

استراتژی کنترل پیش‌بین مستقیم توان‌های اکتیو و راکتیو، اعمال شده بر روی مبدل AC/DC/AC، در یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه مبتنی بر توربین بادی

حسین الیاسی^۱، حامد جواهری فرد^۲، حمیدرضا نجفی^۳

^۱ استادیار دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، H.eliasi@birjand.ac.ir

^۲ کارشناسی ارشد دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، Hamed@birjand.ac.ir

^۳ دانشیار دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، H.r.najafi@birjand.ac.ir

پیش‌بین، به شکل مستقیم و به منظور کنترل توان در یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) بررسی شده است. این طرح کنترلی بر روی مبدل AC/DC/AC این ژنراتور که در یک سیستم تبدیل انرژی بادی بکار رفته است پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی، پاسخ‌های دینامیکی سریع، مقاوم بودن و دقیق بودن این روش کنترلی را نشان می‌دهد.

کلید واژه- انرژی بادی، ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG)، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو

چکیده - کنترل پیش‌بین بر پایه مدل که در دهه‌های اخیر مرسوم شده است، تأثیر قابل توجهی را در مهندسی کنترل مدرن ایجاد کرده است. ایده اساسی ظاهر شده در خانواده کنترل پیش‌بین، بر اساس موارد زیر است: ۱- استفاده از یک مدل برای پیشگویی خروجی فرآیند در لحظات آینده ۲- محاسبه یک دنباله کنترلی به کمک مینیمم‌سازی یک تابع هدف ۳- استفاده از استراتژی کنار گذاشتن، که شامل بکارگیری اولین جزء کنترلی در دنباله کنترلی محاسبه شده در هر لحظه زمانی می‌باشد. در این مقاله، کاربرد استراتژی کنترل

۱- مقدمه

یک کنترل کننده جریان رتور بدست می‌آید. برخی تحقیقات که از کنترل کننده‌های PI و کنترل برداری با جهت‌گیری شار استاتور استفاده کرده‌اند در [۶،۷] ارائه شده است. مسئله استفاده از کنترل کننده‌های PI، تنظیم بهره‌ها و کوپلینگ متقابل در شرایط DFIG در تمام محدوده بهره‌برداری است. روش‌های جالبی برای حل این مشکلات در [۸،۹] انجام شده است.

در برخی تحقیقات نشان داده شده است که استفاده از یک کنترل کننده تابعی پیش‌بین [۱۰] و کنترل کننده داخلی [۱۱] زمانی که با پاسخ PI مقایسه می‌شوند عملکرد رضایت‌بخشی دارند، اما برای اجرا و پیاده‌سازی آن به دلیل فرمولاسیون این دو کنترل کننده مشکل ایجاد می‌شود، امکان دیگر برای کنترل توان DFIG می‌تواند با کمک منطق فازی تحقق یابد [۱۲]. این تکنیک‌ها پاسخ توانی رضایت‌بخشی ارائه می‌کنند، اگرچه خطاها در تخمین پارامترها می‌توانند پاسخ سیستم را تنزل دهند.

نیروی باد هم از لحاظ فناوری و هم از نظر اقتصادی، به عنوان یک منبع تقریباً قابل اعتماد برای تولید برق به اثبات رسیده است [۱]. سیستم‌های انرژی بادی سرعت متغیر امروزه یک منبع مهم از انرژی تجدیدپذیر به شمار می‌روند. این سیستم‌ها مبتنی بر ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه (DFIG)، به دلیل هزینه کم مبدل‌ها و کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو، بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲].

کنترل برداری رایج‌ترین روش بکار رفته در توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG است [۳]. کنترل سیستم توربین بادی به شکل کلاسیک، مبتنی بر جهت‌گیری شار استاتور [۴] و یا جهت‌گیری ولتاژ استاتور [۵] است. این طرح، جریان رتور را به مؤلفه‌های توان اکتیو و راکتیو تقسیم می‌کند. کنترل توان اکتیو و راکتیو با

$$S_e = \frac{2}{3}(s_1 + as_2 + a^2s_3) \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، $a = e^{j \cdot 2\pi/3}$ بیانگر انتقال ۱۲۰ درجه فازی بین فازها و s_1, s_2, s_3 ، حالات سوئیچینگ هر پایه یکسوساز هستند، و مقدار صفر می‌گیرند اگر s_x ، off باشد و یا مقدار یک می‌گیرند اگر s_x ، on باشد؛ به طوری که $x = 1, 2, 3$.

