

## بررسی تأثیر کنترل توان راکتیو در میزان انتشار فلیکر و هارمونیک توربین بادی مجهز به ژنراتور القائی دو سو تغذیه

امیر نقی زاده گوگردره<sup>(۱)</sup> - عارف درودی<sup>(۲)</sup> - محمد پورمنفرد عظیمی<sup>(۳)</sup>

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده فنی و مهندسی، گروه قدرت، دانشگاه شاهد

(۲) استادیار - دانشکده فنی و مهندسی، گروه قدرت، دانشگاه شاهد

(۳) کارشناس ارشد - دانشکده فنی و مهندسی، گروه قدرت، دانشگاه شاهد

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۹۱ تاریخ پذیرش: زمستان ۱۳۹۱

**خلاصه:** یکی از مباحثی که در مورد نیروگاههای بادی باید مدنظر قرار گیرد، مساله نوسان ولتاژ یا فلیکر است که با توجه به ماهیت متغیر سرعت باد و در نتیجه اعوجاجهای احتمالی در توان و ولتاژ توربینها نیازمند بررسی است. علاوه بر این، به دلیل استفاده از میدلهای الکترونیک قدرت، نیروگاههای بادی می‌توانند یکی از منابع تولید هارمونیک در سیستم قدرت نیز باشند. انتشار فلیکر و اعوجاجات هارمونیک از این توربینها متأثر از سرعت و نوسانات باد، نوع ژنراتور و شرایط شبکه (برای مثال ظرفیت اتصال کوتاه و امپدانس شبکه) است. این مقاله ابتدا به مدل‌سازی فلیکر متر، مطابق با استاندارد IEC و الگوریتم مربوط به آن پرداخته و در ادامه یک توربین بادی سرعت متغیر در سطح مگاوات با یک ژنراتور القائی دو سو تغذیه را در نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی نموده است. میزان انتشار فلیکر و تولید اعوجاج هارمونیک در طول عملکرد پیوسته با استفاده از روشهای کنترل توان راکتیو خروجی توربین بادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که کنترل توان راکتیو خروجی توربین بادی، تأثیر بسزائی در کاهش نوسانات ولتاژ ناشی از سرعت و شدت نوسانات باد و شرایط شبکه ایفا می‌کند اما به دلیل مسائل هارمونیک لازم است تا بین کاهش انتشار فلیکر و افزایش هارمونیک در شبکه مصالحه‌ای صورت پذیرد تا به نحو مطلوبی کیفیت توان در این نیروگاهها بهبود یابد.

**کلمات کلیدی:** توربین بادی، ژنراتور القائی دو سو تغذیه، فلیکر، کنترل توان راکتیو، کیفیت توان، هارمونیک

### ۱- مقدمه

بادی متصل شده به شبکه در طول عملکرد پیوسته را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از آن جمله می‌توان به مشخصات باد (میانگین سرعت و شدت نوسانات باد) و شرایط شبکه (ظرفیت اتصال کوتاه، زاویه امپدانس بار و نوع بار) اشاره نمود [۳]. همچنین نوع توربین مورد استفاده نیز بر انتشار فلیکر تأثیر گذار است.

توربینهای بادی سرعت متغیر عملکرد بهتری از نظر انتشار فلیکر نسبت به توربینهای بادی سرعت ثابت نشان داده‌اند [۴]. اگرچه توربینهای بادی سرعت متغیر سطوح فلیکر پائین‌تری تولید می‌کنند، اما با توجه به افزایش نفوذ این توربینها در شبکه قدرت، بررسی آنها باید مورد توجه ویژه قرار گیرد [۵].

از سوی دیگر توربینهای بادی سرعت متغیر به دلیل استفاده از ادوات الکترونیک قدرت می‌توانند یکی از منابع تولید هارمونیک در سیستم قدرت باشند. بنابراین برای توربینهای بادی سرعت متغیر که به مبدل

به دلیل کمبود انرژی و آلودگی‌های محیطی، امروزه در جهان انرژی‌های تجدیدپذیر، بخصوص باد، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند. از آنجا که نفوذ توان الکتریکی ناشی از باد در شبکه‌های قدرت به صورت فزاینده‌ای رو به افزایش است، تأثیر توربینهای بادی روی کیفیت توان الکتریکی شبکه، موضوعی مهم به شمار می‌آید. یکی از مباحث مهم کیفیت توان الکتریکی، نوسانات ولتاژ (فلیکر) است. فلیکر نتیجه نامطلوب نوسانات ولتاژ در شبکه قدرت بوده و در واقع یک احساس شخصی از کم یا زیاد شدن میزان روشنائی است که به صورت سوسو زدن نور لامپهای رشته‌ای ظاهر می‌گردد [۱]. در نیروگاه بادی مقدار فلیکر به عنوان یک مشکل جدی در نظر گرفته شده چرا که ممکن است حداکثر مقدار تولید توان الکتریکی ناشی از باد را محدود کند [۲]. عوامل متعددی وجود دارند که انتشار فلیکر توسط توربینهای

