طراحی و ساخت کانورتر توربین بادی ۱۰۰کیلووات برای ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

مجیدرضا صالحی علی‌آباد ۱، محمد یعقوبی۲*

۱مدیر واحد تحقیق و توسعه شرکت نیان الکترونیک.
۲کارشناس واحد تحقیق و توسعه شرکت نیان الکترونیک.

چکیده — در سال‌های اخیر با توجه به محدود بودن منابع انرژی و افزایش تقاضا برای تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر بخصوص انرژی باد، پیشرفت‌های زیادی در سطوح دانشگاهی و صنعتی برای ساخت توربین های بادی، ریزشبکه‌ها و ... حاصل شده است. همچنین با توجه به مزایای ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم از جمله حجم و وزن کم، بازدهی بالا و عدم نیاز به جعبه‌دنده، استفاده از این نوع ژنراتور در توربین‌های بادی، گسترش یافته است. شرکت نیان الکترونیک با داشتن تجربه و سابقه طولانی در ساخت مبدل‌های الکترونیک قدرت با طراحی و ساخت کانورتر ۱۰۰کیلووات برای ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم و ایجاد دانش بومی، گام‌های بلندی برای توسعه استفاده از انرژی بادی در کشور برداشته است و اکنون در حال انجام مقدمات تولید انبوه این محصول در توان‌های بالاتر می‌باشد. در این مقاله، مراحل اصلی طراحی، شبیه‌سازی و ساخت این کانورتر به اختصار توضیح داده می شود.

واژه‌های کلیدی — توربین بادی؛ کانورتر ۱۰۰کیلووات؛ کنترل میدان برداری؛ ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم؛ ردیابی نقطه‌ی بیشینه‌ی توان

مقدمه

توربین‌های بادی به دو دسته‌ی کلی سرعت-ثابت و سرعت-متغیر تقسیم می‌شوند. توربین های سرعت-ثابت فقط در سرعت خاصی، بیشترین بازدهی خود را دارند و توان تحویلی آن‌ها به شبکه دارای نوسانات زیادی است اما توربین‌های سرعت-متغیر می‌توانند در محدوده‌ی وسیعی از سرعت باد به بیشترین میزان بازدهی برسند و به طور پیوسته سرعت چرخش خود را بر مبنای سرعت لحظه‌ای باد، تنظیم کنند [۱]. برای این‌که بتوان سرعت توربین را تنظیم کرد، ژنراتور از طریق یک کانورتر AC/DC/AC به شبکه‌ی برق متصل می‌شود.

امروزه رایج‌ترین ژنراتورها در توربین‌های سرعت-متغیر، ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه یا DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) و ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم یا PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) هستند. استفاده از ژنراتورهای PMSG به علت سادگی ساختار و بازدهی انرژی بالا در حال گسترش است [۲]. از جمله مزایای PMSG در مقایسه با DFIG، بازدهی بیشتر، کنترل آسان‌تر، عدم نیاز به جریان مغناطیس‌کننده‌ی راکتیو و ابعاد کوچکتر است.

با توجه به گسترش منابع تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر، قوانین و الزاماتی برای اتصال نیروگاه‌های بادی به شبکه‌ی برق وضع شده است تا از امنیت، قابلیت اطمینان و عملکرد بهینه‌ی سیستم قدرت اطمینان حاصل شود. بر این اساس لازم است تا نیروگاه‌های بادی، مشابه نیروگاه‌های معمولی، الزاماتی مانند کنترل توان اکتیو و راکتیو، قابلیت عبور از خطا، رگولاسیون ولتاژ و فرکانس، کیفیت توان و سیستم‌های حفاظتی را برآورده سازند. این الزامات، باید در طراحی کانورتر توربین بادی در نظر گرفته شوند.

NIAN ELECTRONIC

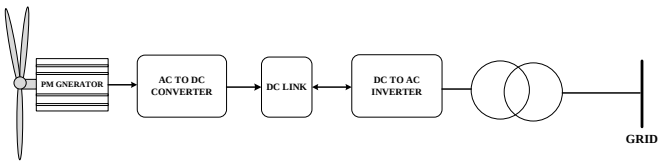
«شکل ۱» دیاگرام شماتیک سیستم توربین بادی با ژنراتور PMSG را نشان می‌دهد که از طریق دو کانورتر back-to-back به شبکه متصل شده است. خروجی اینورتر با استفاده از یک فیلتر اندوکتانسی (L) به ترانسفورمر یا شبکه متصل می‌شود. در این مقاله، مراحل اصلی طراحی و ساخت این کانورترها برای سیستم توربین بادی ۱۰۰کیلووات از جمله طراحی مفهومی، انتخاب قطعات، کنترل‌کننده‌ها و ... ارائه می‌شود.