۲-۲- مدل زمان گسسته

جریان پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه زمان گسسته به طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{di_i(k)}{dt} = \frac{1}{T_s} \cdot \{i_i(k) - i_i(k-1)\} \quad (4)$$

که در رابطه (۴)، T_s ، زمان نمونه‌برداری است. رابطه بین متغیرهای زمان گسسته، با جایگزین کردن رابطه (۴) در رابطه (۱) و انتقال زمان گسسته یک گام به جلو، به شکل زیر بدست می‌آید: (۵)

$$i_i(k+1) = \frac{T_s}{r_f T_s + l_f} \cdot \left\{ e(k+1) - v_e(k+1) + \frac{l_f}{T_s} i_i(k) \right\}$$

رابطه (۵) برای بدست آوردن پیش‌بینی‌ها برای مقدار آینده جریان ورودی، $i_i(k+1)$ ، برای هر بردار ولتاژ، $v_e(k+1)$ ، تولید شده توسط حالات سوئیچینگ قابل قبول استفاده می‌شود. با توجه به ولتاژ ورودی و بردارهای جریان در مختصات متعامد(قائم)، توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای ورودی پیش‌بینی شده می‌تواند توسط روابط زیر بیان شود:

$$P_i(k+1) = \text{RE}\{e(k+1) \cdot \bar{i}_i(k+1)\} = e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta \quad (6)$$

$$Q_i(k+1) = \text{IM}\{e(k+1) \cdot \bar{i}_i(k+1)\} = e_\beta i_\alpha - e_\alpha i_\beta \quad (7)$$

که در رابطه (۶) و (۷)، $\bar{i}_i(k+1)$ ، مزدوج مختلط بردار جریان ورودی پیش‌بینی شده برای یک بردار ولتاژ مشخص و تولید شده توسط یکسوساز، v_e ، است. بنابراین در همین روابط مشاهده می‌شود که توان‌های اکتیو و راکتیو به ترتیب شامل بخش‌های حقیقی، RE، و موهومی، IM، حاصلضرب ولتاژها و جریان‌ها هستند. برای یک زمان نمونه‌برداری کوچک، با توجه به میزان فرکانس پایه شبکه، می‌توان فرض کرد که: $e(k+1) \approx e(k)$. با اینحال، اگر زمان نمونه‌برداری به اندازه کافی کوچک نباشد با در نظر گرفتن ولتاژ شبکه به صورت ثابت بین دو فاصله نمونه‌برداری، ولتاژ شبکه آینده، $e(k+1)$ ، را می‌توان با جبران‌سازی زاویه بردار ولتاژ برای یک زمان نمونه‌برداری به صورت رابطه (۸) محاسبه کرد:

$$e(k+1) = e(k) \cdot e^{j\Delta\theta} \quad (8)$$

کنترل مستقیم توان (DPC) بر اساس اصول کنترل مستقیم گشتاور است [۱۳]. DPC بکار رفته برای کنترل توان DFIG در [۱۴] ارائه شده است. این تکنیک، بردار فضایی ولتاژ روتور را مبتنی بر شار استاتور تخمین زده شده و خطاهای توان محاسبه می‌کند. در [۱۵]، اصول و اجرای DPC با کنترل کننده‌های هسترزیس و فرکانس سوئیچینگ متغیر به دست آمده است. در [۱۶] و [۱۷]، اصول این روش به طور مفصل شرح داده شده و نتایج شبیه‌سازی با استفاده از فرکانس سوئیچینگ متغیر و ثابت به ترتیب ارائه شده است. علاوه بر این، DPC مرسوم، طراحی فیلتر AC را به دلیل فرکانس سوئیچینگ متغیرش پیچیده می‌کند. یک جایگزین برای DPC، کنترل برداری خطای توان است [۱۸]. این استراتژی پیچیدگی کمتری دارد و نتایجی مشابه با کنترل مستقیم توان تولید می‌کند. کنترل پیش‌بین یک روش کنترلی جایگزین است که در درایوهای ماشین و اینورترها مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹، ۲۰]. برخی تحقیقات در مورد اجرای این روش بر روی درایوهای موتور القایی در [۲۱، ۲۲] آمده است. کنترل عملیاتی پیش‌بین با استفاده از حلقه جریان روتور برای کنترل توان DFIG در [۲۳] اعمال شده و DPC پیش‌بین برای DFIG در [۲۴] ارائه شده است. این تکنیک‌ها پاسخ توانی رضایت‌بخشی دارند اگرچه کنترل، خروجی‌ها (توان‌های اکتیو و راکتیو) را پیش‌بینی نمی‌کند و پاسخ توانی ممکن است با تنزل روبرو شود. در همین مقوله در [۲۵] مدل غیرخطی برای کنترل پیش‌بین DFIG ارائه گشته که منجر به محاسبات زیاد و خسته‌کننده شده است.

۲- کنترل پیش‌بین توان در سمت شبکه

۲-۱- مدلسازی

مدل فیلتر ورودی را می‌توان توسط معادلات زیر توصیف کرد:

$$l_f \frac{di_i(k)}{dt} + v_e(k) + r_f i_i(k) = e(k) \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، r_f و l_f به ترتیب اندوکتانس و مقاومت فیلتر ورودی هستند. e ولتاژ شبکه، و v_e هم ولتاژ تولید شده توسط یکسوساز یا مبدل است. v_e به صورت زیر بدست می‌آید:

$$v_e = S_e \cdot v_{DC} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، v_{DC} ، ولتاژ لینک DC و S_e ، بردار حالت سوئیچینگ یکسوساز است که به شکل زیر تعریف می‌شود:

خروجی از مسیر مرجع خود را نشان می‌دهد.

