مقایسه توپولوژیهای مختلف تولید برق بادی و اثرات آنها بر شبکه های ضعیف

دکتر محمد رضا فیضی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر – دانشگاه تبریز
feyzi@tabrizu.ac.ir

مهندس حیدرعلی رئیسی
دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی برق، دانشگاه تبریز
h_raisi@yahoo.com

کلمات کلیدی: انرژی‌های نو، توربین بادی، کیفیت ولتاژ

چکیده: در سالهای اخیربه‌دلیل کمبود سوخت‌های فسیلی وافزایش آلودگی محیط زیست استفاده از انرژی‌های نو مانند انرژی باد، نورخورشید و ژئوترمال رشد سریعی داشته است. انرژی باد به‌دلیل سهولت دسترسی و همچنین هزینه پایین تولید برق بادی به‌ازای هر کیلووات بیشترین میزان تولید را به خود اختصاص داده است. در اینجا با معرفی توپولوژیهای مختلف تولید برق بادی برخی از مشکلات ایجاد شده توسط آنها در شبکه های ضعیف بررسی شده است.

۱ مقدمه

توان تولیدی توسط مزارع بادی بین سال های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ میلادی از ۲۰۰۰ مگاوات به مقدار ۱۶۰۰۰ مگاوات رسیده و با این رشد سریع انتظار می رود که توان تولیدی مزارع بادی در سال ۲۰۱۰ میلادی به مقدار ۵۰۰۰۰ مگاوات برسد.

مهمترین دلایل تسریع رشد توان تولیدی توسط واحدهای بادی عبارت اند از:

الف) ملاحظات زیست محیطی: معاهده کیوتو که در زمینه انتشار گازهای گلخانه ای که عمدتاً ناشی از سوختهای فسیلی می باشند محدودیتهائی را وضع کرده است.

ب) بهره‌وری اقتصادی بالای مزارع بادی جدید: به‌منظور بهره‌برداری اقتصادی، توربین های بادی باید در مناطق بادخیز نصب شوند. مکانهای مناسب برای نصب مزارع بادی معمولاً در نقاط دور افتاده قرار دارند که در آنها شبکه های محلی ضعیفی ایجاد شده است. در این تحقیق ابتدا توپولوژیهای متفاوت برق بادی و سپس مشکلات فنی اتصال واحدهای تولید برق بادی به شبکه های ضعیف مورد بررسی قرار گرفته‌است.

برای سیستمهای برق بادی می توان ترکیبهای مختلفی از توربین و ژنراتور را استفاده کرد[۱] که در زیر چهار توپولوژی که در اغلب موارد به کار می رود توضیح داده شده است:

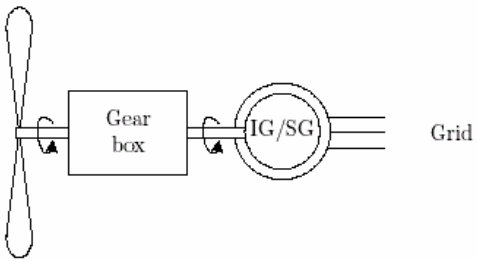
۱-۱ سیستم سرعت ثابت

در یک سیستم سرعت ثابت ژنراتور القائی مطابق شکل۱ مستقیماً به شبکه الکتریکی وصل می‌شود. سرعت روتور در این سیستم توسط یک جعبه دنده و تعداد قطبهای ژنراتور تنظیم می‌شود در این سیستمها معمولاً از دو ژنراتور القائی استفاده می‌شود؛ یکی برای سرعت کم باد (سرعت سنکرون کمتر) و دیگری برای باد با سرعت زیاد (با سرعت سنکرون بیشتر). این سیستم از سال ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ در مزارع بادی احداث شده در دانمارک به‌طور وسیع استفاده شده است.

