

کنترل توان سیستم توربین بادی – BDFRG سرعت متغیر و زاویه پره متغیر با در نظر گرفتن اثر برشی باد و سایه برج توربین

مریم موذن¹، استادیار، مهدی ثقفی²، استادیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه بناب - بناب - ایران؛ moazen@ubonab.ac.ir

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه بناب - بناب - ایران؛ msaghafi@ubonab.ac.ir

چکیده: ژنراتور رلوکتانسی دو سو تغذیه بدون جاروبک (BDFRG) به دلیل قابلیت اطمینان بالای ساختار بدون جاروبک در کنار کارایی قابل مقایسه با همتای تجاری آن، ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG)، به عنوان یک گزینه مناسب برای کاربرد نیروگاه بادی معرفی شده است. در این مقاله، یک روش کنترل توان برای سیستم توربین بادی – BDFRG سرعت متغیر و زاویه پره متغیر با در نظر گرفتن اثر برشی باد و سایه برج توربین که موجب نوسانات توان و گشتاور می شود، ارائه شده است. روش کنترل پیشنهادی، کل ناحیه عملکرد سیستم شامل ناحیه ردیابی نقطه بیشینه توان (MPPT)، ناحیه سرعت ثابت و ناحیه توان نامی را در بر می گیرد. در سرعت باد کم، سرعت BDFRG توسط یک MPPT بر مبنای توان رؤیت شده توربین، برای دریافت بیشینه توان باد کنترل می شود. زمانی هم که سرعت باد زیاد است، با کنترل زاویه پره توربین از افزایش توان توربین به بیش از مقدار نامی جلوگیری شده و توان توربین به مقدار نامی تنظیم می شود. کنترل BDFRG توسط کنترل کننده مستقیم توان پیشگو انجام می شود. سیستم توربین بادی – BDFRG در نرم افزار MATLAB/Simulink مدل شده و عملکرد سیستم با روش کنترل پیشنهادی مطالعه شده است. نتایج شبیه سازی، عملکرد مناسب سیستم در هر سه ناحیه را نشان می دهند.

واژه های کلیدی: ژنراتور رلوکتانسی دو سو تغذیه بدون جاروبک (BDFRG)، توربین بادی، ردیابی نقطه بیشینه توان (MPPT)، کنترل زاویه پره، اثر برشی باد و سایه برج توربین.

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

نام نویسنده ی مسئول: دکتر مریم موذن

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه بناب - بناب - ایران؛ moazen@ubonab.ac.ir

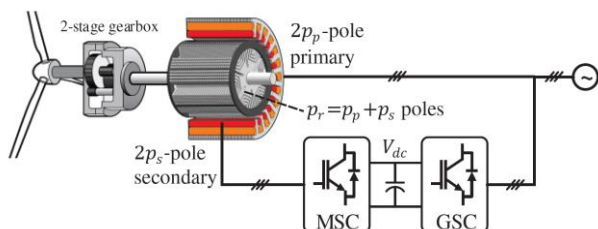
۱- مقدمه

عواملی نظیر افزایش تقاضا برای انرژی، افزایش مداوم قیمت سوخت‌های فسیلی، در کنار اثرات نامطلوب محیط زیستی این سوخت‌ها، موجب شده است که جهان به سرعت به سمت استفاده از منابع پایدار حرکت کند (داودی، ۱۳۹۹؛ فرجامی، محمدزاده، احمدیان، شجاع، ۱۳۹۹). از این میان، سیستم تبدیل انرژی باد به عنوان یکی از سریع‌ترین سیستم‌های انرژی پایدار در حال رشد است (Rihan, Nasrallah, Hasanin, & El-Shahat, 2022). ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) به دلیل قابلیت عملکرد در محدوده وسیعی از سرعت باد در کنار استفاده از مبدل کسر توان نامی ژنراتور، یک انتخاب محبوب در میان سازندگان توربین بادی برای سیستم‌های تبدیل انرژی باد با سرعت متغیر بوده است (شاه آبادی، کرمی ملانی، شجاعی، حلاجی، صافحیان، ۱۴۰۲؛ صفایی، حسینیان، عسکریان ایبانه، ۱۳۹۶؛ کمزترین، رفان، امیری، ۱۴۰۱). با این حال، نیاز به تغذیه سیم‌پیچ روتور با سیستم حلقه لغزان و جاروبک مزایای استفاده از DFIG را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Kashkooli & Jovanović, 2022; Taluo, Ristić, Agha-Kashkooli, & Jovanović, 2024).

در سال‌های اخیر، ژنراتور رلوکتانسی دو سو تغذیه بدون جاروبک (BDFRG) به عنوان یک جایگزین مناسب برای DFIG در کاربرد نیروگاه بادی مورد توجه قرار گرفته است (Agrawal, Choudhry, Mukherjee, & Banerjee, 2023, 2024; Yassin, Yassin, Hemeida, & Hallouda, 2022). مشابه DFIG، قابلیت عملکرد در محدوده تغییرات وسیع سرعت را دارد و از مبدل کسر توان نامی ژنراتور در کاربرد نیروگاه بادی استفاده می‌کند (RE Betz, 2021; Liang, Jin, & Shi, 2022). ساختار بدون جاروبک مزیت آشکار BDFRG است و حذف سیستم حلقه لغزان و جاروبک در BDFRG موجب افزایش قابلیت اطمینان، کاهش هزینه، کاهش نیاز به تعمیر و نگهداری و افزایش کارایی عملیاتی نسبت به DFIG شده است (Kashkooli & Jovanović, 2021; Yang et al., 2024).

سیستم توربین بادی - BDFRG در شکل ۱ نشان داده شده است. استاتور BDFRG دارای دو سری سیم‌پیچ سه فاز شامل سیم‌پیچ اولیه (قدرت) و سیم‌پیچ ثانویه (کنترل) است. سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه از نظر الکتریکی از هم ایزوله‌اند و تعداد قطب‌های متفاوتی دارند. روتور BDFRG که از نوع رلوکتانسی است، تعداد قطب‌هایی برابر با مجموع زوج قطب‌های استاتور دارد (R. E. Betz & Jovanovic, 2002). ساختار روتور نقش مهمی در کوپلینگ بین دو سیم‌پیچ و تولید گشتاور دارد (Agrawal et al., 2023; Long, 2023).