۲-۴- طرح کنترل

بلوک دیاگرام استراتژی کنترل پیش‌بین مستقیم توان در سمت شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است. جریان ورودی، $i_i(k)$ اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌های جریان آینده، $i_i(k+1)$ برای هر یک از هفت بردار ولتاژ ممکن، $v_e(k)$ که توسط مبدل یا همان یکسوساز ایجاد شده‌اند، تولید می‌شوند. این بردارها به صورت زیر می‌باشند:

$$v_e(k) \in (v_0, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7)$$

پیش‌بینی‌های جریان برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو ورودی آینده، $P_i(k+1)$ و $Q_i(k+1)$ ، استفاده می‌شود. یک کنترل کننده PI نیز برای تنظیم ولتاژ لینک DC استفاده می‌شود.

۳- کنترل پیش‌بین توان در سمت روتور

در [۲۶] و [۲۷]، رفتار دینامیکی یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. معادلات ولتاژ روتور و استاتور در مختصات ثابت روتور می‌تواند به صورت زیر ارائه شود:

$$V_S = R_S I_S + \frac{d\phi_S}{dt} + j\omega_S \phi_S \quad (10)$$

$$V_R = R_R I_R + \frac{d\phi_R}{dt} \quad (11)$$

که در روابط (۱۰) و (۱۱)، V_S ولتاژ استاتور، V_R ولتاژ روتور، I_S جریان استاتور، I_R جریان روتور، R_S و R_R به ترتیب مقاومت‌های اهمی استاتور و روتور هستند؛ ϕ_S و ϕ_R نیز به ترتیب شارهای استاتور و روتور می‌باشند. همچنین ω_S سرعت زاویه‌ای استاتور است. همه متغیرها در قاب مرجع روتور در نظر گرفته شده‌اند.

شارهای استاتور و روتور، مرتبط با جریان‌های استاتور و روتور از روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$\phi_S = L_S I_S + L_M I_R \quad (12)$$

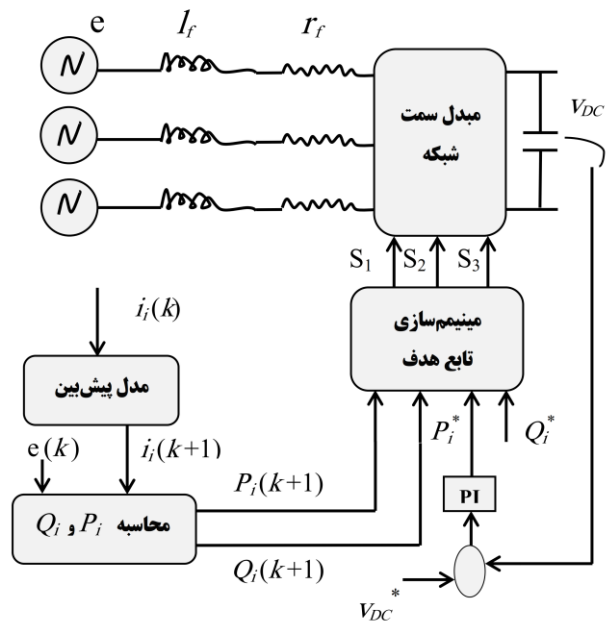
$$\phi_R = L_R I_R + L_M I_S \quad (13)$$

که در روابط (۱۲) و (۱۳)، L_S ، L_R ، L_M به ترتیب اندوکتانس استاتور، اندوکتانس روتور و اندوکتانس متقابل هستند.

توان اکتیو و راکتیو استاتور را می‌توان از ولتاژ و جریان استاتور به شکل زیر محاسبه کرد:

$$P_S = 3/2 \cdot \text{RE} \{V_S \cdot \bar{I}_S\} \quad (14)$$

که $\Delta\theta = \omega \cdot T_s$ پیشروی زاویه بردار ولتاژ شبکه در یک فاصله نمونه برداری است؛ ω نیز فرکانس زاویه‌ای ولتاژ شبکه است.



شکل ۱: شماتیک استراتژی کنترل DPC پیش‌بین مبدل PWM سمت شبکه

۲-۳- تابع هدف

تابع هدف، CF1، رفتار مطلوب یکسوساز را بیان می‌کند. این تابع هدف به شکل تابعی از خطاهای توان راکتیو و توان اکتیو به منظور اجرا کردن استراتژی کنترل پیش‌بین توان مذکور می‌باشد؛ لذا با توجه به این شرایط کنترلی خواهیم داشت:

$$CF_1 = \left\{ \left| P_i^* - P_i(k+1) \right| \right\} + \left\{ \left| Q_i^* - Q_i(k+1) \right| \right\} \quad (9)$$