اهداف و طرح‌های مفهومی

هدف اصلی در طراحی سیستم کانورتر توربین بادی متصل به شبکه، اخذ بیشترین انرژی ممکن از انرژی باد و انتقال آن به شبکه‌ی برق با رعایت الزامات شبکه و اصول حفاظتی لازم است. از جمله‌ی این الزامات، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- حداقل بازدهی کانورتر ۹۵٪
- حداکثر میزان هارمونیک‌ها (THD) در جریان تزریقی به شبکه ۵٪
- حفاظت در برابر اضافه جریان، افزایش یا افت بیش از حد ولتاژ و فرکانس، افزایش یا افت بیش از حد دما در بخش‌های مختلف سیستم، اتصال کوتاه، اضافه‌ولتاژ باس DC و ...
- مانیتورینگ در محل و از راه دور سیستم و نمایشگر
- مدیریت آلارم‌ها
- تشخیص شرایط جزیره‌ای شدن شبکه

همان‌طور که در «شکل ۱» نشان داده شده است، سیستم کانورتر ۱۰۰کیلووات شامل یکسوساز در سمت ژنراتور، اینورتر در سمت شبکه و باس ولتاژ DC بین این دو است. یکسوساز و اینورتر هر دو متشکل از شش سوئیچ الکترونیک–قدرت با آرایش تمام پل سه فاز طراحی شده‌اند. استفاده از این کانورترها، انعطاف و قابلیت بیشتری برای سیستم کنترل به همراه دارد در حالی که با استفاده از یکسوساز دیودی و یک چاپر DC به عنوان کانورتر سمت ژنراتور، امکان کنترل ضریب توان فراهم نمی‌شود [۳].



شکل ۱: دیاگرام شماتیک توربین بادی با کانورتر back-to-back

سیستم کنترل کانورتر سمت ژنراتور، سرعت آن را در مقدار بهینه برای دریافت بیشترین توان از باد کنترل می‌کند یا به عبارت دیگر، کنترل گشتاور یا توان تولیدی ژنراتور را بر عهده دارد. کانورتر سمت شبکه ولتاژ باس DC را ثابت نگه می‌دارد و توان اکتیو و راکتیو تحویلی به شبکه را تنظیم می‌کند. به علاوه، این کانورتر، قابلیت کاهش میزان اعوجاج هارمونیکی تزریقی به شبکه را دارا است [٤].

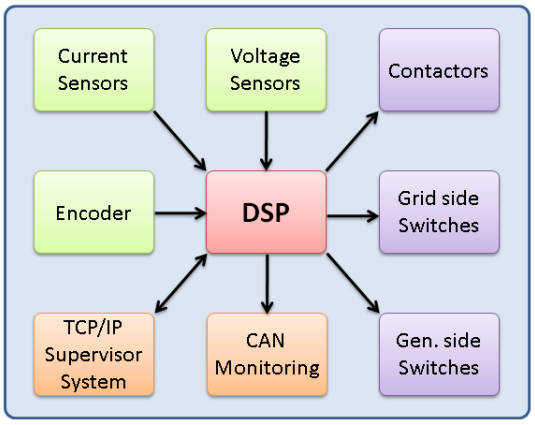
برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ها و برخی حفاظت‌ها در این کانورتر، باید از سنسورهای مناسب برای اندازه‌گیری سرعت ژنراتور، ولتاژ شبکه‌ی برق، جریان‌های سه فاز تزریقی به شبکه و جریان سه فاز ژنراتور، ولتاژ باس DC، دما و ... استفاده شود. با توجه به حجم محاسبات بالا و نیاز به سرعت پردازش کافی و در عین حال، قیمت مناسب پردازنده و راحتی برنامه‌نویسی با آن، از پردازنده‌ی DSP[1] سری C2000 محصول شرکت Texas Instruments استفاده شده است.

از دیگر ویژگی‌های مهم در انتخاب این پردازنده، داشتن قابلیت نمونه‌برداری و تبدیل آنالوگ به دیجیتال (A/D) با سرعت بالا (حدود 80ns)، محاسبات اعداد اعشاری به صورت float point برای برنامه‌نویسی راحت‌تر، داشتن ماژول‌های مخصوص درایو سوئیچ‌های الکترونیک–قدرت با مدولاسیون پهنای پالس یا (PWM) با در نظر گرفتن فاصله‌های زمانی لازم بین روشن و خاموش شدن سوئیچ‌های هر شاخه (Dead Time) با قابلیت قطع آنی سوئیچ‌ها در لحظات بروز خطا و داشتن ماژول قرائت خروجی سنسور انکودر سرعت می‌باشد.

