

## کنترل توان اکتیو و راکتیو یک توربین بادی با ژنراتور دوسو تغذیه (DFIG) توسط روش کنترلی تکسیکلی

عباس کتابی<sup>۱\*</sup>، دانشیار، علی یزدخواستی<sup>۲</sup>، کارشناس ارشد

<sup>۱</sup>پژوهشکده انرژی - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

aketabi@kashanu.ac.ir

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

a-yazdekhashti@grad.kashanu.ac.ir

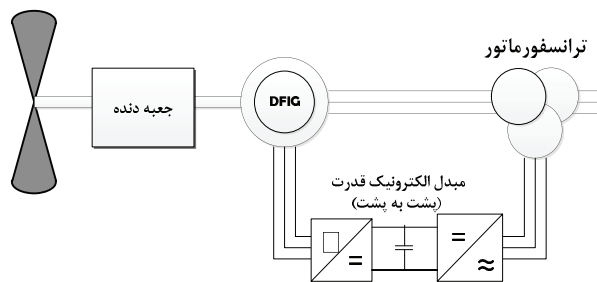
ارسال مقاله: ۹۰/۷/۳ اصلاحیه: ۹۰/۹/۲۲

پذیرش مقاله: ۹۰/۱۱/۱

**چکیده:** مقاله حاضر به بررسی یک سیستم بادی دارای ژنراتور القایی دوسو تغذیه که از طریق یک مبدل پشت به پشت به شبکه متصل شده، پرداخته است. مبدل سمت ژنراتور، سرعت ژنراتور را تنظیم، و مبدل سمت شبکه، توان راکتیو را کنترل می‌کند. یکی از موضوعات مهم، انتخاب کنترل‌کننده برای مبدل‌هاست که در این مقاله، از روش کنترل تکسیکلی برای آن استفاده شده است. هدف کنترل‌کننده تکسیکلی، کنترل توان اکتیو ورودی به ژنراتور و نیز کنترل توان راکتیو شین سمت ترینال ژنراتور تحت حالت‌های مختلف از جمله تغییر بار، اعمال خطا و همچنین وجود بار غیرخطی است. به منظور عملکرد بهتر، پارامترهای کنترل‌کننده توسط الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان (PSO) تعیین شده است. نتایج شبیه‌سازی، توانایی استراتژی کنترلی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** کنترل‌کننده تک سیکلی، مبدل پشت به پشت، ژنراتور القایی دوسو تغذیه، الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان.

نیروگاه بادی به صورتی طراحی می‌شود که مدار استاتور  $DFIG$  به طور مستقیم و مدار روتور آن توسط یک مبدل پشت به پشت<sup>۴</sup> (مبدل سمت ژنراتور و مبدل سمت شبکه) با حلقه‌های لغزان به شبکه متصل گردد. بین دو مبدل، یک خازن که به آن لینک  $dc$  گفته می‌شود، قرار می‌گیرد. این خازن به عنوان ذخیره کننده انرژی و به منظور ثابت نگاه داشتن ولتاژ (کاهش ریپل ولتاژ) به کار می‌رود. در شرایط عملکرد عادی،  $DFIG$  از طریق مبدل سمت شبکه می‌تواند به طور جدا از هم، توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز را در سیستم کنترل کند [۷ و ۸]. این کار توسط روش کنترلی موسوم به کنترل تک‌سیکلی انجام می‌شود [۹ و ۱۰]. در این مقاله، روش پیشنهادی بر روی ژنراتور دوسو تغذیه پیاده‌سازی شده است.



شکل (۱): ژنراتور  $DFIG$  دارای مبدل پشت به پشت

## ۲.۲. مدل توربین بادی

معادلات توربین بادی به قرار زیر است [۱۱]:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho_{air} \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v_w^3 \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V_{wind}} \quad (2)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \beta^{C_5} - C_6 \right) \exp\left(\frac{C_7}{\lambda_i}\right) \quad (3)$$

$$\lambda_i = \left[ \left( \frac{1}{\lambda + C_8 \beta} \right) - \left( \frac{C_9}{\beta^3 + 1} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

$P_m$  توان مکانیکی توربین،  $\rho_{air}$  چگالی هوا،  $V_{wind}$  سرعت باد،  $\omega_m$  سرعت چرخشی توربین،  $\beta$  زاویه تیغه توربین بادی و  $R$  شعاع توربین است. منحنی ضریب توان  $C_p(\lambda, \beta)$ ، برای یک سرعت معین بر حسب  $\lambda$  ارائه می‌شود. همچنین ضرایب ثابت  $C_1$  و  $C_2$  توسط شرکت سازنده توربین داده می‌شود. لازم به ذکر است که مقدار  $C_p^{\max} = 0.59$  یعنی  $C_p(\lambda, \beta)$  نباید از ماکزیمم خود که اصطلاحاً