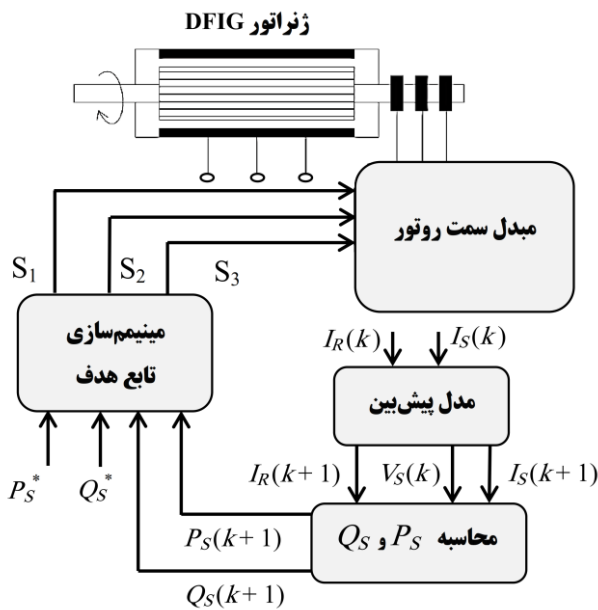
در رابطه (۹)، P_i^* و Q_i^* ، به ترتیب توان اکتیو و راکتیو ورودی لازم (مرجع)، و $P_i(k+1)$ و $Q_i(k+1)$ نیز به ترتیب توان اکتیو و راکتیو ورودی پیش‌بینی شده هستند، که به حالت سوئیچینگ یکسوساز بستگی دارند. هدف کنترل یکسوساز تنظیم ولتاژ لینک DC می‌باشد در حالیکه جریان‌های ورودی سینوسی هم فاز با ولتاژهای خط تغذیه مربوطه هستند؛ که این امر با استفاده از همین تابع هدف مناسب که بایستی هم به حداقل برسد انجام می‌شود. از آنجایی که جریان‌های ورودی سینوسی هم فاز با ولتاژهای خط تغذیه مورد نیاز است، لذا می‌توانیم با صفر کردن مرجع توان راکتیو ورودی به این مورد دست پیدا کنیم، یعنی: $Q_i^* = 0$. البته ما در این مقاله ابتدا مقادیری را برای مرجع توان راکتیو در نظر می‌گیریم و سپس این توان به سمت صفر میل خواهد کرد، این مورد از این نظر حائز اهمیت است که نیرومندی استراتژی پیشنهادی در پیروی

(۲۰) و (۲۱) پیش‌بینی‌های ماشین را تغییر خواهد داد. شگرد کلیدی کنترل پیش‌بین مستقیم توان در تعریف تابع هدف نهفته است، که معمولاً به اهداف کنترلی ارتباط دارد. برای DFIG مورد استفاده در کاربردهای انرژی بادی، گشتاور (مربوط به توان اکتیو) و شار روتور (مربوط به توان راکتیو) حائز اهمیت هستند. به طور خاص، تابع هدف به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$CF_2 = \left\{ \left| P_S^* - P_S(k+1) \right| \right\} + \left\{ \left| Q_S^* - Q_S(k+1) \right| \right\} \quad (22)$$

$$V_R(k) \in (V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7)$$

بلوک دیگرام استراتژی کنترل پیش‌بین در سمت روتور در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: شماتیک استراتژی کنترل DPC پیش‌بین مبدل PWM سمت روتور

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای شروع شبیه‌سازی، پارامترهای یک DFIG با دو جفت قطب را به صورت زیر تعیین می‌کنیم؛ (جدول ۱):

جدول ۱: پارامترهای ژنراتور

V_s	L_{lr}	L_{ls}	L_m	R_r	R_s
580v	0.0145H	0.0145H	0.014H	0.013Ω	0.024Ω

در شکل‌های زیر آزمایشات شبیه‌سازی نشان داده شده است. مطالعات با پله‌های مختلف توان اکتیو و راکتیو و سرعت ثابت روتور در ۲۲۲ رادیان بر ثانیه برای آزمایش پاسخ دینامیکی استراتژی پیشنهادی کنترل توان انجام شده است.

$$Q_S = 3/2 \cdot \text{IM} \{ V_s \cdot \bar{I}_s \} \quad (15)$$

در روابط (۱۴) و (۱۵)، P_S و Q_S به ترتیب توان اکتیو و توان راکتیو استاتور و \bar{I}_s مزدوج مختلط جریان استاتور است.

