نشریه انرژی ایران
۹۵ سال ۱۱ شماره ۲۷ خرداد ۱۳۸۷

بررسی فلیکر توربین‌های بادی سرعت متغیر DFIG و بهبود آن با استفاده از مبدل طرف شبکه توربین

مجید ابدی مرزونی[۱]، مصطفی محمدیان[۱]، علی یزدیان ورجایی[۱]، سیدعلی محمد جوادیان[۱]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۹دی ماه ۸۶
تاریخ پذیرش مقاله:
۸ اسفندماه ۸۶

چکیده

توربین‌های بادی یکی از عوامل عمده تولیدکننده فلیکر در شبکه‌های قدرت می‌باشند. در این مقاله انتشار فلیکر توربین‌های بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی تغذیه دوبل(DFIG)، مورد بررسی قرارگرفته و تأثیر عواملی چون سرعت متوسط باد، میزان اغتشاشات باد، ظرفیت اتصال کوتاه شبکه و زاویه امپدانس شبکه ، بر روی انتشار فلیکر این نوع توربین‌ها تحلیل می‌گردد. همچنین در این مقاله با استفاده از کنترل توان راکتیو خروجی ژنراتور، که از طریق کانورتر طرف شبکه توربین انجام می‌گیرد، میزان فلیکر موجود در ولتاژ خروجی بهبود می‌یابد. برای کنترل جریان این کانورتر جهت بهبود فلیکر، دو روش کنترل ولتاژ و کنترل توان راکتیو پیشنهاد شده است. این دو روش از نظر توانایی در بهبود فلیکر، میزان توان راکتیو مصرفی و ظرفیت کانورتر مورد نیاز، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی، صحت عملکرد روش‌های پیشنهادی را در بهبود فلیکر نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی:
توربین‌های بادی سرعت متغیر، ژنراتورالقایی تغذیه دوبل، فلیکر

۱) تهران، دانشگاه تربیت مدرس ، دانشکده فنی و مهندسی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

مقدمه

با افزایش استفاده از انرژی باد در شبکه‌های قدرت، تأثیر توربین‌های بادی بر روی کیفیت توان شبکه‌های قدرت، به عنوان یک مشکل جدی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مسائل بسیار مهم در زمینه کیفیت توان توربین‌های بادی، بحث فلیکر یا نوسانات ولتاژ می‌باشد[۱].

فلیکر عبارت است از:"اثری که در اثر نوسانات روشنایی یا تغییر طیف نوری یک چراغ در دید انسان پدید می‌آید"[۲]. فلیکر می‌تواند موجب نارضایتی مصرف‌کننده گردد و به عنوان فاکتوری برای محدود کردن اتصال توربین‌های بادی به شبکه های ضعیف به حساب آید. انتشار فلیکر توسط توربین‌های بادی متصل به شبکه طی عملکرد حالت دائم آنها، ناشی از نوسانات توان اکتیو خروجی این توربین‌ها می‌باشد که این امر خود ناشی از اغتشاشات موجود در سرعت باد و همچنین اثر سایه‌ای ناشی از برج نگهدارنده[1] توربین بادی می‌باشد. به طور کلی عواملی چون مشخصات باد (میانگین سرعت باد و شدت آشفتگی) و وضعیت شبکه(سطح اتصال کوتاه و زاویه امپدانس شبکه) در انتشار فلیکر توربین‌های بادی به شبکه قدرت مؤثرند. همچنین نوع توربین بادی نیز در پخش فلیکر در شبکه قدرت تأثیرگذار است. توربین‌های بادی سرعت‌متغیر نسبت به توربین‌های بادی با سرعت ثابت دارای عملکرد بهتری در زمینه پخش فلیکر می‌باشند[۳].

یکی از انواع توربین‌های بادی سرعت‌متغیر، توربین‌های بادی با ژنراتور القایی تغذیه دوبل[2](DFIG) می‌باشد که امروزه به عنوان یکی از رایج‌ترین و پرطرفدارترین توربین‌های بادی در جهان به حساب می‌آید. در این مقاله یک نمونه شبیه‌سازی شده از این نوع توربین‌ها به همراه سیستم کنترل آن با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ارائه شده است. همچنین انتشار فلیکر توربین‌های بادی DFIG مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر عواملی چون مشخصات باد (میانگین سرعت باد و شدت آشفتگی) و وضعیت شبکه (سطح اتصال کوتاه و زاویه امپدانس شبکه) بر روی انتشار فلیکر این نوع توربین‌ها مورد آنالیز قرار می‌گیرد.

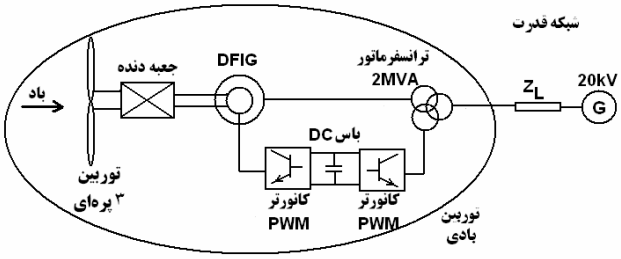
تا کنون روش‌های مختلفی برای بهبود کیفیت توان توربین‌های DFIG و به خصوص بهبود فلیکر آن ارائه شده است که از جمله آن می‌توان به استفاده از ادوات FACTS مانند STATCOM در کنار توربین جهت بهبود فلیکر این توربین‌ها[۴]، استفاده از کانورتر طرف شبکه به عنوان یک فیلتر اکتیو موازی جهت بهبود هارمونیک ولتاژ شبکه[۵]، استفاده از کانورتر طرف روتور و کنترل جریان روتور جهت بهبود هارمونیک و نامتعادلی ولتاژ[۶و۷و۸] و بالاخره استفاده از اینرسی توربین برای کاهش نوسانات ولتاژ خروجی این توربین‌ها[۹]، اشاره نمود. در این مقاله با استفاده از کنترل توان راکتیو خروجی ژنراتور، که از طریق کانورتر طرف شبکه توربین انجام می‌گیرد، میزان فلیکر موجود در ولتاژ خروجی بهبود می‌یابد. در واقع این کانورتر، همانند یک STATCOM عمل می‌کند. برای کنترل جریان این کانورتر جهت بهبود فلیکر از دو روش کنترل ولتاژ و کنترل توان راکتیو استفاده شده است. این دو روش از نظر توانایی در بهبود فلیکر، میزان توان راکتیو مصرفی و ظرفیت کانورتر مورد نیاز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، عملکرد درست سیستم‌های کنترلی پیشنهادی را در بهبود فلیکر نشان می‌دهد.

