



PSC 2007

98-F-REN-153

طراحی، مدل سازی و بررسی عملکرد توربین بادی سرعت متغیر با بهره گیری از چاپگر مجهز به سلف ابرسانا

گئورگ قره پتیان

محمد منفرد

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (قطب علمی قدرت ایران)

تهران

واژه های کلیدی: توربین بادی سرعت متغیر، کنترل توان های اکتیو و راکتیو، استحصال حداکثر توان، سلف ابرسانا، اتصال dc

چکیده:

در این مقاله، پس از معرفی توربین های بادی سرعت متغیر، ایده پیشرفته ای برای مزارع بادی پیشنهاد شده و مفصلاً مورد مطالعه قرار گرفته است. بعلاوه، استفاده از سلف ابرسانا در ترکیب مبدل بوست در توپولوژی ارائه شده، پیشنهاد و امکان سنجی شده است. در ترکیب پیشنهادی، امکان انتقال توان dc از محل تولید تا محل مناسب برای اتصال به شبکه قوی ac و جمع زنراتورهای مزرعه بادی، بدون هزینه و یا تجهیز اضافی وجود دارد. الگوریتم موثری برای کنترل توان در جهت استحصال حداکثر توان اکتیو و حفظ ضریب قدرت و یا توان راکتیو در مقدار مورد نظر ارائه شده است. مدلسازی دقیق دینامیکی و شبیه سازی ها با استفاده از MATLAB/Simulink انجام شده است.

۱- مقدمه:

استفاده از باد به عنوان منبع پاک و رایگان تولید انرژی الکتریکی در حال گسترش روز افزون است و بر طبق پیش بینی ها تا سال ۲۰۲۰ میلادی ۱۰٪ کل برق جهان از انرژی باد استحصال خواهد شد و رشد سالانه تا سال ۲۰۴۰ بین ۱۰٪ تا ۴۰٪ خواهد بود. این رشد سریع، نیازمند دستیابی به استراتژی های جدید و بهبود یافته در بخش های تولید، انتقال و مدیریت منابع بادی در جهت افزایش راندمان، قابلیت اطمینان و کیفیت توان و کاهش هرچه بیشتر هزینه هاست. رشد سریع تکنولوژی نیمه هادی ها، استفاده از ادوات ذخیره ساز انرژی همچون باتری، سوپرکازن، چرخ طیار و سلف ذخیره ساز ابرسانا و پیشرفت های اخیر در زمینه ساخت زنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم، نقش اصلی را در تعیین استراتژی های نوین بهره برداری از منابع انرژی بادی بر عهده دارند. بعلاوه، تکنولوژی های جدید مبتنی بر مبدل های

استحصال می‌کنند. کنترل توان تزریقی اکتیو و راکتیو نیز به سادگی امکان‌پذیر است، THD را می‌توان کنترل کرد و بعلاوه با توجه به ایزولاسیون بین شبکه قدرت و ژنراتور توربین بادی، استرس مکانیکی کاهش یافته و فلیکر نیز تا حد زیادی برطرف می‌شود. سیستم توانایی تحمل محدوده وسیع تغییرات ولتاژ و فرکانس شبکه را دارد و در صورت بروز خطا نیز ضربه گشتاوری در ژنراتور نداریم. از سوی دیگر، کنترل توان راکتیو، حتی امکان کنترل ولتاژ شبکه بوسیله توربین بادی را فراهم می‌کند [۱]، [۲]. نقطه ضعف اصلی این سیستم‌ها، نیازمندی به ادوات الکترونیک قدرت است که تعداد تجهیزات و هزینه سیستم را افزایش داده و کنترل را پیچیده‌تر می‌کند.

عملکرد سرعت متغیر توربین بادی به معنای مجزا کردن فرکانس مکانیکی روتور از فرکانس الکتریکی شبکه قدرت است. همانگونه که اشاره شد، این ایده با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت همچون مبدل‌های ترکیبی ac-dc-ac که بطرز پیچیده‌ای کنترل می‌شوند، عملی می‌گردد. ژنراتورهای القایی دو تحریکه ($DFIG^1$) هرچند تا حدی امکان این مجزاسازی و عملکرد سرعت متغیر را در بازه محدودی فراهم می‌کنند [۱]، [۲] و [۶]، اما آنچه مورد توجه ماست، عملکرد سرعت متغیر کامل، از سرعت صفر تا حداکثر، بوسیله مبدل‌های قدرت می‌باشد. همانگونه که در تصویر (۱) مشاهده می‌گردد، انرژی دریافتی از ژنراتور توسط یک مبدل منبع ولتاژی^۲ در یک باس dc یکسو شده و سپس بوسیله مبدل دیگری به انرژی ac مناسب برای شبکه تبدیل می‌شود. در این ترکیب، عموماً مبدل سمت ژنراتور با بهره‌گیری از الگوریتم‌های کنترل برداری، گشتاور ژنراتور را کنترل می‌کند؛ همچنین جریان مغناطیس‌کنندگی لازم برای ژنراتور القایی را نیز تامین می‌کند. مبدل سمت شبکه نیز توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه را کنترل می‌کند و میزان THD را در کمترین حد خود حفظ می‌کند. باس dc نیز وظیفه حفظ تعادل انرژی در هر لحظه را بر عهده دارد و سیگنال کنترلی