(Wen, Shuai, & Ma, 2023). سیم‌پیچ اولیه BDFRG به طور مستقیم به شبکه وصل می‌شود و سیم‌پیچ ثانویه از طریق یک مبدل پشت به پشت به شبکه متصل می‌گردد. مبدل پشت به پشت شامل مبدل سمت شبکه (GSC) و مبدل سمت ماشین (MSC) است که از طریق لینک DC به هم متصل‌اند و امکان مبادله دو طرفه توان را ممکن می‌سازند (Hamza Chaal & Milutin Jovanovic, 2012). محور BDFRG می‌تواند از طریق یک جعبه‌دنده ساده دو مرحله‌ای به توربین متصل شود (Kashkooli & Jovanović, 2022)، که در مقایسه با جعبه‌دنده‌های سه مرحله‌ای که در سیستم DFIG استفاده می‌شود احتمال شکست کمتری دارد (Zhang, Yu, Wang, Jin, & Jovanovic, 2018). توربین بادی از نوع سرعت متغیر با زاویه پره ثابت یا زاویه پره متغیر است.



شکل (۱): سیستم توربین بادی - BDFRG متصل به شبکه

(Kashkooli & Jovanović, 2022)

کنترل سیستم توربین بادی - BDFRG شامل کنترل مرتبه پایین سیستم و کنترل مرتبه بالای سیستم است. کنترل مرتبه پایین سیستم مربوط به کنترل BDFRG است. کنترل مرتبه بالای سیستم با تولید مقادیر مرجع مناسب برای سیستم کنترل BDFRG، عملکرد سیستم توربین بادی - BDFRG را در شرایط کاری مختلف کنترل می‌کند. اگر توربین بادی از نوع سرعت متغیر و زاویه پره متغیر باشد، کنترل مرتبه بالا مقدار مرجع زاویه پره توربین را نیز تولید می‌کند.

روش‌های کنترل متعددی در مقالات برای کنترل BDFRG پیشنهاد شده است. انواع روش‌های کنترل برداری (Ademi & Jovanovic, 2016; Aghakashkooli & Jovanovic, 2022; M Kumar & Das, 2021; Mukesh Kumar, Das, & Kiran, 2018) از جمله روش‌هایی هستند که برای کنترل BDFRG توسعه یافته‌اند. مزیت روش‌های کنترل برداری در فرکانس کلیدزنی ثابت است، اما تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌های PI مشکل است. از سایر روش‌های کنترل BDFRG می‌توان به روش‌های کنترل مستقیم (Hamza Chaal & Milutin Jovanovic, 2012; H. Chaal & M. Jovanovic, 2012; Shi & Jin, 2023) اشاره کرد که نسبت به روش‌های کنترل برداری پاسخ دینامیکی سریع‌تری دارند، اما فرکانس کلیدزنی در آن‌ها متغیر است. همچنین، روش‌های کنترل مستقیم پیچگو (Kiran & Das, 2020; M. Moazen, R. Kazemzadeh, 2020).

(M.-R. Azizian, 2016a) با پاسخ دینامیکی سریع و فرکانس کلیدزنی ثابت از جمله روش‌هایی هستند که برای کنترل BDFRG توسعه یافته‌اند.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، کنترل مرتبه بالا، وظیفه تولید مقادیر مرجع مناسب برای کنترل BDFRG در شرایط کاری مختلف سیستم را عهده‌دار است. ناحیه کاری سیستم توربین بادی - ژنراتور سرعت متغیر می‌تواند شامل سه ناحیه ردیابی نقطه بیشینه توان (MPPT)، ناحیه سرعت ثابت و ناحیه توان نامی باشد (Jiawei, Jie, & Chunying, 2013). در برخی از مقالات به کنترل مرتبه بالای سیستم نیز پرداخته شده است. در مراجع (Kashkooli & Jovanović, 2021, 2022; Mousa, Allam, & Rashad, 2016; Oualah, Kerdoun, & Boumassata, 2023)، کنترل سیستم توربین بادی - BDFRG جهت ردیابی نقطه بیشینه توان انجام شده است. در مرجع (Valenciaga & Evangelista, 2010)، ناحیه کاری سیستم توربین بادی - BDFRG سرعت متغیر و زاویه پره ثابت به دو ناحیه MPPT و ناحیه توان نامی تقسیم شده و عملکرد سیستم در این دو ناحیه کنترل شده است. در مرجع (M. Moazen, R. Azizian, 2016b) نیز، یک روش کنترل برای سیستم توربین بادی - BDFRG سرعت متغیر و زاویه پره ثابت در هر سه ناحیه کاری ارائه شده است. مرجع (Attya, Ademi, & Anaya-Lara, 2018) از دید کمک به کنترل فرکانس سیستم قدرت به مسئله پرداخته و جهت پشتیبانی از فرکانس شبکه از کنترل زاویه پره توربین استفاده کرده است.

سرعت بادی که به هریک از پره‌های توربین در یک زمان مشخص برخورد می‌کند ثابت نیست. سرعت باد با افزایش ارتفاع افزایش پیدا می‌کند که به آن اثر برشی باد گفته می‌شود. همچنین، توزیع باد در حضور برج توربین نیز تغییر می‌کند که به آن اثر سایه برج توربین گفته می‌شود. اثر برشی باد و سایه برج توربین موجب نوسانات گشتاور و توان با فرکانس سه برابر سرعت زاویه‌ای یک توربین بادی با سه پره می‌شود (Dolan & Lehn, 2006). در این مقاله، یک روش کنترل توان برای سیستم توربین بادی - BDFRG سرعت متغیر و زاویه پره متغیر با در نظر گرفتن اثر برشی باد و سایه برج توربین پیشنهاد شده است. روش کنترل پیشنهادی، که هر سه ناحیه کاری سیستم را در بر می‌گیرد، از توان رؤیت شده توربین بادی جهت محاسبه مقدار مرجع سرعت BDFRG (و در نتیجه مقدار مرجع توان BDFRG) در نواحی کاری مختلف استفاده می‌کند. چون توان توربین بادی به دلیل در نظر گرفتن اثر برشی باد و سایه برج توربین نوسانی است، متوسط توان رؤیت شده محاسبه می‌شود. زمانی که سرعت باد کم است، برای محاسبه سرعت بهینه BDFRG، یک روش MPPT بر مبنای توان توربین مورد استفاده قرار می‌گیرد. با افزایش سرعت باد، سرعت ژنراتور به مقدار بیشینه تنظیم می‌شود. با افزایش بیشتر سرعت باد و رسیدن

توان توربین به مقدار نامی، سیستم کنترل زاویه پره توربین فعال می‌شود تا با تنظیم زاویه پره توربین بادی، توان توربین به مقدار نامی کنترل شده و از افزایش توان به بیش از مقدار نامی جلوگیری شود. برای کنترل مرتبه پایین سیستم نیز از روش کنترل مستقیم توان پیشگو (PDPC) (Moazen et al., 2016a) که یک روش با فرکانس کلیدزنی ثابت و پاسخ دینامیکی سریع است، استفاده شده است. سیستم توربین بادی - BDFRG سرعت متغیر و زاویه پره متغیر در نرم‌افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شده و عملکرد سیستم با روش کنترل پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است.