1) Tower shadow effect
2) Doubly Fed Induction Generator

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

مدلسازی توربین بادی

سیستم شبیه سازی شده، در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم شامل یک توربین بادی با ژنراتور القایی روتور سیم‌پیچی شده است که از دو طرف استاتور و روتور تغذیه می‌گردد. استاتور این ژنراتور به طور مستقیم و روتور از طریق یک کانورتر پشت به پشت به شبکه متصل می‌گردد. در ادامه به مدلسازی اجزاء مختلف سیستم توربین بادی شامل باد، توربین بادی، ژنراتور القایی تغذیه دوبل و کانورترها می‌پردازیم.



شکل (۱): سیستم شبیه سازی شده

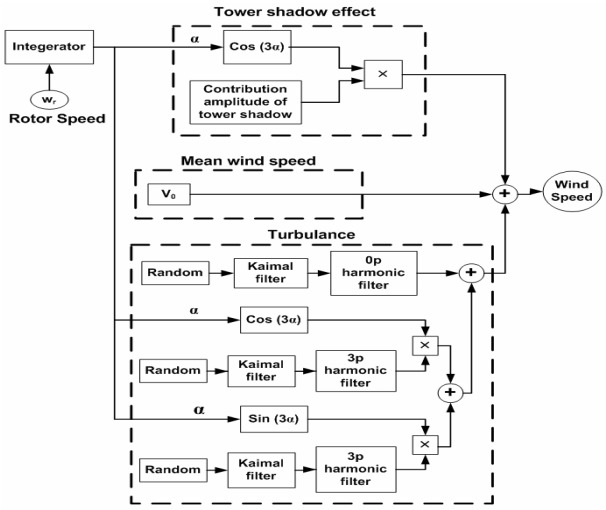
مدل باد: مدل باد شامل ۳ بخش سرعت متوسط باد، اثر سایه‌ای برج نگهدارنده و اغتشاشات باد می‌باشد. سرعت متوسط باد بر اساس مکانی که توربین بادی در آن قرار می‌گیرد و همچنین ارتفاع برج نگهدارنده توربین مشخص می‌گردد. اثر سایه‌ای ستون نگهدارنده توربین، اثری است کاهشی که در هنگام روبرو شدن پره‌های توربین با ستون اتفاق می‌افتد. به طور کلی ستون نگهدارنده سبب کاهش سرعت باد می‌گردد و برای یک توربین ۳ پره‌ای شاهد ۳ بار افت سرعت باد در هر چرخش خواهیم بود. این امر سبب می‌گردد که در توان خروجی توربین شاهد نوساناتی با فرکانس مضرب ۳ باشیم[۱].

برای مدلسازی اغتشاشات باد از طیف فرکانسی Kaimal استفاده شده است که اندازه هر یک از فرکانسهای موجود در اغتشاشات را مشخص می‌کند. رابطه (۱) طیف فرکانسی Kaimal را مشخص می‌کند[۱۰].

$$\frac{f\,K(f)}{\sigma^2}=\frac{\frac{20hf}{v_0}}{(1+1.5\frac{20hf}{v_0})^{\frac{5}{3}}} \qquad (۱)$$

که در آن $K(f)$ اندازه اغتشاش فرکانس fام، h ارتفاع توربین از سطح زمین و v_0 سرعت متوسط باد می‌باشد. با توجه به رابطه (۱)، اندازه اغتشاشات با فرکانس بالاتر، کمتر از فرکانس‌های پایینی می‌باشد و اکثرا از طریق اینرسی توربین از بین می‌روند. مدل شبیه‌سازی شده باد در شکل(۲) نشان داده شده است[۱۰و۱۱و۱۲] .

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل (۲) : مدل شبیه سازی شده باد

مدل توربین بادی: مدل توربین بادی شامل دو قسمت مدل آیرودینامیکی و مدل سیستم چرخشی می‌باشد. سیستم آیرودینامیکی توربین سرعت باد را به گشتاور مکانیکی تبدیل می‌کند. گشتاور مکانیکی حاصل از سرعت باد از رابطه (۲) بدست می‌آید :

$$T_{WT} = \frac{1}{2}\rho R^2 V_w^2 C_p \qquad (۲)$$

که در آن T_{WT} گشتاور مکانیکی توربین بادی، ρ چگالی هوا بر حسب $[\,kg/m^3\,]$ ، R شعاع پره‌های توربین$[m]$، V_w سرعت باد$[\,m/s\,]$ و C_p نیز ضریب کارائی[1] می‌باشد. ضریب کارائی مشخص کننده درصد یا قسمتی از انرژی موجود در باد است که به وسیله توربین قابل استخراج است. C_p علاوه بر شکل آیرودینامیکی پره، طبق روابط زیر به عوامل دیگری نیز بستگی دارد.

$$C_p = f(\lambda, \theta)$$
$$\lambda = \frac{V_t}{V_w} = \frac{R\omega_t}{V_w} \qquad (۳)$$

که λ نسبت سرعت نوک پره توربین به سرعت باد، θ زاویه پره، V_t سرعت نوک پره توربین بر حسب $[\,m/s\,]$ و ω_t سرعت چرخشی پره‌های توربین بر حسب $[\,rad/sec\,]$ می‌باشد.[۱۳] رابطه بین گشتاور مکانیکی توربین و گشتاور الکتریکی ژنراتور نیز به صورت زیر خواهد بود:

1) Coefficient of Performance

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

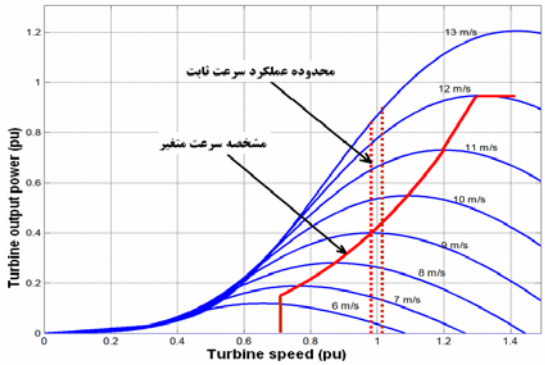
$$J_{WG}\frac{d\omega_r}{dt} = T_{WT} - T_e - D\omega_r \qquad (۴)$$

که در آن J_{WG} مجموع ممان اینرسی توربین بادی و ژنراتور [$kg.m^2$] ، ω_r سرعت روتور بر حسب [rad/sec]، T_{WT} و T_e به ترتیب گشتاور مکانیکی توربین و گشتاور الکتریکی ژنراتور [N.m] و D ضریب اصطکاک است.[$\frac{N.m.Sec}{rad}$]