قدرت که امکان عملکرد سرعت متغیر توربین بادی را فراهم می‌کنند، به شدت مورد توجه هستند. تغییر سرعت توربین متناسب با سرعت باد وزشی، راندمان استحصال توان از باد را بهبود می‌بخشد [۱]، [۲]. هم‌اکنون این استراتژی‌ها مقرون به صرفه شده‌اند، لذا کاربردهای عملی آن‌ها نیز قابل توجه است. در این مقاله، پس از معرفی توربین‌های بادی سرعت متغیر، ایده نوینی برای مزارع بادی پیشنهاد شده و مفصلاً مورد مطالعه قرار گرفته است. بعلاوه، استفاده از سلف ابر رسانا در ترکیب مبدل بوست، پیشنهاد و امکان‌سنجی شده است. لذا در ادامه و در بخشهای آتی این مقاله، تکنولوژی امروزی توربین‌های بادی سرعت متغیر و سیستم جدید پیشنهادی ارائه می‌شوند. با توجه به پیشرفت چشمگیر در طراحی و تولید ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم دور پایین که به حذف جعبه دنده از سیستم مکانیکی توربین منجر می‌شود، در این کار از این ژنراتورها استفاده شده است. این راه حل، افزایش راندمان، کاهش نویز و سرو صدا و مزایای اقتصادی را به دنبال دارد [۳].

ایده استفاده از سلف ابر رسانا در توپولوژی مبدل بوست، مشکلات ناشی از نوسانات توان خروجی توربین را تا حد زیادی تعدیل کرده، ظرفیت مبدل‌های الکترونیک قدرت منبع ولتاژی را تا حد ظرفیت نامی توربین بادی کاهش داده و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهد [۴]. از سوی دیگر، با توجه به مشکلات اتصال توربین‌های بادی به شبکه‌های قدرت ac (که عموماً در محل اتصال مزارع بادی ضعیف هستند)، در ترکیب پیشنهادی امکان انتقال توان dc از محل تولید تا محل مناسب برای اتصال به شبکه ac قوی، بدون هزینه و یا تجهیز اضافی وجود دارد؛ علاوه بر اینکه این روش هزینه‌های انتقال، بخصوص هزینه کابل‌ها را نسبت به انتقال ac کاهش می‌دهد، در عین حال تجمیع تولید مزارع بادی بصورت dc مزایای تکنیکی نیز نسبت به تجمیع ac دارد [۵].

۲- توربین بادی سرعت متغیر، تکنولوژی کنونی:

توربین‌های بادی سرعت متغیر، در طول یک سال، حدود ۵٪ بیشتر از توربین‌های بادی سرعت ثابت، انرژی از باد

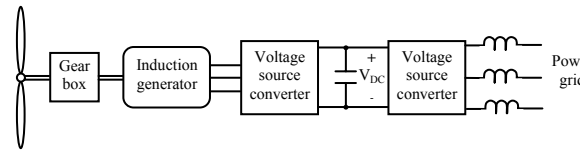
¹ Doubly Fed Induction Generator

² Voltage source converter (VSC)

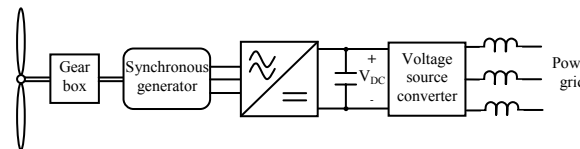
مناسبی، ولتاژ آن را در سطح معینی، ثابت حفظ می‌کند [۱]، [۲] و [۶]. گزینه دیگر، همانگونه که در تصویر (۲) مشاهده می‌شود، استفاده از ژنراتور سنکرون بجای ژنراتور القایی و جایگزینی مبدل سمت ژنراتور با یک یکسوساز پل دیودی ساده است. در این حالت، ولتاژ باس dc با کنترل میدان تحریک ژنراتور کنترل می‌گردد. هرچند هزینه و نیازهای کنترلی ژنراتور افزایش یافته، اما مبدل سمت ژنراتور ارزاتر و بدون نیاز به هر گونه سیستم کنترلی است [۷].