## ۱. مقدمه

استفاده از انرژی باد به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر دارای توجه اقتصادی، در بسیاری از کشورهای جهان رو به فزونی گذاشته است [۱]. ژنراتور مورد استفاده در توربین بادی می‌تواند ژنراتور سنکرون یا ژنراتور القایی باشد. استفاده از ژنراتورهای القایی به دلیل ارزانی، استحکام، ساختمان مکانیکی ساده و هزینه کم برای نگهداری در حال افزایش است [۲]. در سال‌های اخیر، توربین‌های بادی با ژنراتور القایی دوسو تغذیه<sup>۱</sup> ( $DFIG$ ) بسیار مورد توجه سازندگان قرار گرفته‌اند. متغیر بودن سرعت آن‌ها، این قابلیت را ایجاد می‌کند که توربین بتواند در محدوده وسیع‌تری از وزش باد در راندمان ماکزیمم خود کار کند [۳]. مزیت دیگر  $DFIG$  جذب نوسانات باد با تغییر سرعت چرخش روتور و عدم انتقال آن‌ها به شبکه است. بخش کنترلی یک سیستم بادی وظیفه دارد علاوه بر تأمین شرایط لازم برای شبکه الکتریکی، امکان انتقال حداکثر انرژی باد را با بهترین راندمان فراهم آورد؛ بدین منظور از سوی محققان، روش‌های مختلف کنترلی معرفی شده است. در [۴ و ۵] برای پیاده‌سازی کنترل برداری ژنراتور القایی دوسو تغذیه از کنترل‌کننده‌های  $PI$  استفاده شده است. مشکل جدی کنترل‌کننده  $PI$  وابستگی آن به نقطه کار و حساسیت به تغییر شرایط کار و پارامترهای شبکه است. در [۶] از کنترل‌کننده شبکه عصبی برای این امر استفاده شده، البته پیچیدگی پیاده‌سازی از معایب اصلی آن محسوب می‌شود.

در این مقاله از کنترل‌کننده تک‌سیکلی<sup>۲</sup> برای مبدل‌های سمت ژنراتور و سمت شبکه ژنراتور القایی دوسو تغذیه استفاده شده است. روش پیشنهادی دارای مزایایی از قبیل سادگی در پیاده‌سازی و عدم نیاز به تبدیل محورهای  $dq$  (عدم نیاز به  $DSP$ )<sup>۳</sup> است. در ادامه در بخش ۲ مدل توربین بادی و مدل ژنراتور  $DFIG$  بیان گردیده است. بخش ۳ به تشریح کنترل‌کننده تک‌سیکلی پرداخته است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار  $MATLAB$  و همچنین نتایج مقایسه روش کنترلی پیشنهاد شده با روش کنترلی مرسوم  $PWM$  در بخش ۴ ارائه شده است.

## ۲. مدل سیستم توربین بادی دارای $DFIG$

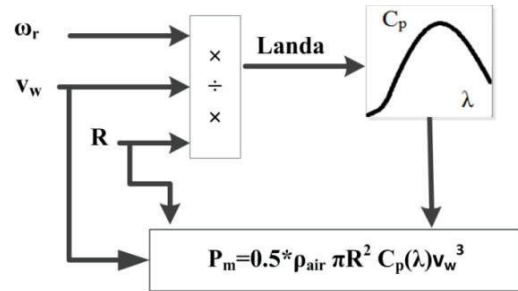
### ۱.۲. ساختار نیروگاه بادی

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، ساختار یک

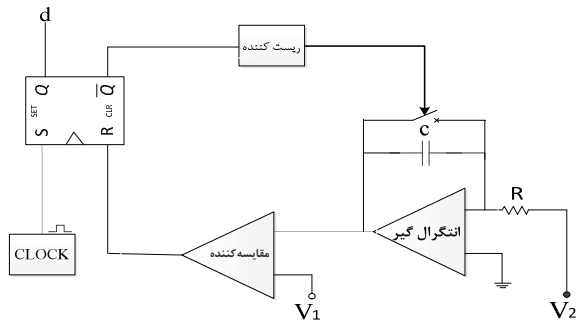
1. Double Fed Induction Generator
2. One Cycle Control
3. Digital Signal Processor

به آن حد بتز<sup>۱</sup> گفته می‌شود، بیشتر شود. از این ضریب، برای عملکرد دائمی توربین استفاده می‌شود [۱۱]. بلوک دیاگرام معادلات فوق در شکل (۲) نشان داده شده است. در این بلوک، زاویه تیغه توربین ثابت در نظر گرفته می‌شود ( $\beta = 0$ ).

به آن حد بتز<sup>۱</sup> گفته می‌شود، بیشتر شود. از این ضریب، برای عملکرد دائمی توربین استفاده می‌شود [۱۱]. بلوک دیاگرام معادلات فوق در شکل (۲) نشان داده شده است. در این بلوک، زاویه تیغه توربین ثابت در نظر گرفته می‌شود ( $\beta = 0$ ).



شکل (۲): مدل دینامیکی توربین بادی

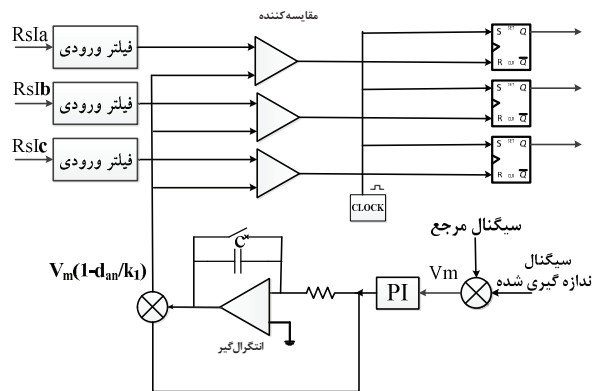


شکل (۳): هسته کنترل کننده تک سیگلی

معادله کلی عملکرد کنترل کننده تک سیگلی عبارت است از [۱۳]:

$$v_1 = -\frac{1}{RC} \int v_2 dt \quad (۹)$$

در محیط شبیه سازی، برای پیاده سازی مدار کنترلی تک سیگلی از یک انتگرال گیر همراه با ریست (مطابق شکل ۳) استفاده می‌شود. همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده [۱۴ و ۱۵]، ابتدا تفاضل بین مقدار اندازه گیری شده (سرعت ژنراتور برای کنترل توان اکتیو ورودی از سمت توربین، و ولتاژ ترمینال ژنراتور برای کنترل توان راکتیو شبکه) و مرجع کنترل، به منظور ایجاد مقدار میانگین از خطا، وارد یک کنترل کننده PI می‌شود. در ادامه با روش کنترلی در هر قسمت مبدل پشت به پشت به صورت جداگانه آشنا می‌شوید.