نوآوری‌های مقاله را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- در نظر گرفتن نوسانات ناشی از اثر برشی باد و سایه برج توربین در مدل سیستم و روش کنترل پیشنهادی
- کنترل پره توربین برای جلوگیری از افزایش توان توربین به بیش مقدار نامی در سیستم توربین بادی - BDFRG
- ارائه یک روش کنترل توان تمام ناحیه‌ای برای سیستم توربین بادی - BDFRG سرعت متغیر و زاویه پره متغیر
- بقیه مقاله به صورت زیر تنظیم شده است: در بخش ۲ مدل BDFRG و عملکرد آن توضیح داده شده است. در بخش ۳ مدل توربین بادی با در نظر گرفتن اثر برشی باد و سایه برج توربین تشریح شده است. روش کنترل پیشنهادی برای سیستم توربین بادی - BDFRG سرعت متغیر و زاویه پره متغیر در بخش ۴ توضیح داده شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۵ نشان داده شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در نهایت، در بخش ۶ نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- ژنراتور رلوکتانسی دو سو تغذیه بدون جاروبک

تعداد قطب‌های سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه در BDFRG متفاوت است و در حالت ایده‌آل دو سیم‌پیچ به طور مستقیم باهم اندرکنش ندارند. اندرکنش بین سیم‌پیچ‌های استاتور از طریق یک روتور رلوکتانسی با شرایط زیر امکان‌پذیر است (R Betz & Jovanovic, 1998):

$$p_r = p_p + p_s \quad (1)$$

$$\omega_r = p_r \omega_m = \omega_p + \omega_s \quad (2)$$

که p_r تعداد قطب‌های برجسته روتور، p_p تعداد زوج قطب‌های اولیه، و p_s تعداد زوج قطب‌های ثانویه است و ω_r سرعت زاویه‌ای الکتریکی روتور، ω_m سرعت زاویه‌ای مکانیکی روتور، ω_p فرکانس زاویه‌ای اولیه و ω_s فرکانس زاویه‌ای ثانویه است.

مدل بردار فضایی BDFRG در چارچوب مرجع چرخان دایره‌ای با معادلات زیر بیان می‌شود (R Betz & Jovanovic, 1998):

$$\mathbf{v}_p = R_p \mathbf{i}_p + \frac{d\lambda_p}{dt} + j\omega\lambda_p \quad (3)$$

$$T_{t_class} = \frac{0.5\rho\pi R^3 C_p v_w^2}{\lambda} \quad (9)$$

$$T_{t_ws} = \frac{\rho\pi R^3 C_p v_w}{\lambda} v_{eq_ws} \quad (10)$$

$$T_{t_ts} = \frac{\rho\pi R^3 C_p v_w}{\lambda} v_{eq_ts} \quad (11)$$

که ρ چگالی هوا، R شعاع توربین بادی و v_w سرعت باد است. C_p نیز ضریب تبدیل توان توربین است که تابعی از زاویه پره، β ، و نسبت سرعت نوک پره، λ ، با رابطه زیر است (Abad et al., 2011):

$$\lambda = \frac{R\omega_t}{v_w} \quad (12)$$

که ω_t سرعت زاویه‌ای مکانیکی توربین است. v_{eq_ws} و v_{eq_ts} نیز به ترتیب سرعت باد معادل به خاطر اثر برشی باد و سایه برج توربین هستند:

$$v_{eq_ws} = v_w \left(\frac{\alpha(\alpha-1)}{8} \left(\frac{R}{H} \right)^2 + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{60} \left(\frac{R}{H} \right)^3 \cos(3\theta_t) \right) \quad (13)$$

$$v_{eq_ts} = \frac{v_w}{3R^2} \sum_{b=1}^3 \left(\frac{a^2}{\sin^2(\theta_b)} \ln \left(\frac{R^2 \sin^2(\theta_b)}{X^2} + 1 \right) - \frac{2a^2 R^2}{R^2 \sin^2(\theta_b) + X^2} \right) \quad (14)$$

که α ضریب برشی باد، H ارتفاع هاب، X فاصله پره تا مرکز برج، a شعاع برج، θ_t زاویه توربین و b شماره پره‌های توربین است. θ_b برای $b = 1, 2, 3$ برابر است با:

$$\theta_b = \theta_t + (b-1) \frac{2\pi}{3} \quad (15)$$

لازم به ذکر است که گشتاور ناشی از اثر سایه برج توربین برای هر پره، زمانی که آن پره از مقابل برج توربین عبور می‌کند اء حال می‌شود (Das et al., 2011; Dolan & Lehn, 2006). در نهایت، از ضرب گشتاور در سرعت زاویه‌ای مکانیکی توان خروجی توربین، P_t ، به دست می‌آید:

$$P_t = T_t \omega_t \quad (16)$$

از طرف دیگر با در نظر گرفتن ضریب جعبه‌دنده، N ، می‌توان گشتاور مکانیکی، T_m ، و سرعت زاویه‌ای مکانیکی، ω_m ، را در سمت ژنراتور به صورت زیر به دست آورد (Abad et al., 2011):

$$T_m = \frac{T_t}{N} \quad (17)$$

$$v_s = R_s \dot{i}_s + \frac{d\lambda_s}{dt} + j(\omega_r - \omega) \lambda_s \quad (4)$$

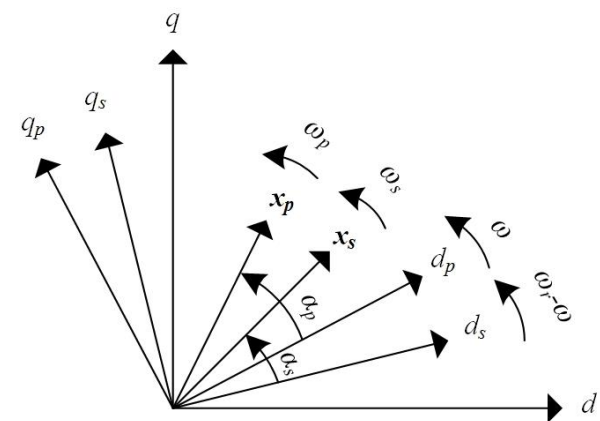
$$\lambda_p = L_p \dot{i}_p + L_{ps} \dot{i}_s^* \quad (5)$$

$$\lambda_s = L_s \dot{i}_s + L_{ps} \dot{i}_p^* \quad (6)$$

که L_{ps} و L_s ، L_p ، R_s ، R_p به ترتیب مقاوت اولیه، مقاوت ثانویه، اندوکتانس اولیه، اندوکتانس ثانویه و اندوکتانس متقابل اولیه - ثانویه هستند. $\dot{i}_p$ و $\dot{i}_s$ به ترتیب بردارهای ولتاژ، جریان و شار اولیه‌اند که در چارچوب مرجع چرخان اولیه، dq_p ، بیان شده‌اند. $\dot{i}_s$ و $\dot{i}_s$ نیز بردارهای ولتاژ، جریان و شار ثانویه‌اند که در چارچوب مرجع چرخان ثانویه، dq_s ، بیان شده‌اند. چارچوب‌های مرجع اولیه و ثانویه که به ترتیب با سرعت زاویه‌ای ω و $\omega_r - \omega$ می‌چرخند، در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