سطح نویز صوتی کاهش می‌یابد، تلفات سیستم مکانیکی کاهش یافته و طول عمر افزایش می‌یابد. همه این‌ها، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری را به دنبال دارد [۳]، [۸]. سه خازن فیلتر در پایانه‌های ژنراتور با تامین جریان خازنی برای ژنراتور، ظرفیت توان آن را افزایش داده و ولتاژ آنرا در مقابل تغییرات جریان پایدار می‌کنند. توان ac تولیدی بوسیله این ژنراتور، بوسیله مبدل پل دیودی به توان dc تبدیل می‌شود. این مبدل، ساده، مقاوم، ارزان و بدون نیاز به هرگونه مدار کنترلی است و در مقایسه با مبدل منبع ولتاژی بسیار ارزاتر است. از آنجا که با تغییر سرعت ژنراتور، دامنه ولتاژ تولیدی در سمت dc مبدل دیودی تغییر می‌کند، لذا یک چارپ افزاینده (مبدل بوست)، این ولتاژ را به سطح ولتاژ لینک dc اینورتر می‌رساند. با کنترل جریان کشیده شده بوسیله مبدل بوست، می‌توان گشتاور و در نتیجه سرعت ژنراتور را کنترل کرد. توجه شود که سلف بکار رفته در این مبدل از نوع ابررساناست. زمین کردن نقطه میانی بانک خازنی متقارن لینک dc تا حد قابل ملاحظه‌ای تداخلات الکترومغناطیسی را کاهش می‌دهد. پس از لینک dc ، یک چارپ ترمزی است که به هنگام افزایش ولتاژ لینک از مقدار حداکثر، انرژی اضافی را که ممکن است به تجهیزات صدمه برساند، تلف می‌کند. مبدل و یا اینورتر منبع ولتاژ، تبدیلی شش پالسه است که انرژی dc را به انرژی ac مناسب برای اتصال به شبکه قدرت تبدیل کرده و توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه را کنترل می‌کند. مدل مکانیکی-آیرودینامیکی توربین بادی استفاده شده در این مقاله بر اساس کار ارائه شده در [۹] است. در بخش‌های آتی، اجزای اساسی سیستم و منطق کنترل آن‌ها تشریح خواهد شد.

شکل ۱: توربین بادی سرعت متغیر، ژنراتور القایی



شکل ۱: توربین بادی سرعت متغیر، ژنراتور القایی



شکل ۲: توربین بادی سرعت متغیر، ژنراتور سنکرون

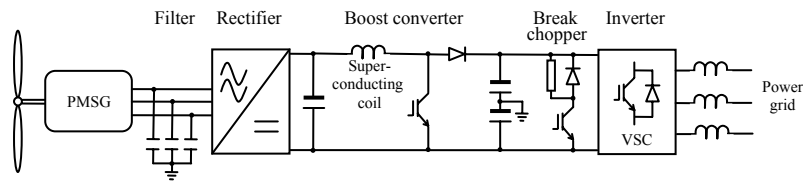
۳- توربین بادی سرعت متغیر، سیستم پیشنهادی:

سیستم پیشنهادی، ترکیبی از تکنولوژی‌های روز در کنار استفاده ابداعی از سلف ابررساناست. همانگونه که در تصویر (۳) ملاحظه می‌گردد، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم با تعداد قطب بالا^۳ و سرعت پایین نیاز به جعبه دنده را مرتفع ساخته است. در چند سال اخیر، تکنولوژی این ژنراتورها توسط سازندگان، کاملاً اقتصادی شده و ژنراتورهای توان بالا (تا محدوده 3.6 MW) در چندین سایت مختلف با موفقیت نصب و راه‌اندازی شده‌اند [۳]. این ژنراتورها، ابعاد کوچکتر، وزن کمتر و راندمان بالاتری دارند. استفاده موثر از مواد فرومغناطیس و عدم نیاز به سیم‌پیچی روتور، علاوه بر اینکه تلفات را کاهش داده، سیستم کنترل را نیز ساده‌تر کرده است. بعلاوه، سیستم مکانیکی ساده‌تر شده و تنش‌های مکانیکی و

³ Multi-pole permanent magnet synchronous generator

۳-۱- مبدل بوست و بکارگیری ابرسلف در

ترکیب آن:



شکل ۳: توربین بادی سرعت متغیر، سیستم پیشنهادی

تا حد هرچه بیشتر اقتصادی شدن، کاهش می‌دهد [۱۰]. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی ابرسانا در لینک dc سابقه‌ای طولانی دارد [۱۰]. اما اخیراً ایده استفاده از این ادوات برای اتصال dc توربین‌های بادی به یکدیگر در ترکیب ac-dc-ac مطرح شده است [۴]. سیستم پیشنهادی در [۴] به سبب ظرفیت بالای انرژی و لذا محدودیت‌های اقتصادی و تکنیکی هنوز در حد ارائه ایده است. لیکن استفاده از ابرساناهای دما بالا با ظرفیت انرژی نسبتاً کم، در محل اتصال لینک‌های dc هر توربین بادی (عنصر ابرسانا در ترکیب بوست سیستم پیشنهادی)، آنگونه که در این مقاله پیشنهاد شده، مقرون به صرفه و عملی است. برای مقایسه باید اشاره کرد که آنچه در [۴] پیشنهاد می‌شود، استفاده از سیستم‌های با ظرفیت ذخیره چند ده مگا ژول است؛ ولی آنچه‌آنکه در این مقاله ارائه می‌شود، ظرفیت سیستم‌های به کار رفته در ترکیب مبدل بوست را به چندین صد کیلو ژول محدود می‌سازد. مقادیر فرکانس طبیعی و ضریب تضعیف مبدل بوست بصورت زیر بدست می‌آیند [۱۱]:

$$\xi = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{1}{2R(1-D)} \quad \text{و} \quad \omega_m = \frac{(1-D)}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

همانگونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش قابل ملاحظه مقدار L، فرکانس سیستم کاهش یافته و مولفه‌های ریبیل متغیرهای حالت کاهش می‌یابند. از سوی دیگر، صفر سمت راست، به مبدا نزدیکتر شده و نقش غالبتری می‌یابد که تاثیر غیرمی‌نیمم فاز آن، عمل کنترل را دچار مشکل می‌کند. همانگونه که در تصویر (۴) مشاهده می‌شود، برای مقابله با این اثر، در حلقه کنترل ولتاژ لینک dc علاوه بر ولتاژ لینک، از جریان سلف

مبدل بوست، ولتاژ لینک dc را مستقل از تغییرات ولتاژ خروجی یکسوساز که ناشی از تغییرات سرعت ژنراتور سنکرون است، تثبیت می‌کند. تثبیت ولتاژ لینک dc با تنظیم نسبت هدایت کلید مبدل بوست (D) محقق می‌شود. D نسبت زمان هدایت سویچ در هر پریود به طول پریود است. ولتاژ ثابت لینک dc در ترمینال‌های اینورتر افزایش راندمان و بهره‌گیری مناسب از ادوات نیمه‌هادی قدرت را در پی خواهد داشت. مبدل بوست، رفتاری مشابه یک سیستم درجه دو دارد که دارای یک صفر اضافی در نیمه راست محور فرکانس است. صفر سمت راست، سیستم را غیر می‌نیمم فاز می‌کند که این پدیده‌ای نامطلوب در تنظیم‌کننده‌های ولتاژ می‌باشد؛ زیرا هر تغییری در ولتاژ خروجی، قبل از اینکه کنترلر آن را تصحیح کند، فرصت افزایش دارد. همانگونه که در تصویر (۳) نیز ملاحظه می‌گردد، نقش اساسی در عملکرد مبدل بوست بر عهده عنصر ذخیره‌ساز انرژی است. بدینصورت که در هر پریود کلیدزنی مبدل و در مدت زمان هدایت کلید، انرژی در میدان مغناطیسی سلف ذخیره شده و سپس در نیمه دوم پریود که کلید باز است، انرژی به بانک خازن لینک dc تزریق می‌گردد. در صورتی که برای تبادل انرژی الکترومغناطیسی از یک سلف ابرسانا استفاده گردد، توانایی ذخیره‌سازی انرژی و راندمان تا حد چشمگیری افزایش می‌یابند. استفاده از این ادوات ذخیره‌سازی انرژی برای بهبود رفتار دینامیکی سیستم‌های قدرت و اصلاح نوسانات بارهای صنعتی متداول شده است. بخصوص در مواردی که ظرفیت پایین است، امکان استفاده از ابرساناهای دما بالا^۴ هزینه‌ها را

⁴ High temperature superconductor

اتصال توربین ($|V_o|$) و V_d صفر باشد، آنگاه رابطه (۲) به رابطه ساده‌تر (۳) تبدیل می‌شود [۷].

$$Q = -\frac{3}{2} |V_o| I_d \text{ و } P = \frac{3}{2} |V_o| I_q \quad (3)$$

از آنجا که دامنه ولتاژ، $|V_o|$ ، به سبب اتصال توربین بادی به شبکه قدرت ac، ثابت و تغییرات آن در مقایسه با تغییرات دامنه I_d و I_q بسیار ناچیز است، لذا کنترل P و Q بصورت مستقل از یکدیگر و با تنظیم مقادیر این دو جریان، به راحتی امکان‌پذیر است. سیگنال‌های آتش کلیدها با استفاده از تکنیک کنترل هیستریزس جریان ایجاد می‌شوند. مقادیر مرجع P و Q بسته به استراتژی کنترل VSC تعیین می‌شوند. بدینصورت که هدف اصلی در کنترل توان اکتیو، حصول حداکثر توان مکانیکی بوسیله توربین از باد وزشی است که در بخش آتی مفصلاً بررسی می‌گردد. کنترل توان راکتیو نیز عموماً یکی از اهداف تنظیم ضریب توان، تنظیم kVar (جبران‌سازی راکتیو) و یا کنترل ولتاژ را دنبال می‌کند. غالباً بهره‌برداران از شبکه علاقه‌مند هستند که نیروگاه‌های بادی در ضریب توان نزدیک به یک کار کنند تا از ایجاد اغتشاش در شبکه‌های قدرت مجاور که به آن‌ها متصلند، جلوگیری شود. مقدار مرجع توان راکتیو را می‌توان بوسیله رابطه (۴) از روی مقادیر مرجع توان اکتیو و ضریب قدرت بدست آورد.

$$Q_{ref} = P_{ref} \frac{\sqrt{1 - PF^2}}{PF} \quad (4)$$

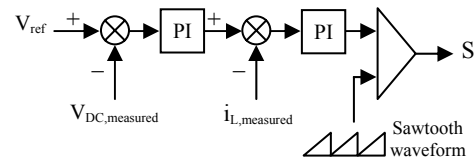
مسلماً برای تنظیم توان راکتیو، محدودیت وجود دارد که این حد ناشی از محدودیت ظرفیت VSC است و می‌توان آن را از رابطه (۵) بدست آورد. P_{vsc} و S_{vsc} ، توان اکتیو خروجی و MVA نامی VSC هستند.