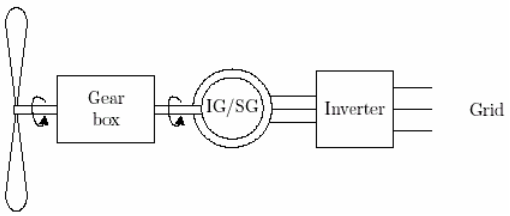
این سیستم برای سرعتهای پائین شفت طراحی شده‌است که در این قسمت منحنی‌های توان برای سرعت‌های متفاوت باد به هم نزدیک می‌باشند و بنابر این یک حفاظت طبیعی در برابر اضافه بار و لغزش زیاد وجوددارد اما بهره برداری از ژنراتور ضعیف است. توان راکتیو پس فازماشین القایی با استفاده از یک بانک خازنی بزرگ که به ترمینال‌های ماشین متصل شده‌است جبران سازی می‌شود سوئیچ‌زنی بانک خازنی شکل موج‌های گذرای نامطلوب و غیر منتظره در شکل موج ولتاژ و جریان ایجاد می‌کند. به‌منظور افزایش توان تولیدی ژنراتور تحت شرایطی که شدت وزش باد کم است یک سیم پیچ دیگر با توان کمترو سرعت سنکرون پایین‌تربه ماشین اضافه شده‌است. کنترلر با توجه به شرایط باد از یک سیم‌پیچ به یک سیم‌پیچ دیگر سوئیچ می‌کند. این مشخصه، ماشین را به شکل غیراستاندارد و گران درمی‌آورد. هم‌چنین جریان بی‌باری در این سیستم برای ژنراتوراصلی مقداربالایی می باشد.

۱-۲ سیستم با سرعت متغیر (بدون محدودیت سرعت)

در این سیستم که در شکل ۲ نشان داده شده است ژنراتور توسط یک اینورتر به شبکه وصل می‌شود ژنراتور می تواند ژنراتور القائی با تغذیه تکی ویا ژنراتور سنکرون باشد. جعبه دنده به‌گونه‌ای طراحی می شود که حداکثر سرعت روتور برابر با سرعت نامی ژنراتور باشد. در این سیستم سرعت روتور از صفر تا سرعت نامی می‌تواند تغییر کند. مزیت این سیستم‌ها توسعه یافتگی خوب آنها و کنترل مقاوم می‌باشد. یک سیستم با سرعت متغیر، جذب توانی بهتری نسبت به سیستم با سرعت ثابت دارد اما به دلیل استفاده از اینورتر راه اندازی این سیستم هزینه بالاتری نسبت به سیستم سرعت ثابت دارد.محدودیتهای توان با توجه به انتخاب ژنراتور مشخص می‌شوند در حالی که محدودیت سرعت با توجه به طراحی توربین و برج سیستم مشخص می‌شود. میتوان ژنراتور را با استفاده از سرعت متوسط باد در فصلی که بیشترین مقدار سرعت را دارد انتخاب کرد.



شکل۱ سیستم سرعت ثابت



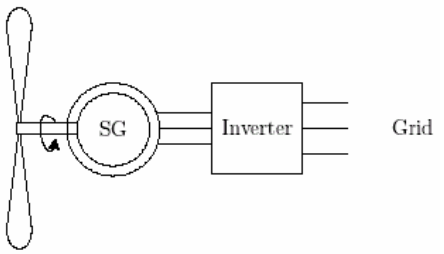
شکل۲ سیستم با سرعت متغیر

۱-۳ سیستم با تغییرات سرعت نامحدود و ژنراتورهای با تعداد قطب زیاد

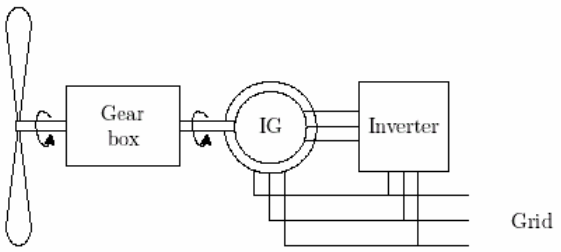
در این روش ژنراتور سنکرون معمولی یا ژنراتور سنکرون با مغناطیس دائم با تعداد قطبهای زیاد استفاده می‌شود و در نتیجه نیازی به جعبه دنده وجود ندارد (شکل ۳). سیستم با ژنراتور با مغناطیس دائم نیز فوائد توسعه یافتگی خوب و کنترل مقاوم را در بر دارد. شرکت Enercon از این روش برای تولید توربین بادی استفاده کرده است. از این سیستم به طور محدود استفاده می شود.