گشتاور BDFRG نیز از معادله زیر به دست می‌آید (R Betz & Jovanovic, 1998):

$$T_e = j \frac{3}{4} p_r \{ \lambda_p \dot{i}_p^* - \lambda_p^* \dot{i}_p \} \quad (7)$$



شکل (۲): بردارها و چارچوب‌های مرجع اولیه و ثانویه BDFRG

۳- توربین بادی

توربین بادی انرژی باد را مهار کرده و به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. انرژی مکانیکی حاصل، از طریق جعبه‌دنده به محور ژنراتور منتقل می‌شود. گشتاور توربین بادی در نظر گرفتن اثر برشی باد و سایه برج توربین، از معادله زیر به دست می‌آید (Das, Karnik, & Santoso, 2011):

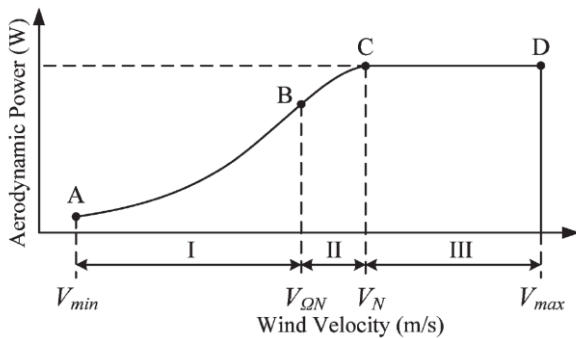
$$T_t = T_{t_class} + T_{t_ws} + T_{t_ts} \quad (8)$$

که T_{t_class} گشتاور کلاسیک توربین بادی، T_{t_ws} گشتاور ناشی از در نظر گرفتن اثر برشی باد و T_{t_ts} گشتاور ناشی از در نظر گرفتن اثر سایه برج توربین را نشان می‌دهند (Abad, Lopez, Rodríguez, Marroyo, & Iwanski, 2011; Das et al., 2011; Dolan & Lehn, 2006):

$$k_{opt_t} = \frac{0.5\rho\pi R^5 C_{p_max}}{\lambda_{opt}} \quad (23)$$

که C_{p_max} بیشینه مقدار ضریب تبدیل توان توربین بادی است. زمانی که سرعت باد کم است و سیستم در ناحیه I کار می کند، سرعت BDFRG به ω_m^* کنترل می شود. به این منظور، سرعت BDFRG مقدار مرجع مقایسه شده و نتیجه به یک کنترل کننده PI داده می شود تا با تولید مقدار مرجع مناسب گشتاور، T_{e_ref} ، سرعت را به مقدار بهینه کنترل نماید. با ضرب مقدار گشتاور مرجع در ω_p/p_r ، مقدار مرجع توان اکتیو اولیه، P_{p_ref} ، تولید می شود.

با افزایش سرعت باد، سرعت BDFRG نیز افزایش یافته و با رسیدن به حد بالای خود، ω_{m_max} ، سیستم وارد ناحیه کاری II می شود. در این ناحیه، با کنترل سرعت BDFRG به ω_{m_max} ، از افزایش سرعت ژنراتور به بیش از مقدار نامی جلوگیری می شود. در این ناحیه توان توربین هنوز به مقدار نامی نرسیده و با افزایش سرعت باد افزایش می یابد.



شکل (۳): منحنی توان ایده آل توربین بادی (Jiawei et al., 2013).

با رسیدن توان توربین به مقدار نامی در اثر افزایش سرعت باد، سیستم وارد ناحیه III می شود. در این ناحیه برای این که با افزایش بیشتر سرعت باد، توان توربین از مقدار نامی، P_{t_max} ، تجاوز نکند، از کنترل پره توربین استفاده می شود. P_{t_mean} با P_{t_max} مقایسه شده و نتیجه به یک کنترل کننده PID قابل ریست داده می شود. کنترل کننده PID زمانی فعال می شود که ورودی آن از یک مقدار منفی به یک مقدار مثبت تغییر کند (P_{t_mean} از مقدار P_{t_max} تجاوز کند). این کنترل کننده با تولید مقدار مرجع زاویه پره توربین، β_{ref} ، توان را به مقدار نامی کنترل می کند. در این ناحیه سرعت BDFRG به ω_{m_max} کنترل می شود. گزینه ریست کنترل کننده PID زمانی فعال می شود که ورودی کنترل کننده از یک مقدار مثبت به یک مقدار منفی برسد. بنابراین زمانی که سیستم از ناحیه III به ناحیه II برمی گردد، خروجی کنترل کننده PID صفر می شود.

مدل سیستم و کنترل زاویه پره توربین بادی در شکل (۵) نشان داده شده است. زاویه پره توربین با مقدار مرجع مقایسه شده و نتیجه به یک کنترل کننده PI داده می شود تا نرخ مرجع تغییرات زاویه پره، $d\beta^*$ ، به دست آید. رفتار دینامیکی سیستم کنترل سرعت تغییرات

$$\omega_m = N\omega_t \quad (18)$$

بنابراین، مدل تک-جرم سیستم، به صورت زیر است (Monfared, Madadi Kojabadi, & Rastegar, 2008):

$$T_m - T_e = \left(\frac{J_t}{N^2} + J_m \right) \frac{d\omega_m}{dt} \quad (19)$$

که J_t و J_m به ترتیب اینرسی توربین و ژنراتور هستند.

