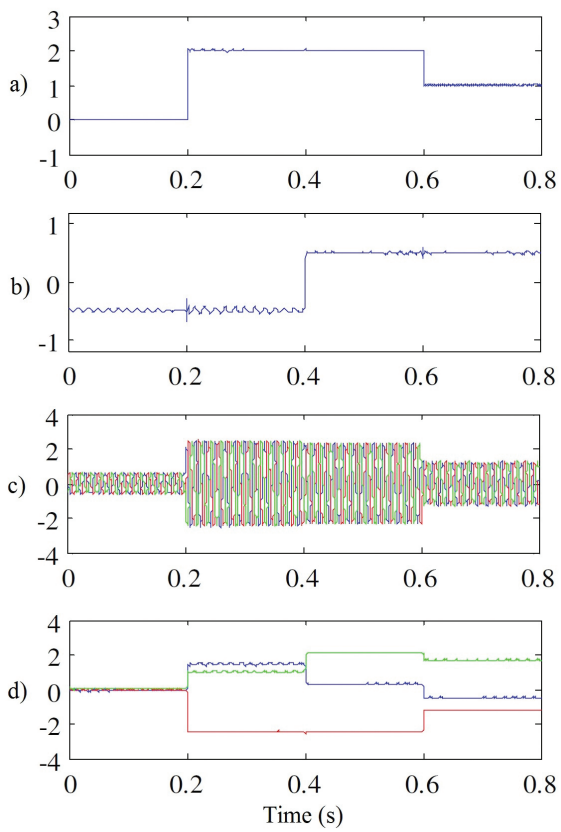
فرکانس نمونه‌برداری و کلیدزنی مبدل سمت روتور برای روش کنترل مستقیم توان پیشنهادی به ترتیب 4KHz و 2KHz است. از طرفی در روش پیشنهادی از یک مدولاتور PWM به روش SVM استفاده شده است.

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 1pu از خارج اعمال شده و در این مقدار ثابت می‌ماند. همان‌طورکه در شکل نشان داده شده است، در ابتدا توان‌های اکتیو و راکتیو به ترتیب در مقدارهای 0MW و 5MW- تنظیم شده‌اند، سپس در زمان 0.2s تغییر پله‌های افزایش در مقدار توان اکتیو از مقدار 0 به 2MW داده شده است. همچنین در زمان 0.4s تغییر پله‌های افزایش در مقدار مرجع توان راکتیو از مقدار 0.5Mvar- به 0.5Mvar داده 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 می‌کند. به منظور بررسی دقیق‌تر، تغییر پله‌ای کاهشی از مقدار 1MW به 2MW در مرجع توان اکتیو اعمال شده است. هر دو روش کنترل پیشنهادی سریع واکنش نشان داده و مقدار توان اکتیو را در مقدار مرجع تنظیم می‌کنند.

برای تایید اینکه تغییرات پارامترهای ژنراتور DFIG ناچیز بوده و تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد روش کنترلی ندارد شبیه‌سازی با ۴۰% خطا در مقدار اندوکتانس متقابل L_m و تغییرات سرعت روتور انجام گرفته است که نتایج را در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌کنیم. روش‌های کنترلی پیشنهادی عملکرد طبیعی خود را حتی با تغییر سرعت باد هم زمان با تغییرات پله‌ای در