مدل ژنراتور القایی و کانورتر PWM: ژنراتور مورد استفاده در این سیستم یک ژنراتور القایی دوتغذیه‌ای است. استاتور این ژنراتور به طور مستقیم و روتور نیز از طریق دو کانورتر پشت به پشت[1] به شبکه متصل شده است. کانورتر طرف روتور یک اینورتر منبع ولتاژ کنترل شونده با جریان است که با کنترل آن می‌توان گشتاور و توان راکتیو ژنراتور را با استفاده از مؤلفه‌های مولد آنها از جریان روتور ، به صورت مستقل از هم کنترل کرد. کانورتر طرف شبکه یک اینورتر PWM می‌باشد که وظیفه آن انتقال توان اکتیو به باس DC و ثابت نگه داشتن ولتاژ خازن می باشد. برای مدل‌سازی ژنراتور از مدل چارچوب مرجع چرخان dq استفاده شده است و مدار روتور و استاتور آن با تمام جزئیات شبیه سازی شده است. از آنجا که برای مطالعات فلیکر نیاز به زمان بسیار زیادی می‌باشد (حدود ۱۰ دقیقه)، استفاده از مدل سوئیچینگ برای کانورتر PWM مناسب نیست چون نیاز به زمان بسیار زیادی برای شبیه سازی دارد. در نتیجه در این مقاله کانورتر PWM به صورت یک منبع ولتاژ متغیر شبیه‌سازی شده است.

طرح سیستم کنترل

اساس سیستم کنترل توربین بادی DFIG بر مبنای دریافت ماکزیمم توان از سرعت باد می‌باشد. در شکل (۳) مشخصه توان تولیدی یک توربین بادی بر حسب سرعت ژنراتور در سرعت های مختلف باد نشان داده شده است. محدوده عملکرد ژنراتور با سرعت ثابت و مشخصه عملکرد ژنراتور با سرعت متغیر جهت گرفتن ماکزیمم توان از باد در شکل نشان داده شده است. سیستم کنترل با تغییر سرعت روتور در هر سرعت باد، سرعت بهینه روتور را با توجه به شکل (۳) جهت دریافت ماکزیمم توان از باد تعیین می‌کند. برای کنترل توربین بادی DFIG از روش کنترل برداری استفاده شده است.



شکل (۳) : توان تولیدی ژنراتور بر حسب سرعت باد و سرعت ژنراتور

1) Back to Back

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

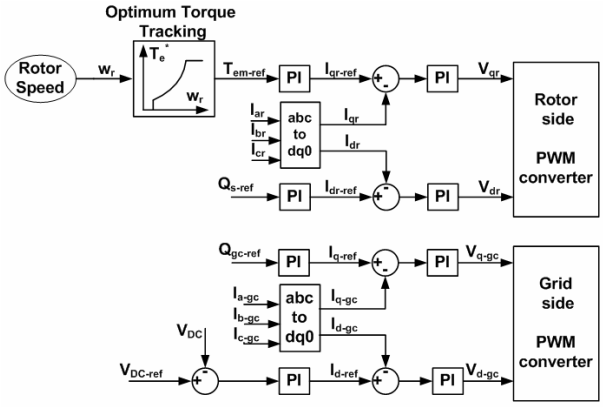
با استفاده از روابط ماشین القایی در دستگاه مرجع سنکرون و با ثابت در نظر گرفتن شار فاصله هوایی ماشین القایی خواهیم داشت :

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\lambda^{e}_{ds} i^{e}_{qs} = -\frac{3}{2}\frac{P}{2}\frac{L_m}{L_s}\lambda^{e}_{ds} i^{e}_{qr} \quad (۵)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}\omega\lambda^{e}_{ds} i^{e}_{ds} = \frac{3}{2}\omega\lambda^{e}_{ds}\left(\frac{\lambda^{e}_{ds} - L_m i^{e}_{dr}}{L_s}\right) \quad (۶)$$

همان گونه که ملاحظه می‌گردد در صورتی که شار فاصله هوایی (λ^{e}_{ds}) ثابت بماند، با کنترل مولفه های d و q از جریان روتور (i^{e}_{dr} و i^{e}_{qr}) در دستگاه مرجع سنکرون، می‌توان به طور مستقل از هم توان راکتیو استاتور (Q_s) و گشتاور الکترومغناطیسی ماشین (T_{em}) را کنترل نمود.

در شکل (۴) بلوک دیاگرام کنترل کانورترهای طرف روتور و طرف شبکه DFIG نشان داده شده است. همان گونه که نشان داده شده است، با استفاده از منحنی ماکزیمم گشتاور الکتریکی بر حسب سرعت روتور، گشتاور الکتریکی مرجع مشخص شده و با استفاده از رابطه (۵) مقدار جریان مؤلفه q روتور تعیین می‌گردد. همچنین با استفاده از رابطه (۶) و توان راکتیو مرجع، میزان جریان مؤلفه d روتور مشخص می‌گردد. جریان مؤلفه d کانورتر طرف شبکه میزان توان اکتیو انتقالی از این کانورتر و بالطبع ولتاژ باس DC را کنترل می‌کند و جریان مؤلفه q آن نیز میزان توان راکتیو انتقالی از این کانورتر را مشخص می‌کند.



شکل (۴): بلوک دیاگرام کنترل کانورترهای DFIG

سیستم مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم شامل یک ژنراتور القایی2MW است که از طریق یک ترانسفرماتور 2MVA به شبکه 20kV متصل می‌گردد. توان راکتیو مرجع کانورترهای DFIG برابر صفر در نظر گرفته

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

شده است تا ضریب توان توربین برابر یک گردد. میزان توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور القایی در این حالت از طریق خازن باس DC تأمین می‌گردد. در جدول (۱) اطلاعات مربوط به پارامترهای ژنراتور القایی آورده شده است. همچنین در جدول (۲) اطلاعات مربوط به شبکه و باد در حالت پایه نشان داده شده است که در آن SCR ظرفیت اتصال کوتاه شبکه، In شدت اغتشاشات باد و ψ_k زاویه امپدانس شبکه می باشند و از روابط ۷ ، ۸ و ۹ قابل محاسبه می‌باشند:

$$SCR = \frac{S_k}{S_n} \quad (۷)$$

$$In = \frac{\Delta \upsilon}{\upsilon} \quad (۸)$$

$$\psi_k = \tan^{-1}(\frac{X}{R}) \quad (۹)$$

که در روابط فوق S_k توان ظاهری اتصال کوتاه شبکه در نقطه اتصال توربین بادی، S_n توان نامی توربین بادی، υ سرعت متوسط باد، $\Delta\upsilon$ میزان تغیرات سرعت باد ، X اندوکتانس معادل شبکه و R مقاومت معادل شبکه است.