شکل (۴): مدار کنترلی تک سیگلی در محیط شبیه سازی

### ۱.۳.۱. عملکرد کنترل کننده تک سیگلی در مبدل سمت ژنراتور

مهم ترین وظیفه مبدل سمت ژنراتور، کنترل سرعت روتور DFIG توسط کنترل کننده تک سیگلی است. مطابق شکل (۵)، ابتدا سرعت روتور ژنراتور ( $\omega_r$ ) اندازه گیری و سپس با سرعت مرجع مقایسه می‌شود. طبق معادله (۱۰) سرعت ژنراتور ارتباط مستقیمی با توان اکتیو خروجی از توربین دارد.

### ۳.۲. مدل ژنراتور DFIG

مدل دینامیکی ولتاژ و شار استاتور و روتور با توجه به مدل ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده در قاب مرجع سنکرون توسط معادله های (۵) تا (۸) بیان می‌گردد [۱۲]:

$$v_s = R_s i_s + \frac{d\phi_s}{dt} + j\omega_s \phi_s \quad (۵)$$

$$v_r = R_r i_r + \frac{d\phi_r}{dt} + j\omega_{slip} \phi_r \quad (۶)$$

$$\phi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (۷)$$

$$\phi_r = L_s i_r + L_m i_s \quad (۸)$$

که:

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

$$L_r = L_{lr} + L_m$$

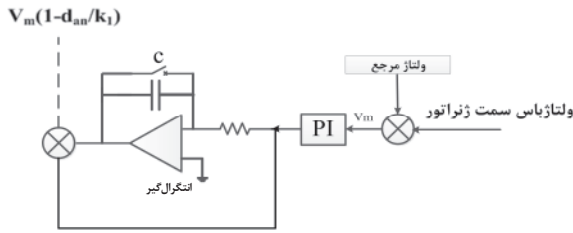
$$\omega_{slip} = \omega_s - \omega_r$$

است.

### ۳. مدل کنترل کننده تک سیگلی

شکل (۳) هسته اصلی یک کنترل کننده تک سیگلی را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل فوق دیده می‌شود، از سیگنال  $v_2$  در ورودی انتگرال گیر، انتگرال گرفته شده و حاصل آن با سیگنال مرجع  $v_1$  مقایسه می‌شود. با برابر شدن دو مقدار، پایه ریست فلیپ فلاپ

تک‌سیکلی، میزان تبادل توان راکتیو به شبکه نیز کنترل می‌شود.

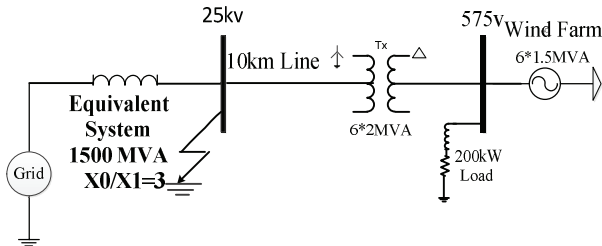


شکل (۶): مدار کنترلی تک‌سیکلی در مبدل سمت شبکه

#### ۴. نتایج شبیه‌سازی

##### ۱.۴. شماتیک تک‌فاز سیستم بادی

شکل (۷) سیستم تک‌فاز یک مزرعه بادی متصل به شبکه قدرت را نشان می‌دهد.



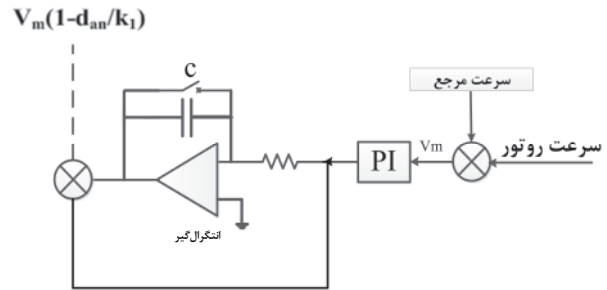
شکل (۷): شماتیک تک‌فاز یک مزرعه بادی

برای انجام شبیه‌سازی مطابق شکل (۷)، یک مزرعه بادی ۹ مگاواتی (متشکل از ۶ توربین ۱/۵ مگاواتی) متصل به شبکه توزیع ۲۵ کیلوولت در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای مربوط به ژنراتور و خط انتقال در بخش ضمیمه آورده شده است. بخشی از توان تولیدی توسط توربین‌های بادی به مصرف بار محلی ۲۰۰KW در باس ۵۷۵ ولت (B575) می‌رسد و باقی‌مانده توان تولیدی نیز از طریق یک فیدر ۲۵KV به طول ۱۰Km به شبکه (باس بی‌نهایت) تزریق می‌شود. برای دستیابی به پاسخ دینامیکی مناسب در کنترل ولتاژ ترمینال، پارامترهای بهینه بخش PI کنترل‌کننده تک‌سیکلی توسط الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان یا اجتماع ذرات (PSO) [۱۵] تعیین می‌شود.

تابع هدف این بهینه‌سازی، زمان بازیابی ولتاژ به حالت اولیه پس از اعمال تغییرات (افزایش بار خطی و غیرخطی و وقوع خطا) انتخاب شده است. ضریب ثابت و بهره انتگرال‌گیر ( $K_i$  و  $K_p$ ) متغیرهای الگوریتم بهینه‌سازی است که با توجه به تابع هدف (مینیمم زمان بازیابی ولتاژ) تعیین می‌گردد. در جداول (۱) و (۲) به ترتیب،

$$P_m = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_p(\lambda) \left(\frac{R}{\lambda}\right) \omega_r^3 \quad (10)$$

در معادله فوق،  $C_p(\lambda)$  ضریب توان و بیانگر نسبت تبدیل انرژی جنبشی به انرژی مکانیکی توسط توربین است.  $\lambda$  نسبت سرعت نوک پره نامیده می‌شود که به زاویه تیغه توربین، برای توربین‌های با قابلیت کنترل پیچ، وابسته است.  $A$  سطح جاروب شده توسط پره است. با کنترل سرعت ژنراتور در مقدار مرجع (با توجه به مشخصه توان خروجی باد به سرعت ژنراتور) می‌توان مورد نیاز شبکه را از توربین بادی دریافت کرد.