«شکل ۲» بلوک دیاگرام کلی واحد کنترل کانورتر را نشان می‌دهد که با پردازنده‌ی DSP پیاده‌سازی شده است. این واحد شامل DSP، مدارهای فیدبک ولتاژ و جریان، مدارهای درایو سوئیچ‌های سمت شبکه و سمت ژنراتور، ارتباط با سنسور سرعت ژنراتور و نرم‌افزار کنترل و مانیتورینگ می‌باشد.

[1] Digital Signal Processor

NAN ELECTRONIC



شکل ۲: بلوک دیاگرام کلی واحد کنترل کانورتر ۱۰۰کیلووات

برای مانیتورینگ برخط کانورتر، نیاز به انتقال اطلاعات از DSP با سرعت بالا می‌باشد. به همین منظور، از ارتباط CAN[۲] استفاده شده است.

انتخاب قطعات سخت افزاری

سخت‌افزار کانورتر back-to-back به طور کلی شامل سوئیچ‌های الکترونیک–قدرت، سیستم خنک‌کننده، سنسورها و برد کنترل‌کننده می‌باشد که در «شکل ۳» نمایش داده شده است.

سنسورها باید دارای دقت و زمان پاسخ‌دهی مناسب باشند، بدین منظور جهت اندازه‌گیری ولتاژ و جریان‌ها از سنسورهای اثر هال استفاده شده است.

برای انتخاب ژنراتور در رنج توان متوسط به بالا معمولا از ژنراتورهای با ولتاژ خروجی ۶۹۰ ولت استفاده می‌شود تا جریان خروجی کمتر باشد و راندمان بهتری داشته باشیم.

ژنراتورهای مغناطیس‌دائم در سه محدوده سرعت بالا ، سرعت متوسط و سرعت کم موجود می‌باشند. در ژنراتورهای سرعت بالا معمولا به جعبه دنده سه مرحله‌ای نیاز است که طراحی و نگهداری آن مشکل است. ژنراتورهای دور متوسط به گیربکس یک مرحله ای نیاز دارند و ژنراتورهای دور پایین نیاز به گیربکس ندارد . در این پروژه از دو نوع ژنراتور سرعت بالا و سرعت متوسط برای تست کانورتر استفاده شده است.

[2] Controller Area Network

شکل ۳: برد مدار چاپی کنترل‌کننده‌ی کانورتر ۱۰۰کیلووات

با توجه به ولتاژ خروجی ۶۹۰ ولت ژنراتور، حداقل ولتاژ باس DC در حدود ۱۲۰۰ ولت خواهد بود. سوئیچ‌ها نیز با توجه به همین ولتاژ انتخاب شده اند و ولتاژ نامی آنها حدود ۱۷۰۰ ولت می باشد.

طراحی کنترل‌کننده‌ها

پیاده‌سازی حلقه‌های کنترلی، بخش اصلی برنامه‌نویسی DSP را تشکیل می‌دهد. این حلقه‌ها، شامل حلقه‌ی کنترل سرعت و جریان ژنراتور، کنترل ولتاژ باس DC، کنترل جریان تزریقی به شبکه و حلقه‌ی قفل فاز برای آشکارسازی فاز و فرکانس ولتاژ شبکه‌ی برق هستند.

معادلات ولتاژ و گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور سنکرون مغناطیس‌دائم در روابط (۱) تا (۳) نشان داده شده‌اند:

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + d(L_d i_{sd})/dt - \omega_e L_q i_{sq} \quad (۱)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + d(L_q i_{sq})/dt + \omega_e (L_d i_{sd} + \psi_f) \quad (۲)$$

$$T_e = (3p/4)\, \psi_f i_{sq} \quad (۳)$$

در این روابط، V_{sd}، V_{sq}، i_{sd}، i_{sq}، L_d، L_q، ψ_{sd} و ψ_{sq} مولفه‌های d و q ولتاژ، جریان، اندوکتانس و شار استاتور را در چارچوب مرجع dq نشان می‌دهند. همچنین ω_e، T_e و ψ_f نشان‌دهنده‌ی سرعت زاویه‌ای الکتریکی روتور، گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور و فلوی آهنربای روتور است [۵].