جدول (۱) : پارامترهای ماشین القایی

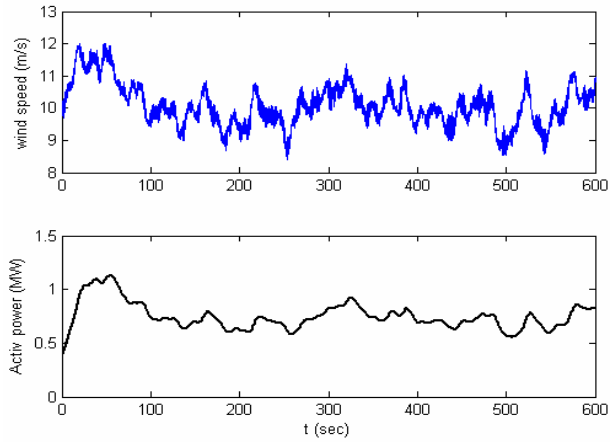
Parameter	Value
Rated power	۲ MW
Rated voltage	۵۷۵ V
Rated frequency	۶۰ Hz
Stator resistant	۰/۰۰۷۰۶ pu
Rotor resistant	۰/۰۰۵ pu
Stator leakage inductance	۰/۱۷۱ pu
Rotor leakage inductance	۰/۱۵۶ pu
Mutual inductance	۲/۹ pu
Inertia constant	۵/۰۴ s
Friction factor	۰/۰۱ pu

جدول (۲) : مشخصات شبکه و باد در حالت پایه

Parameter	Value
Mean wind speed (υ)	۱۰ m/s
Turbulence intensity ($\frac{\Delta\upsilon}{\upsilon}$)	٪۱۰
Short circuit capacity ratio (SCR)	۲۰
Grid impedance angle (ψ_k)	۵۰ Deg

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

در شکل (۵) سرعت باد معادل و توان اکتیو خروجی توربین بادی، برای حالت پایه ارائه شده در جدول (۲)، در یک شبیه‌سازی ۶۰۰ ثانیه‌ای، آورده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌گردد توان اکتیو خروجی ژنراتور متناسب با تغییرات سرعت باد، سرعت ژنراتور تغییر کرده و در هر سرعت باد توان اکتیو ماکزییم را به شبکه تحویل می‌دهد.



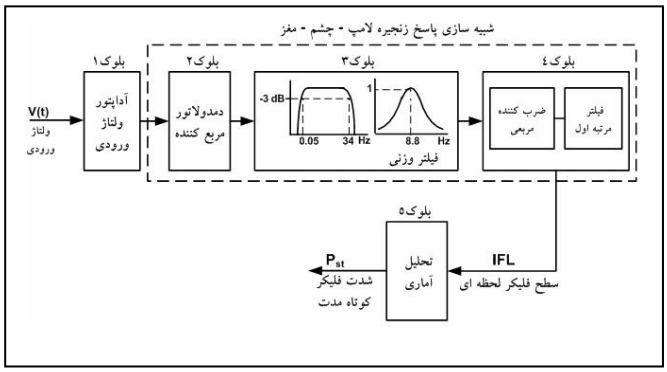
شکل (۵) : سرعت باد و توان اکتیو خروجی توربین در حالت پایه

طراحی فلیکرمتر

طراحی فلیکرمتر بر اساس استاندارد IEC 61000-4-15 [۱۴]، انجام می‌گیرد تا بـه وسـیله آن شـدت فلیکـر کوتـاه مدت[1] (P_{st}) محاسبه گردد. ساختار فلیکرمتر ارائه شده در این استاندارد، در بلوک دیاگرام شکل (۶) آورده شده است. سـاختار فلیکرمتر شامل دو قسمت اساسی می‌باشد :

۱- شبیه سازی پاسخ زنجیره لامپ- چشم- مغز

۲- تحلیل آماری سیگنال فلیکر و ارائه نتایج



شکل (۶) : بلوک دیاگرام فلیکرمتر طبق استاندارد IEC

1) Short term flicker severity

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

بلوک های ۱، ۲، ۳ و۴ وظیفه قسمت اول را بر عهده دارند و بلوک۵ دومین قسمت فلیکرمتر را انجام می‌دهد. بلوک۱ ولتاژ ورودی را به یک سطح ولتاژ مرجع داخلی درجه بندی می‌کند. با این کار فلیکرمتر بدون وابستگی به سطح ولتاژ ورودی میزان فلیکر را اندازه گیری می‌کند. بلوک۲ نوسانات ولتاژ را با مربع کردن ولتاژ ورودی بازیابی می‌کند. در واقع این بلوک عملکرد یک لامپ ملتهب را شبیه‌سازی می‌کند. بلوک۳ از دو فیلتر که به طور سری قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. فیلتر اول مؤلفه DC و ریپل هارمونیک دوم خروجی دمدولاتور را حذف می‌کند. این فیلتر از ترکیب یک فیلتر بالاگذر مرتبه اول (با فرکانس قطع 0.05Hz) و یک فیلتر باتروورث مرتبه۶ با فرکانس قطع 35Hz تشکیل یافته است. دومین فیلتر بلوک۲ یک فیلتر وزنی است که پاسخ فرکانسی یک لامپ رشته ای پر شده با گاز (60W, 230V) نسبت به نوسانات ولتاژ سینوسی، همراه با سیستم بصری انسان را شبیه‌سازی می‌کند. بلوک۴ از یک مربع کننده و یک فیلتر پایین گذر با ثابت زمانی 300ms (مدت زمانی که یک تصویر در ذهن انسان باقی می‌ماند) تشکیل یافته است. خروجی بلوک۴ سطح فلیکر لحظه‌ای[1] (IFL) را نمایش می‌دهد.

