بیشینهسازی بازده ژنراتور القایی دوتحریکه با در نظر گرفتن تلفات هسته و کنترل توان راکتیو با استفاده از روش کنترل تطبیقی مدل مرجع بهینه

آریا یونسی'، دانشجوی دکتری؛ سجاد توحیدی'، استادیار؛ حجت یوسفی"، کارشناس ارشد

۱ – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر – دانشگاه تبریز – تبریز – ایران – ariayounesi@tabrizu.ac.ir ۲– دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر – دانشگاه تبریز – تبریز – ایران – stohidi@tabrizu.ac.ir ۳– دانشکده فنی و مهندسی – واحد اهر – دانشگاه آزاد اسلامی – اهر – ایران – h-yousefi@iau-ahar.ir

چکیده: در این مقاله، روشی نوین برای بیشینهسازی بازده توربین بادی مجهز به یک ژنراتور القایی دوتحریکه پیشنهاد می شود. به منظور بیشینه سازی بازده، رابطه جدیدی برای تعیین مقدار مرجع توان راکتیو استاتور، با در نظر گرفتن تلفات هسته ارائه می شود. این روابط که تابعی از سرعت باد هستند، با استفاده از مدل ژنراتور برای بازده و توان راکتیو مرجع استخراج می شوند. از سوی دیگر، با ارائه یک روش کنترلی جدید توان های اکتیو و راکتیو و راکتیو این ژنراتور کنترل می شود. روش کنترلی پیشنهادی منطبق بر روش کنترل تطبیقی مدل مرجع است که توانهای اکتیو و راکتیو و راکتیو و راکتیو و راکتیو این ژنراتور کنترل می شود. روش کنترلی پیشنهادی منطبق بر روش کنترل تطبیقی مدل مرجع است که توانهای اکتیو و راکتیو و راکتیو این ژنراتور کنترل می شود. روش کنترلی پیشنهادی منطبق بر روش کنترل تطبیقی مدل مرجع است که توانهای اکتیو و راکتیو ژنراتور را کنترل می کند. از آنجا که کنترل کننده پیشنهادی شامل کنترل کننده های تناسبی – انتگرال و مشتق گیر است، انتخاب ضرایب مناسب برای این کنترل می کند. از آنجا که کنترل کننده پیشنهادی شامل کنترل کننده های تناسبی – انتگرال و مشتق گیر است، انتخاب ضرایب مناسب برای این کنترل می کند. از آنجا که کنترل کننده پیشنهادی شامل کنترل کننده های تناسبی – انتگرال و مشتق گیر است، انتخاب بهینه این مناسب برای این کنترل کنیده ها ز اهمیت بالایی برخوردار است. لذا در اینجا، استفاده از الگوریتم بهینهسازی کریله رد برای انتخاب بهینه این ضرایب کنترلی پیشنهادی را برای ردیابی توانهای اکتیو و راکتیو مرجع با مناسب برای این کنینهاد می شود. نتایج شبیه سازی عملکرد بسیار خوب روش کنترلی پیشنهادی را برای ردیابی توانهای اکتیو و راکتیو مرجع با دینامیک بالا و ریپل پایین، نشان می دهد. همچنین، با توجه به این که بیشینه سازی بازده به روش پیشنهادی هر پیشهادی هر برای روش روش روش زمون و می پیشنهادی را برای ردیابی توانهای اکتیو و راکتیو مرجع با در مان می مرد. با تول با من می و مربع می بازده به روش پیشنهادی هر پی بازی می و مرازی در بی بازی در بی بازی مربع می بازد.

واژههای کلیدی: بازده، تلفات هسته، توربین بادی، کنترل تطبیقی مدل مرجع، ژنراتور القایی دوتحریکه.

Efficiency Maximizing of Doubly Fed Induction Generator with Considering Core Loss and Reactive Power Control by Optimized Model Reference Adaptive Method

A. Younesi¹, PhD Student; S. Tohidi², Assistant Professor; H. Yousefi², MSc

Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: ariayounesi@tabrizu.ac.ir
Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: stohidi@tabrizu.ac.ir
Faculty of Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran, Email: h-yousefi@iau-ahar.ir

Abstract: In this paper, a novel approach is proposed for maximizing the efficiency of doubly fed induction generator based wind turbine. In order to maximize the efficiency, a new relationship is presented for determining the stator reactive power reference value, with considering core loss into account. In addition, a new control scheme is proposed which is based on model reference adaptive and controls the active and reactive powers. Since the suggested controller has proportional-integral and derivative controllers, selecting proper coefficient for them is of high importance. Hence, the Krill-Herd optimization algorithm is used to optimize the controller' coefficients. The simulation results show the satisfactory performance of the proposed control scheme with high dynamics and low ripple. In addition, since maximizing the efficiency does not seek any additional cost, so the use of the proposed method makes wind power generation more cost effective.

Keywords: Efficiency, wind Turbine, core loss, model reference adaptive control (MRAC), doubly fed induction generator (DFIG).

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۵ و ۱۳۹۵/۲۲ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۳ و ۱۳۹۵/۰۲/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۵ نامنی نویسنده مسئول: ایران – تبریز – بلوار ۲۹ بهمن – دانشگاه تبریز – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

امروزه، ژنراتورهای القایی دوتحریکه^۱ به دلیل برخورداری از مزایایی نظیر عملکرد در محدوده وسیع از سرعتهای زیر سنکرون تا فوق سنکرون، هزینه پایین ادوات الکترونیک قدرت، قابلیت کنترل مستقل توانهای اکتیو و راکتیو، بهبود کیفیت توان و تلفات کم در بیش از ۷۰ درصد توربینهای بادی مورد استفاده قرار می گیرد [۱، ۲]. این ژنراتورها در مقایسه با ژنراتورهای سنکرون که یک مبدل توان تمام ظرفیت در مدار استاتور نیاز دارند، برای تغییرات ۳۰ درصد حول سرعت نامی، به یک مبدل پشتبهپشت با توانی در حدود ۳۰ درصد توان نامی ژنراتور نیاز دارند [۳].

بهینهسازی بازده ژنراتورهای القایی دوتحریکه، یکی از موضوعاتی است که نظر بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است و به همین دلیل در مراجع مختلف روشهای گوناگونی برای این منظور ارائه شده است. در [۶-۴] روشهایی برای افزایش توان خروجی ژنراتور و بهبود کیفیت توان توسط کنترل مبدل طرف شبکه پیشنهاد شده است. این روشها راهکارهای نسبتاً سادهای برای افزایش توان خروجی دارند، ولی به دلیل اینکه توان راکتیو مرجع در همه آنها صفر لحاظ شده است، پاسخ دقیقی ندارند.

در [۷] مقدار توان راکتیو مرجع از روی اعمال پاسخ فیدبک محاسبه میشود، ولی چون از مقاومت استاتور صرفنظر شده است، این روش نیز دقت پایینی دارد. روشهای دیگری نیز در [۸، ۹] ارائه شده است؛ مقاومتهای استاتور و روتور در این روشها مدنظر قرار گرفته است، اما به دلیل پیچیدگی روابط و طولانی بودن زمان رسیدن به راهحل مورد نظر، روشهای قابل قبولی نیستند. در هیچ کدام از [۹-۴] به تلفات هسته اشاره نشده است و در محاسبات و نتایج از تلفات هسته صرفنظر شده است.

در [۱۰] یکی از روشهای کنترلی بدون حسگر برای ژنراتور القایی دوتحریکه ارائه شده است که مبتنی بر اعمال سیگنال فرکانس بالای استاتور است. در منابع مختلف دیگری نیز، روشهای کنترلی گوناگونی برای این نوع ژنراتورها ارائه شده است [۱۱، ۱۲]. در [۱۳، ۱۴] روشهایی مبتنی بر کنترل برداری ارائه شده است. در این روشها، جریانهای روتور تنها از طریق کنترل کنندههای تناسبی- انتگرال گیر^۲ کنترل میشود، لذا به تغییرات پارامترهای ماشین بسیار حساس هستند و این مسئله پاسخ دینامیکی آنها را برای عدم قطعیتهای سیستم پایین میآورد.