مطابق رابطه‌ی (۳)، می‌توان با کنترل مولفه‌ی q جریان استاتور، سرعت یا گشتاور آن را کنترل کرد. این روش، کنترل میدان برداری[۳] نام دارد که یکی از رایج‌ترین روش‌های کنترل توان ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

[3] Field Oriented Control

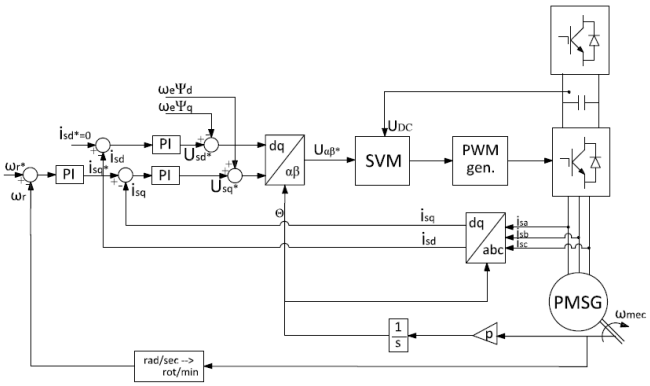
NIAN ELECTRONIC

است. در این روش، گشتاور ژنراتور به طور غیر مستقیم و از طریق کنترل جریان استاتور، کنترل می‌شود.

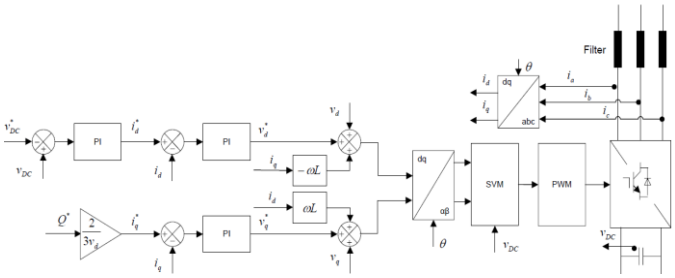
«شکل ٤» دیاگرام بلوکی سیستم کنترل سرعت ژنراتور را نشان می‌دهد که در برنامه‌ی پردازنده‌ی DSP برای کانورتر سمت ژنراتور پیاده شده است. مقدار مرجع مولفه‌ی i_{sd} برای عملکرد بهتر، مساوی صفر در نظر گرفته می‌شود و مقدار مرجع مولفه‌ی i_{sq} توسط کنترل‌کننده‌ی سرعت تعیین می‌شود. با اعمال سیگنال‌های جبران‌سازی، حلقه‌های کنترل جریان i_{sd} و i_{sq} از هم مستقل می‌شوند و تابع انتقال هر حلقه محاسبه می‌شود. سپس با هدف سرعت و ردیابی مناسب، پارامترهای تناسبی و انتگرالگیر طراحی می‌شوند.

در کانورتر سمت شبکه، معادلات حاکم بر سیستم براساس نوع فیلتر مورد استفاده بین کانورتر و شبکه استخراج می‌شود که در مورد کانورتر ۱۰۰کیلووات، یک فیلتر اندوکتانسی حدود 1mH به کار رفته است. این فیلتر به وسیله‌ی یک اندوکتانس و یک مقاومت کوچک که تلفات اهمی آن را نشان می‌دهد، مدل می‌شود.

کنترل‌کننده‌های متنوعی برای کانورتر سمت شبکه به کار می‌روند که همه‌ی آن‌ها اهداف مشترکی دارند: کنترل ولتاژ باس DC، کنترل توان اکتیو و راکتیو تحویلی به شبکه و سنکرون بودن با شبکه [٦]. در فاز طراحی این پروژه، کنترل‌کننده‌های مختلفی از جمله تناسبی–رزونانسی (PR) در چارچوب αβ و تناسبی–انتگرالگیر (PI) در چارچوب dq برای کنترل جریان تزریقی به شبکه و کاهش میزان هارمونیک‌های ناشی از کلیدزنی در آن، طراحی و بررسی شدند اما به علت سادگی و عملکرد مناسب و مقاوم کنترل‌کننده‌ی تناسبی–انتگرالگیر، در برنامه‌ی نهایی از آن استفاده شده است. دیاگرام شماتیک این سیستم در «شکل ٥» نشان داده شده است.