۱-۴ سیستم با سرعت متغیر (تغییرات سرعت محدود)

در این سیستم که در شکل ۴ نشان داده شده‌است از یک توربین بادی و یک ژنراتور القائی با سرعت متغیر و فرکانس ثابت (ژنراتور القائی با تغذیه دو گانه) استفاده می‌شود. در این حالت مدار روتورتوانائی انتقال دوطرفه توان را دارد که اجازه عملکرد درحالتهای زیر سنکرون وبالای سنکرون را به‌ماشین می‌دهد. مدار روتور درحالت زیرسنکرون بخشی از توان تولیدی توسط استاتور را جذب می‌کند در حالی‌که در شرایط بالای سنکرون هر دو مدار استاتور و روتور توان به شبکه تزریق می‌کنند. استاتور مستقیماً به شبکه الکتریکی وصل می‌شود و روتور با استفاده ازحلقه‌های لغزان واز طریق یک اینورتر به‌شبکه وصل می‌شود.



شکل۳ سیستم با تغییرات سرعت نامحدود و ژنراتورهای با تعداد قطب زیاد



شکل٤ سیستم با سرعت متغیر (تغییرات سرعت محدود)

اندازه اینورتر به محدوده تغییرات سرعت بستگی دارد و معمولا تغییرات سرعت در محدوده کوچکی حول سرعت سنکرون در نظر گرفته می‌شود. جعبه دنده به گونه‌ای طراحی می‌شود که سرعت نامی ژنراتور برابر با حد وسط تغییرات سرعت توربین بادی باشد، این عمل برای کوچک کردن اندازه اینورتر صورت می‌گیرد. می‌شود که سرعت نامی ژنراتور برابر با حد وسط تغییرات سرعت توربین بادی باشد، این عمل برای کوچک کردن اندازه اینورتر صورت می‌گیرد. در این سیستم روابط توان روتور و استاتور به شکل زیر می باشند[۲]:

$$P_{stator} = \frac{P_{grid}}{1-s} = \frac{\eta_{gen.} P_{mec.}}{1-s} \qquad (۱)$$

$$P_{rotor} = -sP_{stator}$$

که در آن‌ها s میزان لغزش، P_{grid} توان تحویلی به شبکه، $P_{mec.}$ توان مکانیکی تحویلی به ژنراتور و $\eta_{gen.}$ رانلمان ژنراتور می‌باشد.

با استفاده از اینورتر، سرعت و توان راکتیو استاتور ژنراتور القائی قابل کنترل است. می‌توان نسبت دور روتور به استاتور را به شکلی تنظیم کرد که حداکثر ولتاژ اینورتر (که وابسته به ولتاژ روتور می‌باشد) در بیشترین لغزش پدیدار شود و در نتیجه اندازه اینورتروتلفات آن کاهش یابد. با انتخاب سطح ولتاژ بالاتر برای استاتور نسبت به روتور نتیجه مشابه حاصل می‌شود.

در این سیستم اندازه کنورتور به شدت کاهش یافته‌است درنتیجه ولتاژپایین تری به قطعات اعمال می‌شود.شاراستاتور برای کلیه ناحیه عملکردثابت است در نتیجه می‌توان گشتاور ماشین را در مقدار نامی خود در سرعتهای بالاتراز سرعت سنکرون ثابت کرد که باعث تولید توان بالاتری در حالت بالای

سنکرون می‌شود. اگر این سیستم با سیستم روتور قفس سنجابی با همین ابعاد ژنراتور مقایسه شود این نتیجه حاصل می‌شود که بهره برداری از ماشین به شدت بهبود یافته است و به یک ولتاژ dc پایینتری نیاز است که منجر به کاهش ولتاژ بانک خازنی و در نتیجه کاهش هزینه می‌شود.