شکل (۵): مدار کنترلی تک‌سیکلی در مبدل سمت ژنراتور

خروجی PI وارد یک انتگرال‌گیر با ریسست می‌شود و رابطه  $v_m \left(1 - \frac{d_{an}}{K_1}\right)$  را که دارای شکل موج مثلثی است، تشکیل می‌دهد. از طرف دیگر، از جریان خط نمونه‌برداری ( $R_s I_{ph}$ ) می‌شود و مطابق شکل و با خروجی انتگرال‌گیر دارای ریسست مقایسه می‌گردد. برابر شدن دو رابطه با یکدیگر (زمانی که مقدار اندازه‌گیری شده به مقدار مرجع برسد) سبب ریسست شدن فلیپ فلاپ و در نهایت انتگرال‌گیر می‌شود و خروجی فلیپ فلاپ تغییر حالت می‌دهد:

$$\begin{cases} R_s I_a = V_m \left(1 - \frac{d_{an}}{K_1}\right) \\ R_s I_b = V_m \left(1 - \frac{d_{bn}}{K_1}\right) \\ R_s I_c = V_m \left(1 - \frac{d_{cn}}{K_1}\right) \end{cases} \quad (11)$$

در رابطه فوق، برای همگرایی بهتر  $K_1 = 0.5$  قرار داده می‌شود.

##### ۲.۳. عملکرد کنترل‌کننده تک‌سیکلی در مبدل سمت شبکه

مهم‌ترین وظیفه مبدل سمت ژنراتور، کنترل توان راکتیو مورد نیاز شبکه است. این کار توسط کنترل ولتاژ ترمینال ژنراتور، و با فرمان دادن به مبدل سمت شبکه انجام می‌شود. مطابق شکل (۶) از ولتاژ سمت ژنراتور نمونه‌برداری، و با کنترل آن توسط یک کنترل‌کننده

پارامترهای به کار گرفته شده در الگوریتم *PSO* و پارامترهای بهینه به دست آمده کنترل کننده *PI* ارائه شده است.

جدول (۱): پارامترهای الگوریتم *PSO*

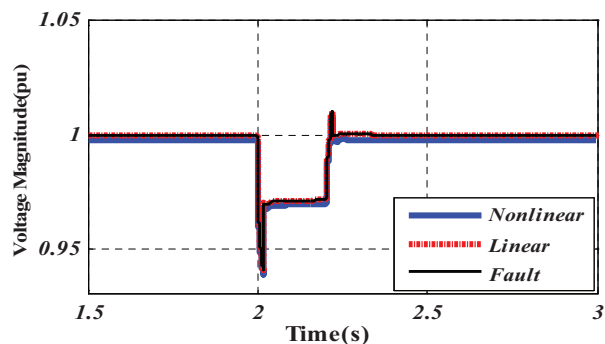
پارامتر	مقدار
تعداد تکرار	۶۰
تعداد جمعیت	۶۰
$C_1$	۱/۵
$C_2$	۱/۵
$\omega_{start}$	۰/۴
$\omega_{end}$	۰/۹

جدول (۲): پارامترهای بهینه کنترل کننده *PI* در شرایط مختلف شبکه

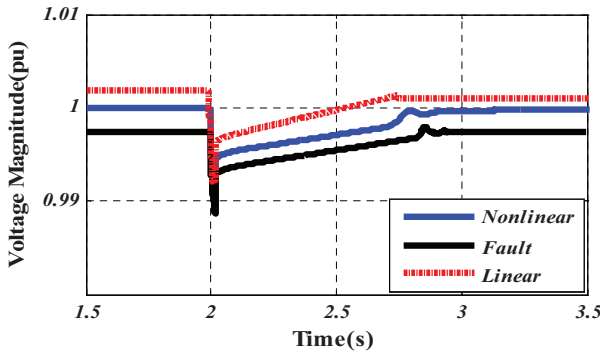
شرایط شبکه	$K_p$	$K_i$
افزایش بار خطی	۰/۱	۰/۰۰۰۱
افزایش بار غیرخطی	۰/۳	۰/۰۰۲
وقوع خطا	۰/۰۵	۰/۳

در جدول (۱)  $C_1$  و  $C_2$  ضرایب یادگیری و  $\omega$  ضریب وزن ذره در پیاده سازی الگوریتم *PSO* است.

از بین پارامترهای بهینه الگوریتم *PSO* برای تمام شرایط شبکه (خطا، بار خطی و بار غیرخطی) یکسری از پارامترهای  $K_p$  و  $K_i$  را از جدول (۲) باید انتخاب کرد. با توجه به تکرار بیشتر شرایط افزایش بار خطی، پارامترهای کنترل کننده بر اساس آن انتخاب می شوند. شکل (۸) عملکرد کنترل کننده با انتخاب پارامترهای مربوط به حالت افزایش بار خطی ( $K_p = 0.1$  و  $K_i = 0.0001$ ) را که به صورت خط چین نشان داده شده، نسبت به عملکرد با پارامترهای بهینه در دو حالت دیگر (بار غیرخطی و خطا) مقایسه کرده است.



(الف)



(ب)

شکل (۸): مقایسه ولتاژ باس ژنراتور با  $K_p$  و  $K_i$  سه حالت مختلف در شرایط (الف) اعمال خطا، (ب) افزایش بار غیرخطی

بنابراین می توان از پارامترهای  $K_p$  و  $K_i$  در افزایش بار خطی برای شرایط دیگر شامل خطا و افزایش بار غیرخطی استفاده کرد.