بلوک۵ بر روی سطح فلیکر لحظه‌ای تحلیل آماری انجام می‌دهد. ابتدا، سیگنال IFL به چند سطح طبقه‌بندی می‌گردد (حداقل ۶۴ سطح) و سپس تابع تجمعی احتمال (CPF) سطوح فلیکر بدست می‌آید. میزان شدت فلیکر، P_{st} ، از رابطه زیر بدست می آید :

$$P_{st} = \sqrt{\sum_i K_i P_i} \qquad (۱۰)$$

که در آن P_i سطح فلیکری است که IFL در i% کل دوره نمونه گیری (که حدود ۱۰ دقیقه می‌باشد)، از آن سطح فراتر می‌رود. میزان i و K_i مربوط به رابطه (۱۰) در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳) : پارامتر های مربوط به رابطه (۱۰)

K_i	i
۰/۰۳۱۴	۰/۱
۰/۰۱۷۵	۰/۷، ۱، ۱/۵
۰/۰۲۲۵	۲/۲، ۳، ۴
۰/۹۳۳۳	۶، ۸، ۱۰، ۱۳، ۱۷
۰/۰۲۶۶	۳۰، ۵۰، ۸۰

1) Instantaneous Flicker Level

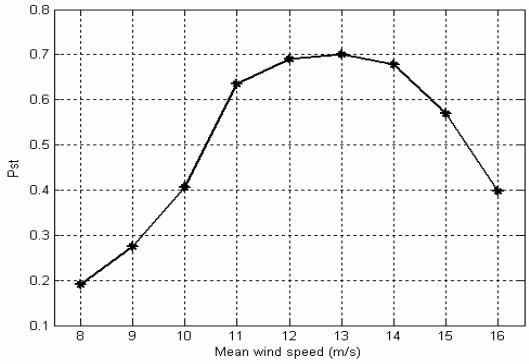
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

بررسی انتشار فلیکر

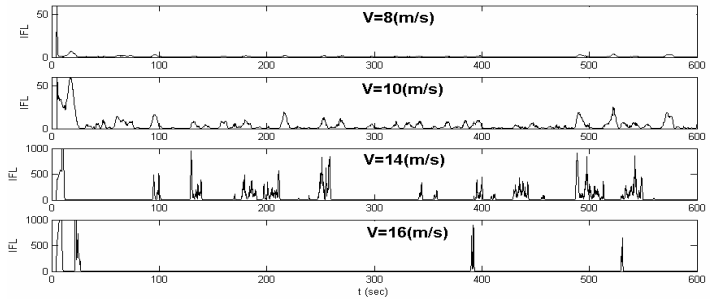
در این بخش عوامل زیر بر روی انتشار فلیکر توربین بادی DFIG مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است:

- سرعت متوسط باد (υ)
- ظرفیت اتصال کوتاه شبکه (SCR)
- شدت اغتشاشات باد (In)
- زاویه امپدانس شبکه (ψ_k)

مشخصات باد: در شکل (۷) تغییرات شدت فلیکر کوتاه مدت، P_{st} ، با سرعت متوسط باد نشان داده شده است. با توجه به شکل، در سرعتهای پایین باد، میزان P_{st} به طور خطی با افزایش سرعت متوسط باد افزایش می‌یابد که علت آن افزایش شدت اغتشاشات باد با افزایش سرعت متوسط باد می‌باشد. در سرعتهای بالای باد (بالاتر از $13^{m}/_{s}$)، جایی که توربین توان نامی خود را تولید می‌کند، میزان P_{st} با افزایش سرعت متوسط باد کاهش می‌یابد. علت این امر عملکرد سیستم تغییر سرعت توربین می‌باشد که با تغییر سرعت ژنراتور، توان نامی ثابتی را در خروجی توربین ایجاد می‌کند، و با این کار میزان فلیکر را کاهش می‌دهد. در شکل (۸)، سطح فلیکر لحظه‌ای برای چند سرعت نمونه باد آورده شده است. در شکل (۹) میزان تغییرات شدت فلیکر با شدت اغتشاشات باد نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌گردد با افزایش شدت اغتشاشات باد، شدت فلیکر نیز افزایش می‌یابد.

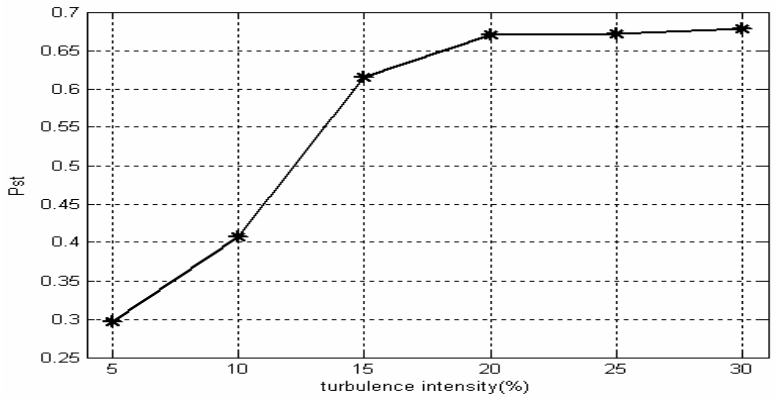


شکل (۷) : شدت فلیکر کوتاه‌مدت در سرعتهای مختلف باد
($\psi_k = 50°$ ، Scr = 20 ، In = 10%)



شکل (۸) : سطح فلیکر لحظه‌ای برای سرعت‌های باد نمونه
($\psi_k = 50°$ ، Scr = 20 ، In = 10%)

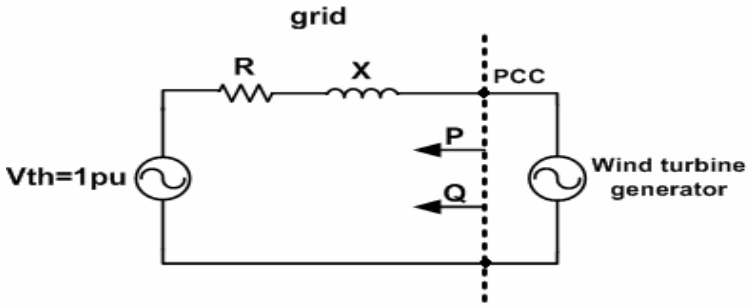
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل (۹) : شدت فلیکر کوتاه‌مدت در اغتشاشات مختلف باد

($\psi_k = 50°$ ، Scr = 20 ، V = 10m/s)

وضعیت شبکه: شکل (۱۰) مدار معادل ساده یک توربین بادی متصل به شبکه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰) : مدار معادل یک توربین بادی متصل به شبکه

با توجه به دیاگرام شکل (۱۰)، می‌توان میزان تغییرات ولتاژ در نقطه اتصال توربین به شبکه[1](PCC) را از رابطه زیر به دست آورد[۱۵] :

$$\Delta V = \frac{PR + XQ}{V} \qquad (۱۱)$$

رابطه (۱۰) را می‌توان به صورت زیر نمایش داد :