## ۲- مدل سازی فلیکرمتر

سطح فلیکر با مقدار فلیکر کوتاه مدت (Pst) تعیین می‌شود. در محاسبه شدت فلیکر، پاسخ انتشار نور از لامپهای رشته‌ای به تغییرات ولتاژ و همچنین پاسخ چشم و مغز انسان در برابر تغییرات ادراکی در شدت روشنایی در نظر گرفته می‌شود. روش طراحی فلیکرمتر در استاندارد IEC شماره ۱۵-۴-۶۱۰۰۰-۴ آمده است [۱۰]. ساختار فلیکرمتر به شکل (۱) آمده است. این ساختار به دو قسمت مجزا تقسیم می‌گردد که هر یک وظایف مشخصی دارند. قسمت اول مربوط به شبیه‌سازی پاسخ زنجیره لامپ - چشم - مغز بوده (بلوکهای ۲ تا ۴) و قسمت دوم به بررسی آماری بلادرنگ سیگنال فلیکر و نمایش نتایج می‌پردازد (بلوک ۵). گرچه وجود بلوک آخر اجباری نیست و می‌توان با ضبط اطلاعات و سپس به کارگیری تجهیزات دیگر این بررسی‌ها را انجام داد، لیکن سرعت کار و نتیجه بلادرنگی که می‌توان به کمک این بلوک به دست آورد بسیار مفید خواهد بود. در این مطالعه، فلیکرمتر و الگوریتم مربوط به آن، مطابق با استاندارد IEC در نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی شده است.

## ۳- مدل سازی توربین بادی DFIG

مدل‌سازی توربین بادی DFIG شامل مدل‌سازی آیرودینامیکی توربین بادی، ماشین القایی روتور سیم‌پیچی شده، مبدلهای PWM پشت به پشت سمت روتور و شبکه، همراه با یک خازن dc بین این دو است. شکل (۲) مؤلفه‌های اصلی یک توربین بادی متصل‌شده به شبکه قدرت را نشان می‌دهد.

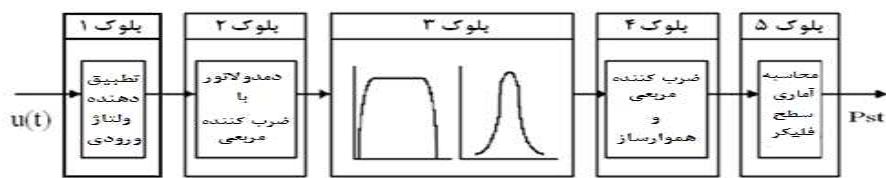
شبیه‌سازی باد بخصوص برای تحلیل عملکرد دینامیکی بین مزارع بادی و شبکه قدرت، نقش بسزایی در مدل‌سازی توربین بادی دارد. مدل باد روتور شامل تأثیر نمونه‌برداری چرخشی و یکپارچگی در طول پره‌های توربین است. مدل باد روتور، سرعت باد معادل برای هر توربین بادی را فراهم می‌کند که به عنوان ورودی مدل آیرودینامیکی ساده توربین بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه بین سرعت باد و گشتاور آیرودینامیکی را می‌توان توسط معادله زیر بیان نمود:

$$T_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v_{eq}^2 \frac{C_p(\theta, \lambda)}{\lambda} \quad (1)$$

توان تجهیز شده‌اند، انتشار جریان‌های هارمونیک در طی عملکرد پیوسته باید مشخص شود. میزان انتشار این هارمونیکهای منحصر به فرد برای فرکانسهایی تا ۵۰ برابر فرکانس اصلی شبکه قدرت، توسط پارامتر اعوجاج هارمونیک کل (THD) تعیین می‌شود.

روشهای مختلفی جهت کاهش نوسانات ولتاژ خروجی نیروگاه‌های بادی پیشنهاد شده است [۶-۸]. یکی از روشهای مناسب برای کاهش فلیکر نیروگاههای بادی که از ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) بهره می‌گیرند، کنترل توان راکتیو در خروجی ژنراتور است. در مرجع [۹] نشان داده شده است که نوسان ولتاژ (فلیکر) می‌تواند از طریق تنظیم مناسب توان راکتیو خروجی ژنراتور محدود شود و این کار توسط مبدلهای سمت شبکه و سمت روتور انجام می‌گیرد. نکته‌ای که در این بحث مورد توجه نبوده آن است که این مبدلهای دارای ظرفیت محدودی هستند و نمی‌توان در شرایط کاری مختلف تنها از یک مبدل جهت تزریق توان راکتیو بهره گرفت. راه حل مسئله، استفاده از هر دو مبدل در کنترل توان راکتیو است. از طرف دیگر تزریق توان راکتیو به منظور کاهش فلیکر، میزان هارمونیکهای تولیدی توربین بادی را نیز به طور مشخص تحت تأثیر قرار خواهد داد و این نکته دومی است که تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله به طور جامع به این موضوع پرداخته می‌شود و تأثیر تزریق توان راکتیو از هر دو مبدل سمت روتور و سمت شبکه بر میزان کاهش فلیکر و تولید هارمونیک مورد بررسی قرار خواهد گرفت و نشان داده خواهد شد که مبدل سمت روتور گزینه مناسبتری جهت تزریق توان راکتیو به منظور کاهش فلیکر تولیدی نیروگاه بادی است و عملاً باید بین کاهش فلیکر و افزایش هارمونیک توربینهای بادی مصالحه‌ای صورت پذیرد.