۲ جذب انرژی

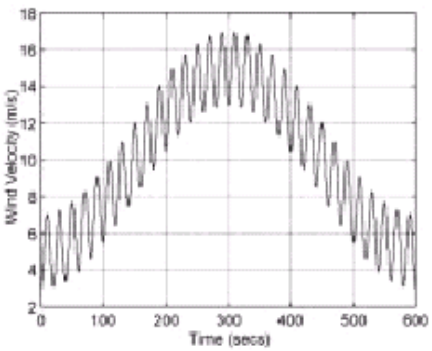
برای مقایسه جذب انرژی در سه سیستم از یک مدل ساده شده الکترومکانیکی استفاده شده و شبیه سازی با نرم افزارsimulink انجام گرفته است. در حین شبیه سازی محدودیتهای سرعت و توان اعمال شده‌اند. درمورد سیستمهای شامل کنورتر فرض شده است که پاسخ دینامیکی کنترلر گشتاور بسیار سریعتر از ثابت زمانی مکانیکی سیستم است و بنابراین دینامیک حلقه کنترل جریان در نظر گرفته نشده‌است. همچنین گشتاور تولیدی برابرمقدار نامی درنظرگرفته شده‌است[۳].

برای ارزیابی مؤثر عملکرد سیستم، سیستمها باید در کل محدوده تغییرات باد مورد ارزیابی قرار گیرند تا همه محدودیتها مشخص شود. به این منظور برای سرعت باد تابع زیر که در شکل ۵ قابل مشاهده است در نظر گرفته شده است:

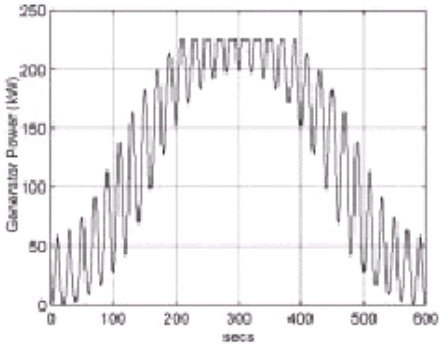
$$V_w = 10 - 2\cos(\frac{2\pi}{20})t - 5\cos(\frac{2\pi}{600}) \qquad (۲)$$

۲-۱ سیستم با سرعت ثابت

از آنجا که سرعت سیستم ثابت است در انرژی ذخیره شده سیستم هیچ تغییری رخ نمی دهد و اینرسی پره‌های توربین اثری ندارد. با چشم پوشی ازتلفات، توان ژنراتور و توربین یکسان می‌باشند. کل انرژی خروجی ناشی از تابع معرفی شده برای باد در یک بازه زمانی ده دقیقه ای *kWh* ۲۱/۵ می‌باشد. شکل ٦ توان تولیدی ژنراتور را نشان می‌دهد.



شکل۵ نمودار تابع سرعت باد



شکل۶ توان تولیدی ژنراتور

۲-۲ سیستم با سرعت متغیر و ژنراتور القائی با روتور قفس سنجابی

انرژی تولید شده ناشی از تابع معین شده برای باد در طول ده دقیقه ۲۸/۵Kwh می باشد که نسبت به سیستم سرعت ثابت ۳۲/۵٪ افزایش داشته است. شکل ۷ توان تولیدی ژنراتور را نشان می‌دهد.

۲-۳ سیستم سرعت متغیر و ژنراتور القائی با روتور سیم پیچی شده

مشاهده می‌شود انرژی خروجی ناشی از تابع تعریف شده برای باد در مدت زمان ۱۰ دقیقه برابر ۳۵kWh است. این مقدار نسبت به سیستم سرعت متغیر با ژنراتور القائی روتور قفس سنجابی۲۲٪ و نسبت به سیستم سرعت ثابت ٦۲/۷٪ افزایش نشان می‌دهد. شکل ۸ توان تولیدی استاتور، شکل ۹ توان تولیدی روتور وشکل ۱۰ کل توان تولیدی را نشان می‌دهد. نتایج مقایسه این سیستم‌ها در جدول ۱ قابل مشاهده است[۲].