$$Q_{limit} = \pm \sqrt{S_{vsc}^2 - P_{vsc}^2} \quad (5)$$

۳-۳- الگوریتم استحصال حداکثر توان از باد وزشی (MPPT):

تصویر (۵) منحنی مشخصه‌های توان بر حسب سرعت دوران توربین بادی (۶) به ازای مقادیر مختلف سرعت باد (V_i) را

ابرسانا نیز فیدبک گرفته شده و یک حلقه کنترل جریان داخلی درون حلقه کنترل ولتاژ طراحی می‌شود. با این وجود، با افزایش بیش از حد مقدار L ممکن است مقدار ΔI_L (ریپل جریان سلف ابرسانا) در مقایسه با مقدار متوسط آن به حدی کاهش یابد که عملکرد صحیح حلقه کنترل جریان داخلی مختل گردد. پس کاملاً مشخص شد که طراحی هوشمندانه کنترلر ولتاژ لینک که در این مقاله از کنترلرهای PI متداول استفاده شده است (تصویر (۴)) و انتخاب مناسب ظرفیت سلف ابرسانا، علاوه بر بهره‌مندی از بیشتر مزایایی که در [۴] به آن‌ها اشاره شده است، منجر به سیستمی می‌شود که از لحاظ فنی و اقتصادی عملی است. در کار انجام شده در این مقاله از ابرسانا با ظرفیت 150 kJ استفاده شده است.



شکل ۴: کنترلر مبدل بوسست مود ولتاژی

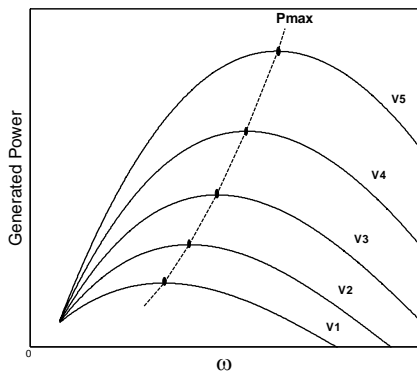
۳-۲- استراتژی کنترل توان:

مبدل منبع ولتاژی با جریان کنترل شده، جریان ac را در سطح مرجع مورد نظر کنترل کرده و بدینگونه امکان کنترل توان اکتیو و راکتیو تریقی به شبکه قدرت ac را فراهم می‌کند. در این کار، از روش کنترل dq برای کنترل جریان VSC استفاده شده است. در این روش، مقادیر سه فاز از مختصات abc بوسیله تبدیل dq به قاب دواری که با سرعت سنکرون می‌چرخد، منتقل می‌شوند. در سیستم سه فاز متعادل، توان‌های لحظه‌ای خروجی اکتیو و راکتیو، P و Q ، توربین بادی توسط روابط (۲) بیان می‌شوند.

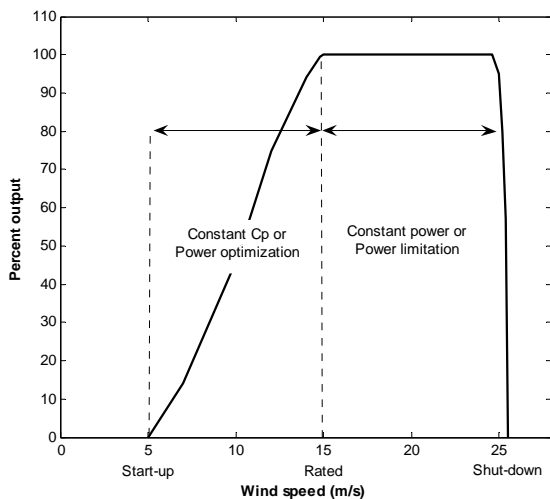
$$Q = \frac{3}{2} (V_d I_q - V_q I_d) \text{ و } P = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (2)$$

که در آن V_d ، V_q ، I_d و I_q به ترتیب ولتاژها و جریانهای محورهای d و q توربین در محل اتصال به شبکه هستند. با فرض اینکه V_q برابر با اندازه مقدار لحظه‌ای ولتاژ در محل

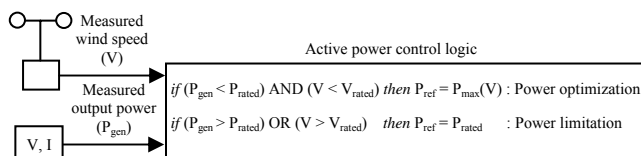
سبب افزایش ولتاژ لینک شده که با کاهش جریان ورودی جبران می شود. با کاهش ولتاژ ورودی، کنترلر ولتاژ dc دوباره با تنظیم جریان سلف ابرسانا، بالانس توان اکتیو را برقرار می کند.