در این مقاله شبیه‌سازی مدل توربین بادی سرعت متغیر در سطح مگاوات مجهز به (DFIG) توسط نرم‌افزار Matlab/Simulink انجام شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی تأثیر کنترل توان راکتیو خروجی توربین بادی بر روی نوسانات ولتاژ و اعوجاجات هارمونیک ناشی از سرعت و شدت باد و شرایط شبکه را ارزیابی می‌کند. در بخش دوم این مقاله، مدل فلیکرمتر شبیه‌سازی شده مطابق استاندارد IEC و الگوریتم مربوط به آن توضیح داده می‌شود. در بخش سوم مدل توربین بادی DFIG و شماتیک کنترل‌های توان راکتیو خروجی آن معرفی می‌گردد و در نهایت در بخش چهارم شبیه‌سازی‌ها انجام گرفته و میزان انتشار فلیکر و اعوجاج هارمونیک تولیدی در طول عملکرد پیوسته توربین بادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل (۱): بلوک دیگرام مدل فلیکرمتر

Fig. (1): Flickermeter model block diagram

راندمان آیرودینامیکی،  $C_p$ ، در بیشترین مقدار بوده و تبدیل انرژی در حالت بیشینه خواهد بود.

به طور کلی توربینهای بادی سرعت متغیر دو هدف کنترلی متفاوت را دنبال می‌کنند که به سرعت باد منوط می‌گردد. در سرعتهای باد پائین تا متوسط، هدف کنترل، ثابت نگه داشتن نرخ سرعت نوک پره بهینه برای استحصال بیشترین راندمان آیرودینامیکی است. در سرعتهای باد بالاتر، هدف سیستم کنترل، ثابت نگه داشتن توان خروجی نامی به منظور جلوگیری از اضافه بار سیستم است. هر دو رویه کنترلی فوق در مدل توربین بادی با نامهای کنترل سرعت و کنترل گام انجام می‌گیرد. کنترل سرعت می‌تواند توسط تنظیم توان یا گشتاور ژنراتور اعمال گردد. کنترل گام نیز یک روش کنترل معمولی برای تنظیم توان آیرودینامیکی از ناحیه توربین می‌باشد.

#### ۴- سیستم کنترلی و فلیکر ولتاژ

همان طور که قبلاً هم اشاره شد، نیروگاههای بادی یکی از منابع تولید فلیکر به شمار می‌آیند. جهت کاهش و محدود کردن این پدیده می‌توان از مبدلهای فرکانسی سمت روتور و شبکه استفاده کرد. از مزایای مهم توربین بادی DFIG امکان کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو در این توربین است که توسط کنترلرهای سمت روتور و شبکه صورت می‌گیرد. مبدل سمت روتور اجازه می‌دهد که سرعت یا گشتاور و نیز ضریب قدرت در ترمینالهای استاتور کنترل شوند. در واقع این مبدل با کنترل مؤلفه‌های جریان روتور، توان اکتیو و راکتیو را کنترل می‌نماید [۸]. مبدل سمت شبکه در حالت طبیعی فقط به کنترل ولتاژ خازن میانی اختصاص داده می‌شود. این مبدل همچنین می‌تواند جهت پشتیبانی از توان راکتیو شبکه در طول خطا و در ارتقاء کیفیت توان شبکه استفاده شود. مدل کنترلی این کنترلرها در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. پارامترهای موجود در بلوکهای کنترلی هر دو مبدل با استفاده از روش سعی و خطا و با هدف کاهش مقدار جهش و زمان قرار به دست آمده‌اند. هدف کنترلرهای سمت شبکه و روتور، کنترل توان راکتیو خروجی برای رساندن اختلاف زاویه  $(\psi_k - \psi)$  به ۹۰ درجه است که در ادامه مقاله توضیح داده می‌شود.

که در آن  $T_w$  گشتاور آیرودینامیکی خروجی  $\rho$  چگالی هوا  $R$  شعاع روتور توربین بادی  $v_{eq}$ ، [m] سرعت باد معادل

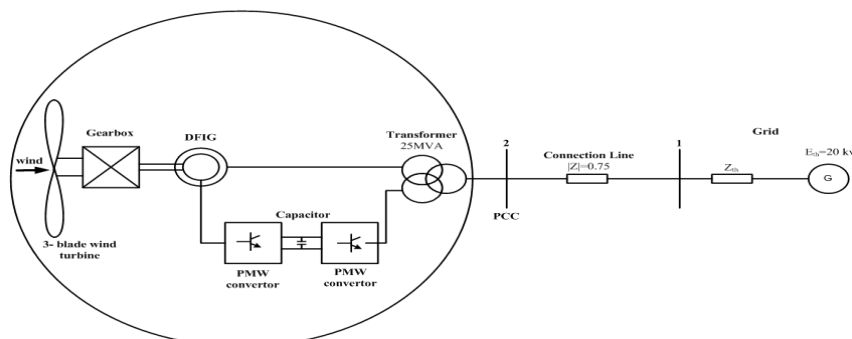
$$\theta$$
 زاویه گام پره توربین [deg]،  $\lambda = \frac{\omega_{rot} R}{v_{eq}}$  نرخ سرعت

نوک پره،  $\omega_{rot}$  سرعت روتور توربین بادی [rad/s] و  $C_p$  بازده آیرودینامیکی توربین است.