### ۲.۴. الگوی سرعت باد و توان دریافتی از باد

سرعت باد وارد شده به توربین بادی، طبق مدل ارائه شده در [۱۶] مطابق رابطه (۱۲) در نظر گرفته شده است:

$$v_w = v_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (12)$$

که  $\omega_1 = \pi$ ،  $v_0 = 11$ ،  $\varphi_1 = 0$  و  $A_1 = 0.06$  (سرعت میانگین باد) انتخاب شده است. همان طور که در رابطه (۱۲) مشخص شده، سرعت باد، نوسانات کوچکی در محدوده سرعت پایه ۱۱ m/s به صورت کسینوسی دارد. طبق رابطه (۱۳) مکعب سرعت باد ارتباط مستقیمی با توان به دست آمده از توربین بادی دارد، بنابراین می توان بهینه دریافتی از باد را به صورت زیر نیز بیان کرد:

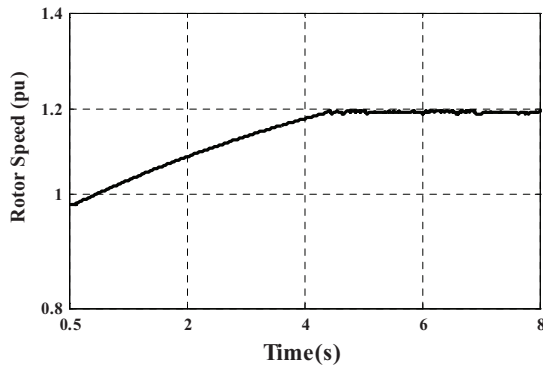
$$P_{m-opt} = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_p^{max} \pi R^2 \frac{\omega_{r-opt}^3}{\lambda_{opt}} \quad (13)$$

در رابطه فوق،  $C_p^{max}$  ضریب توان ماکزیمم و  $\lambda_{opt}$  نسبت بهینه سرعت نوک پره به سرعت باد است.

با توجه به این رابطه و با در نظر گرفتن زاویه تیغه توربین بادی ثابت ( $\beta = 0$ ) و به علت ثابت بودن  $\lambda_{opt} = 8$  و  $R = 1^m$ ، مقدار  $C_p^{max} = 0.48$  به دست می آید.

### ۳.۴. کنترل توان اکتیو خروجی از توربین

توان اکتیو خروجی از توربین بادی و ورودی به ژنراتور با توجه به رابطه (۱۳) تنها به تغییرات سرعت بهینه ژنراتور ( $\omega_{r-opt}^3$ ) وابسته است، بنابراین دستیابی به نقطه حداکثر توان در سیستم های بادی، با کنترل سرعت چرخش روتور توربین به صورت لحظه به لحظه

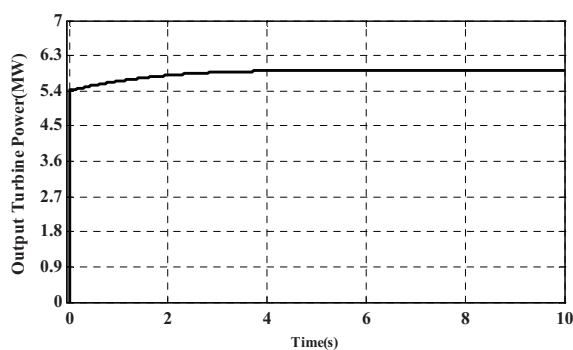


شکل (۱۰): سرعت روتور کنترل شده با روش تکسیکلی

همان‌طور که در شکل فوق مشخص شده است، سرعت ژنراتور به سرعت پس از گذشت  $0/6$  ثانیه به مقدار ۱ پریونیت می‌رسد (از زیر مقدار نامی به مقدار نامی). پس از مدتی در حدود  $4/5$  ثانیه در مقدار مورد نظر یعنی  $1/2$  پریونیت (از مقدار نامی به بالاتر از مقدار نامی) قرار می‌گیرد و در همان محدوده با نوسانی اندک که ناشی از تغییرات سرعت باد ورودی به توربین است، ثابت می‌شود.

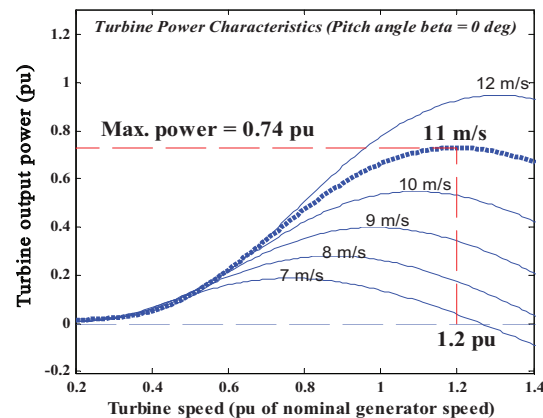
#### ۲.۳.۴. افزایش بار خطی

با توجه به مشخصه توان خروجی به سرعت ژنراتور (مطابق شکل ۹) و با کنترل سرعت ژنراتور در مقدار  $1/2$  پریونیت، مقدار توان خروجی توربین طبق انتظار برابر  $5/95$  مگاوات می‌شود که در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در شکل (۱۲) عملکرد کنترل‌کننده تحت افزایش بار خطی نشان داده شده است. در این بخش، کنترل‌کننده تکسیکلی، ولتاژ باس  $575V$  (نشان داده شده در شکل ۷) را که بار محلی شبکه نیز بدان متصل شده، کنترل می‌کند. در زمان ۳ ثانیه، یک بار خطی ( $RL$ ) به طور موازی با بار اولیه ( $200KW$ ) اضافه می‌شود و باعث افت ولتاژ در باس سمت ژنراتور می‌گردد. به طور کلی پایداری ولتاژ، توسط کنترل توان راکتیو در شبکه انجام می‌شود.