روشهایی مبتنی بر کنترل مستقیم توان به مرور بهعنوان روشهای جایگزین برای کنترل مبدل پشتب پشت در ژنراتورهای دوتحریکه بسیار مورد استفاده قرار گرفتند [۱۵]؛ اما از جمله مشکلات اصلی این روشها، وجود ریپل بالا در گشتاور الکترومغناطیسی و همچنین جریانهای روتور و بهعلاوه فرکانس کلیدزنی متغیر است. برای برطرف کردن این مشکلات، راهکارهای مختلفی ارائه شده است.

در [۱۶] از مدولاسیون فضای برداری^۳ برای تثبیت فرکانس کلیدزنی استفاده شده است.

برای افزایش پاسخ دینامیکی، روش های جدیدی پیشنهاد شده است که در این میان، کنترل تطبیقی مدل مرجع^۴ بهعنوان یک روش مدرن و کارآمد برای کنترل جریانهای روتور ژنراتور القایی دوتحریکه بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۷]. در [۱۸] نیز از ترکیب روش کنترل تطبیقی مدل مرجع و مدولاسیون بردار فضایی برای کنترل یک ژنراتور القایی دوتحریکه استفاده شده است. لازم به ذکر است که پایداری سیستم کنترلی از روش لیاپانوف قابل اثبات است [۱۸]. از آنجا که در این روش سیستم کنترلی در هر لحظه خود را با تغییرات سیستم به روز میکند، استحکام بالایی در مقابل تغییرات پارامترهای ماشین و عدم قطعیتهای سیستم دارد.

این مقاله، در ابتدا با در نظر گرفتن مقاومت تلفات هسته، یک روش نوین برای بهینهسازی بازده ژنراتور القایی دوتحریکه ارائه می کند، سپس با ارائه یک روش کنترلی جدید مبتنی بر کنترل تطبيقي مدل مرجع، توانهاي اكتيو و راكتيو ژنراتور القايي دوتحريكه را کنترل می کند. استفاده از مدل تطبیقی برای کنترل جریان های روتور، ضمن کاهش ریپل توانهای اکتیو و راکتیو، استحکام روش پیشنهادی را در برابر عدم قطعیتهای سیستم بسیار بالا میبرد. در روش کنترلی پیشنهادی از کنترل کننده های تناسبی- انتگرال و مشتق گیر استفاده شده است. عملکرد این کنترل کننده ها بستگی زیادی به ضرایب کنترلی دارد [۱۹]. بنابراین، انتخاب مناسب و بهینه این ضرایب مسئله بسیار مهمی است. در راستای انتخاب بهینه ضرایب فوق روشهای گوناگونی ارائه شده است. از جمله این روشها استفاده از الگوریتمهای بهینهسازی هوشمند است. در مقاله حاضر از یک الگوریتم جدید به نام کریل هرد که در سال ۲۰۱۲ ارائه شده است، برای اولین بار در ساختار کنترلی ارائهشده استفاده می شود. در [۲۰] عملکرد بهتر این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتمهای بهینهسازی تابع هدف نشان داده شده است.

با در نظر گرفتن مقاومت تلفات هسته در روش پیشنهادی، مقدار توان راکتیو مرجع در کسری از ثانیه به گونهای محاسبه میشود که بیشینه بازده ژنراتور القایی دوتحریکه حاصل گردد. علاوه بر این، بازده و توان راکتیو مرجع به صورت روابط ریاضی به دست میآیند و به راحتی میتوان این روابط را برای هر توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوتحریکه محاسبه نمود.

این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم مدل دینامیکی ژنراتور القایی دوتحریکه معرفی شده است. در بخش سوم بازده و توان راکتیو مرجع، به روش پیشنهادی محاسبه شده است. با توجه به نیاز ژنراتور به یک کنترلکننده قوی جهت کنترل دقیق توان راکتیو و بیشینهسازی بازده، در بخش چهارم، روش کنترلی پیشنهادی برای کنترل توانهای اکتیو و راکتیو بیان شده است. نتایج حاصل از شبیهسازی و تحلیل عددی برای بهینهسازی بازده در بخش پنج آمده



شکل ۱: مدار معادل حالت پایدار DFIG [۳]

است. در بخش ششم نیز عملکرد ردیابی روش کنترلی پیشنهادی برای ردیابی مقادیر مرجع جدید بیان شده است. در نهایت در بخـش هفـتم نتیجهگیری ارائه شده است.

۲- مدل دینامیکی ژنراتور القایی دوتحریکه

گام اساسی در رسیدن به راه حل دقیق، استفاده از مدل مناسب و دقیق ماشین است. مدار معادل حالت پایدار ژنراتور القایی دوتحریکه در شکل ۱ نشان داده شده است و همان طور که مشاهده می شود، همانند مدار معادل یک ژنراتور القایی معمولی است، با این تفاوت که به سیم پیچی روتور یک ولتاژ کنترلی وصل است و مقدار آن در سرعتهای مختلف باد به منظور دریافت توان خروجی بهینه از ژنراتور تغییر می کند و مقدار آن با توجه به شکل ۱، به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{\overline{V_r}}{s} = \overline{V_s} + (R_s + jX_{ls})\overline{I_s} + (\frac{\overline{R_r}}{s} + jX_{lr})\overline{I_r}$$
(1)

در روش پیشنهادی، بـرای اینکـه تـأثیر مقاومـت و تلفـات هسـته استاتور بر روی روابط بازده و توان راکتیو مرجع به وضوح دیـده شـود، حالتهای مختلفی برای مدل ژنراتور القایی دوتحریکـه در نظـر گرفتـه میشود، این حالتها عبارتاند از:

حالت اول) مقاومت و تلفات هسته استاتور هر دو در نظر گرفته شده است:

$$R_s \neq 0$$
 , $R_c \neq \infty$
حالت دوم) مقاومت استاتور در نظر گرفته شده و از تلفات هست
استاتور صرفنظر می شود:
 $R_s \neq 0$, $R_c \rightarrow \infty$
حالت سوم) از مقاومت و تلفات هسته استاتور صرفنظر می شود:
 $R_s = 0$, $R_c \rightarrow \infty$

در گام بعدی، با بهکارگیری روش پیشنهادی، بـرای بـازده و تـوان راکتیو مرجع روابط ریاضی به دست میآید.

۳- محاسبه بازده به روش پیشنهادی

در این بخش، یک روش جدید برای بیشینهسازی بازده ژنراتـور القـایی دوتحریکه پیشنهاد میشود. در این روش، روابط جدیدی برای بازده بـه دست میآید. تنها مجهول این روابط، سرعت بـاد اسـت. تـوان راکتیـو

استاتور مرجع برای بیشینه سازی بازده در بخش (۳–۱) به دست میآید. برای به دست آوردن روابط بازده ژنراتور القایی دوتحریکه مراحل زیر طی می شود: مرحله اول) روابط (۲) و (۳) به ترتیب برای جریان و ولتاژ روتور از

روی شکل ۱ به دست میآید:

$$\overline{I_r} = \frac{\overline{V_s} + [(A + R_s) + j(B + \omega_s L_{\sigma_s})\overline{I_s}]}{A + jB}$$
(7)

$$\overline{V_r} = [(R_r + sA) + j(sB + \omega_r L_{\sigma r})\overline{I_r} - (sA + jsB)\overline{I_s}$$
(٣)

که در معادلات (۲) و (۳)، $\overline{V_r}, \overline{I_r}$ به ترتیب جریان و ولتاژ روتـور اسـت و $B = R_c \parallel j\omega_s L_m = A + jB$ مربوط به شاخه موازی مدار معادل شکل و $R = k_c \parallel j\omega_s L_m = A + jB$ و لتاژ استاتور، با اندازه معلوم و زاویه صفر به عنوان ولتاژ مرجع در نظر گرفته شده است.