از آنجا که برای مدل دینامیکی، تأکید بر روی ساختار دینامیکی توربین بادی است که در برهم‌کنش با شبکه قدرت شرکت دارد، بنابراین تنها محور محرکه توربین بادی در نظر گرفته می‌شود و از سایر قسمتهای ساختمان توربین بادی برای مثال، برج و خمیدگی‌های لبه صرف نظر می‌گردد. با این فرض سیستم چرخشی مذکور می‌تواند توسط معادله جنبشی زیر مدل شود:

$$J_{WG} \frac{d\omega_{rot}}{dt} = T_w - T_G - D\omega_{rot} \quad (2)$$

که در آن  $J_{WG}$  اینرسی مکانیکی توربین بادی به علاوه اینرسی مکانیکی ژنراتور  $T_G$ ، [kg.m<sup>2</sup>]، گشتاور الکترومغناطیس ژنراتور [Nm] و  $D$  ضریب اصطکاک [Nm/rad] است. از آنجایی که در DFIG از مبدلهای با تکنیک PWM استفاده می‌شود، این مبدلها نیز بایستی در شبیه سازی مدل شوند. برای مدل سازی مبدل منبع ولتاژ PWM، مؤلفه‌های الکترونیک قدرت باید در فرکانس بالا (چندین کیلوهرتز KHz) روشن و خاموش شوند که به یک زمان شبیه سازی بسیار کوتاه جهت نمایش مناسب شکل موج PWM نیازمند است. لذا سرعت شبیه سازی بسیار کم خواهد بود. بنابراین مدل مبدل منبع ولتاژ PWM برای محاسبات فلیکر که به زمان بیشتری نیاز دارد مناسب نیست. از آنجا که توجه این مطالعه روی سوئیچ‌های مبدل PWM نیست، بنابراین یک مدل میانگین بدون سوئیچ‌ها استفاده می‌شود تا شبیه سازی بتواند در زمان طولانی‌تر، نتایج را به خوبی نمایش دهد [۱۱]. در توربین‌های بادی سرعت متغیر، سرعت روتور می‌تواند متناسب با سرعت باد، در سرعتهای باد کم تا متوسط تغییر کند، طوری که بهینه سرعت نوک پره حاصل شود. در این نرخ سرعت نوک پره،



شکل (۲): بلوک دیاگرام یک توربین بادی متصل شده به شبکه با ژنراتور القایی دوسو تغذیه  
Fig (2): Block diagram of a DFIG wind generation system connected to grid

$$\Delta V = \frac{PR_{th} \cos(\psi - \psi_k)}{V \cdot \cos \psi \cdot \cos \psi_k} \quad (۶)$$

در جایی که  $\psi_k$  برابر زاویه امپدانس شبکه و  $\psi$  ضریب توان توربین بادی است.

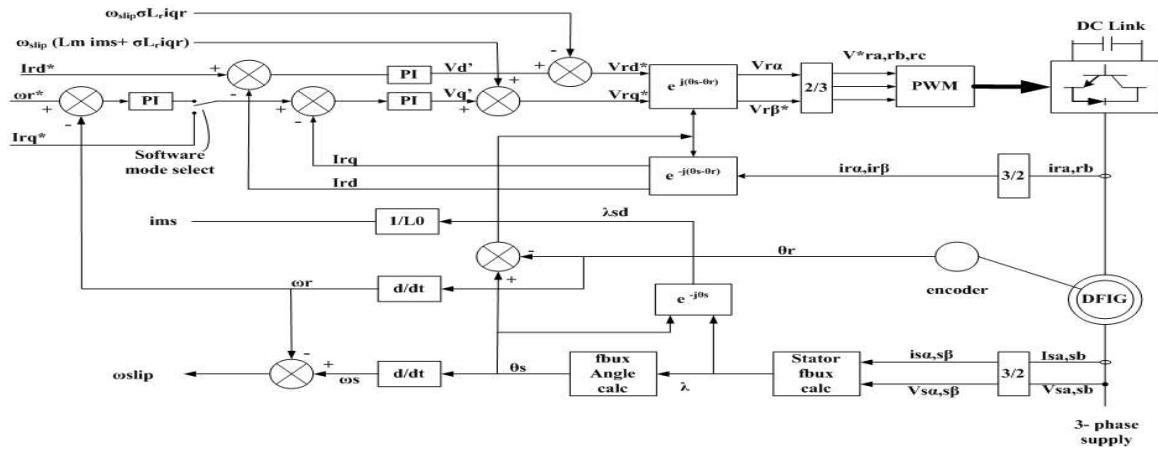
رابطه (۶) نشان می‌دهد که اگر تفاوت بین  $\psi$  و  $\psi_k$  به ۹۰ درجه برسد، تغییر ولتاژ و در نتیجه آن سطح فلیکر کاهش خواهد یافت.

نوسان ولتاژ (فلیکر) می‌تواند از طریق تنظیم مناسب توان راکتیو با تغییر توان اکتیو، محدود شود. با توجه به رابطه تغییر ولتاژ در طول یک خط انتقال و روابط زاویه امپدانس شبکه و ضریب توان، می‌توان نوشت [۹]:

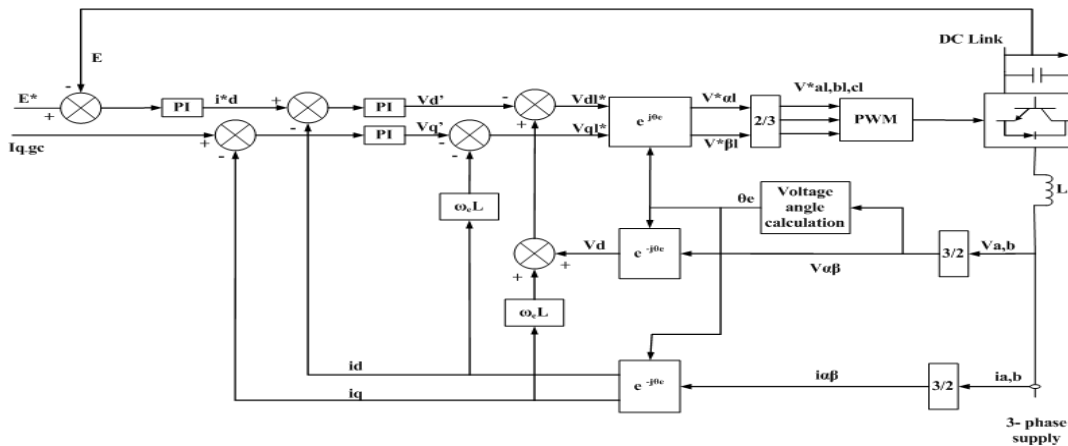
$$\Delta V = \frac{PR_{th} + QX_{th}}{V} \quad (۳)$$

$$\tan \psi_k = \frac{X_{th}}{R_{th}} \quad (۴)$$

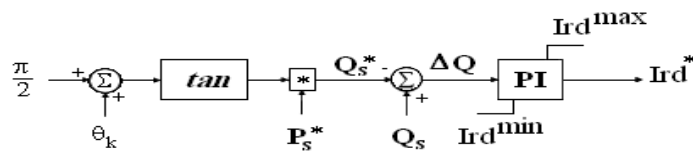
$$\tan \psi = \frac{Q}{P} \quad (۵)$$



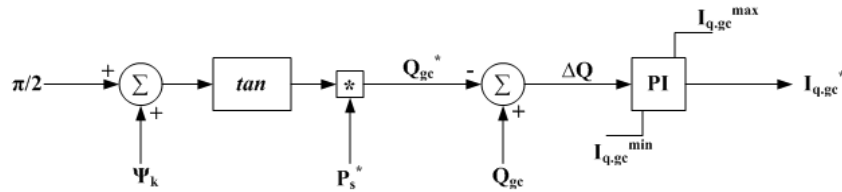
شکل (۳): ساختار کنترلر مبدل سمت روتور DFIG  
Fig (3): Controller structure of a DFIG rotor-side convertor



شکل (۴): ساختار کنترلر مبدل سمت شبکه DFIG  
Fig. (4): Controller structure of a DFIG grid-side convertor



شکل (۵): بلوک دیاگرام کنترلر زاویه ضریب توان در مبدل سمت روتور  
Fig. (5): Block diagram of power factor control in rotor-side convertor



شکل (۶): بلوک دیاگرام کنترل زاویه ضریب توان در مبدل سمت شبکه

Fig. (6): Block diagram of power factor control in grid-side converter

Table (1): Generator parameters

جدول (۱): پارامترهای ژنراتور

پارامتر	مقدار
توان نامی	2 MW
ولتاژ نامی	0.69 Kv
فرکانس زاویه‌ای مبنا	314.16 Rad/s
نسبت دور استاتور/روتور	0.4333
لختی زاویه‌ای اینرسی	1.9914 p.u.
دمپینگ مکانیکی	0.02 p.u.
مقاومت استاتور	0.0175 p.u.
مقاومت روتور	0.019 p.u.
اندوکتانس نشستی استاتور	0.2571 P.u.
اندوکتانس نشستی روتور	0.295 p.u.
اندوکتانس متقابل	6.921 p.u.

Table (2): Base values for simulation

جدول (۲): مقادیر پایه برای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
سرعت باد میانگین (v)	9 m/s
شدت نوسانات (In)	0.1
نرخ ظرفیت اتصال کوتاه (SCR)	20
زاویه امپدانس شبکه	50 Deg

با اعمال بلوکهای کنترلی به مبدل سمت روتور و شبکه تغییرات شاخص فلیکر کوتاه مدت یعنی Pst بر حسب سرعت باد، نوسانات باد، نسبت ظرفیت اتصال کوتاه و زاویه امپدانس شبکه به دست می‌آید که در شکل‌های (۷) الی (۱۰) آورده شده‌اند. در این شکلها نتایج شبیه‌سازی روشهای متفاوت کنترلی، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در حالت عادی مقدار مرجع توان راکتیو در صفر تنظیم می‌شود. کنترل ولتاژ، توان راکتیو مرجع را تولید می‌کند که منجر به تنظیم ولتاژ در نقطه PCC می‌گردد. این کنترل ولتاژ مقدار ولتاژ پایانه را در نقطه PCC ثابت نگه می‌دارد که سطح فلیکر در این حالت کاهش محسوسی را در پی خواهد داشت. همان طور که در شکل‌های (۷) تا (۱۰) مشاهده می‌شود، روابط بین شاخص فلیکر کوتاه مدت و پارامترهای موجود در هر سه شرایط تقریباً شبیه به هم هستند. اگر چه در مقایسه با عملکرد نرمال توربین بادی، استفاده از مبدل سمت شبکه فلیکر خروجی توربین بادی را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. از شکل‌های فوق می‌توان نتیجه گرفت که تنظیم اختلاف زاویه  $(\Psi - \Psi_k)$  به وسیله