شکل (۱۱): توان اکتیو خروجی از توربین بادی

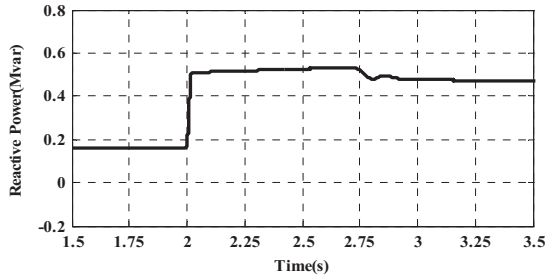
امکان‌پذیر است. یکی از کارآمدترین روش‌های ردیابی نقطه‌ای حداکثر توان که بر اساس منحنی حداکثر توان توربین بادی و پروفیل سرعت باد کار می‌کند، روش ( $MPPT$ ) است [۱۷ و ۱۸]. این روش به ژنراتور اجازه می‌دهد که سرعت ژنراتور را در مقداری قرار دهد که بتواند تحت سرعت‌های مختلف باد، بیشترین توان را از آن دریافت کند. با ثابت فرض کردن تقریبی سرعت باد می‌توان سرعت ژنراتور را توسط کنترل‌کننده تک سیکلی در مقدار مورد نظر ثابت نگاه داشت. در نتیجه توان خروجی برای سرعت تقریبی باد ۱۱ متر بر ثانیه و در سرعت ژنراتور  $\omega_r = 1.2$  پریونیت (مطابق شکل ۹) در حدود  $5/95$  مگاوات به دست می‌آید. با توجه به مقدار نامی توان خروجی توربین بادی ( $P_{rate} = 8MW$ )، مقدار آن  $0/74$  پریونیت است.



شکل (۹): مشخصه توان خروجی باد به سرعت ژنراتور

#### ۱.۳.۴. کنترل سرعت ژنراتور توسط روش تکسیکلی

همان‌طور که در بخش ۳.۴ اشاره شد، سرعت روتور ژنراتور از عوامل مؤثر در توان خروجی توربین بادی است که به صورت مستقیم در آن اثر می‌گذارد، بنابراین کنترل و تثبیت آن در مقدار معین، همواره از اهداف مهم در سیستم بادی به شمار می‌آید. این کار توسط مبدل سمت ژنراتور انجام می‌شود و با کنترل آن توسط روش تکسیکلی می‌توان سرعت را در مقدار مورد نیاز که در این شبیه‌سازی در حدود  $1/2$  پریونیت است، ثابت نگاه داشت. در شکل (۱۰) حالت ماندگار سرعت روتور کنترل شده با روش تکسیکلی نشان داده شده است.

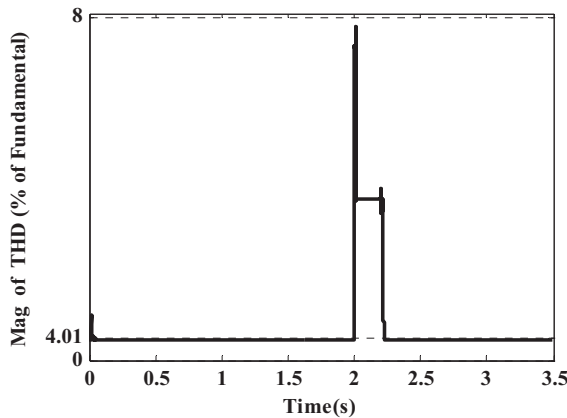


(ب)

شکل (۱۳): عملکرد کنترل کننده هنگام افزایش بار غیرخطی (الف) دامنه ولتاژ شین ژنراتور، (ب) توان راکتیو شبکه

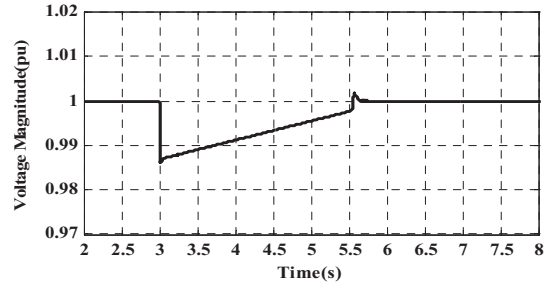
بارهای غیرخطی باعث ایجاد جریان‌های هارمونیکی در کنار جریان اصلی می‌شوند. پس از اضافه شدن یک بار غیر خطی (پل سه فاز دیودی موازی با بار مقاومتی) به باس بار ۵۷۵۷V در زمان ۲ ثانیه ولتاژ از مقدار مورد نظر (۱ pu) به اندازه ۱٪ افت می‌کند. البته این افت ولتاژ همراه با تزریق جریان هارمونیکی به شبکه است. کنترل کننده تک سیگلی نیز پس از مدتی (حدود ۱/۱۵ ثانیه) ولتاژ را به مقدار اولیه باز می‌گرداند. این عمل نشان‌دهنده آن است که هارمونیک نمی‌تواند در عملکرد کنترل کننده پیشنهادی تأثیر بگذارد.

در شکل (۱۴) تغییرات ضریب اعوجاج هارمونیکی ( $THD$ ) ولتاژ باس متصل به بار غیر خطی نشان داده شده است.