با جایگزین کردن روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲)، (۱۳) در روابط (۱۴)، (۱۵)، توان‌های اکتیو و راکتیو می‌توانند از لحاظ شار استاتور و شار روتور به صورت زیر بیان شوند: (۱۶)

$$Q_S = 3/2 \cdot \omega_s \left(\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \right) \left[L_r |\phi_s^R|^2 - L_m \cdot \text{RE}(\bar{\phi}_r \phi_s) \right]$$

$$P_S = 3/2 \cdot \omega_s L_m \left(\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \right) \text{IM}(\bar{\phi}_r \phi_s) \quad (17)$$

مدل زمان پیوسته ارائه شده برای ماشین القایی رفتار متغیرهای ماشین را توصیف می‌کند. به منظور به دست آوردن پیش‌بینی‌های توان اکتیو و راکتیو برای فاصله نمونه‌برداری بعدی، معادلات زمان گسسته از این مدل به دست آمده، به طوری که k بیانگر لحظه نمونه‌برداری حال می‌باشد. تبدیل زمان گسسته به سادگی توسط سیگنال‌های نمونه‌برداری و با توجه به یک تقریب مرتبه اول برای اولین شکل‌های اشتقاقی (مشتق) محاسبه می‌شود. معادله زمان گسسته برای پیش‌بینی شارهای استاتور و روتور، به دست آمده از مدل ارائه شده، به شکل زیر می‌باشد: (۱۸)

$$\phi_s(k+1) = \phi_s(k) + T_s [V_s(k) + R_s I_s(k) - j \omega_r \phi_s(k)]$$

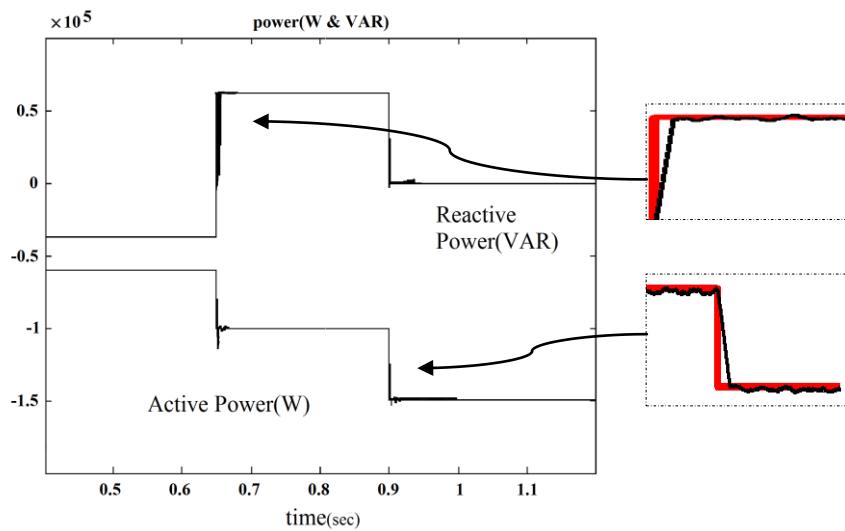
$$\phi_r(k+1) = \phi_r(k) + T_s [V_r(k) + R_r I_r(k)] \quad (19)$$

با استفاده از معادلات (۱۸) و (۱۹) و جایگزینی آنها در (۱۶) و (۱۷)، پیش‌بینی زمان گسسته توان‌های اکتیو و راکتیو را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

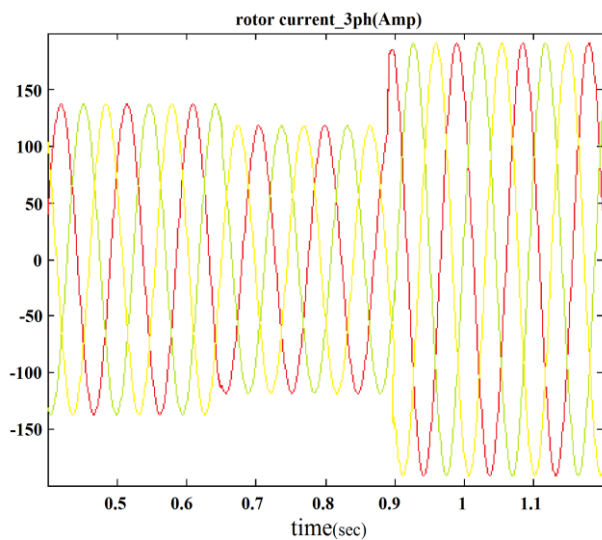
$$P_S(K+1) = 3/2 \cdot \omega_s L_m \left(\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \right) \cdot \text{IM}(\bar{\phi}_r(K+1) \phi_s(K+1)) \quad (20)$$

$$Q_S(K+1) = 3/2 \cdot \omega_s \left(\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \right) \cdot \left[L_r |\phi_s^R|^2 - L_m \cdot \text{RE}(\bar{\phi}_r(K+1) \phi_s(K+1)) \right] \quad (21)$$