همان طور که قبلاً بیان شد، توربین بادی DFIG این توانایی را دارد که توان اکتیو و راکتیو خروجی را به طور مستقل کنترل کند. به طور نرمال در این توربین‌ها ضریب توان در مقدار واحد، ثابت نگه داشته می‌شود. در صورتی که این امکان وجود دارد که از طریق کنترل مبدل سمت روتور و یا مبدل سمت شبکه و یا هر دو مبدل، توان راکتیو خروجی با تغییر توان اکتیو تغییر کند. بنابراین ضریب توان می‌تواند به این صورت تنظیم گردد. در این روش مبدل روتور و مبدل شبکه مانند یک STATCOM در ترمینال توربین بادی عمل می‌کنند، با این تفاوت که هزینه اضافی نصب STATCOM بر توربین بادی تحمیل نمی‌شود [۱۲]. برای تعیین یک زاویه ضریب توان مطلوب، مقدار مرجع توان راکتیو خروجی ( $Q_{g\_ref}$ ) باید از طریق مرجع توان اکتیو خروجی محاسبه گردد. زمانی که زاویه ضریب توان به  $\Psi_k + 90$  برسد، فلیکر کاهش می‌یابد. با توجه به این توضیحات بلوک دیاگرام کنترل مبدل سمت روتور و شبکه به صورت شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده می‌شوند.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

### ۵-۱- شبیه سازی فلیکر توربین بادی

با توجه به شکل (۲)، توربین بادی مورد مطالعه از طریق یک منبع ولتاژ ثابت به صورت سری با امپدانس معادل تونن آن با شبکه قدرت متصل شده است. شین ۲ نقطه اتصال مشترک (PCC) است. شبکه قدرت به شین ۲ توسط خط ۱-۲، که مقدار امپدانس آن 0.75 pu است، متصل می‌گردد. توربین بادی، یک ژنراتور القایی دوسو تغذیه 2 MW مجهز به مبدل منبع ولتاژ PWM پشت به پشت را تغذیه می‌کند. جدول (۱) پارامترهای این ژنراتور را با جزئیات نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای جدول (۲) از جمله شدت نوسانات باد، نسبت ظرفیت اتصال کوتاه و زاویه امپدانس شبکه به صورت زیر تعریف می‌شوند:

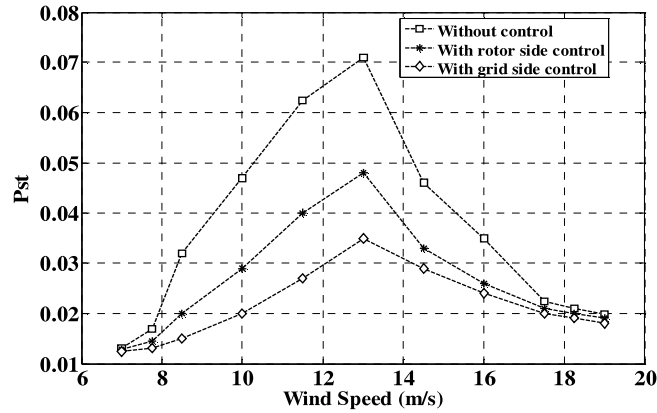
$$I_n = \frac{\Delta v}{v} \quad (7)$$

$$SCR = \frac{S_k}{S_n} \quad (8)$$

$$\Psi_k = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \quad (9)$$

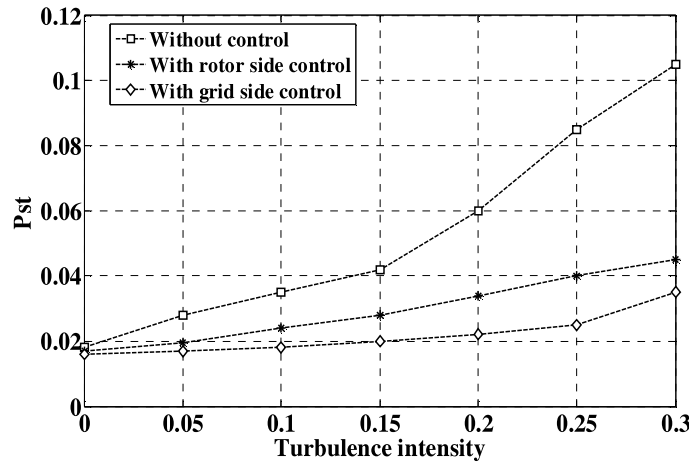
که در آن  $\Delta v$  انحراف معیار سرعت باد،  $v$  میانگین سرعت باد،  $S_k$  توان ظاهری اتصال کوتاه شبکه که توربینهای بادی به آن متصل می‌شوند،  $S_n$  توان ظاهری نامی توربین بادی،  $R$  و  $X$  مقاومت و راکتانس خط می‌باشند.

توان رآکتیو خروجی توربین بادی، تأثیر معناداری در کاهش فلیکر در برابر سرعت میانگین باد، شدت نوسانات باد و نسبت ظرفیت اتصال کوتاه در پی خواهد داشت. هم چنین با مقایسه نتایج استفاده از کنترلر سمت شبکه و کنترلر سمت روتور می‌توان نتیجه گرفت که کنترلر سمت رآکتیو در مدل سمت شبکه تأثیر بیشتری در کاهش انتشار فلیکر بر روی توربین بادی DFIG می‌گذارد.