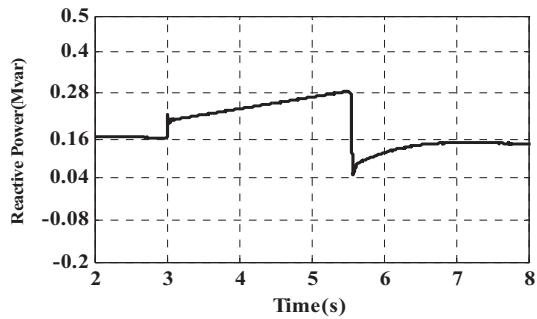


شکل (۱۴): ضریب اعوجاج هارمونیکی ولتاژ تحت بار غیرخطی

همان‌طور که در شکل (۱۴) مشخص است، درصد  $THD$  قبل از اضافه شدن بار غیرخطی در حدود ۰/۱٪ (به دلیل فرآیند غیرخطی بودن سوئیچ زنی میدل و نوسان اندک باد) است. پس از اضافه شدن بار تا حدود ۸٪ افزایش می‌یابد و سرانجام کنترل کننده تک سیگلی،  $THD$  را به مقدار ۰/۸٪ باز می‌گرداند، بنابراین کنترل کننده مذکور توانسته مانند یک فیلتر اکتیو، هارمونیک ایجاد شده توسط بار غیرخطی را حذف کند.



(الف)



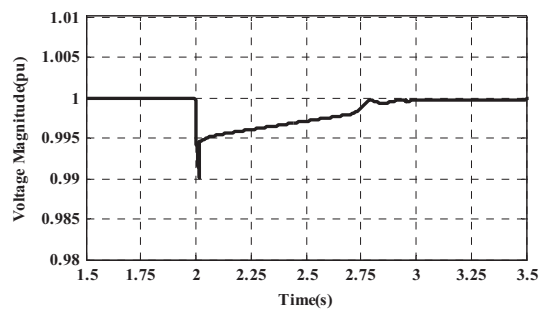
(ب)

شکل (۱۲): عملکرد کنترل کننده در حین افزایش بار (الف) دامنه ولتاژ شین ژنراتور، (ب) توان راکتیو شبکه

همان‌طور که در شکل (۱۲-ب) دیده می‌شود، مثبت بودن توان راکتیو نشان‌دهنده تزریق توان به شبکه و منفی بودن آن، بیانگر جذب توان راکتیو از شبکه است. همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، کنترل کننده تک سیگلی به خوبی توانسته افت ولتاژ ناشی از افزایش بار را با کنترل و تزریق توان راکتیو به شبکه جبران کند.

### ۳.۳.۴. افزایش بار غیرخطی

در شکل (۱۳) عملکرد کنترل کننده تحت افزایش بار غیرخطی نشان داده شده است.



(الف)

با به کارگیری کنترل کننده تک سیکلی، دیگر نیازی به تبدیل محورهای  $dq$  که می‌تواند پیاده‌سازی آن را ساده‌تر کند، نیست.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش کنترل کننده تک‌سیکلی برای کنترل مبدل‌های یک نیروگاه بادی دارای ژنراتور القایی دوسو تغذیه استفاده شده است. هدف، کنترل توان ورودی به ژنراتور با کنترل سرعت ژنراتور توسط مبدل سمت ژنراتور برای به دست آوردن حداکثر توان از نیروی باد و کنترل توان راکتیو شبکه با کنترل ولتاژ ترمینال ژنراتور در شرایط اضافه بار، خطا و تغذیه بارهای غیرخطی توسط مبدل سمت شبکه است. به منظور تعیین بهینه پارامترهای کنترل کننده  $PI$  موجود در روش کنترلی تک‌سیکلی، از الگوریتم بهینه‌سازی  $PSO$  استفاده شده است. با بررسی نتایج شبیه‌سازی، توانایی این روش کنترلی برای کنترل توان اکتیو و راکتیو شبکه و همچنین حذف هارمونیک ناشی از حضور بارهای غیرخطی نشان داده شد. همچنین با مقایسه روش تک سیکلی با روش  $PWM$  برای تنظیم ولتاژ ترمینال ژنراتور در زمان وقوع خطای اتصال کوتاه در شبکه، کارایی روش پیشنهادی نشان داده شد.

## ضمیمه

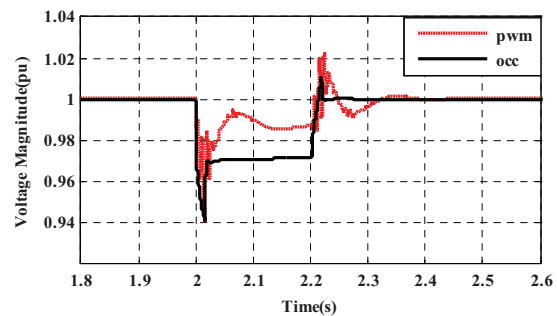
پارامترهای ماشین القایی ( $DFIG$ ) و خط انتقال برای انجام شبیه‌سازی، به شرح زیر است:

توضیحات	واحد	مقدار	کمیت
rms	V	۵۷۵	ولتاژ نامی
MVA		۱۰	توان نامی
Hz		۶۰	فرکانس شبکه
پس فاز	-	۰/۹۳	ضریب توان
rpm		۱۲۰۰	سرعت نامی
-		۶	تعداد قطب
(pu)	Ohm	۰/۰۰۷۱	$R_s$
(pu)	H	۰/۱۷۱۰	$L_{ls}$
(pu)	Ohm	۰/۰۰۵	$R_r$
(pu)	H	۰/۱۵۶	$L_{lr}$
(pu)	H	۲/۹	$L_m$
$J(Inertia)$	$Kg.m^2$	۵/۰۴	
	Km	۳۰	طول خط انتقال