مرحله دوم) در گام دوم، با جایگذاری رابطه (۲) در (۳)، ولتاژ روتور به صورت رابطه (۴) و (۵) به دست میآید:

$$V_{rx} = \frac{(A1)I_{sx} + (B1)I_{sy} + (C1)V_s}{A^2 + B^2}$$
(*)

$$V_{ry} = \frac{(A3)I_{sx} + (B3)I_{sy} + (C3)V_s}{A^2 + B^2}$$
(Δ)

که در معادلات (۴) و (۵) ولتاژ روتور و جریان استاتور به ترتیب $\overline{I_s} = I_{sx} + jI_{sy}$ و موهومی $\overline{V_r} = V_{rx} + jV_{ry}$ ایت و مؤلفههای حقیقی و موهومی ایـــن معــادلات از هـــم تفکیـــک شـــده اســـت. مقــادیر A1, B1, C1, A3, B3, C3 در پیوست (ج) آورده شده است. **مرحله سوم**) در این مرحله، جریان استاتور به صورت تابعی از توان راکتیو استاتور و توان خروجی ژنراتور نوشته می شود:

$$Q_s = 3 \operatorname{Im}(\overline{V_s}.\overline{I_s}^*) \quad \Rightarrow \quad I_{sy} = \frac{-Q_s}{3V_s}$$
 (8)

$$P_{out} = (1-s)P_s \qquad \Rightarrow \qquad I_{sx} = \frac{P_{out}}{3(1-s)V_s}$$
 (Y)

که در معادلات (۶) و (۷)، Q_s توان راکتیو استاتور، P_{out} توان کل خروجی ژنراتور و P_s توان حقیقی استاتور است. در رابطه (۷)، از تلفات مسی استاتور و روتور صرفنظر شده است.

مرحله چهارم) در این مرحله، روابط (۶) و (۷) در (۴) و (۵) جاگذاری می شود و ولتاژ روتور به صورت (۸) و (۹) بازنویسی می شود:

$$V_{rx} = \frac{(\frac{A1}{1-s})P_{out} - (B1)Q_s + 3(C1)V_s^2}{3V_s(A^2 + B^2)}$$
(A)

$$V_{ry} = \frac{(\frac{A3}{1-s})P_{out} - (B3)Q_s - 3(C3)V_s^2}{3V_s(A^2 + B^2)}$$
(9)

که در روابط (۸) و (۹)، V_{rr} قسمت حقیقی ولتاژ روتور، V_{ry} قسمت موهومی ولتاژ روتور است. *A,B* به ترتیب قسمتهای حقیقی و موهومی بخش موازی مدار معادل شکل ۱ است. مقادیر *A*1, *B*1, *C*1, *A*3, *B*3, *C*3 در پیوست (ج) آمده است.

مرحله پنجم) بهطور کلی معادله بـازده در ژنراتـور بـا نادیـده گـرفتن تلفات، برابر است با:

$$\eta = \frac{P_s + P_r}{P_{mec}} = \frac{3\text{Re}(V_s, \overline{I_s^*}) + 3\text{Re}(\overline{V_r}, \overline{I_r^*})}{P_{mec}}$$
(1.)

 $P_r = 3 ext{Re}(\overline{V_r}.\overline{I_r}^*)$ که در آن $P_s = 3 ext{Re}(\overline{V_s}.\overline{I_s}^*)$ توان اکتیو استاتور، $P_r = 3 ext{Re}(\overline{V_r}.\overline{I_s}^*)$ توان اکتیو روتور است.

در مرحله آخر برای به دست آوردن روابط بازده، با جاگذاری روابط (۶) تا (۹) در رابطه (۱۰)، بازده برای سه حالت مختلف ژنراتـور القـایی دوتحریکه به صورت زیر است:

الف) معادله بازده برای حالت اول:

$$\eta = \frac{(U)Q_s^2 - (X)Q_s + (W)P_{out}^2}{(A^2 + B^2)P_{mec}} + \frac{(Y)P_{out} + 3(Z)V_s^2}{(A^2 + B^2)P_{mec}}$$
(11)

$$\eta = \frac{(N_1)Q_s^2 + (J_1)Q_s + (T_1)P_{out}^2}{P_{mec}} + \frac{(R_1)P_{out} + (M_1)V_s^2}{P_{mec}}$$
(17)

$$\eta = \frac{(I_1)Q_s^2 + (J_1)Q_s + (K_1)P_{out}^2}{P_{mec}} + \frac{(L_1)P_{out} + (M_1)V_s^2}{P_{mec}}$$
(17)

که I, K1, L1 در پیوست (ب) آمده است. در (۱۱) تـا (۱۳)، بـازده برحسب توان راکتیو استاتور، محاسبه شده است.

در گام بعدی، برای این که معادلات بازده بهینه شود، توان راکتیو مرجع بهینه استاتور محاسبه می شود.

۲-۱-۳ محاسبه توان راکتیو مرجع

ژنراتور القایی به دلیل اینکه مدار میدان مجزا ندارد، نمی تواند توان راکتیو تولید کند و درواقع خود ژنراتور توان راکتیو مصرف می کند و همواره باید یک منبع توان راکتیو خارجی به آن وصل باشد تا میدان مغناطیسی استاتور را حفظ کند و به همین علت توربینهای بادی دارای ژنراتور القایی دوتحریکه، بیشتر اوقات متصل به شبکه کار می کنند.

توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور القایی دوتحریکه، از دو طریق تـأمین میشود:

- شبکه
- مبدل طرف شبکه

برای به دست آوردن توان راکتیو مرجع جدید، باید اندازه توان راکتیو بهینه استاتور با اندازه توان راکتیو مبدل طرف شبکه مقایسه شود و نحوه تأمین توان راکتیو مشخص شود؛ مقایسه به این صورت انجام می گیرد که در لحظاتی که اندازه توان راکتیو بهینه استاتور از مقدار توان راکتیو بیشینهای که مبدل طرف شبکه می تواند مبادله کند کوچک تر است، توان راکتیو مرجع برابر با توان راکتیو بهینه استاتور خواهد بود، در غیر این صورت توان راکتیو مرجع با منفی بیشینه توان راکتیو قابل تبادل توسط مبدل طرف شبکه برابر است.

بەعبارت ديگر اگر:

$$Q_{GSC-max} > |Q_{s-opt}| \Rightarrow Q_{s-ref} = Q_{s-opt}$$
 شرط اول در غیر این صورت:

شرط دوم

$$Q_{s-ref} = -Q_{GSC-max}$$

که در شروط فوق، Q_{s-opt} توان راکتیو مرجع استاتور، Q_{s-opt} توان راکتیو مرجع استاتور، Q_{s-opt} توان راکتیو بهینه استاتور و $Q_{GSC-max}$ توان راکتیو ماکزیمم مبدل طرف شبکه است و نحوه محاسبه آنها در بخشهای (۳–۲) و (۳–۳) آورده شده است.

۲-۳- توان راکتیو بهینه

با توجه به اینکه، تنها متغیری که در DFIG می توان مقدار آن را از بیرون تغییر داد، توان راکتیو استاتور است، به همین دلیل برای بهینهسازی بازده، توان راکتیو استاتور بهعنوان متغیر کنترلی در نظر گرفته می شود. برای محاسبه توان راکتیو بهینه، از معادلات (۱۰) تا (۱۲) نسبت به توان راکتیو مشتق گیری می شود. حالت اول) اگر ($\infty \neq R$, $q \in R$, باشد:

$$Q_{s-opt} = \frac{3V_s^2(X)}{2(B1B2 + B3B4)}$$
(14)

که
$$X$$
 , B l, B 2, B 3, B 4 در پیوست (ج) آمده است.
حالت دوم) اگر ($R_s \neq 0$, $R_c \to \infty$) باشد:

$$Q_{s-opt} = \frac{-3(R_r \omega_s L_s) V_s^2}{(R_r R_s^2 + R_r \omega_s^2 L_s^2 + R_s \omega_s \omega_r L_m^2)}$$
(1 Δ)

که در آن $L_s = L_{\sigma s} + L_m$, $L_r = L_{\sigma r} + L_m$ هستند.

با توجه به رابطه (۱۵) مشاهده می شود، با در نظر گرفتن مقاومت استاتور، توان راكتيو بهينه استاتور وابسته به سرعت روتور است. پس در هر سرعتی از باد، یک توان راکتیو استاتور بهینه یکتایی به دست مىآيد. در اين حالت توان راكتيو بهينه استاتور با سرعت روتور كه به سرعت باد وابسته است، نسبت عکس دارد.

د: حالت سوم) اگر $(R_s = 0, R_c \rightarrow \infty)$ باشد:

$$Q_{s-opt} = \frac{-3V_s^2}{\omega_s L_s} \tag{19}$$

در رابطه (۱۶)، ϖ_s سرعت سنکرون استاتور است. همچنان که مشاهده می شود، زمانی که از مقاومت استاتور صرف نظر می شود، توان راکتیو بهینه استاتور به سرعت روتور وابسته نیست و توان راکتیو بهینه استاتور، برای تمام سرعتهای باد یک مقدار ثابت است.