جدول ۱ مقایسه سیستم‌های مختلف

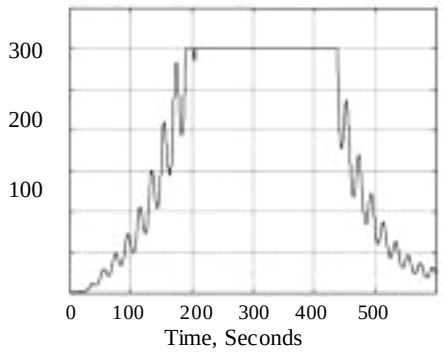
	سیستم سرعت ثابت با ژنراتور القائی قفس سنجابی	سیستم سرعت متغیر با ژنراتور القائی قفس سنجابی	سیستم سرعت متغیر با ژنراتور القائی تغذیه دو گانه
نوع توربین	V 27	V 27	V 27
ژنراتور	ژنراتور القائی قفس سنجابی با دو سیم‌پیچی، اصلی: ٤١٥ V، kw ٢٢٥، ٦قطبی کمکی: ٤١٥V، ٨ قطبی	ژنراتور القائی قفس سنجابی ٤١٥V، ٣٠٠ kW، ٦ قطبی	ژنراتور القائی با روتور سیم‌پیچی شده، ٤١٥V، ٣٠٠ kW ٦ قطبی
جعبه دنده	٢٣،٤:١	١٣،٣:١	١٣،٣:١
کنورتر	ندارد	IGBT ١٢٠٠KVA, ٣٧٥ v modules	IGBT ١٢٠٠KVA, ٣٧٥ v modules
ولتاژ شین dc	ندارد	٧٥٠ v	٣٧٥ v
خازن شین dc	ندارد	١٩٨٠٠ uf	١٩٨٠٠ uf
ترانسفورماتور	٤١٥kv:٦،٦kVA, ٢٢٠ v	٤١٥kv:٦،٦kVA, ٣٧٥ v	٢٠٨v/٤١٥kv:٦،٦kVA, ٥٦٠ v
حداکثر توان جذب شده	٢٢٥ kw	٣٠٠ kw	٤٥٠ kw
محدوده سرعت (شفت ژنراتور)	٧٥٠ rpm/١٠٠٠ rpm ثابت	٠–١٥٠٠ rpm	٥٠٠–١٥٠٠ rpm

۳ مشکلات سیستم برق بادی در شبکه ضعیف

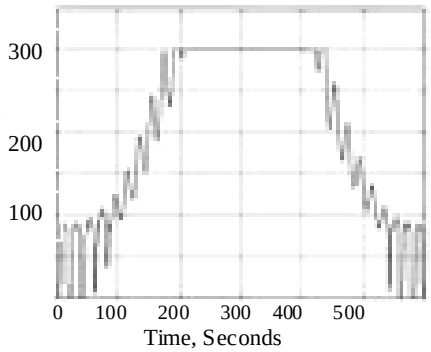
اتصال سیستم‌های برق بادی با محدودیت‌هایی روبرو می باشد که از آجمله می توان به محدودیتهای کیفیت ولتاژ، محدودیتهای حرارتی و پایداری، و نیز در صورت مستقل و جدا بودن شبکه مساله کنترل فرکانس اشاره کرد. در اینجا فرض شده که شبکه محلی به یک شبکه قوی متصل شده است و در نتیجه مزارع بادی تاثیر چشمگیری بر روی فرکانس ندارد.

استاندارد EN 50160 [۴] مشخصات یک ولتاژ مناسب را از نظر کیفیت برای مصرف کننده در زمان کار عادی سیستم توصیف می کند. این مشخصات با حضور واحدهای برق بادی دچار تغییرات محسوس می‌شوند. مهمترین مشکلات مرتبط با مساله کیفیت ولتاژ را می توان به سه بخش flicker ، افت ناگهانی و سریع ولتاژ (Voltage Dips)، و ایجاد هارمونیک تقسیم کرد. هریک از این مشکلات به‌اختصار در زیر شرح داده شده‌اند.