شکل ۵: منحنی مشخصه های توان بر حسب سرعت دوران توربین بادی به ازای مقادیر مختلف سرعت باد



شکل ۶: نواحی مختلف عملکرد توربین بادی سرعت متغیر

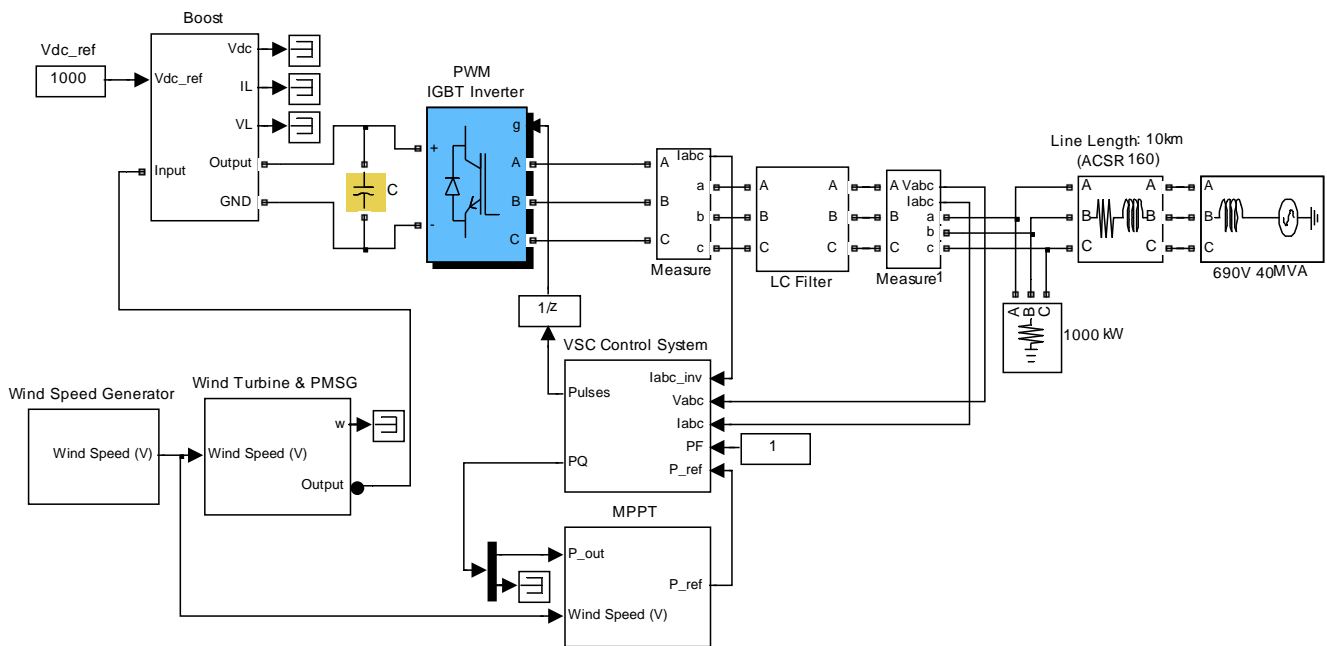


شکل ۷: منطق کنترل توان اکتیو توربین بادی سرعت متغیر

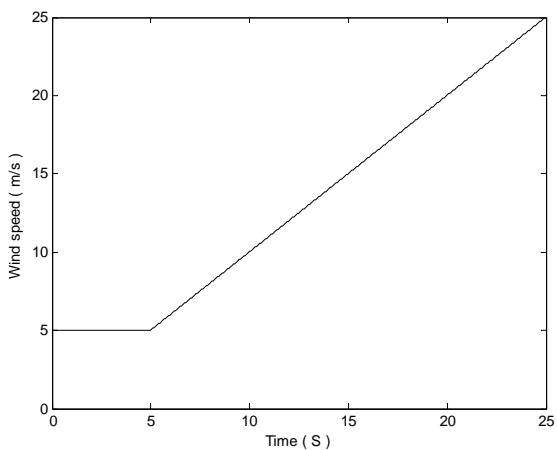
نشان می دهد. از این منحنی ها به سادگی در می یابیم که حداکثر توان خروجی، با تغییر سرعت دوران توربین بر روی منحنی حداکثر توان به ازای هر سرعت باد مشخص بدست می آید. یک روش استحصال حداکثر توان، با آگاهی از این منحنی ها (که بوسیله سازندگان، برای هر توربین در اختیار بهره برداران قرار می گیرند) تنظیم مقدار مرجع توان اکتیو VSC، برابر با این مقدار حداکثر قابل استحصال است. تصویر (۶)، نواحی مختلف عملکرد توربین بادی سرعت متغیر را نشان می دهد. هرگاه سرعت باد، کمتر از سرعت باد نامی و توان خروجی، کمتر از توان نامی گردد، بهینه سازی توان توربین انجام می گیرد؛ به اینصورت که با تغییر سرعت توربین در هر سرعت باد معین، حداکثر توان (تصویر (۵)) از باد استحصال می گردد که این به معنای حفظ ضریب بهره آیرودینامیکی توربین بادی (C_p) در مقدار حداکثر خود است. از سوی دیگر، هرگاه توان خروجی، بیش از مقدار نامی خود یا سرعت باد، بیش از مقدار نامی گردد، کنترل محدودسازی توان توربین فعال می گردد. در این ناحیه با تغییر سرعت توربین و به تبع آن تغییر مقدار C_p ، توان استحصالی از باد، در حد توان نامی سیستم محدود می گردد. تصویر (۷)، این ایده را که قبلاً نیز ارائه شده است [۱۲]، نشان می دهد.