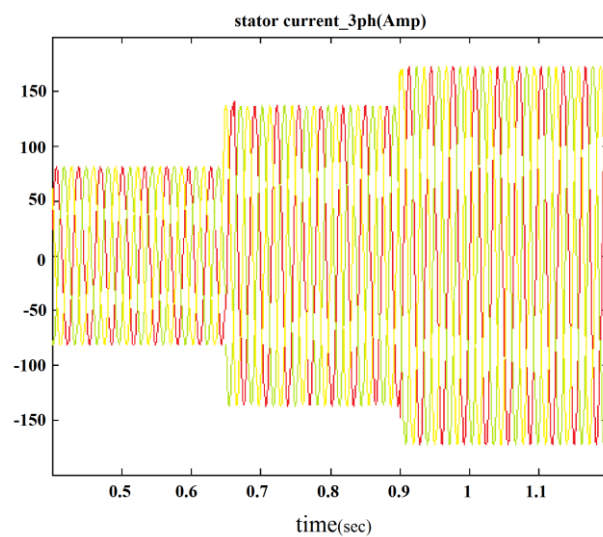
معادلات (۲۰) و (۲۱) برای به دست آوردن پیش‌بینی‌های توان اکتیو و راکتیو و برای هر یک از هشت ترکیب سوئیچینگ قابل قبول استفاده می‌شوند. هر حالت سوئیچینگ یک $V(k+1)$ ممکن، که به روتور در لحظه نمونه‌برداری بعدی اعمال شده است، تولید می‌کند. هر حالت سوئیچینگ ممکن یک مقدار معین برای $V(k+1)$ تولید خواهد کرد که با توجه به معادله



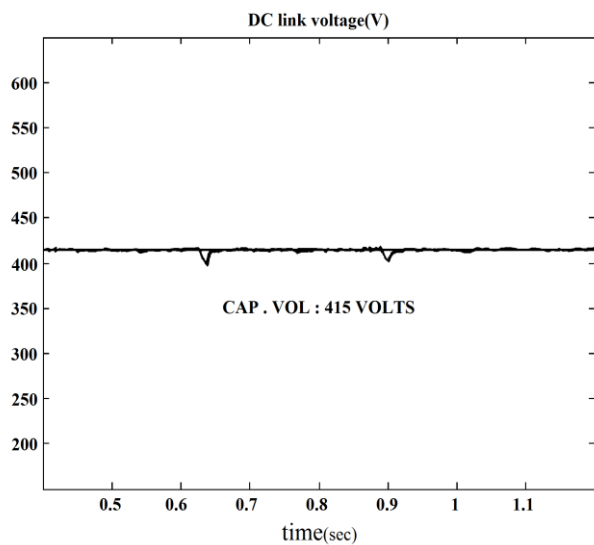
شکل ۳: پاسخ آزمایش پله‌ای برای توان اکتیو و راکتیو در بهره‌برداری فوق سنکرون



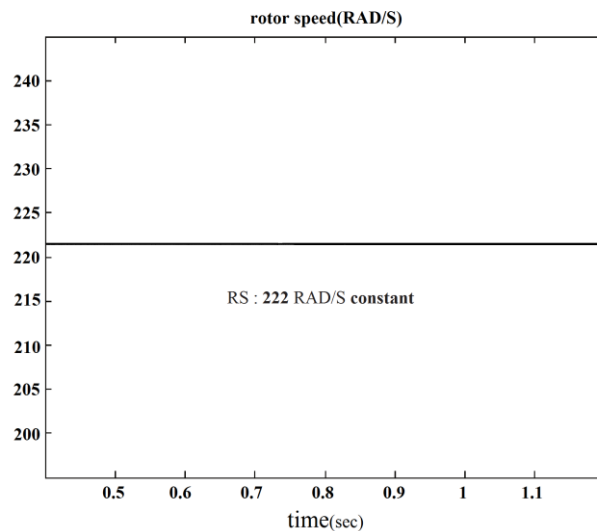
شکل ۵: جریان‌های سه‌فاز روتور در مرجع ساکن



شکل ۴: جریان‌های سه‌فاز استاتور در مرجع ساکن



شکل ۷: ولتاژ لینک DC خازنی



شکل ۶: سرعت روتور به عنوان ورودی برحسب رادیان بر ثانیه در مرجع ساکن

مراجع

- [1] Tourou P, Sourkounis C, "Review of control strategies for DFIG-based wind turbines under unsymmetrical grid faults," *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), IEEE Conference Publications*, 2014, pp.1-9.
- [2] Boulâam, K., Boukhelifa, A, "A fuzzy sliding mode control for DFIG-based wind turbine powermaximisation," *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), IET Conference Publications*, 2014, pp.1 - 6.
- [3] Ademi.S. , Jovanovic.M., "Vector Control Methods for Brushless Doubly-Fed Reluctance Machines," *Industrial Electronics, IEEE Trans on*, 2014, pp.1.
- [4] Esmaeeli. M.R, Kianinejad. R, Razzaz. M, "Field oriented control of DFIG based on modified MRAS observer," *Electrical Power Distribution Networks (EPDC), Proceedings of 17 th Conference on*, 2012, pp.1 - 7.
- [5] Ozsoy.E.E, Golubovic.E, Sabanovic.A, Gokasan.M, "A stator voltage oriented doubly fed induction generator control method with a disturbance observer," *EUROCON, IEEE, 2013*, pp.1102 - 1107.
- [6] Shuhui.Li., Chaloo. R, Nemmers.M.J, "Comparative study of DFIG power control using stator-voltage and stator-flux oriented frames," *Power & Energy Society General Meeting, PES '09. IEEE, 2009*, pp. 1 - 8.
- [7] Naguru.N.R, Karthikeyan.A, Nagamani.C, Kumar.V.S, "Comparative study of power control of DFIG using PI control and FeedBack Linearization Control," *Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET), International Conference on*, 2012, pp.1 - 6.
- [8] R.G.deOliveira, J.L.daSilva, S.R.Silva, "Development of a new reactive power control strategy in doubly-fed induction generators for wind turbines," *Eletrônica de Potência*, vol. 13, no. 4, 2008, pp.277-284.
- [9] F.Poitiers, T.Bouaouiche, M. Machmoum, "Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion," *Electric Power Syst. Res.*, vol. 79, 2009, pp.1085-1096.
- [10] Guolian Hou, Zhentao Wang, Pan Jiang, Jianhua Zhang, "Multivariable predictive functional control applied to doubly fed induction generator under unbalanced grid voltage conditions," *Industrial Electronics and Applications, ICIEA, 4th IEEE Conference on*, 2009, pp. 2644 - 2650.
- [11] J. Guo, X. Cai, and Y. Gong, "Decoupled control of active and reactive power for a grid-connected doubly-fed induction generator," in *Proc. Third Int. Conf. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Apr. 2008, pp. 2620-2625.
- [12] Cheikh. R, Belmili. H, Drid.S, Menacer.A, Tiar.M, "Fuzzy logic control algorithm of grid connected doubly fed induction generator driven by vertical