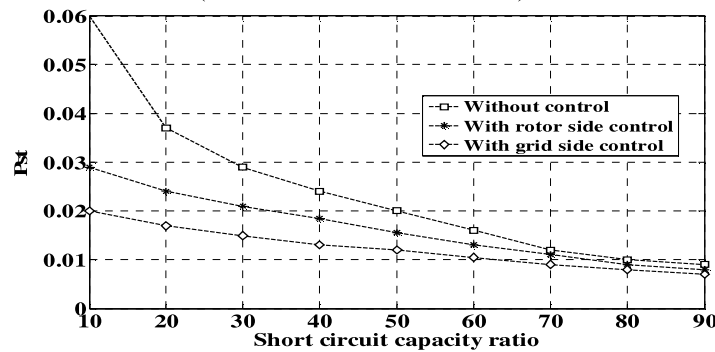
شکل (۷): تغییر شاخص فلیکر کوتاه مدت در برابر میانگین سرعت باد

Fig. (7): Pst versus mean wind speed  
( $I_n = 0.1, SCR = 20, \psi_k = 50^\circ$ )



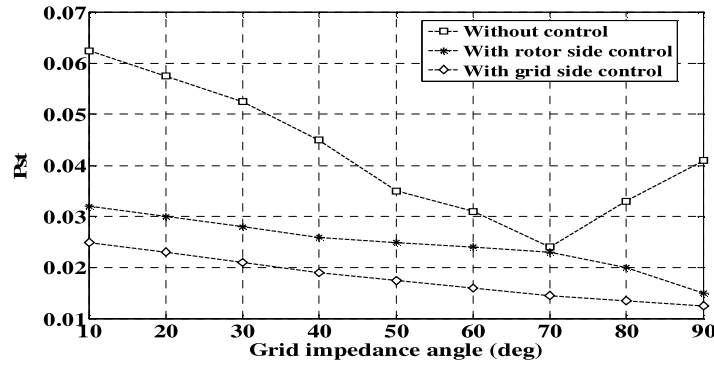
شکل (۸): تغییر شاخص فلیکر کوتاه مدت در برابر شدت نوسانات باد

Fig. (8): Pst versus turbulence intensity  
( $v = 9 \text{ m/s}, SCR = 20, \psi_k = 50^\circ$ )



شکل (۹): تغییر شاخص فلیکر کوتاه مدت در برابر نسبت ظرفیت اتصال کوتاه

Fig. (9): Pst versus short circuit capacity ratio  
( $v = 9 \text{ m/s}, I_n = 0.1, \psi_k = 50^\circ$ )



شکل ۱۰- تغییر شاخص فلیکر کوتاه مدت Pst در برابر زاویه امپدانس شبکه

Fig. (10): Pst versus grid impedance angle

$$(v = 9\text{m/s}, I_n = 0.1, \text{SCR} = 20)$$

بررسی شدت نوسانات باد نیز از 0.1 تا 0.3 تغییر داده شد، اما باز هم

تغییری در مقدار THD حاصل نشد.

سناریوی بعدی که برای این قسمت در نظر گرفته شده استفاده از کنترلر زاویه ضریب توان مبدل سمت شبکه برای مقادیر پایه جدول (۲) است. بعد از اندازه‌گیریهای صورت گرفته در این حالت ملاحظه شد که مقدار  $\text{THD} = 3.12\%$  به دست می‌آید که می‌توان آن را ناشی از عملکرد مبدل سمت شبکه دانست. زیرا از آنجا که مبدل سمت شبکه به طور مستقیم به شبکه قدرت متصل شده است، در نتیجه با تغییر فرکانس کلیدزنی در این مبدل، نفوذ هارمونیک در شبکه با افزایش مواجه خواهد شد در صورتی که با اعمال کنترلر توان از طریق مبدل سمت روتور این میزان انتشار هارمونیک کمتر بود.

با توجه به نتایج شبیه سازی‌های صورت گرفته در مورد کنترلر مبدلهای سمت روتور و شبکه، هر چند استفاده از کنترلر زاویه ضریب توان مبدل سمت شبکه می‌تواند باعث کاهش میزان فلیکر گردد، اما به دلیل افزایش اعوجاجات هارمونیک باید در استفاده از این کنترلر بررسیهای هارمونیک لازم صورت گیرد و فقط به صرف اینکه این مبدل می‌تواند باعث کاهش مطلوب انتشار فلیکر شود، از آن در کنترلر توان توربین بادی استفاده نکرد.

#### ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، فلیکر متر و الگوریتم مربوط به آن، مطابق با استاندارد IEC در نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی گردید. از این مدل، برای محاسبه مقدار شاخص فلیکر کوتاه مدت Pst بر پایه یک دوره زمانی ۱۰ دقیقه‌ای استفاده شد. همچنین در این مقاله، مدل توربین بادی DFIG با استفاده از مبدلهای منبع ولتاژ PWM پشت به پشت و اشکال کنترلی آن تشریح گردید. بر پایه مدل توربین بادی ارائه شده، انتشار فلیکر و هارمونیک توربین بادی با ژنراتور القایی دوسو تغذیه در طول عملکرد پیوسته بررسی گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مشخصات شبکه قدرت، از جمله نسبت ظرفیت اتصال کوتاه و زاویه امپدانس شبکه، تأثیر بسزایی روی انتشار فلیکر از سوی توربین