۴- شبیه سازی ها:

تصویر (۸)، مدل سیستم پیشنهادی است که در محیط MATLAB/Simulink شبیه سازی شده است. ظرفیت نامی توربین بادی 1200 kW و منحنی مشخصه آن در تصویر (۶) نشان داده شده است، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم دارای ۴۰ جفت قطب و سرعت نامی روتور، 30 rpm است. ظرفیت سلف ابرسانا با توجه به حداکثر جریان آن تعیین می گردد. این جریان به ازای کمترین ولتاژ خروجی یکسوساز، معادل کمترین سرعت باد (سرعت باد راه اندازی)، محاسبه می شود و بر این اساس ظرفیت سلف ابرسانا، 150 kJ تعیین شده است. تصویر (۹)، رفتار دینامیکی حلقه کنترل ولتاژ لینک dc به ازای تغییر پله ولتاژ ورودی را نشان می دهد. ملاحظه می گردد که افزایش در ولتاژ ورودی، در لحظه اول

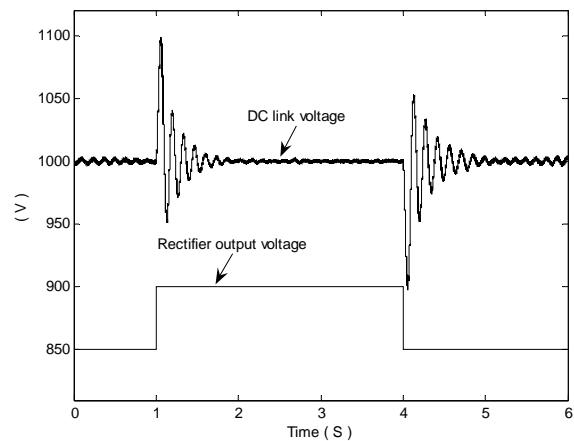


شکل ۸: شبیه سازی سیستم در محیط MATLAB/Simulink



شکل ۱۰: سرعت باد اعمالی برای بدست آوردن منحنی مشخصه

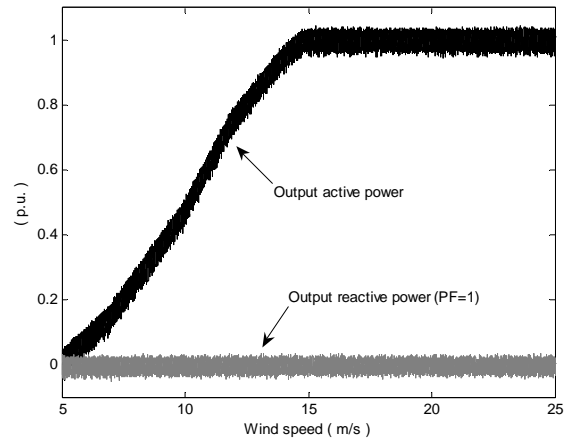
توربین بادی



شکل ۹: رفتار دینامیکی حلقه کنترل ولتاژ لینک DC به ازای تغییر پله

ولتاژ ورودی

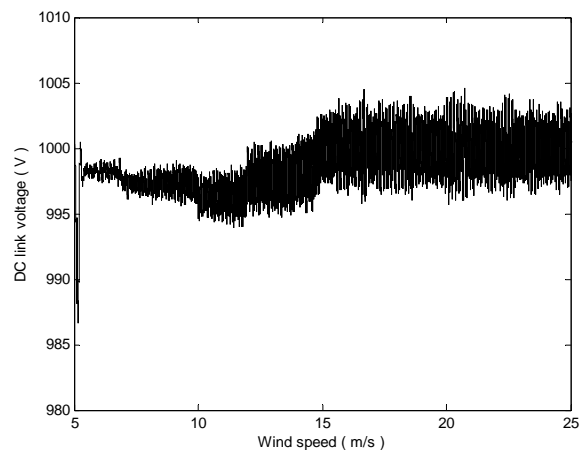
در مطالعه بعدی، سرعت بادی که در تصویر (۱۰) نشان داده شده است، به مدل اعمال می‌گردد. با توجه به این الگوی تغییرات سرعت نسبت به زمان، به راحتی می‌توان منحنی تغییرات توان و ولتاژ لینک dc را نسبت به تغییرات سرعت باد بدست آورد (تصاویر (۱۱) و (۱۲)). تصویر (۱۱)، بطور کامل و دقیق الگوی منحنی تصویر (۶) را دنبال می‌کند که نشان از عملکرد صحیح کنترلر توان VSC دارد. همچنین مشاهده می‌شود که ولتاژ لینک dc نیز کاملاً نسبت به تغییرات سرعت باد مقاوم است. تصویر (۱۳)، عملکرد حلقه کنترل جریان هیستریزس را در حالت توان نامی نشان می‌دهد.