۴- روش کنترل پیشنهادی

روش کنترل پیشنهادی برای سیستم توربین بادی - BDFRG سرعت متغیر و زاویه پره متغیر، بر مبنای پیروی از منحنی ایده آل توان توربین بادی است. شکل (۳) منحنی توان ایده آل توربین بادی را نسبت به سرعت باد نشان می دهد، که شامل سه ناحیه زیر است:

- ناحیه I (ناحیه MPPT): از کمترین سرعت بادی که توربین می تواند شروع به کار کند تا سرعت بادی که سرعت ژنراتور به مقدار بیشینه می رسد.
 - ناحیه II: از سرعت بادی که سرعت ژنراتور به مقدار بیشینه می رسد تا سرعت بادی که توان توربین به مقدار نامی می رسد.
 - ناحیه III: از سرعت بادی که توان توربین به مقدار نامی می رسد تا سرعت بادی که توربین از مدار خارج می شود.
- بلوک دیاگرام روش کنترل پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است. ابتدا توان توربین توسط یک رُویت گر (Moazen et al., 2016b) رُویت می شود، سپس مقدار متوسط توان رُویت شده، P_{t_mean} ، محاسبه می گردد. با توجه به اینکه توان توربین به دلیل در نظر گرفتن اثر برشی باد و سایه برج توربین با فرکانس سه برابر سرعت چرخش توربین نوسان خواهد کرد، فرکانس نوسانات توان توربین برابر است با:

$$f_{ws_ts} = 3 \frac{\omega_t}{2\pi} = 3 \frac{\omega_m}{2\pi N} \quad (20)$$

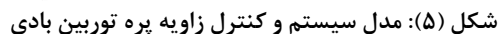
در نتیجه دوره تناوب میانگین گیری، T_{mean} ، برابر خواهد بود با:

$$T_{mean} = \frac{1}{f_{ws_ts}} = \frac{2\pi N}{3\omega_m} \quad (21)$$

برای دریافت بیشینه توان، باید نسبت سرعت نوک پره با مقدار بهینه، λ_{opt} ، برابر باشد. بنابراین، سرعت BDFRG باید به شکلی با تغییرات سرعت باد تغییر کند که λ همواره در مقدار بهینه باشد. سرعت بهینه BDFRG برای جذب بیشینه توان باد از رابطه زیر محاسبه می شود (Moazen et al., 2016b):

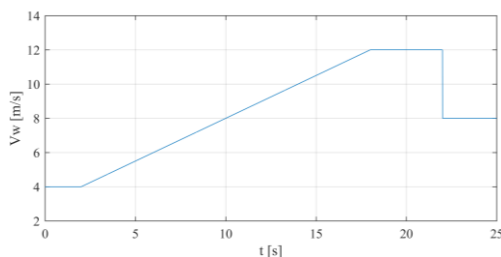
$$\omega_m^* = N \sqrt[3]{\frac{P_t}{k_{opt_t}}} \quad (22)$$

که

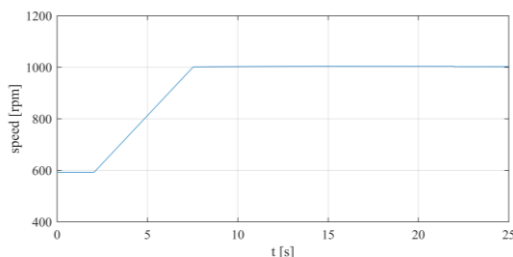


سیستم به ناحیه کاری II، زاویه پره توربین کاهش یافته و به 0° برمی گردد.

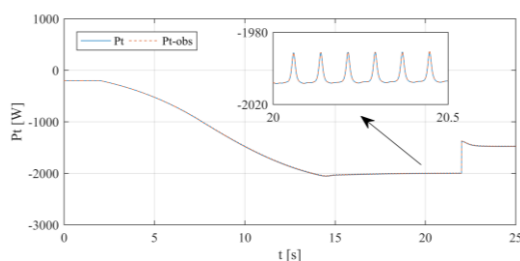
ضریب تبدیل توان توربین بادی نیز در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در ابتدا که سیستم در ناحیه I کار می کند، مقدار C_p برابر با بیشینه مقدار 0.411 است و نشان می دهد جذب بیشینه توان باد در این ناحیه صورت می گیرد. در $t \approx 7/5$ s سیستم وارد ناحیه کاری II می شود و چون سرعت BDFRG به مقدار بیشینه رسیده است، با افزایش سرعت باد از مقدار C_p کاسته می شود. با ورود به ناحیه کاری III در $t \approx 13/7$ s، با افزایش زاویه پره توربین جهت جلوگیری از افزایش توان توربین، شیب کاهش C_p افزایش می یابد تا در $t = 18$ s با تثبیت سرعت باد (در 12 m/s)، و در نتیجه تثبیت زاویه پره توربین، C_p ثابت می ماند. پس از آن در $t = 22$ s با کاهش پله ای سرعت باد، C_p هم به طور پله ای افزایش می یابد. علاوه بر این، چون کاهش سرعت باد باعث تغییر ناحیه کاری سیستم به ناحیه II می شود و زاویه پره توربین به 0° برمی گردد، در ادامه نیز C_p یک افزایش مجدد به دلیل کاهش زاویه پره توربین دارد.



شکل (۷): منحنی تغییرات سرعت باد



شکل (۸): سرعت مکانیکی BDFRG



شکل (۹): توان خروجی توربین بادی و مقدار رؤیت شده

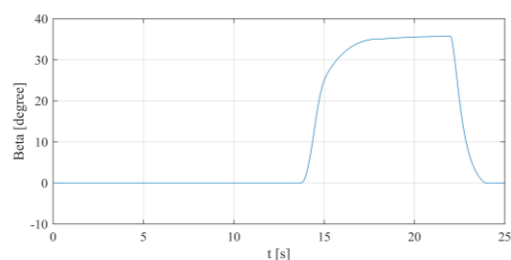
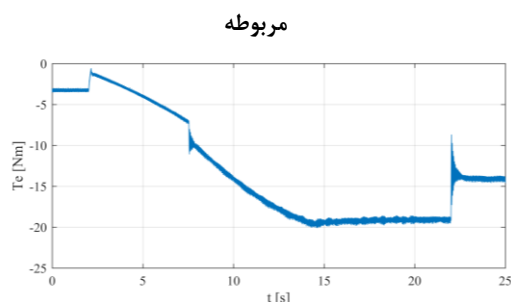
شکل (۶): منحنی ضریب تبدیل توان توربین بادی به نسبت سرعت نوك پره برای زاویه های پره متفاوت