شکل ۳ عملکرد دینامیکی استراتژی کنترل پیشنهاد شده برای پله‌های توان اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج پاسخ‌های توان اکتیو و راکتیو دیده می‌شود بایستی گفت که پاسخ دینامیکی هر دو توان سریع هست. توان اکتیو مرجع اولیه ۶۰- کیلووات و ضریب قدرت ۰/۸۵ هستند. سپس توان اکتیو مرجع از ۶۰- به ۱۰۰- کیلووات و ضریب قدرت از ۰/۸۵ به ۰/۸۵- در ۰/۶۵ ثانیه تغییر می‌کند. توان مرجع دوباره از ۱۰۰- به ۱۴۹- کیلووات و ضریب قدرت از ۰/۸۵- به ۱ در ۰/۹ ثانیه تغییر می‌کنند در شکل ۴ جریان‌های سه فاز استاتور و در شکل ۵ جریان‌های سه فاز روتور به تصویر کشیده شده است؛ این جریان‌ها کاملاً سینوسی هستند. فراجش موجود، هم در پاسخ‌های توان اکتیو و راکتیو و هم در جریان‌های سه‌فاز روتور و استاتور بسیار کم است. در شکل ۶ سرعت ثابت روتور به عنوان ورودی نشان داده شده است، مقدار آن بر روی ۲۲۲ رادیان بر ثانیه ثابت نگه داشته شده است. در نهایت ولتاژ لینک خازنی با مقدار ۴۱۵ ولت به همراه مسیر مرجع آن در شکل ۷ داده شده است. عملکرد رضایت‌بخش سیستم کنترلی می‌تواند به دلیل این واقعیت باشد که این سیستم با پارامترهای طراحی مطابقت دارد. به دلیل پیروی کردن توان‌ها از مقادیر مرجع خود قطعاً سیستم کنترلی عملکرد خوبی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک استراتژی کنترل پیش‌بین مستقیم توان در جهت کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) مبتنی بر سیستم انرژی بادی بادی ارائه شده است. کنترل کننده پیش‌بین، مبتنی بر مدل است و برای کنترل توان DFIG به سادگی قابل اجرا است. کنترل کننده پیشنهادی وظیفه کنترل مبدل AC/DC/AC را به عهده دارد و بر روی مبدل سمت روتور و سمت استاتور پیاده‌سازی شده است. خروجی‌ها (توان‌های اکتیو و راکتیو) توسط دو تابع هدف که به صورت مستقل در همین دو سمت سیستم طراحی شده‌اند، پیش‌بینی می‌شوند. این روش کنترلی، فرکانس سوئیچینگ ثابتی را اعمال می‌کند که بر اشکالات روش مرسوم و قدیمی کنترل مستقیم توان در [۲۸] غلبه می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان از مقاوم بودن و مؤثر بودن این روش کنترلی دارد. پژوهش‌ها در آینده احتمالاً در مورد اجرای استراتژی کنترل پیش‌بین بر روی دیگر منابع تجدیدپذیر خواهد بود؛ برای مطالعه بیشتر رجوع کنید به [۲۹-۳۳].