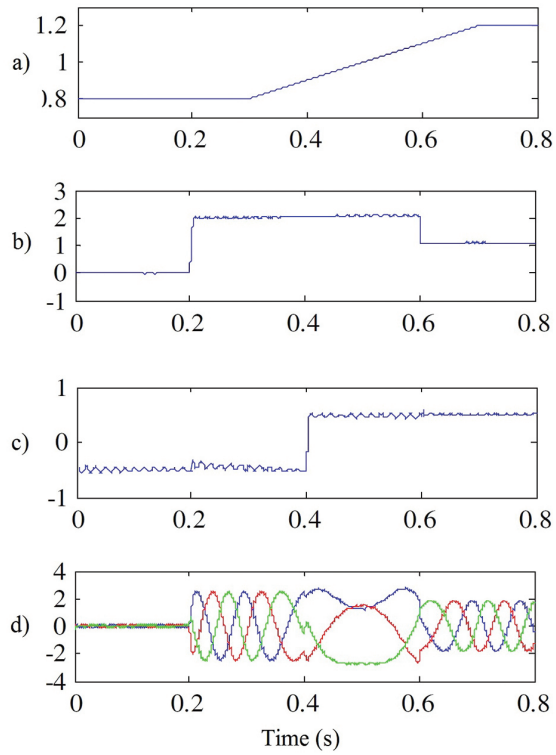


شکل۹: عملکرد حالت پایدار روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل‌کننده فازی a) توان اکتیو b ((MW) توان راکتیو c ((Mvar) جریان استاتور d ((KA) جریان روتور (KA)

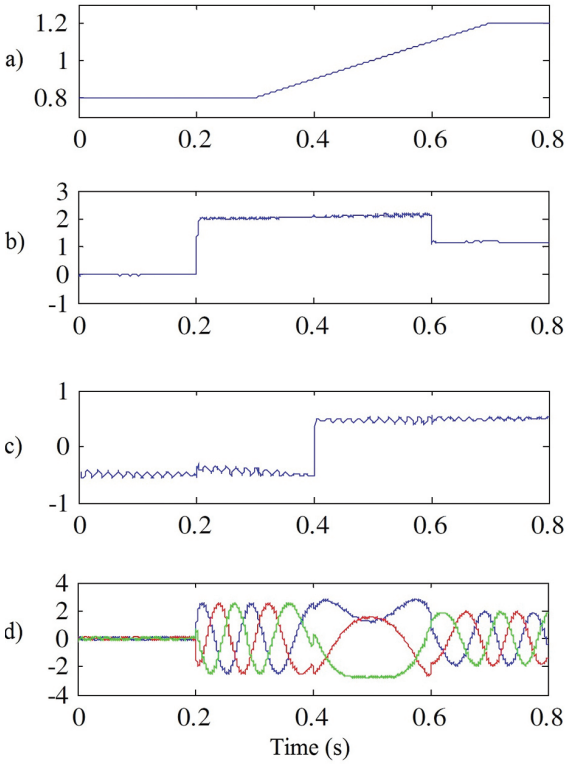


شکل۱۰: عملکرد حالت پویا روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل‌کننده تمام فازی a) توان اکتیو b ((MW) توان راکتیو c ((Mvar) جریان استاتور d ((KA) جریان روتور (KA)

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]



شکل ۱۱: عملکرد روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل‌کننده فازی تحت تغییرات سرعت روتور و ۴۰٪ خطا در مقدار اندوکتانس متقابل (Lm a) جریان استاتور (KA b) توان اکتیو (MW c) توان راکتیو (MVar d) جریان روتور KA



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 (KA b) توان اکتیو (MW c) توان راکتیو (MVar d) جریان روتور KA

توان‌های اکتیو و راکتیو حفظ می‌کند.

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 کنترل‌کننده فازی محاسبه می‌شود. در روش ارائه شده یه مدولاتور PWM جایگزین مقایسه‌کننده‌های هیسترزیس و جدول کلیدزنی شده است. روش‌های پیشنهادی جهت پیاده‌سازی بر روی سخت‌افزار مناسب نبوده و دارای مشکلاتی می‌باشند که برای حل این مشکل و کارایی روش‌های پیشنهادی فوق برای کاربردهای صنعتی از بورد FPGA استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های مختلفی بر روی روش‌های سیستم کنترلی پیشنهادی تحت بورد FPGA 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

[1] 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 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. "A novel 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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

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 DFIG-based 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, E., M. Rafiee, and M. Pichan. “Fuzzy-genetic algorithm-based 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 algorithm-based 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.

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]