منحنی تغییرات سرعت باد در طول تست در شکل (۷) نشان داده شده است. سرعت باد در ابتدا 4 m/s است، در $t = 2$ s افزایش می یابد تا در $t = 18$ s به 12 m/s می رسد، و دوباره در $t = 22$ s به 8 m/s افت می کند. لازم به ذکر است که مرجع توان راکت یو اولیه BDFRG برابر 0.411 است و مرجع توان اکتیو اولیه نیز توسط سیستم کنترل تعیین می شود. همچنین مقدار مرجع ولتاژ لاینک DC برابر 600 V است. در ادامه نتایج شبیه سازی نشان داده شده است. در ابتدا چون سرعت باد کم است، سیستم در ناحیه I کار می کند. شکل (۸) سرعت مکانیکی BDFRG را نشان می دهد که در ابتدا با افزایش سرعت باد افزایش می یابد. اما با رسیدن به بیشینه مقدار، تقریباً در $t \approx 7/5$ s سیستم وارد ناحیه کاری II می شود. در این ناحیه از افزایش سرعت به بیش از 1000 rpm جلوگیری شده و سرعت BDFRG به 1000 rpm تنظیم می شود. همچنین با توجه به شکل (۸)، BDFRG ابتدا در سرعت زیر-سنکرون (کمتر از 750 rpm) کار می کند و تقریباً در $t \approx 4/2$ s به سرعت سنکرون (750 rpm) می رسد و پس از آن در سرعت فوق-سنکرون (بیشتر از 750 rpm) کار می کند.

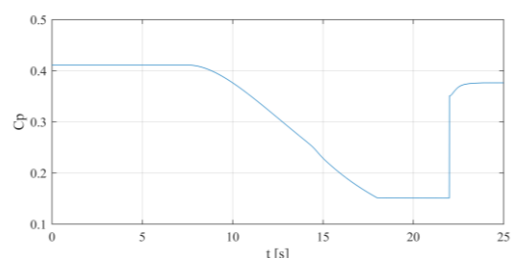
توان خروجی توربین بادی، P_t و مقدار رؤیت شده آن، P_{t-obs} در شکل (۹) نشان داده شده است. عملکرد مناسب رؤیت گر توان قابل مشاهده است. علامت منفی بیانگر تولید توان است. در ابتدا با افزایش سرعت باد توان خروجی توربین بادی نیز افزایش می یابد (ناحیه I و II). اما تقریباً در $t \approx 13/7$ s، به مقدار نامی می رسد و سیستم وارد ناحیه کاری III می شود. در این ناحیه برای جلوگیری از افزایش توان خروجی توربین در اثر افزایش سرعت باد، سیستم کنترل زاویه پره توربین وارد عمل شده و با تنظیم β ، توان خروجی توربین را به 2000 W تنظیم می کند. در این ناحیه نیز، سرعت BDFRG به 1000 rpm کنترل می شود. در $t = 22$ s که سرعت باد مجدداً افت می کند (به 8 m/s)، توان توربین نیز از مقدار بیشینه افت می کند، اما سرعت BDFRG هنوز در 1000 rpm می ماند که بیانگر عملکرد سیستم در ناحیه کاری II است. بزرگنمایی توان خروجی نیز نشان دهنده نوسانات توان خروجی به دلیل اثر برشی باد و سایه برج توربین است.

شکل (۱۰) زاویه پره توربین بادی را نشان می دهد. در ابتدا که سرعت باد کم است و توان توربین بادی کمتر از مقدار نامی است، زاویه پره توربین بادی برابر 0° است. با ورود سیستم به ناحیه کاری III در $t \approx 13/7$ s و افزایش توان توربین به بیش از مقدار نامی، سیستم کنترل زاویه پره توربین فعال می شود. زاویه پره توربین با افزایش سرعت باد افزایش می یابد تا از افزایش توان توربین به بیش از مقدار نامی جلوگیری کند. در نهایت، در $t = 22$ s با افت سرعت باد و ورود

شکل (۱۲): توان‌های اکتیو و راکتیو اولیه BDFRG و مقادیر مرجع

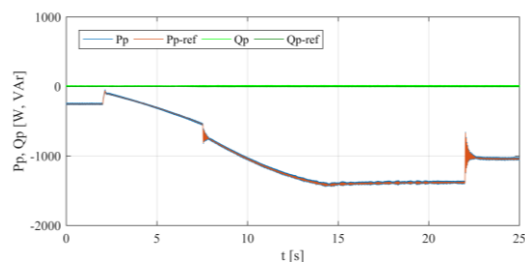


شکل (۱۰): زاویه پره توربین بادی

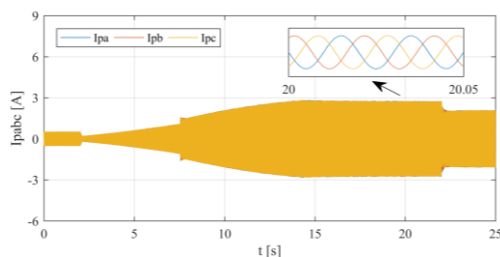


شکل (۱۱): ضریب تبدیل توان توربین بادی

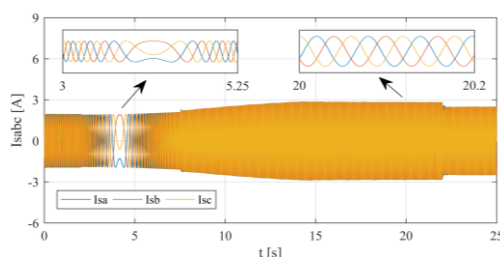
توان‌های اکتیو و راکتیو اولیه BDFRG در شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند که به خوبی مقادیر مرجع مربوطه را دنبال می‌کند. علامت منفی بیانگر تولید توان است. شکل (۱۳) نیز گشتاور الکتریکی BDFRG را نشان می‌دهد که متناسب با توان اکتیو اولیه تغییر می‌کند. جریان سه فاز اولیه BDFRG در شکل (۱۴) نشان داده شده است. با توجه به اینکه توان راکتیو اولیه صفر است، دامنه جریان اولیه متناسب با توان اکتیو اولیه تغییر می‌کند. فرکانس جریان اولیه نیز ثابت و برابر ۵۰ Hz است که در شکل بزرگنمایی شده قابل مشاهده است. جریان ثانویه BDFRG در شکل (۱۵) نشان داده شده است. فرکانس جریان ثانویه ثابت نیست و با تغییر سرعت BDFRG طبق رابطه (۲) تغییر می‌کند ($\omega_s = \omega_r - \omega_p$). در ابتدا که سرعت BDFRG پایین است و در ناحیه زیر سنکرون کار می‌کند، فرکانس جریان ثانویه زیاد است. اما با افزایش سرعت و نزدیک شدن به سرعت سنکرون، فرکانس ثانویه کاهش یافته و در سرعت سنکرون (تقریباً در $t \approx 4/2$ s) به صفر می‌رسد. همچنین، دوباره با افزایش سرعت BDFRG و فاصله گرفتن از سرعت سنکرون، فرکانس ثانویه افزایش می‌یابد. تغییر توالی جریان ثانویه از وضعیت *acb* به وضعیت *abc* در سرعت سنکرون در شکل بزرگنمایی شده قابل مشاهده است. شکل (۱۶) نیز ولتاژ لینک DC را نشان می‌دهد که به مقدار مرجع کنترل شده است.