۳-۳- توان راکتيو مبدل طرف شبکه

براى مشخص شدن نحوه تأمين توان راكتيو ژنراتور القايى دوتحريك، مقدار توان راکتیوی که مبدل طرف شبکه تولید میکند، محاسبه می شود. با توجه به اینکه مبدل توان طرف شبکه در ژنراتور القایی دوتحریکه در محدوده ۳۰ درصد توان نامی ژنراتور عمل میکند، روابط محاسبه توان راکتیو مبدل طرف شبکه به صورت زیر به دست میآید: $(0.3S_n)^2 = P_{GSC}^2 + Q_{GSC}^2$ (1Y)

$$Q_{GSC-\max} = (0.3S_n)^2 - P_{GSC}^2 \qquad (1\lambda)$$

در روابط (۱۷) و (۱۸)، S_n توان نامی ژنراتور، ضریب γ' ۰ به علت توان نامی روتور که در ۳۰ درصد توان نامی ژنراتور است و P_{GSC} توان اکتیو مبدل سمت شبکه است که با صرفنظر کردن از تلفات مبدلهای توان، رابطه P_r برقرار می شود که در این تساوی، P_r توان اکتیو روتور $P_{GSC} = P_r$ است.

با مشاهده نتایج، میانگین مقدار مرجع توان راکتیوی که به ازای آن بازده بیشینه میشود، در حدود ۰۵/۰۵- پریونیت است. ایـن مقـدار مرجع با روشهای کنترلی پیشین که با ریپل بالاتر از این مقدار توانهای اکتیو و راکتیو مرجع را دنبال میکنند، بهخوبی قابل ردیابی نیست؛ لذا در این مقاله یک روش کنترلی جدید مبتنی بر کنترل تطبیقی مدل مرجع پیشنهاد می شود که با دقت ردیابی بالا و ریپل پایین بتواند ژنراتور القایی دوتحریکه را به منظور مقادیر مرجع مورد نظر كنترل كند.

۴- روش کنترلی پیشنهادی

در این مقاله، با استفاده از یک روش مبتنی بر کنترل تطبیقی، توانهای اکتیو و راکتیو یک ژنراتور القایی دوتحریکه کنترل میشوند.

۴-۱-۴ کنترل توانهای اکتیو و راکتیو

در روش پیشنهادی مقادیر توانهای اکتیو و راکتیو استاتور با مقادیر مرجع خود مقایسه می شوند. سپس از طریق روابط حاکم بر مدل ماشین و همچنین یک کنترل تناسبی- انتگرال و مشتق گیر^۵ مقادیر مرجع جریانهای روتور به دست میآیند. در نهایت با مقایسه مقادیر جریانهای مرجع بهدست آمده، با مقادیر واقعی و از طریق یک كنترل كننده تطبيقي، مقادير مرجع ولتاژهاي مرجع به دست مي آيند و به ژنراتور اعمال می شوند.

با صرفنظر کردن از مقاومت فازهای استاتور، می توان ولتاژ استاتور را به صورت زیر بیان کرد:

$$V_{sq} = V_s \tag{19}$$

که در آن V_{sq} و V_{sd} به ترتیب مؤلف های ولتاژ استاتور در راستای محورهای q و d قاب مرجع چرخان هستند.

به کمک (۱) تا (۵)، توانهای اکتیو و راکتیو استاتور برحسب مؤلفههای جریان روتور در قاب مرجع چرخان dq به صورت زیر به دست می آیند:

$$P_s = -V_s \times \frac{L_m}{L_s} \times i_{rq} \tag{(Y \cdot)}$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s \times L_s} - \frac{V_s \times L_m}{L_s} \times i_{rq}$$
(71)

۲-۴- کنترل تطبیقی مدل مرجع

در روش کنترل تطبیقی برای کنترل توان باید ورودیهای مناسبی برای کنترل کننده تطبیقی انتخاب شود. با توجه به اینکه در بخش اول به کمک کنترل کننده های تناسبی-انتگرال و مشتق گیر مقادیر جریان مرجع به دست آمد، در این بخش با استفاده از روش کنترل تطبیقی، از روى اين جريان ها مقادير ولتاژ مرجع انتخاب شده و به مدار اعمال مىشود.

در اینجا نیز مانند [۲۱] از تقریب خطی مرتبه اول برای مدلسازی حالتهای سیستم استفاده می شود. با در نظر گرفتن (x(t) بهعنوان یکی از حالتهای سیستم و (u(t) به عنوان سیگنال کنترلی، تقریب خطی مرتبه اول برای این حالت به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$\dot{x}(t) = -a \cdot x(t) + b \cdot u(t) \tag{77}$$

که در آن a و b پارامترهای سیستم هستند و با توجه به شرایطی که سیستم در آن قرار دارد، تغییر میکنند.

به منظور انطباق سیگنال کنترلی (u(t) با شرایط سیستم، این سیگنال هم از حالت فعلی سیستم و هم از مقدار مرجع تأثیر می پذیرد. رابطه زیر نحوه تولید این سیگنال کنترلی را نشان میدهد. (۳۳)

$$u(t) = K(t) \cdot x(t) + K_r(t) \cdot r(t)$$



در رابطه فوق، (*K*(*t*) و (*K*(*t*) به ترتیب بهرههای پس خور⁹ و پیش خور^۷ تطبیقی هستند. برای به دست آوردن مقادیر این بهرهها بایـد اخـتلاف حالت مدل تخمین زدهشده ((*x*(*t*)) با حالت مدل مرجع ((*x*_m(*t*)) مقایسـه شود و متناسب با آن تصمیم گیری شود. به عبارتی مقادیر این بهرهها به گونهای تعیین می شود که اخـتلاف حالـت تخمینـی بـا حالـت مرجع کمینه شود. تقریب خطی مرتبه اول مدل مرجع به صورت زیـر فـرض می شود:

$$\dot{x}_m(t) = a_m \cdot x_m(t) + b_m \cdot r(t) \tag{14}$$

که در آن am و bm مقادیر پارامترهای مدل مرجع هستند.

با استفاده از (۲۲)، (۲۳) و (۲۴)، میتوان مقدار خطای مدل را بـه صورت زیر بیان کرد:

$$x_e(t) = x_m(t) - x(t) \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= a_m \cdot x_e(t) + (a - a_m - b \cdot K(t)) \cdot x(t) + \\ &\quad (b_m - b \cdot K_r(t)) \cdot r(t) \end{aligned}$$

در حالت معمولی مقادیر K و K^r مانند کنترل کنندههای تناسـبی-انتگرال گیر عمل میکنند و به صورت زیر بیان میشوند [۱۷]:

$$K_e(e,t) = \int_0^t I_1 \cdot y_e \cdot I_{rdq}^T \cdot dt + P_1 \cdot y_e \cdot I_{rdq}^T$$
(YY)

$$K_r(e,t) = \int_0^t I_2 \cdot y_e \cdot I_{rdqref}^T \cdot dt + P_2 \cdot y_e \cdot I_{rdqref}^T$$
(YÅ)

که در آن *P2 II ،P1 و I*2 و *I* ضرایب وزنی برای کنترل کنندههای تطبیقی هستند. همچنین *ye* بیان گر تابع وزنی برای خطای حالت و مشـتقات آن است و از روی رابطه زیر به دست میآید [۱۸]:

$$y_e = C_e \cdot x_e \tag{Y9}$$

در رابطه (۲۹)، *Ce* مقدار ثابتی است که جهت کسب اطمینان از پایداری قسمت پیشخور، کنترل کننده انتخاب می شود.

با در نظر گرفتن جریان های I_{ndqnef} که از خروجی کنترل کننده های PID حاصل می شوند به عنوان مقادیر مرجع، جریان های I_{ndq} که با سنسور اندازه گیری و یا تخمین زده شده اند به عنوان متغیرهای حالت و در نهایت سیگنال ولتاژ خروجی بخش

کنترل تطبیقی (V_{rdqref})، متغیرهای کنترلی سیستم، بلوک دیاگرام کنترلی مربوط به کنترل کننده پیشنهادی در شکل ۲ بیان شده است. مطابق شکل ۲، مقدار توانهای اکتیو و راکتیو مرجع، با مقادیر واقعی آنها که به ترتیب با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۱) به دست میآید، مقایسه میشوند.