- [26] M. Kazemi, A. Yazdankhah, H. Kojabadi, "Direct Power Control of DFIG based on discrete Space Vector Modulation," **Elsevier, Renewable Energy**, **2010**, pp. 1033-1042.
- [27] Aggarwal Archana, Saini Lalit Mohan, Singh Bhim, "Control Strategies for DFIG Based Grid Connected Wind Energy Conversion System," **International Journal of Grid Distribution Computing**, Vol.7, no.3, **2014**, pp.49-60.
- [28] L. Xu and P. Cartwright, "Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation," **IEEE Trans. Energy Convers.**, vol. 21, no. 3, **2006**, pp. 750-758.
- [29] H. Eliasi, M.B. Menhaj, H. Davilu, "Robust nonlinear model predictive control for a PWR nuclear power plant," **Progress in Nuclear Energy, ELSEVIER**, Volume 54, Issue 1, **2012**, pp. 177-185.
- [30] H. Eliasi, M.B. Menhaj, H. Davilu, "Robust nonlinear model predictive control for nuclear power plants in load following operations with bounded xenon oscillations," **Nuclear Engineering and Design, ELSEVIER**, Volume 241, Issue 2, **2011**, pp. 533-543.
- [31] H. Eliasi, H. Davilu, M.B. Menhaj, "Adaptive fuzzy model based predictive control of nuclear steam generators," **Nuclear Engineering and Design, ELSEVIER**, Volume 237, Issue 6, **2007**, pp. 668-676.
- [۳۲] حامد جواهری فرد، حمیدرضا نجفی، جواد نجفی، "انواع بیکره بندی‌ها و ارائه کنترلر پیش‌بین بر پایه مدل بروی اینورتر سیستم‌های فتوولتائیک." "چهارمین کنفرانس سالانه انرژی پاک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، ۴ و ۵ تیرماه ۱۳۹۳.
- [۳۳] حامد جواهری فرد، حمیدرضا نجفی، "استراتژی پیش‌بین در یک توربین بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) به جهت کنترل توان با کمک جریان روتور،" "۲۹ کنفرانس بین‌المللی برق، PSC، پژوهشگاه نیرو، ۵ و ۷ آبان ماه ۱۳۹۳.
- axis wind turbine in variable speed," Systems and Control (ICSC), 3rd International Conference on, **2013**, pp. 439 - 444.
- [13] M. Depenbrock, "Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine," **IEEE Trans. Power Electron.**, vol. 3, no. 4, **1988**, pp. 420-429.
- [14] Mohammadi, J., Vaez, Zadeh, S., Afsharnia, S., Daryabeigi, E., "A Combined Vector and Direct Power Control for DFIG-Based Wind Turbines," **Sustainable Energy, IEEE Trans on**, **2014**, pp. 767 - 775.
- [15] R. Datta, V. T. Ranganathan, "Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors," **IEEE Trans. Power Electron.**, vol. 16, no. 3, **2001**, pp. 390-399.
- [16] L. Xu, P. Cartwright, "Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation," **IEEE Trans. Energy Convers.**, vol. 21, no. 3, **2006**, pp. 750-758.
- [17] D. Zhi, L. Xu, "Direct power control of DFIG with constant switching frequency and improved transient performance," **IEEE Trans. Energy Convers.**, vol. 22, no. 1, **2007**, pp. 110-118.
- [18] I. de Alegria, J. Andreu, P. Ibanez, J. L. Villate, I. Gabiola, "Novel power error vector control for wind turbine with doubly fed induction generator," in Proc. 30th Annu. Conf. **IEEE Industrial Electronics Society, (IECON)**, vol. 2, **2004**, pp. 1218-1223.
- [19] Fuentes, E., Kalise, D., Rodriguez, J., Kennel, R. M., "Cascade-Free Predictive Speed Control for Electrical Drives," **IEEE Trans. Industrial Electronics**, **2014**, pp. 2176 - 2184.
- [20] Rameshkumar, K., Sakthivel, A., Vijayakumar, P., Senthil kumar, A., "Performance analysis of model predictive control for voltage source inverter," Green Computing, Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), **International Conference on**, **2014**, pp. 1 - 5.
- [21] Yongsoo Cho, Woo Jin Choi, Kyo-Beum Lee, "Model predictive control using a three-level inverter for induction motors with torque ripple reduction," Industrial Technology (ICIT), **IEEE International Conference on**, **2014**, pp. 187 - 192.
- [22] Yongchang Zhang, Haitao Yang, "Model Predictive Torque Control of Induction Motor Drives With Optimal Duty Cycle Control," Power Electronics, **IEEE Trans on**, **2014**, pp. 6593 - 6603.
- [23] Z. Xin-fang, X. Da-ping, L. Yi-bing, "Predictive functional control of a doubly fed induction generator for variable speed wind turbines," in Proc. **IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation**, vol. 4, **2004**, pp. 3315-3319.
- [24] G. Abad, M. Ángel Rodríguez, J. Poza, "Three-level npc converter-based predictive direct power control of the doubly fed induction machine at low constant switching frequency," **IEEE Trans. Ind. Electron.**, vol. 55, no. 12, **2008**, pp. 4417-4429.
- [25] Xiangjie Liu, Xiaobing Kong, "Nonlinear Model Predictive Control for DFIG-Based Wind Power Generation," Automation Science and Engineering, **IEEE Trans on**, **2013**, pp: 1 - 10.

جدول ۲: کلمات اختصاری

DFIG	DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR
PI	PROPORTIONAL-INTEGRAL
DPC	DIRECT POWER CONTROL