#### ۵-۲- شبیه سازی هارمونیک توربین بادی

به دلیل مواردی چون کنترلر توان راکتیو و کنترلر زاویه ضریب توان باید تغییراتی در توان راکتیو خروجی توربین بادی DFIG اعمال کرد. از آنجا که این تغییرات توان راکتیو توسط مبدل توان صورت می‌گیرد لذا به دلیل مسائل کلیدزنی باید بررسی هارمونیک در این موارد هم صورت گیرد. هر موج نوسانی ولتاژ  $V(t)$  می‌تواند توسط رابطه زیر (سری فوریه) تجزیه شود:

$$V(t) = V_1 \sin \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (10)$$

اولین مؤلفه سمت راست معادله بالا، مؤلفه اصلی و ترمهای با فرکانس بالاتر ( $n=2,3,\dots$ ) مربوط به هارمونیکها می‌باشند. کل اعوجاج هارمونیک نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (11)$$

این پارامتر برای مقایسه کیفیت توان یک سیستم متناوب و در موقعیتهای مختلف از لحاظ هارمونیک بسیار مفید است. در یک منبع سینوسی خالص این مقدار برابر صفر خواهد بود. استراتژی بررسی هارمونیک ناشی از توربین بادی DFIG در این قسمت بر مبنای تغییر میانگین سرعت باد است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد هنگامی که از کنترلر زاویه ضریب توان مبدل سمت روتور برای کاهش سطح فلیکر استفاده می‌شود، با تغییر در سرعت باد از 7.5 m/s تا 15 m/s تقریباً تغییری در مقدار THD در شین ۲۰ کیلوولت حاصل نمی‌شود و این مقدار در 1.87 درصد ثابت باقی می‌ماند. البته می‌توان این رفتار هارمونیک توربین بادی را ناشی از کنترلر سرعت (توان) در مبدل توان سمت روتور دانست. همان طور که قبلاً هم اشاره شد کنترلر توان ناشی از تغییرات سرعت در مبدل سمت روتور انجام می‌شود، به همین دلیل می‌توان گفت که هارمونیک می‌تواند از طریق سیم‌پیچی روتور و در نهایت استاتور به شبکه قدرت نفوذ کند، اما وجود فاصله هوایی مانع از آن می‌شود که مؤلفه‌های هارمونیک وارد شبکه قدرت شوند. در این

مساءل هارمونیکي لازم است تا بين کاهش انتشار فليکر و افزايش هارمونیک در شبکه مصالحه‌ای صورت پذیرد تا به نحو مطلوبی کیفیت توان در این نیروگاهها بهبود یابد.

بادی با ژنراتور القائی تغذیه دو سویه خواهد داشت. همچنین در بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که هر چند کنترل توان راکتیو خروجی توربین بادی، تأثیر بسزائی در کاهش نوسانات ولتاژ ناشی از سرعت و شدت نوسانات باد و شرایط شبکه ایفا می‌کند اما بدلیل

### References

- [1] R.C. Dugan, M.F. Mc Granaghan, *Electrical Power Systems Quality: McGraw – Hill*, 2004.
- [2] L. Rossetto, P.Tenti, A. Zuccato, "Electromagnetic compatibility issues in industrial equipment", *IEEE Ind. Appl. Mag.*, Vol. 5, No. 6, pp. 34–46, Nov./Dec. 1999.
- [3] Å. Larsson, "Flicker emission of wind turbines during continuous operation", *IEEE Trans. on Ene. Con.*, Vol. 17, No. 1, pp. 114–118, Mar. 2002.
- [4] M.P. Papadopoulos, S.A. Papathanassiou, S.T. Tentzerakis, N. G.Boulaxis, "Investigation of the flicker emission by grid connected wind turbines", *IEEE/ICHQP*, Vol. 2, pp. 1152–1157, Athens, Greece, Oct. 1998.
- [5] IEC (International Electro technical Commission) *Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines*, IEC 61400-21, IEC, WWW.IEC.CH, 2001.
- [6] L. Meegahapola, "Voltage and power quality improvement strategy for a DFIG wind farm during variable wind conditions", *IEEE/ISMEPS*, Belfast, UK., Sep. 2010.
- [7] T.L. Van, "Flicker mitigation in DFIG wind turbine systems", *IEEE/EPE*, Sep. Aug./Sep. 2011.
- [8] Y.S. Kim, D.J. Won, "Mitigation of the flicker level of a DFIG using power factor angle control", *IEEE Trans. on Pow. Del.*, Vol. 24, No. 4, Oct. 2009.
- [9] W. Hu, Zh. Chen, Y. Wang, Zh. Wang, "Flicker mitigation by active power control of variable-speed wind turbines with full-scale back-to-back power converters", *IEEE Trans. Ene. Conv.*, Vol. 24, No. 3, pp. 640–649, Sep. 2009.
- [10] Flicker meter — Functional and Design Specifications, IEC Std.61000-4-15.
- [11] T. Sun, Z. Chen, F. Blaabjerg, "Flicker study on variable speed wind turbines with doubly fed induction generators", *IEEE Trans. on Ene. Con.*, Vol. 40, No. 4, pp. 896–905, Dec. 2005.
- [12] P. Giroux, G. Sybille, H. Le-Huy, "Modeling and simulation of a distribution STATCOM using simulink's power system block set", *IEEE/IES*, Vol. 2, pp. 990–994, Denver, CO, Nov./Dec., 2001.