در شکل ۲، کنترل تطبیقی مدل مرجع به بلوک کنترل توان اضافه شده است.

۴-۳- الگوریتم بهینهسازی کریل هرد

الگوریتم کریل هرد یکی دیگر از الگوریتمهای بهینه سازی الهام گرفته از طبیعت است که به تازگی برای حل مسائل بهینه سازی معرفی و توسعه یافته است [۲۰]. این الگوریتم رفتار و حرکت گروهی هر کریل را در اجتماع شبیه سازی می کند.

نحوه آرایش کریل ها در اجتماع به پارامتره ای بسیاری وابسته است. هنگامی که شکارچیان به کریل ها حمله می کنند، تراکم جمعیت کریل ها کاهش می یابد. دو هدف اصلی به هم پیوستن کریل ها، افزایش تراکم و دستیابی به غذا است، بنابراین تابع هدف حرکت اجتماع کریل شامل دستیابی به کمترین فاصله هر کریل از غذا و بیش ترین تراکم جمعیت است. حرکت کریل به سه عامل اصلی شامل حرکت متأثر از سایر کریل ها، فعالیتهای مربوط به جستجوی غذا و پخش شدن در جهتهای مختلف وابسته است. هر کریل سعی می کند تراکم اجتماع را حفظ و به سوی سایرین حرکت کند. همچنین بخشی از جابه جایی متأثر از حرکت به سوی مکان غذا و آخرین موقعیت غذا است که در حافظ ه ذخیره شده است. پخش شدن، حرکتی تصادفی است که شامل بردار زمان ها و بیشینه سرعت پخش شدن است.

بهطور کلی، حرکتهای تعریفشده، موقعیت هر کریل را به سوی بهترین موقعیت بهبود میبخشند. در حرکت جستجو و حرکت متأثر از سایر کریلها، دو استراتژی کلی و محلی وجود دارد که به صورت موازی با هم کار میکنند و این باعث میشود الگوریتم بهینهسازی اجتماع کریل، الگوریتم کارآمدی باشد. در صورتی که مقدار مناسب مربوط به ضریب مؤثر این حرکتها بهتـر از مقـدار مناسـب کریـل أم باشد، باعث جذب به سوی آن و در غیر این صورت باعث دفع می شود.

شکل ۳ فلوچارت الگوریتم کریلهرد را به صورت سادهشـده نشـان میدهد.

۴-۴- پیادہسازی الگوریتم کریل ھرد

الگوریتم کریل هرد بر اساس اصول ساختاری خود، تابع هدف مشخصی را با استفاده از ضرایب کنترلی ki ،kp و ka کمینه می کند. مطابق ساختار روش کنترلی پیشنهادی دو کنترل کننده تناسبی- انتگرال و مشتق گیر به ترتیب برای کنترل توانهای اکتیو و راکتیو استفاده شده است. بنابراین پارامترهای کنترلی عبارتاند از: kal و ki برای کنترل توان اکتیو و ki2 ،kp2 و kal برای کنترل توان راکتیو.

برای بهبود پاسخ زمانی سیستم میتوان توابع هدف مختلفی انتخاب کرد. به منظور ردیابی بهتر و دقیقتر توانهای اکتیو و راکتیو مرجع محاسبهشده توسط ژنراتور، تابع هدفی مورد نیاز است که هم



شکل ۳: بلوک دیاگرام سادهشده الگوریتم کریلهرد [۲۰]

شامل مجموع خطاهای حالت ماندگار برای توان اکتیو و هم مجموع خطاهای حالت ماندگار برای توان راکتیو باشد. بنابراین تابع هدف را میتوان به صورت رابطه (۳۰) بیان کرد.

$$J = \frac{h}{2} \sum_{k=1}^{N} \left(\frac{|\mathbf{P}^{*}(k) - \mathbf{P}(k)| + |\mathbf{P}^{*}(k-1) - \mathbf{P}(k-1)| +}{|\mathbf{Q}^{*}(k) - \mathbf{Q}(k)| + |\mathbf{Q}^{*}(k-1) - \mathbf{Q}(k-1)|} \right)$$
(7.)

P که در آن P^* و Q^* به ترتیب، توانهای اکتیو و راکتیو مرجع هستند. P و Q به ترتیب، توانهای اکتیو و راکتیو اندازه گیریشده، N تعداد نمونهها و h فاصله بین نمونهها است.

مسئله طراحی کنت-رل کننده را می توان به صورت مسئله بهینه سازی محدود شده بیان کرد که در آن محدودیت های بهینه سازی همان بازه های پارامتر های کنترل کننده تناسبی- انتگرال و مشتق گیر هستند [۱۹]. در این مسئله فرض شده است که ضرایب بهینه سازی در بازه [۵۰۰۰] هستند.

نتایج بهینهسازی با استفاده از الگوریتم کریـلهـرد بـرای تعیـین پارامترهای کنترلی به صورت جدول ۱ به دست میآید.

جدول ۱: ضرایب کنترل کنندههای تناسبی – انتگرال و مشتق گیر برای کنترل کنندههای توان اکتیو و راکتیو

مقدار	ضرايب كنترلى	كنترلكننده
40/2095	k _{p1}	
1/984.	k _{i1}	توان اكتيو
• / • ١٣١	k _{d1}	
4.1221	k_{p2}	
١/٧٨۵٩	\mathbf{k}_{i2}	توان راكتيو
۰/۰ ۱۳۶	k _{d2}	

۵- نتایج شبیهسازی و تحلیل عددی برای بیشینهسازی بازده

برای بررسی روش پیشنهادی در این مقاله و صحت روابط، از شبیهسازی کامپیوتری استفاده شده است. این شبیهسازی توسط نرمافزار MATLAB/Simulink و برای نشان دادن تأثیر روش پیشنهادی روی بهبود بازده انجام شده است. نتایج شبیهسازی مؤید صحت روش پیشنهادی است.

در توربین بادی دارای ژنراتور القایی دوتحریکه، توان الکتریکی از دو طریق استاتور و روتور، به شبکه تحویل داده می شود. در شکل ۴، میزان تولید و یا مصرف توان حقیقی که هر یک از سیم پیچیهای استاتور و روتور بر عهده دارد، نشان داده شده است.

شکل ۴ نشان میدهد، روتور در لحظاتی که ژنراتور در حالت فوق سنکرون است، به شبکه توان تزریق میکند و در حالت زیرسنکرون از شبکه توان دریافت میکند و همچنین در حالت سنکرون سیمپیچی روتور هیچ نقشی در تبادل توان ایفا نمیکند و تنها سیمپیچی استاتور توان به شبکه منتقل میکند.

در شکل ۵، توان راکتیو بهینه استاتور، در سرعتهای مختلف روتور با استفاده از معادلات (۱۳)، (۱۴) و نتایج شبیهسازی نشان داده شده است. نحوه به دست آوردن نتایج شبیهسازی، توسط روش سعیوخطا انجام پذیرفته است، به این صورت که با دادن مقادیر مختلف در نرمافزار شبیهسازی برای توان راکتیو مرجع، آن مقدار از توان راکتیوی که در آن بازده ژنراتور القایی دوتحریکه بیشینه می شود، بهعنوان توان راکتیو مرجع در نظر گرفته شده است.

شکل ۵ نشان میدهد، مقادیر توان راکتیو بهینه بهدستآمده با روش جدید، بسیار نزدیک به مقادیر شبیهسازی است. همچنین در جدول ۲، توان راکتیو بهینه استاتور در سه حالت مختلف، در نظر گرفته شده برای ژنراتور القایی دوتحریکه و همچنین ماکزیمم توان مبدل طرف شبکه که از رابطه (۱۸) به دست میآید، در لغزشهای مختلف، نشان داده شده است.

با مشاهده مقادیری که در جدول ۲، باری توان راکتیو بهینه استاتور به دست میآید، تلفات هسته استاتور تأثیر کمی بر روی مقدار توان راکتیو بهینه استاتور دارد.