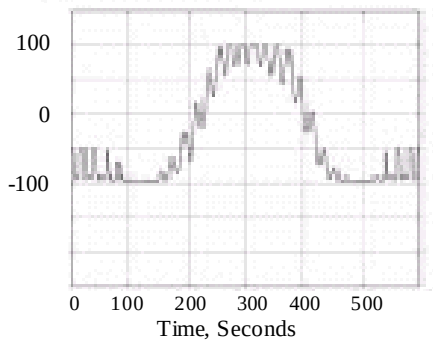
فلیکر (Flicker): به تغییرات ضعیف ولتاژ که معمولاً باعث سوسوزدن نور لامپهای روشنائی می شوند فلیکر گفته می‌شود. طبق استاندارد EN50160 شدت فلیکر طولانی مدت ولتاژ در ۹۵٪ اوقات یک هفته باید از یک کمتر باشد و برای رسیدن به این نتیجه باید سهم کمتری از تولید توان به منابعی که انتشار فلیکر آنها بالامی‌باشد اختصاص داده شود. برای توربین های بادی این مساله هم در لحظه راه اندازی و هم در حین کار عادی وجود دارد.



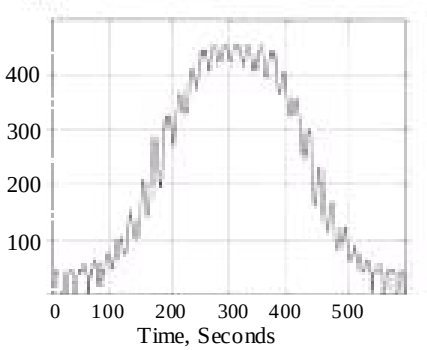
شکل۷ توان تولیدی ژنراتور(kw)



شکل۸ توان تولیدی استاتور(kw)



شکل۹ توان تولیدی روتور(kw)



شکل۱۰ کل توان تولیدی(kw)

به منظور ارزیابی انتشار فلیکر ناشی از راه اندازی برای هر توربین بادی یک مشخصه با نام ضریب گام فلیکر $K_f(\psi_k)$ در نظر گرفته می‌شود و مقدار آن برابر مقدار نرمالیزه انتشار فلیکر در اثر راه‌اندازی در بدترین حالت می باشد. با فرض اینکه حداکثر تعداد راه اندازیها در دو دوره ۱۰ و ۲۰ دقیقه ای که به ترتیب با N_{10} و N_{120} نمایش داده می‌شوند مشخص باشد از دو رابطه ۱ و ۲ انتشار کوتاه مدت (P_{st}) و انتشار بلند(P_{lt}) فلیکر برای مزارع بادی قابل محاسبه است.

$$P_{st} = \frac{18}{S_k}\left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{10i}\left(K_{fi}(\psi_k).S_{ni}\right)^{\frac{3}{2}}\right)^{0.31} \qquad (۳)$$

$$P_{lt} = \frac{8}{S_k}\left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{120i}\left(K_{fi}(\psi_k).S_{ni}\right)^{\frac{3}{2}}\right)^{0.31} \qquad (۴)$$

که در این روابط N_{wt} تعداد توربینهای بادی، S_k سطح اتصال کوتاه شبکه و S_{ni} سطح اتصال کوتاه توربین i ام می‌باشد. برای محاسبه انتشار فلیکر در حین کار عادی برای هر توربین، یک ثابت فلیکر $C(\psi_k, v_a)$ در نظر گرفته می‌شود که برابر اندازه نرمالیزه حداکثر انتشار فلیکر در حالت کار عادی است. در این حالت اندازه انتشار کوتاه مدت و بلند مدت فلیکر با هم برابر و از رابطه زیر قابل محاسبه‌اند.

$$P_{st} = P_{lt} = \frac{1}{S_k}\left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} (C_{fi}(\psi_k, v_a).S_{ni})^2\right)^{0.31} \qquad (۵)$$

محدودیتهای انتشار فلیکر در یک شبکه از استاندارد IEC 61400-21 [۵] قابل محاسبه است. در هنگام توسعه مزارع بادی محدودیتهای انتشار فلیکر باید مد نظر قرارگیرد.

برای کاهش انتشار فلیکر می‌توان از توربینهای با K_f و C پائین‌تر استفاده کرد.