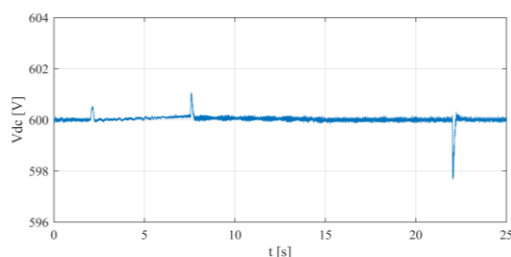
شکل (۱۳): گشتاور الکتریکی BDFRG



شکل (۱۴): جریان اولیه BDFRG



شکل (۱۵): جریان ثانویه BDFRG



شکل (۱۶): ولتاژ لینک DC

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش کنترل توان برای سیستم توربین بادی - ژنراتور رلکتناسی دو سو تغذیه بدون جاروبک سرعت متغیر و زاویه پره متغیر با در نظر گرفتن اثر برشی باد و سایه برج توربین پیشنهاد شد. روش کنترل پیشنهادی که بر مبنای پیروی از منحنی توان ایده‌آل توربین بادی است، کل ناحیه عملکرد سیستم را در بر می‌گیرد. منحنی توان ایده‌آل توربین بادی ناحیه کاری سیستم را به سه ناحیه ردیابی نقطه بیشینه توان، سرعت ثابت و توان ثابت تقسیم می‌کند. به دلیل اثر برشی باد و سایه برج توربین، سرعت باد که به هر یک از پره‌های توربین در یک زمان مشخص برخورد می‌کند یکسان نیست و

Agrawal, S., Choudhry, H., Mukherjee, D., & Banerjee, A. (2023). Modeling and Design Optimization of Rotor Flux-Barriers in a Brushless Doubly-Fed Reluctance Machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*

Agrawal, S., Choudhry, H., Mukherjee, D., & Banerjee, A. (2024). Optimal Torque Angle for a Switched Brushless Doubly Fed Reluctance Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*

Attya, A., Ademi, S., Jovanović, M., & Anaya-Lara, O. (2018). Frequency support using doubly fed induction and reluctance wind turbine generators. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 101, 403-414.

Betz, R. (2021). *Comparison of Rotor Side Converter Protection for DFIGs and Brushless Doubly Fed Reluctance Machines under Fault Conditions*. Paper presented at the 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe).

Betz, R., & Jovanovic, M. (1998). Introduction to brushless doubly fed reluctance machines-the basic equations: tech. rep., Dept. Elec. Energy Conversion, Aalborg University, Denmark.

Betz, R. E., & Jovanovic, M. G. (2002). Theoretical analysis of control properties for the brushless doubly fed reluctance machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 17(3), 332-339. doi: 10.1109/TEC.2002.801997

Bouafia, A., Gaubert, J. P., & Krim, F. (2010). Predictive direct power control of three-phase pulsewidth modulation (PWM) rectifier using space-vector modulation (SVM). *IEEE Transactions on Power Electronics* 25(1), 228-236. doi: 10.1109/TPEL.2009.2028731

Chaal, H., & Jovanovic, M. (2012). Power control of brushless doubly-fed reluctance drive and generator systems. *Renewable Energy* 37(1), 419-425.

Chaal, H., & Jovanovic, M. (2012). Practical implementation of sensorless torque and reactive power control of doubly fed machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59(6), 2645-2653. doi: 10.1109/TIE.2011.2161065

Das, S., Karnik, N., & Santoso, S. (2011). Time-domain modeling of tower shadow and wind shear in wind turbines. *ISRN Renewable Energy*, 2011.

Dolan, D. S. L., & Lehn, P. W. (2006). Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 21(3), 717-724. doi: 10.1109/TEC.2006.874211

Iqbal, A., Lamine, A., Ashraf, I., & Mohibullah. (2006). *Matlab/simulink model of space vector PWM for three-phase voltage source inverter*. Paper presented at the 41st International Universities Power Engineering Conference, Newcastle-upon-Tyne.

Jiawei, C., Jie, C., & Chunying, G. (2013). New overall power control strategy for variable-speed fixed-pitch wind turbines within the whole wind velocity range. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 60(7), 2652-2660. doi: 10.1109/TIE.2012.2196901

Jovanovic, M. G., Jian, Y., & Levi, E. (2006). Encoderless direct torque controller for limited speed range applications of brushless doubly fed reluctance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications* 42(3), 712-722. doi: 10.1109/TIA.2006.872955

Kashkooli, M. A., & Jovanović, M. G. (2021). Sensorless adaptive control of brushless doubly-fed reluctance generators for wind power applications. *Renewable Energy* 177, 932-941.

Kashkooli, M. A., & Jovanović, M. G. (2022). Parameter independent control of doubly-fed reluctance wind generators without a rotor position sensor. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 137, 107778.

هر یک از پره‌ها توان متفاوتی را دریافت می‌کنند. در نتیجه در یک توربین سه پره، توان حاصل از پره‌ها نوسانی است. بنابراین، در ابتدا توان توربین رؤیت شد و از یک متوسط‌گیر برای محاسبه متوسط توان دریافتی از سه پره استفاده شد. در ناحیه کاری I که سرعت باد کم است، سرعت بهینه ژنراتور با استفاده از متوسط توان رؤیت شده توربین جهت دریافت بیشینه توان باد محاسبه می‌شود. با افزایش سرعت باد سیستم وارد ناحیه II شده و سرعت ژنراتور به مقدار بیشینه کنترل می‌شود. زمانی که سرعت باد زیاد است و سیستم در ناحیه III کار می‌کند، برای عملکرد ایمن سیستم توربین - ژنراتور، سیستم کنترل زاویه پره توربین وارد عمل می‌شود و با تنظیم زاویه پره، توان توربین به مقدار نامی کنترل می‌شود. برای بررسی عملکرد روش کنترل پره‌های پیشنهادی، سیستم در نرم افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شد و عملکرد سیستم طی تغییرات تدریجی و پله‌ای باد تست شد. نتایج شبیه‌سازی کارایی روش کنترل پره‌های پیشنهادی در دریافت بیشینه توان باد، جلوگیری از افزایش سرعت ژنراتور از بیشینه مقدار و ممانعت از افزایش توان توربین به بیش از مقدار نامی را نشان می‌دهند.