به منظور تعیین توان راکتیو مرجع برای ژنراتور القایی دوتحریک،



شکل ۴: سهم استاتور و روتور از توان خروجی ژنراتور القایی دوتحریکه



شکل ۵: توان راکتیو بهینه استاتور در ژنراتور القایی دوسو تغذیه

جدول ۲: مقادیر *ی_{s-op},* و ک_{3-cor} با و بدون تلفات هسته و مقایسه با نتایج شییهسازی,

$Q_{GSC-max}$	Q_{s-ant}	Q_{s-opt}		
نتايج	(<i>pu</i>) از رابطه (۱۴)	از رابطه (۱۲)	$Q_{\scriptscriptstyle GSC-max}$	لغزش
شبيەسازى		(<i>pu</i>)	(<i>pu</i>)	0,
-•/•A۵	-•/• \ ۴	- ۰ / ۰ ۸ ۳	۰/۰۵۴	- • /٣
-•/•YA	-•/•YY	-•/•Y۶	•/•۶٨	-•/۲۵
-•/•Y١	-•/•Y	-•/•۶٩	•/•YA	-•/Y
-•/•۶۶	-•/• ۶ ۵	-•/•۶۴	٠/٠٨۴	-•/1۵
-•/•۶١	-•/•۶	-•/• ۵ ٩	•/• XV	-•/\
-•/• ۵ Y	-•/• ۵ ۶	-•/•۵۵	٠/٠٨٩	-•/Δ
+/۰۵۴	-•/•۵۳	-•/•۵۲	• / • ٩	•
-•/•۵١	-•/• \	-•/•۴٩	٠/٠٨٩	۰/۵
-•/• ۴ λ	-•/• ¥V	-•/• 49	٠/• ٨ ٩١	٠/١
-•/•۴۶	-•/• ۴۵	-•/•۴۴	•/• AA	۰/۱۵
-•/•۴٣	-•/• 47	-•/•۴١	•/• . \YA	٠/٢
-•/•۴١	-•/• ۴	-•/• ~ ٩	•/• \Y \	٠/٢۵
-•/•٣٩	-٠/٠٣٨	-•/•٣٧	•/•እ۶٨	۰ /٣

مقدار توان راکتیو بهینه استاتور با توان راکتیو مبدل طرف شبکه از لحاظ اندازه مورد بررسی قرار می گیرد.

در شکل ۶، مقایسه توانهای راکتیو بهینه استاتور و مبدل توان برای توربین بادی دارای DFIG نمونه ذکرشده در پیوست (د)، صورت گرفته است.

نحوه مقایسه از روی شکل ۶ به این صورت است که:

) در لحظاتی که ۲۰/۲۲ > s است، مقدار $Q_{GSC-max}$ کوچکتر $\mathbf{S} < -0.77$ کوچکتر $|\mathbf{Q}_{GSC-max}|$ از $|\mathcal{Q}_{s-opl}|$ است، در این صورت توان راکتیو مرجع برابر با توان راکتیو مبدل طرف شبکه است.

 $\left|Q_{s-opt}\right|$ است، مقدار $Q_{GSC-max}$ بزرگتر از Q_{S-opt} است، مقدار $Q_{GSC-max}$ است و توان راکتیو بهینه استاتور است و توان راکتیو بهینه استاتور است.



شکل ۶: مقایسه اندازه توان راکتیو بهینه و مبدل سمت شبکه

نتایج مقایسه، همان مقادیر توان راکتیو مرجع است؛ در جـدول ۳ مقادیر توان راکتیو مرجع برای ژنراتور القایی دوتحریکـه نمونـه، نشـان داده شده است.

در شکل ۷، بازده DFIG در دو حالت، یکی توان راکتیو مرجع صفر و دیگری توان راکتیو مرجع جدید نشان داده میشود.

در شکل ۷، میزان بهبود بازده با روش پیشنهادی در مقایسه با حالتی که توان راکتیو مرجع برابر با صفر باشد، نشان داده شده است. مطابق شکل ۷، بازده ژنراتور القایی دوتحریکه با اعمال توان راکتیو مرجع پیشنهادی بهبود یافته است. قابل ذکر است که در اکثر مراجع، توان راکتیو مرجع صفر در نظر گرفته میشود.



دوتحريكه

تأثیر مقاومت استاتور و تلفات هسته بر روی بـازده ژنراتـور القـایی دوتحریکه در شکل ۸ نشان داده میشود. در این شـکل، تـوان راکتیـو مرجع جدید بهجای مقدار صفر اعمال شده است.



شکل ۸: تأثیر مقاومت تلفات هسته بر بازده ژنراتور القایی دوتحریکه با توان راکتیو مرجع پیشنهادی

در شکل ۸، نمودار ۱ توسط رابطه (۱۲) بـرای حالـت دوم در نظـر گرفته شده (0≠ s_R و ∞−c) با اعمال توان راکتیو مرجع پیشنهادی به

دست آمده است. نمودار ۳، توسط رابطه (۱۱) برای حالت اول (0¢Rs و $\infty \neq Rs$) با اعمال توان راکتیو مرجع جدید، به دست آمده است. نمودار ۲ مربوط به شبیه سازی نرمافزار متلب است که به جای توان راکتیو مرجع صفر، توان راکتیو مرجع پیشنهادی قرار داده شده است. لازم به ذکر است، در روابط بازده به دست آمده با روش پیشنهادی (معادلات ۱۱ تا ۱۳)، تنها متغیر مجهول، توان راکتیو استاتور است و در روابط و یا همان میزان سرعت باد است و به تبع آن با معلوم بودن سرعت باد، توان راکتیو و یا همان میزان سرعت باد است و با معلوم بودن توان راکتیو و یا همان میزان سرعت باد است و با معلوم بودن توان راکتیو استاتور راکتیو مرجع می توان راکتیو محاصل معلوم بودن توان راکتیو محاصل معلوم بودن توان راکتیو محاصل محاصبه است و با معلوم بودن توان راکتیو استاتور مرجع می توان بازده را برای هر سرعتی از باد، به دست آورد. محاصب هازده با معلوم بودن توان راکتیو محاصل محاصبه بازده با معلوم بودن توان راکتیو استاتور مرجع می توان بازده را برای هر سرعتی از باد، به دست آورد. محاصب هازده با معلوم بودن توان راکتیو محاصب محاصب می توان بازده با بازده با بازده با به بازده با محصل محاصب محاصل محاصب محاصل محاصب محاصل محاصب محاصل مودن سرعت باد به اختصار در زیر آمده است:

که در آن، n: بازده، Q_{s-ref} : توان راکتیو مرجع استاتور، s: لغزش و v: سرعت باد که تعیین کننده لغزش است.

میانگین بازده در Qs-ref و لغزش ۷/۰۳ تا ۷/۰۳ به دست میآید و با میانگین بازده بهدستآمده با توان راکتیو پیشنهادی در همان محدوده لغزش، مقایسه می شود و اختلاف این دو مقدار، همان میزان بهبود بازده است. این عمل مقایسهای در شکل ۶ نشان داده شده است.

۵-۱- بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای مدار معادل روی مقادیر مرجع

در این مقاله برای اینکه تأثیر هر یک از مقاومتهای استاتور و روتور و همچنین مقاومت تلفات هسته بر روی بازده و توان راکتیو مرجع مشخص شود، وجود و عدم وجود آنها در سه حالت در بخش (۲) آورده شده است.

برای بهتر نشان دادن تأثیر تغییرات این پارامترها، جدول ۴ تهیه شده است.

در جدول ۴ تأثیر تغییرات ۲۰ درصدی مقاومت روتور و استاتور روی مقدار توان راکتیو بررسی شده است و نشان میدهد که این مقدار تغییـر تأثیری بسیار جزئی بر روی توان راکتیو مرجع و به تبع آن بازده دارد.

۶- نتایج شبیهسازی برای روش کنترلی پیشنهادی

جهت بررسی عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی، کـل سیستم در نـرمافـزار MATLAB/Simulink شـبیهسـازی شـده اسـت. در ایـن شبیهسازی عملکرد روش پیشنهادی بـرای کنتـرل تـوانهـای اکتیـو و راکتیو مرجع دلخواه توسط ژنراتور القایی دوتحریکه بررسی میشود.

مشخصات نامی ژنراتور القایی دوتحریکه و توربین بادی استفادهشده در این شبیهسازی در پیوست (د) داده شده است.