کاهش ناگهانی ولتاژ (Voltage Dips): منظور از Voltage Dips یک کاهش ناگهانی در اندازه ولتاژ به میزان ۰/۱Pu تا ۰/۹pu و سپس بازگشت ولتاژ به حالت اولیه خود در یک مدت زمانی بین ۱ میلی ثانیه تا یک دقیقه می باشد. این پدیده می تواند از ۱۰ تا ۱۰۰۰ بار در سال رخ دهد. توربین بادی در زمان راه اندازی می‌تواند باعث ایجاد این پدیده شود.

برای هر توربین بادی یک ضریب تغییر ولتاژ $K_u(\psi_\kappa)$ در نظر گرفته می شود که با استفاده از آن کاهش ناگهانی ولتاژ ناشی از راه اندازی توربین طبق رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$d = 100.K_u(\psi_K).\frac{S_n}{S_K} \qquad (۶)$$

که در آن S_n سطح اتصال کوتاه مزرعه بادی می باشد.

در اکثر مزارع بادی توربینها به صورت همزمان راه اندازی می شوند. به‌همین دلیل این رابطه به تعداد توربینها بستگی ندارد. در هنگام نصب و یا توسعه مزارع بادی باید دقت شود که مقدار d از محدودیت‌های مطرح شده توسط استاندارد EN50160 بیشتر نشود.

ایجاد هارمونیک: طبق استاندارد EN50160 حداثر تا هارمونیک مرتبه ۲۵ می‌تواند در شبکه انتشار یابد و THD شبکه برای هارمونیک های تا مرتبه ٤٠ نباید از ۸ درصد تجاوز کند. این محدودیتها منجر به محدودیت‌هایی در انتشار هارمونیک جریان در شبکه خواهند شد که به مشخصات شبکه وابسته اند و توسط استاندارد IEC61000-36 [۶] قابل محاسبه هستند. توربین بادی با سرعت ثابت و ژنراتور القائی که مستقیماً به شبکه وصل شده‌باشد تاثیر زیادی بر روی شکل موج ولتاژ شبکه ندارد اما در صورت استفاده از راه اندازی های الکترونیکی (Soft Starter) برای این توربین‌ها باید محدودیتهای هارمونیک ولتاژ در نظر گرفته شود.

برای توربینهای بادی سرعت متغیر که در آنها از کنورترها به شکل گسترده استفاده می شود مساله انتشار هارمونیک اهمیت بیشتری می‌یابد زیرا به علت خاصیت کلید زنی این کنورترها، هارمونیک های جریان زیادی تولید خواهندشد که بر روی ولتاژ اثر می گذارند. برای رفع این مشکل می توان از فرکانس کلید زنی بالاتر از $3\,kHz$ استفاده کرد.

۴ نتیجه گیری

سیستمهای مختلف نیروگاه‌های بادی مورد مطالعه قرار گرفت و مزایا و معایب هریک مورد بحث و بررسی قرار گرفت مقایسه سیستمهای مختلف نشان داد که سیستم سرعت متغیر با ژنراتور القائی روتور سیم‌پیچی شده با وجود هزینه بالای نصب به‌دلیل جذب انرژی بالاتر از بقیه سیستمها در شرایط یکسان و همچنین تأثیر چشمگیر سیستم کنترلی آن بر کیفیت ولتاژ شبکه بهترین سیستم برای نصب در مزارع بادی می‌باشد.

۵ مراجع

[1] Anca d Hansen, "Overall control strategy of variable speed doubly-fed induction generator wind turbine"

[2] Rajib Data, "Variable-speed wind power generation using doubly fed wounded rotor induction machine" IEEE trans. on energy conversion, vol 17 pp 414-421, sept. 2002

[3] . A. Kazachkov, J. W. Feltes and R. Zavadil "Modeling Wind Farms for Power System Stability Studies", IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 13-17, 2003, Toronto, Canada

[4] EN 50160 (1995) "Voltage characteristic of electric supplied by public distribution system"

[5] IEC 61400-21(2001) "Measurement and assessment of power quality characteristic of grid connected wind turbine"

[6] IEC 61000-3-6 Part limit section6 "Assessment of emission limit for distorting load in MV and HV power system"