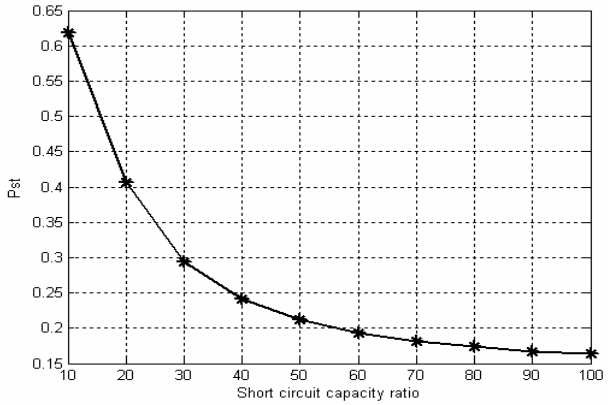
$$\Delta V = \frac{SZ\cos(\theta - \psi_k)}{V} \qquad (۱۲)$$

1) Point of Common Coupling

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

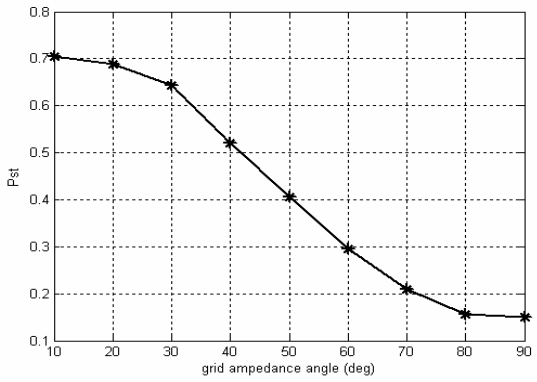
که در آن S توان ظاهری توربین ($S=\sqrt{P^2+Q^2}$)، V ولتاژ نقطه PCC ، Z امپدانس شبکه، ψ_k زاویه امپدانس شبکه و θ زاویه ضریب توان توربین($\theta=\tan^{-1}(\frac{Q}{P})$) می‌باشد. با توجه به رابطه (۱۲) میزان تغییرات ولتاژ با امپدانس شبکه و توان ظاهری توربین رابطه مستقیم دارد.

شکل (۱۱) تغییرات شدت فلیکر کوتاه مدت با ظرفیت اتصال کوتاه شبکه را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده شدت فلیکر با افزایش ظرفیت اتصال کوتاه شبکه کاهش می‌یابد. علت این امر این است که ظرفیت اتصال کوتاه شبکه با امپدانس شبکه رابطه عکس دارد. در نتیجه با توجه به رابطه (۱۲) با افزایش ظرفیت اتصال کوتاه شبکه، تغییرات ولتاژ کاهش یافته و به واسطه آن شدت فلیکر نیز کاهش می‌یابد.



شکل (۱۱) : تغییرات شدت فلیکر کوتاه‌مدت با ظرفیت اتصال کوتاه شبکه ($\psi_k = 50°$ ، In = 10% ، V = 10m/s)

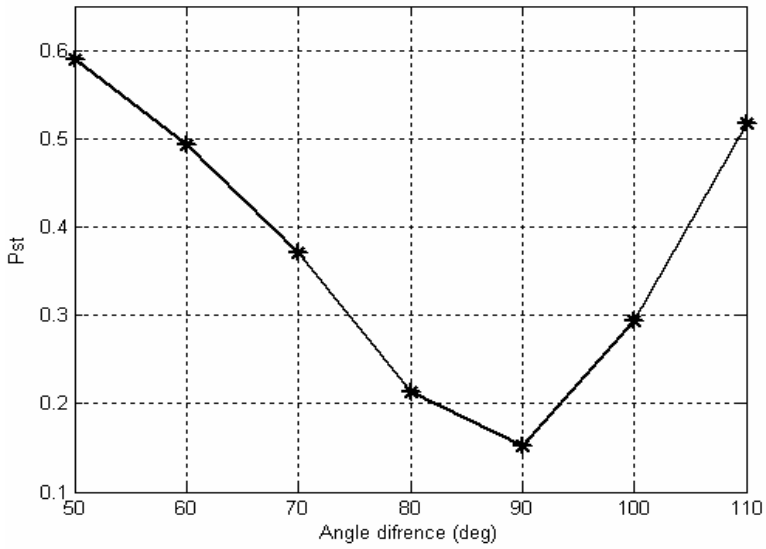
در شکل (۱۲) تغییرات شدت فلیکر کوتاه مدت با زاویه امپدانس شبکه نشان داده شده است. با توجه به شکل، با افزایش زاویه امپدانس شبکه میزان شدت فلیکر کاهش می‌یابد و کمترین میزان شدت فلیکر در زاویه امپدانس ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. از آنجا که توان راکتیو خروجی ژنراتور القایی بر روی صفر تنظیم شده است، زاویه ضریب توان ژنراتور تقریبا برابر صفرمی‌باشد. در نتیجه با توجه به رابطه (۱۲)، کمترین تغییرات ولتاژ هنگامی روی می‌دهد که زاویه امپدانس شبکه برابر ۹۰ درجه باشد.



شکل (۱۲) : تغییرات شدت فلیکر کوتاه‌مدت با زاویه امپدانس شبکه ($\psi_k = 50°$ ، In = 10% ، V = 10m/s)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

همچنین در شکل (۱۳) تغییرات شدت فلیکر با اختلاف زاویه بین زاویه امپدانس شبکه و زاویه ضریب توان ژنراتور نشان داده شده است. همان گونه که انتظار می‌رود، طبق رابطه (۱۱) هنگامی که اختلاف زاویه برابر ۹۰ درجه می‌گردد، شاهد پایین‌ترین شدت فلیکر هستیم.