ابتدا فرض شده است که ژنراتور به میزان *pu ۰/۳ ب*ه شبکه توان اکتیو تحویل دهد، سپس در لحظه s ۰/۰۵ این توان به *pu ۰/۹ ا*فزایش یابد.

مقدار توان راکتیو مرجع در بیشتر تحقیقات پیشین، صفر لحاظ شده است؛ اما همان طور که در بخش قبلی محاسبه شد، توان راکتیو مرجع با بیشینه سازی بازده مقداری غیر صفر به دست آمده است. این مقدار مرجع در لغزش های مختلف دارای مقادیر متفاوتی است، اما چون مقادیر آن بسیار نزدیک به هم هستند، در شبیه سازی از متوسط مقدار مرجع توان راکتیو برای لغزش های ۲/۰ – تا ۲/۰+ که برابر مقدار مراب است، استفاده می شود.

لازم به ذکر است در روشهای کنترلی پیشین، برای مثال در [۱۴] و [۲۲] که به ترتیب روشهایی مبتنی بر کنترل برداری و کنترل مستقیم توان ارائه شده است، ریپل بالایی در توان اکتیو و راکتیو دیده میشود (عموماً بالای ۱۹ ۱/۰)، لذا استفاده از این روشها



شکل ۹: عملکرد ردیابی توانهای اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی دوتحریکه در شرایط بازده بیشینه

برای ردیابی مقدار مرجع جدید توان راکتیو امکانپذیر نیست. شکل ۹ ولتاژ و جریان استاتور، جریان روتور و توانهای تولیدی ژنراتور را برای مقادیر مرجع ذکرشده نشان میدهد. شکل ۹ نشان میدهد، با استفاده از روش کنترلی پیشنهادی مقدار ۲۵ – ۰۰۰ بهعنوان توان راکتیو با ریپل بسیار کمتر از روشهای پیشین (کمتر از ۲۵ – ۰۰) و با پاسخ دینامیکی بالا توسط ژنراتور تولید میشود. همچنین مطابق شکل ۹، با استفاده از روش پیشنهادی شکل موج جریانهای سهفاز استاتور و روتور دارای اعوجاج کمی بوده و بلافاصله با تغییرات توان، اندازه آنها تغییر کرده و به سرعت به حالت سینوسی کامل در میآیند.

به منظور بررسی بیش تر عملکرد ردیابی این سیستم کنترلی، مقادیر توان راکتیو دلخواهی بهعنوان مرجع به آن اعمال شده است.

شکل ۱۰ عملکرد ردیابی توانهای اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی دوتحریکه را با مقادیر دلخواه نشان میدهد.

همانطور که در شکل ۱۰ پیداست، با استفاده از کنتـرلکننـده پیشنهادی ژنراتور به خوبی و با ریپل بسیار کم و دینامیـک بسـیار بـالا مقادیر توان اکتیو و راکتیو مورد نظر را تولید میکند.

۷- نتیجهگیری

در این مقاله، ابتدا مقدار توان راکتیو به منظور حصول بیشترین بازده برای ژنراتور القایی دوتحریکه در سه حالت زیر به دست آمد:

حالت اول) مقاومت و تلفات هسته استاتور هر دو در نظر گرفته شـده است.

حالت دوم) مقاومت استاتور در نظر گرفته شده و از تلفات هسته استاتور صرفنظر می شود.

حالت سوم) از مقاومت و تلفات هسته استاتور صرفنظر می شود.



شکل ۱۰: عملکرد ردیابی توانهای اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی

Slip	-•/٣•	-٠/٢۵	-•/٢•	-•/ \ ۵	-•/ \ •	- •/Δ	•	• /۵	•/\•	٠/١۵	• / ٢ •	٠/٢۵	•/٣•
$Q_{s-ref}(pu)$	-•/•۵۴	-•/• ۶ λ	-•/•۶٩	-•/•۶۴	-•/•∆٩	-•/•۵۵	-•/•۵۲	-•/•۴٩	-•/•۴۶	-•/•۴۴	-•/•۴١	-•/•٣٩	-•/•٣٧

جدول ۳: محاسبه توان راكتيو مرجع با روش پيشنهادي براي ژنراتور القايي دوتحريكه

s	_ •/٣	-•/Y	-•/\	•	•/1	۰/۲	• /٣
$Q_{s-ref}(0.8R_r)$	-•/•۵A I	-•/•¥١•	-•/•۶••	-•/•&Y•	-•/• ۴۵۵	-•/• * • Y	-•/•٣٨۴
$Q_{s-ref}(R_r)$	-•/• \ ۴٣	-•/•۶٩•	-•/•∆٩•	-•/•۵۲١	-•/• * ۶•	-•/• ۴ •٨	-•/• °A9
Q _{s-ref} (1.2R _r)	-•/• \ ۴•	-•/•۶Y۶	-•/• ۵ ۷۸	-•/• ۵ ۱۹	-•/• 491	-•/• ۴ •٨	-•/• WA9
$Q_{s-ref}(0.8R_s)$	-•/• \ •	-•/•YY)	-•/•۶١•	-•/•۵۲۳	-•/• ۴ ۵۱	-•/•۴•۴	-•/• °X •
$Q_{s-ref}(R_s)$	-•/• \ ۴٣	-•/•۶٩•	-•/•໖٩•	-•/•&Y)	-•/• * ۶•	-•/•۴• λ	-•/• °K8
Qs-ref (1.2Rs)	-•/• \ ۶•	-•/• ۶ ۵•	-•/• & ۶•	-•/• ۵ ١٨	-•/• 494	-•/•۴•٩	-•/•٣٩٣

جدول ۴: تأثير تغييرات مقاومت استاتور و روتور بر روى توان راكتيو مرجع



توانهای اکتیو و راکتیو

ییوست (ب)

$$I1 = \frac{R_{r}L_{s}^{2}}{3V_{s}^{2}L_{m}^{2}}$$
$$J1 = \frac{2R_{r}L_{s}}{\omega_{s}L_{m}^{2}}$$

با توجه به نتایج محاسباتی، تأثیر در نظر گرفتن مقاومت اهمی استاتور و تلفات هسته در مقدار توان راکتیو مرجع ارزیابی گردید. از آنجا که توان راکتیو مرجع بهدست آمده مقدار نسبتاً کوچکی دارد، روشهای متداول کنترل DFIG قادر به تأمین دقیق آن نیستند. بنابراین یک روش کنترلی جدید مبتنی بر کنترل تطبیقی مدل مرجع ييشنهاد شد كه با دقت بالايي مقدار توان راكتيو را به دست مي دهـد. الگوريتم بهينهسازى كريل هرد نيز جهت تعيين ضرايب كنترل كننده ها به کار رفت. بهعلاوه نتایج شبیهسازی مزایای زیر را برای روش کنترلی پیشنهادی نشان میدهند.

- ریپل بسیار پایین در ردیابی توانهای اکتیو و راکتیو
 - یاسخ دینامیکی بالا
- استحکام خوب در مقابل تغییرات پارامترهای ماشین، به دلیل استفاده از مدل تطبیقی در ساختار آن

ييوست (الف)

در این مقاله، برای بهینهسازی بازده ژنراتور القایی دوتحریکه، مراحل مختلفی طی شده است و به اختصار در زیر، به صورت الگوریتمی آورده شده است:

پيوست (د) مشخصات ژنراتور القايي دوتحريكه مورد استفاده در بخش بیشینهسازی بازده به شرح زیر است: مشخصات سيستم كنترلى

	توربین بادی
Rated power	10 KW
Pole pairs	3
Gain	5.4
Blade diameter	3 <i>m</i>
Inertia moment	$0.00065 \ kg.m^2$
Friction coefficient	0.017 N.m/sec
Air density	$1.22 \ kg/m^3$
	ژنراتور القایی دوتحریکه
Rated power	4 <i>KW</i>
Rated voltage	220/380 V
Rated speed	1440 rpm
Pole pairs	2
	پارامترهای ژنراتور القایی دوتحریکه:
	سهفاز، ۶۰ هرتز، اتصال Y، دارای ۶ قطب

$$\begin{split} V_s &= 332 \ volt \ ; \ R_s = 2.33 \times 10^{-4} \ ohm; \\ R_r &= 1.65 \times 10^{-4} \ ohm; \ l_{\sigma s} = 9.4 \times 10^{-5} \ H \\ l_{\sigma r} &= 8.58 \times 10^{-5} H; \ L_m = 1.59 \times 10^{-5} H; \\ P_{mec} &= 9 \times 10^6 \ watt \end{split}$$