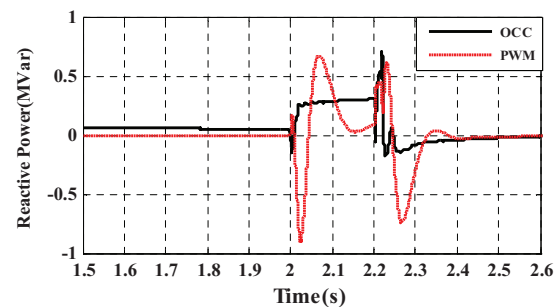
## ۴.۳.۴. وقوع خطا

در شکل (۱۵) عملکرد کنترل کننده تحت خطای سه فاز نشان داده شده است. یک خطای سه فاز اتصال کوتاه در ابتدای خط انتقال ۲۵ کیلوولت وارد می‌شود. ابتدا در زمان ۲ ثانیه خطایی به مدت ۰/۲ ثانیه (حدود ۱۲ سیکل) به شبکه اعمال و پس از آن در زمان ۲/۲ ثانیه از شبکه برداشته می‌شود. هنگام اعمال خطای سه فاز به شبکه، یک افت ناگهانی در ولتاژ سمت ژنراتور ایجاد می‌شود. در این زمان، کنترل کننده پیشنهادی برای بازگردانی ولتاژ به مقدار اولیه خود وارد عمل می‌شود. اگر مدت زمان افت ولتاژ در باس سمت ژنراتور طولانی شود، باعث آسیب رساندن و جدا شدن توربین بادی از شبکه و اصطلاحاً فروپاشی شبکه خواهد شد. برای درک بهتر قابلیت‌های کنترل کننده پیشنهادی، مقایسه‌ای بین عملکرد کنترل کننده تک‌سیکلی با کنترل کننده  $PWM$  در شکل (۱۵) انجام شده که مبین ویژگی‌های بارز کنترل کننده تک‌سیکلی نسبت به کنترل کننده  $PWM$  است.

با مشاهده شکل (۱۵) این نتیجه استنباط می‌شود که دامنه ولتاژ ترمینال ژنراتور و توان راکتیو مبادله شده به شبکه با کنترل تک‌سیکلی، دارای نوسان کمتر است. به عبارت دیگر، پایداری در هنگام بروز خطا و سرعت بازیابی ولتاژ ( $DVR$ ) پس از برطرف شدن خطا در روش تک‌سیکلی بهتر از روش  $PWM$  است. همچنین نوسانات ایجاد شده، در مقدار اولیه و مطلوب، سریع‌تر میرا می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل (۱۵): عملکرد کنترل کننده هنگام خطای سه فاز (الف) دامنه ولتاژ شین ژنراتور، (ب) توان راکتیو شبکه



## مراجع

- [1] Harini. C, Kumari. NK, Raju. GS, "Analysis of wind turbine driven doubly fed induction generator", in International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), pp.246-251, 2011.
- [2] Chen. WL, Hsu, "Controller Design for an Induction Generator Driven by a Variable-Speed Wind Turbine", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21. No. 3, pp.625-635, 2006.
- [3] Gautam. D, Vittal. V, Harbour. T, "Impact of Increased Penetration of DFIG-Based Wind Turbine Generators on Transient and Small Signal Stability of Power Systems", IEEE Transactions on Energy Society, Vol. 24. No. 3, pp.1426-1434, 2009.
- [4] G. Tapia, A. Tapia, and J.X. Ostolaza, "Modeling and control of wind turbine driven by doubly fed induction generator", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.18, No.2, pp.194-204, Nov. 2004.
- [5] G. Tapia, A. Tapia, and J.X. Ostolaza, "Two alternative modeling approaches for the evaluation of wind farm active and reactive power performance", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.21, No. 4, pp. 909-920, Dec. 2006.
- [6] Orlando. s, Henrique. G, Antonio. M, Adriano. C, "Nonlinear control of the doubly-fed induction generator in wind power systems", Renewable Energy vol.35, pp.1662-1670,2010.
- [7] Yanhua. L, Zhang. Xu, Zhao, Dongmei. M, "Research on the Wind Farm Reactive Power Compensation Capacity and Control Target", in Asia Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp.1-5, 2011.
- [8] سعید لسانی، هادی طاری مرادی، «کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو در ژنراتورهای القایی با تغذیه دوبل متصل به شبکه» هفدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ۱۳۸۱.
- [9] Lock. A.S, da Silva. E, Elbuluk. M.E, Jacobina. C.B, "A clamping current control technique, based on one cycle control OCC", in IEEE Power Electronics Specialists Conference, Record, pp.319 – 325, 2009.
- [10] Femia. N, Fortunato. M, "Dynamic model of one-cycle control for converters operating in continuous and discontinuous conduction modes", in International Journal of Circuit Theory and Applications, Vol. 37.No.5, pp.661-686, 2009.
- [11] Ackermann. T, "Wind Power in Power Systems", John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [12] Boldea. Ion, "Variable Speed Generators", CRC Publishing, 2005
- [13] Smedley. K, "One-Cycle Controller for renewable energy conversion systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, Orlando, FL, pp.13-16, Nov. 10-13, 2008.
- [14] Chen. Y, Smedley. K.M, "One-Cycle-Controlled Three-Phase Grid-Connected Inverters and Their Parallel Operation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44.No. 2, pp.663-671, 2008.
- [15] علی یزدخواستی، «کنترل توان اکتیو و راکتیو یک توربین بادی با ژنراتور دوسو تغذیه (DFIG) با استفاده از روش کنترل تک‌سیکلی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، ۱۳۸۹.
- [16] Nichita. C, "Large Band Simulation of the Wind Speed for Real-Time Wind Turbine Simulators", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17. No. 4, pp.523-529, 2002.
- [17] Padron. J.F.M, Lorenzo. A.E.F, "Calculating Steady-State Operating Conditions for Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbines", IEEE Transactions on Energy Society, Vol. 25. No. 2, pp.922-928, 2010.
- [18] Koutroulis. E, Kalaitzakis. K., "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications", IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol.53, No.2, pp.486-494, 2006.