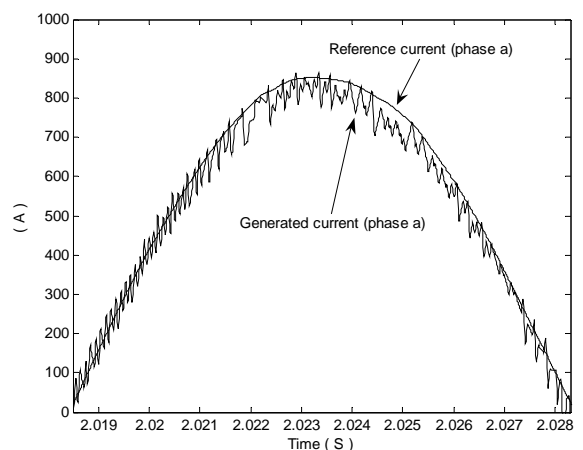
شکل ۱۱: منحنی مشخصه توربین بادی شبیه‌سازی شده و توان راکتیو خروجی به ازای ضریب قدرت یک

۵- نتیجه‌گیری:

در این مقاله، ایده نوینی برای مزارع بادی بر اساس استفاده از سلف ابرسانا در ترکیب مبدل بوست پیشنهاد و امکان‌سنجی شد. توپولوژی پیشنهادی، علاوه بر کلیه مزایای فنی، هزینه‌ها را نیز کاهش می‌دهد بطوریکه امکان انتقال توان dc از محل تولید تا محل مناسب برای اتصال به شبکه قوی ac و تجمیع ژنراتورهای مزرعه بادی، بدون هزینه و یا تجهیز اضافی وجود دارد. نشان داده شد که مبدل بوست منبع ولتاژی، سیستمی غیر مینیمم فاز است که با افزایش اندازه سلف مبدل، صفر سمت راست سیستم به مبدا نزدیکتر شده و نقش غالبتری می‌یابد. برای مقابله با این اثر، در حلقه کنترل ولتاژ لینک dc علاوه بر ولتاژ لینک، از جریان سلف ابرسانا نیز فیدبک گرفته شد و یک حلقه کنترل جریان داخلی درون حلقه کنترل ولتاژ طراحی شد. با این وجود، با افزایش بیش از حد مقدار سلف ممکن است مقدار ΔI_L (ریپل جریان سلف ابرسانا) در مقایسه با مقدار متوسط آن به حدی کاهش یابد که عملکرد صحیح حلقه کنترل جریان داخلی مختل گردد. لذا انتخاب مناسب سلف ابرسانا و طراحی هوشمندانه کنترلر ولتاژ لینک که در این مقاله از کنترلرهای PI متداول استفاده شده است، الزامی است. بعلاوه، در این مقاله الگوریتم موثری برای کنترل توان در جهت استحصال حداکثر توان اکتیو و حفظ ضریب قدرت و یا توان راکتیو در مقدار مورد نظر ارائه شد. مدل‌سازی دقیق دینامیکی و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از



شکل ۱۲: حفظ ولتاژ لینک dc با تغییر سرعت باد



شکل ۱۳: عملکرد کنترلر هیستریزس جریان

[۱۲] محمد منفرد و حسن رستگار، " بهره‌گیری از کنترل فعال پدیده قطع به عنوان استراتژی کنترل دینامیکی توربین بادی متصل به شبکه"، مجموعه مقالات بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC2006)، تهران، ۱۳۸۵

MATLAB/Simulink در چندین مورد مطالعه صحت عملکرد سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهند.

مراجع:

- [1] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind energy explained*, John Wiley, 2002.
- [2] T. Burton, D. Sharpe, D. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind energy handbook*, John Wiley, 2001.
- [3] Permanent magnet synchronous generators for wind energy applications, [online] available: <http://www.abb.com/motors&drives>
- [4] S. Nomura, Y. Ohata, T. Hagita, H. Tsutsui, S. T. Iio, and R. Shimada, "Wind farms linked by SMES systems", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 15, no. 2, June 2005, pp. 1951-1954.
- [5] K. H. Sobrink, P. L. Sorensen, P. Christensen, N. Sondersen, K. Eriksson, and P. Holmberg, "DC feeder for connection of a wind farm", *Cigre Symposium, Malaysia*, Sept. 1999.
- [6] M. R. Patel, *Wind and solar power systems*, CRC Press, 1999.
- [7] S. K. Kim, E. S. Kim, J. Y. Yoon, and H. Y. Kim, "PSCAD/EMTDC based dynamic modeling and analysis of a variable speed wind turbine", in *Proc. IEEE PES general meeting*, June 2004, vol. 2, pp. 1735-1741.
- [8] I. Schiemenz, and M. Steibler, "Control of a permanent magnet synchronous generator used in a variable speed wind energy system", in *Proc. IEEE IEMDC*, 2001, pp. 872-877.
- [۹] محمد منفرد و حسن رستگار، "ارائه مدلی انعطاف‌پذیر برای مطالعات نیروگاه بادی در سیستم‌های قدرت"، مجموعه مقالات چهاردهمین کنفرانس مهندسی برق ایران (ICEE2006)، تهران، ۱۳۸۵
- [10] K. Tam, and P. Kumar, "Application of superconductive magnetic energy storage in an asynchronous link between power systems", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 5, no. 3, sep. 1990, pp. 436-444.
- [11] S. Ang, and A. Oliva, *Power-switching converters*, CRC Press, 2005.