[1] غلامرضا صیاد، امین خدابخشیان و رحمتالله هوشمند، «طراحی پایدارساز سیستم قدرت برای توربینهای بادی مجهز به ژنراتور القایی دو تغذیه به روش کلاسیک و الگوریتم ژنتیک»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۳۹، صفحات ۱۳-۲۳، .1778

مراجع

- [3] G. Abad, J. Lopez, M. A. Rodriguez, L. Marroyo and G. Iwanski, Doubly Fed Induction Machine, Wiley Publishing, 2011.
- [4] M. M. Baggu, B. Chowdhury and J. Kimball, "Comparison of advanced control techniques for grid side converter of doubly-fed induction generator back-to-back converters to improve power quality performance during unbalanced voltage dips," IEE Proc. Elect. Power Appl., vol. 3, no. 2, pp. 516-524, 2015.
- [5] S. Chondrogiannis and M. Barnes, "Stability of doublyfed induction generator under stator voltage orientated vector control," IET Renew. Power Generat, vol. 2, no. 3, pp. 170-180, 2008.
- W. Hofmann and F. Okafor, "Doubly-fed full-controlled [6] induction wind generator for optimal power utilization," In Proc. 4th IEEE Int. Conf. Power Electron, vol. 1, pp. 355-361, 2001.
- [7] H. Nian, P. Cheng and Z. Q. Zhu, "Independent operation of DFIG-based WECS using resonant feedback compensators under unbalanced grid voltage conditions," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 7, pp. 3650-3661, 2015.

$$\begin{split} K1 &= \frac{R_r L_s^2}{3V_s^2 L_m^2 (1-s)^2} \\ L1 &= \frac{(\omega_s + \omega_r)}{\omega_s (1-s)} \\ M1 &= \frac{3R_r}{\omega_s^2 L_m^2} \\ N1 &= \frac{R_r R_s^2 + R_r \omega_s^2 L_s^2 + R_s \omega_s \omega_r L_m^2}{3V_s^2 \omega_s^2 L_m^2} \\ R1 &= \frac{2R_r R_s + \omega_s^2 L_m^2 + \omega_s \omega_r L_m^2}{\omega_s^2 L_m^2 (1-s)} \\ T1 &= \frac{R_r R_s^2 + R_r \omega_s^2 L_s^2 + R_s \omega_s \omega_r L_m^2}{3V_s^2 \omega_s^2 L_m^2 (1-s)^2} \end{split}$$

$$\begin{split} U &= \frac{(B1B2 + B3B4)}{3V_s^2} \\ X &= \frac{A1A2 + A3A4}{3V_s^2(1-s)^2} \\ W &= \frac{A1A2 + A3A4}{3V_s^2(1-s)^2} \\ Y &= \frac{[(A^2 + B^2)^2 + A1C2 + C1A2 - A3C4 - C3A4]}{1-s} \\ Z &= C1C2 + C3C4 \\ A1 &= (R_r + sA)(A^2 + B^2 + AR_s + B\omega_{s\sigma s}) \\ &- (sB + \omega_r l_{\sigma r})(A\omega_s l_{\sigma s} - BR_s) - sB(A^2 + B^2) \\ B1 &= (R_r + sA)(BR_s + A\omega_s l_{\sigma s}) \\ &- (sB + \omega_r l_{\sigma r})(A^2 + B^2 + AR_s + B\omega_s l_{\sigma s}) + sB(A^2 + B^2) \\ C1 &= A(R_r + sA) + B(sB + \omega_r l_{\sigma r}) \\ A2 &= A^2 + B^2 + AR_s + B\omega_s l_{\sigma s} \\ B2 &= BR_s - A\omega_s l_{\sigma s} \\ C2 &= A \\ A3 &= (R_r + sA)(A\omega_s l_{\sigma s} - BR_s) + (sB + \omega_r l_{\sigma r}) \\ &(A^2 + B^2 + AR_s + B\omega_s l_{\sigma s}) - sB(A^2 + B^2) \\ B3 &= (R_r + sA)(A^2 + B^2 + AR_s + B\omega_s l_{\sigma s}) - sB(A^2 + B^2) \\ B3 &= (R_r + sA)(A^2 + B^2 + AR_s + B\omega_s l_{\sigma s}) - sB(A^2 + B^2) \\ C3 &= B(R_r + sA) - A(sB + \omega_r l_{\sigma r}) \\ A4 &= A\omega_s l_{\sigma s} - BR_s \\ B4 &= A^2 + B^2 + AR_s + B\omega_s l_{\sigma s} \\ C4 &= B \end{split}$$

$$P_{out} = (1-s)P_s = (1-s)3\operatorname{Re}(\overline{V_s}.\overline{I_s}^*)$$

= 3(1-s) Re[V_s.(I_{sx} - jI_{sy})]
= 3(1-s)(V_s.I_{sx})
$$\Rightarrow I_{sx} = \frac{P_{out}}{3(1-s)V_s}$$

=

=

- [15] D. W. Zhi and L. Xu. "Improved direct power control of doubly-fed induction generator based wind energy system," *IEMDC*, vol. 1, pp. 436-441, 2007.
- [16] M. Guo, D. Sun and B. T. He, "Direct power control for wind turbine driven DFIG with constant switch frequency," *ICEMS*, pp. 253-258, 2007.
- [17] F. Amrane and A. Chaiba. "Model reference adaptive control for DFIG based on DPC with a fix switching frequency," *IECEC*, 2015.
- [18] Y. D. Landau, Adaptive Control: The Model Reference Approach, Marcel ekker, New York, 1979.
- [19] A. Younesi and S. Tohidi, "Design of a sensorless controller for PMSM using Krill Herd algorithm," 6th IEEE Conference on Power Electronics and Applications (PEDSTC), 2015.
- [20] A. H. Gandomi and A. H. Alavi, "Krill Herd: a new bioinspired optimization algorithm," *Commun Nonlinear Sci Number Simulat*, vol. 17, pp. 4831-4845, 2012.
- [21] R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz and G. Asher, "Overview of control system for the operation of DFIGs in wind energy applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 7, pp. 2776-2798, 2013.
- [22] B. Singh and N. K. S. Naidu, "Direct power control of single VSC-based DFIG without rotor position sensor", *IEEE Trans on Ind. Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 4152-4163, Nov 2014.

- [8] C. H. Liu and Y. Y. Hsu, "Effect of rotor excitation voltage on steady-state stability and maximum output power of a doubly fed induction generator," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 4, pp. 1096–1109, 2011.
- [9] J. Ben Alaya, A. Khedher and M. F. Mimouni, " DTC, DPC and nonlinear vector control strategies applied to the dfig operated at variable speed," *Journal of Electrical Engineering (JEE)*, vol. 6, no 2, pp. 744-753, 2011.
- [10] D. Diaz Reigosa, F. Briz, C. Blanco and J. M. Guerrero, "Sensorless Control of Doubly Fed Induction Generators Based on Stator High-Frequency Signal Injection," *IEEE Industry Applications Society*, vol. 50, no.5, pp. 3382-3391, 2014.
- [11] F. K. A, Lima, A. Luna, P. Rodriguez, E. H. Watanabe and R. Teodorescu, "Comparison of power control strategies for DFIG wind turbines," *IEEE Trans. Energy Conversion*, pp. 2131-2136, 2008.
- [12] A. G. Abo-Khalil, G. Ahmed, "Synchronization of DFIG output voltage to utility grid in wind power system," *Renewable Energy* 44, pp. 193-198, 2012.
- [13] H. M. Jabr, D. Lu and N. C. Kar, "Design and implementation of neuro-fuzzy vector control for wind driven doubly fed induction generator," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 404–413, 2011.
- [14] L. Xu and P. Cartwright, "Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 21, pp. 750-758, 2006.

زيرنويسها

- ¹ Doubly Fed Induction Generator (DFIG)
- ² Proportional-Integral Controller (PI Controller)
- ³ Space Vector Modulation (SVM)
- ⁴ Model-Reference Adaptive Control (MRAC)
- ⁵ Proportional-Integral-Derivative Controller (PID Controller)
- ⁶ Feedback Gain
- 7 Forward Gain