اختصارات

BDFRG	Brushless doubly fed reluctance generator	ژنراتور ولوکتانسی دو سو تغذیه بدون جاروبک
DFIG	doubly fed induction generator	ژنراتور القایی دو سو تغذیه
GSC	Grid side convertor	مبدل سمت شبکه
MSC	Machine side convertor	مبدل سمت ماشین
MPPT	Maximum power point tracking	ردیابی نقطه بیشینه توان
PDPC	Predictive direct power control	کنترل مستقیم توان پیشگو
SVPWM	Space vector pulse width modulation	مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی

مراجع

Abad, G., Lopez, J., Rodríguez, M., Marroyo, L., & Iwanski, G. (2011). *Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation* (Vol. 85): John Wiley & Sons.

Ademi, S., & Jovanovic, M. (2016). Control of doubly-fed reluctance generators for wind power applications. *Renewable Energy* 85, 171-180.

Aghakashkooli, M., & Jovanovic, M. G. (2022). A Dual Observer for Parameter-Free Encoderless Control of Doubly-Fed Reluctance Generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 70(4), 3461-3470.

- Zhang, F., Yu, S., Wang, Y., Jin, S., & Jovanovic, M. G. (2018). Design and performance comparisons of brushless doubly fed generators with different rotor structures. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66(1), 631-640.
- داودی م؛ محمدقلیها م، (۱۳۹۹). پیش بینی توان خروجی مزارع بادی براساس الگوریتم‌های فازی با هدف کاهش تاثیر عدم قطعیت انرژی باد، نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق/ایران، ۹(۴)، صص ۳۴-۲۴.
- شاه آبادی ا؛ کرمی ملانی ع؛ شجاعی ع؛ حلاجی م؛ صافحیان ج، (۱۴۰۲). ردیابی نقطه حداکثر توان توربین‌های بادی با الگوریتم رقابت استعماری مبتنی بر آشوب، نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق/ایران، ۱۲(۲)، صص ۸۹-۸۲.
- صفایی آ؛ حسینیان س؛ عسکریان ابیانه ح، (۱۳۹۶). بهبود قابلیت گذر از خطای توربین بادی دارای ژنراتور القایی تغذیه دوگانه در ریز شبکه، نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق/ایران، ۶(۲)، صص ۴۵-۳۴.
- فرجامی ف؛ محمدزاده ا؛ احمدیان ع؛ شجاع س، (۱۳۹۹). طراحی کنترل کننده فازی $PI^{\wedge}I$ برای کنترل زاویه گام در توربین بادی سرعت متغیر، نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق/ایران، ۹(۱)، صص ۱۵-۱.
- کمرزین م؛ رفان م؛ امیری پ، (۱۴۰۱). تشخیص عیب و کنترل تحمل پذیر خطا در مبدل پشت به پشت DFIG، نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق/ایران، ۱۱(۱)، صص ۱۳۸-۱۲۶.
- Kiran, K., & Das, S. (2020). Variable speed operation of brushless doubly fed reluctance machine drive using model predictive current control technique. *IEEE Transactions on Power Electronics* 35(8), 8396-8404.
- Kumar, M., & Das, S. (2021). *Speed Control of Brushless Doubly-fed Reluctance Generator under MTPIA and UPPF Conditions for Wind Power Application*. Paper presented at the 2021 International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE).
- Kumar, M., Das, S., & Kiran, K. (2018). Sensorless speed estimation of brushless doubly-fed reluctance generator using active power based MRAS. *IEEE Transactions on Power Electronics* 34(8), 7878-7886.
- Liang, S., Jin, S., & Shi, L. (2022). Research on Control Strategy of Grid-connected Brushless Doubly-fed Wind Power System Based on Virtual Synchronous Generator Control. *CEES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 6(4), 404-412.
- Long, D., Wen, H., Shuai, Z., & Ma, Z. (2023). Evolution and optimization of a brushless doubly-fed machine with an asymmetrical reluctance and magductance rotor. *IET Renewable Power Generation* 17(12), 2950-2963.
- Moazen, M., Kazemzadeh, R., & Azizian, M.-R. (2016a). Model-based predictive direct power control of brushless doubly fed reluctance generator for wind power applications. *Alexandria Engineering Journal* 55(3), 2497-2507.
- Moazen, M., Kazemzadeh, R., & Azizian, M. R. (2016b). Power control of BDFRG variable-speed wind turbine system covering all wind velocity ranges. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(2), 477-486.
- Monfared, M., Madadi Kojabadi, H., & Rastegar, H. (2008). Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled dc motor. *Renewable Energy* 33(5), 906-913.
- Mousa, M. G., Allam, S., & Rashad, E. M. (2016). Maximum Wind-Power Extraction under Minimum Converter Current of a Grid-Connected Wind-Driven Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator. *signs*, 2, 1.
- Oualah, O., Kerdoun, D., & Boumassata, A. (2023). Super-twisting sliding mode control for brushless doubly fed reluctance generator based on wind energy conversion system. *Electrical Engineering & Electromechanics*(2), 86-92.
- Rihan, M., Nasrallah, M., Hasanin, B., & El-Shahat, A. (2022). A Proposed Controllable Crowbar for a Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator, a Grid-Integrated Wind Turbine. *Energies*, 15(11), 3894.
- Shi, L., & Jin, S. (2023). Direct torque control and space vector modulation-based direct torque control of brushless doubly-fed reluctance machines. *IET Electric Power Applications*
- Taluo, T., Ristić, L., Agha-Kashkooli, M.-R., & Jovanović, M. (2024). Hardware-in-the-loop testing of brushless doubly fed reluctance generator under unbalanced grid voltage conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 158, 109940.
- Valenciaga, F., & Evangelista, C. A. (2010). 2-sliding active and reactive power control of a wind energy conversion system. *IET Control Theory & Applications*, 4(11), 2479-2490. doi: 10.1049/iet-cta.2009.0437
- Yang, X., Qin, Y., Bai, J., Zhan, J., Li, Y., & Hao, S. (2024). Passive Control for Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator Under Unbalanced Grid Voltages. *IEEE Access*.
- Yassin, E. F., Yassin, H. M., Hemeida, A., & Hallouda, M. M. (2022). Real Time Simulation of Brushless Doubly Fed Reluctance Generator Driven Wind Turbine Considering Iron Saturation. *IEEE Access*, 10, 9925-9934.