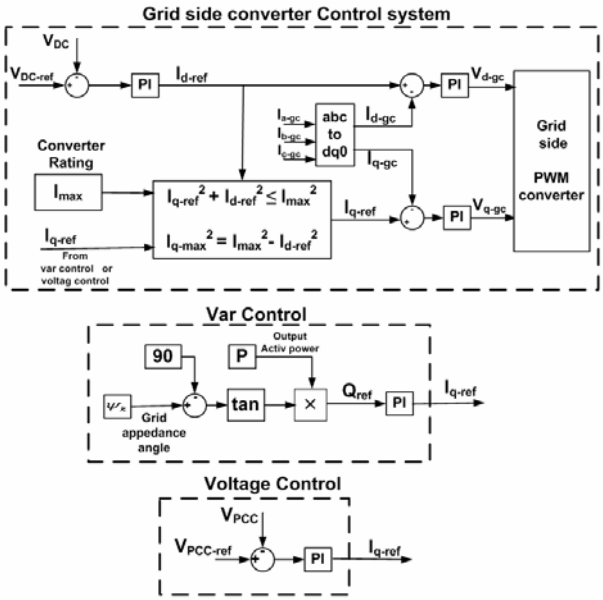


شکل (۱۳) : تغییرات شدت فلیکر کوتاه‌مدت با اختلاف زاویه ψ_k و θ ($V = 10m/s$، $In = 10\%$، $\psi_k = 67.5°$)

بهبود فلیکر با استفاده از کانورتر طرف شبکه

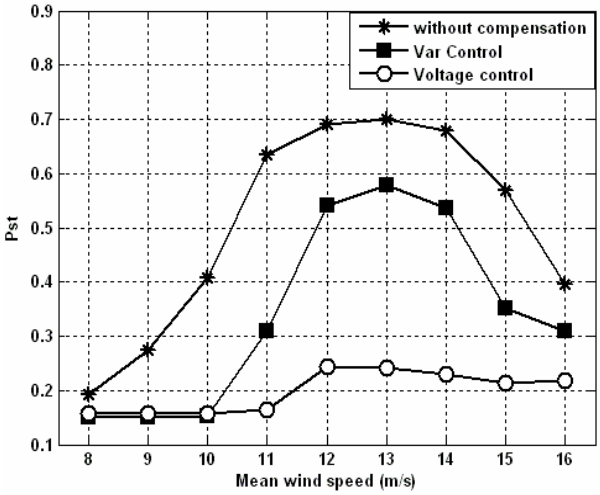
در این مقاله، برای بهبود فلیکر از کنترل توان راکتیو خروجی توربین استفاده شده است. کنترل توان راکتیو خروجی توربین از طریق کنترل جریان کانورتر طرف شبکه ژنراتور نجام می‌پذیرد. همان گونه که در بخش سوم اشاره شد، مؤلفه d جریان این کانورتر برای انتقال توان اکتیو و ثابت نگه داشتن ولتاژ باس DC استفاده می‌شود. از جریان مؤلفه q نیز می‌توان برای کنترل توان راکتیو استفاده کرد. در این مقاله دو روش برای کنترل جریان مؤلفه q کانورتر طرف شبکه و بالطبع کنترل توان راکتیو خروجی توربین ارائه گردیده است. روش اول روش کنترل وار و روش دوم روش کنترل ولتاژ می باشد. در روش اول توان راکتیو خروجی به گونه‌ای کنترل می‌گردد که اختلاف زاویه بین زاویه ضریب توان توربین و زاویه امپدانس شبکه $(\theta - \psi_k)$، برابر ۹۰ درجه گردد تا طبق رابطه (۱۲) تغییرات ولتاژ برابر صفر گردد. روش دوم نیز با مقایسه ولتاژ نقطه PCC با یک ولتاژ مرجع میزان جریان مؤلفه q کانورتر طرف شبکه و توان راکتیو خروجی توربین را کنترل می‌کند. بلوک دیاگرام این دو روش به همراه سیستم کنترل انورتر طرف شبکه در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



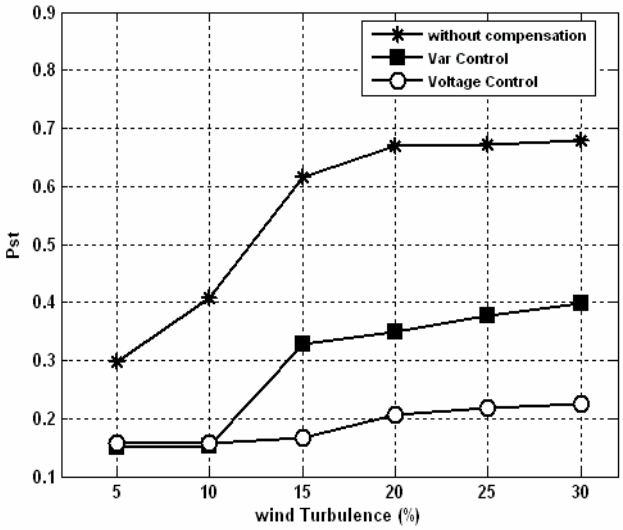
شکل (۱۴) : بلوک دیاگرام کنترل کانورتر طرف شبکه

در شکل (۱۵) شدت فلیکر کوتاه مدت در سرعت‌های مختلف باد، قبل و بعد از اعمال سیستم کنترل پیشنهادی، آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌گردد عملکرد روش کنترل ولتاژ در سرعتهای بالای باد بهتر از روش کنترل وار می‌باشد. در شکل (۱۶) شدت فلیکر برای اغتشاشات مختلف باد آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌گردد سیستم کنترل ولتاژ نسبت به سیستم کنترل وار یا توان راکتیو، در کاهش شدت فلیکر عملکرد بهتری دارد. در سرعت و اغتشاشات پایین باد عملکرد دو روش ارائه شده تقریبا مشابه می باشد.



شکل (۱۵) : شدت فلیکر کوتاه‌مدت در سرعتهای مختلف باد ($\psi_k = 50°$ ، Scr = 20، In = 10%)

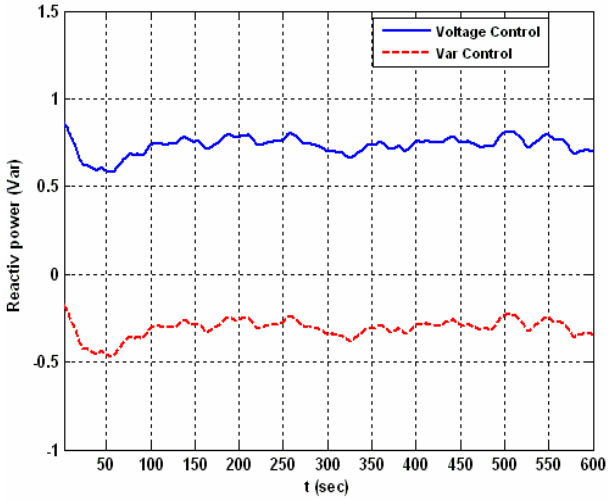
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]



شکل (۱۶) : شدت فلیکر کوتاه‌مدت در اغتشاشات مختلف باد

($\psi_k = 50°$ ، Scr = 20 ، V = 10m/s)

در شکل (۱۷) توان راکتیو تحویلی به شبکه توسط توربین در دو روش ارائه شده نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌گردد در روش کنترل ولتاژ توان راکتیو به شبکه تحویل داده می‌شود ولی در روش کنترل وار توان راکتیو از شبکه جذب می‌گردد. لازم به ذکر است که میزان ولتاژ مرجع در روش کنترل ولتاژ برابر 1.05pu در نظر گرفته شده است.

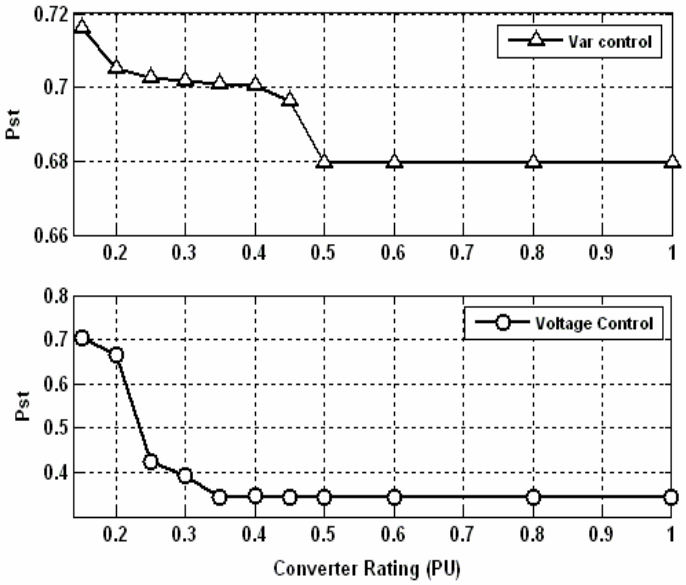


شکل(۱۷) :توان راکتیو تحویلی به شبکه در دو روش ارائه شده

($\psi_k = 50°$ ، Scr = 20 ، In = 10% , V = 10m/s)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

در شکل (۱۸) میزان تغیرات شدت فلیکر کوتاه مدت در شرایط (In = 20% , V = 13m/s)، نسبت به ظرفیت‌های مختلف کانورتر نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌گردد با افزایش میزان ظرفیت کانورتر، شدت فلیکر کاهش می‌یابد.



شکل(۱۸) : شدت فلیکر در ریتینگ‌های مختلف کانورتر
($\psi_k = 50°$ ، Scr = 20 ، In = 20% , V = 13m/s)

نتیجه‌گیری

در این مقاله انتشار فلیکر توربین‌های بادی سرعت متغیر DFIG مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر عواملی چون سرعت متوسط باد، میزان اغتشاشات باد، ظرفیت اتصال کوتاه شبکه و زاویه امپدانس شبکه بر میزان انتشار فلیکر این نوع توربین‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. در این مقاله نشان داده شد که میزان شدت فلیکر، در سرعت‌های پایین باد با افزایش سرعت متوسط باد افزایش می‌یابد ولی در سرعتهای بالای باد (بالاتر از 13m/s)، با افزایش سرعت باد شدت فلیکر کاهش می‌یابد. همچنین شدت فلیکر با میزان اغتشاشات باد رابطه مستقیم و با ظرفیت اتصال کوتاه شبکه رابطه عکس دارد. شدت فلیکر با کسینوس اختلاف زاویه بین زاویه امپدانس شبکه و زاویه ضریب توان توربین نیز رابطه مستقیم دارد. همچنین با استفاده از کنترل توان راکتیو خروجی توربین، از طریق کانورتر طرف شبکه توربین، با دو روش کنترل ولتاژ و کنترل وار، میزان شدت فلیکر کاهش داده شد. روش کنترل ولتاژ نسبت به روش کنترل وار در میزان بهبود فلیکر، میزان توان راکتیو مصرفی و ریتینگ مورد نیاز کانورتر دارای عملکرد بهتری می‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]

منابع

[1] Tao Sun, Zed Chen, "Flicker study on variable speed wind turbines with Doubly Fed Induction Generators", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 20, No. 4, December 2005, pp. 896-905.

[2] L. Rossetto , P.Tenti, and A. Zuccato, "Electromagnetic compatibility issues in industrial equipment," IEEE lnd.Appl.Mag., vol. 5 No..6, pp.34-46, Nov./Dec. 1999.

[3] A.Larsson, "Flicker emission of wind turbines during continuous operation," IEEE Tran. Enargy Convers., vol. 17, No.1, pp. 114-118, Mar. 2002

[4] T. Sun, Z. Chen, F. Blaabjerg, "Flicker mitigation of grid connected wind Turbine using STATCOM", Second International conference on power electronic and drive (PEMD 2004), April 2004.

[5] E. Tremblay, A. Chandra, "Grid-Side converter control of DFIG wind turbine to enhance power quality of distribution network", Power Engineering Society General Meeting IEEE, Juan 2006.

[6] Ted Brekken, Ned Mohan, "Control of a Doubly Fed Induction Generator under unbalanced grid voltage conditions", IEEE Transaction on Energy Conversion,Volume 22, Issue 1, March 2007 Page(s):129 – 135.

[7] B. Toufik, M. Machmoum, "Doubly Fed Induction Generator with active filtering function for wind energy conversion system", European Conference on Power Electronics and Application, Sept. 2005.

[8] Mehdi T. Abolhassani, Hamid A. Toliyat, Prasad Enjeti, "Stator Flux Oriented Control of an Integrated Alternator/Active Filter for wind power applications", IEEE International conference on power electronic and drive (IEMDC 2003), June 2003.

[9] L. Ran, J.R. Bumby, P.J. Tavner, "Use of turbine inertia for power smoothing of turbines with a DFIG", 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Sept. 2004.

[10] P. Søerensen, A. D. Hansen, "Renewable energy sources and power fluctuations from wind farm", Journal of Wind Energy, Vol. 90, pp. 1381-1402, 2002.

[11] P. Rosas, "Dynamic influence of wind power on power system", Risø-R-1408 (EN), March 2003.

[12] F. Iov, A. D. Hansen, F. Blaabjerg, "Wind turbine blockset in Matlab/Simulink ", Aalborg University, Denmark, March 2004.

[13] R. Cardenas , G. Asher , "MRAS Observer for Sensorless Control of Standalone Doubly Fed Induction Generators", IEEE Trans. on energy conversion , Vol.20, No.4, Des. 2005.

[14] Electromagnetic Compatibility (EMC)-Part 4: Testing and Measurement Techniques- Section 15: Flickermeter-Function and Design Specifications, IEC Std. 61000-4-15, Nov. 1997.

[15] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkinse, E.Bossanyi, "Wind Energy Hand book", NewYork : Wiley, 2001.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-16]