شکل ٤: بلوک دیاگرام سیستم کنترل کانورتر سمت ژنراتور [٥]



شکل ٥: دیاگرام بلوکی سیستم کانورتر سمت شبکه [٦]

سیستم کنترل کانورتر سمت شبکه که در طراحی کانورتر ۱۰۰کیلووات به کار رفته، شامل دو حلقه می‌باشد. حلقه‌ی داخلی جریان‌های تزریقی به شبکه را کنترل می‌کند و حلقه‌ی بیرونی تثبیت ولتاژ باس DC و توان راکتیو خروجی را بر عهده دارد. برای انتقال کل توان اکتیو تولید شده توسط توربین بادی به شبکه، مقدار مرجع توان راکتیو برابر صفر تنظیم می‌شود تا ضریب قدرت یک فراهم شود. معادلات توان اکتیو و راکتیو در سمت شبکه با روابط (٤) و (٥) نشان داده شده‌اند [٦]:

$$P_g = (3/2)\, V_d\, i_d \qquad (٤)$$

$$Q_g = (3/2)\, V_d\, i_q \qquad (٥)$$

در این روابط، P_g و Q_g توان اکتیو و راکتیو شبکه، i_d، i_q و V_d و V_q مولفه‌های d و q جریان و ولتاژ شبکه را نشان می‌دهند. این روابط مشخص می‌کنند که چگونه کنترل توان تحویلی به شبکه، با استفاده از حلقه‌ی داخلی جریان انجام می‌شود.

منابع تولید پراکنده باید جریان تزریقی خود را با ولتاژ شبکه سنکرون کنند تا الزامات شبکه‌ی قدرت برآورده شود. یکی از راه‌های آشکارسازی فاز ولتاژ شبکه، حلقه‌ی قفل فاز یا PLL[4] است که در این پروژه پیاده‌سازی شده است. این حلقه با استفاده از روش‌ها و منابع مختلف طراحی و شبیه‌سازی شده است تا در نهایت، روشی که در برابر خطاهای احتمالی شبکه مانند عدم تعادل ولتاژ فازها، پاسخ خوبی نشان می‌دهد، انتخاب شود.

فاز اجرایی و نتایج

پس از تعیین اهداف و الزامات پروژه، تهیه فلوچارت‌ها و ماشین حالت برنامه‌ی DSP، مدل‌سازی اجزای مختلف سیستم از جمله سوئیچ‌ها، ژنراتور،

[4] Phase Locked Loop

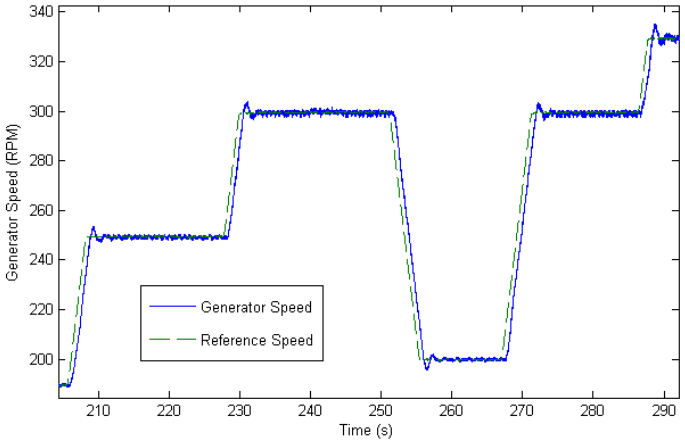
NAN ELECTRONIC

فیلترها و ...، طراحی کنترل‌کننده‌ها و شبیه‌سازی سیستم در نرم‌افزار Matlab/Simulink، نوبت به انتخاب قطعات و ساخت سخت‌افزار کانورتر می‌رسد. طراحی بدنه‌ی کانورتر، بردهای مدار چاپی و مونتاژ قطعات که به هم بسیار وابسته هستند، در فاز اجرایی توسط کارشناسان شرکت نیان الکترونیک انجام شده‌اند. در این فاز، تست مرحله به مرحله برای عیب‌یابی راحت‌تر سیستم از اهمیت زیادی برخوردار است. «شکل ٦» تصویری از محصول نهایی را نشان می‌دهد.

شکل ٦: نمایی از محصول نهایی کانورتر ۱۰۰کیلووات

براساس استانداردهای توربین بادی و کانورترهای متصل به شبکه، آزمون‌های مختلفی برای بررسی و صحه‌گزاری عملکرد این سیستم انجام شده است که از جمله‌ی آن، می‌توان به ردیابی نقطه‌ی بیشینه توان، اندازه‌گیری ضریب توان، اضافه ولتاژ ژنراتور، قطع سه فاز شبکه، قطع سه فاز ژنراتور، قطع یک فاز شبکه، قطع یک فاز ژنراتور، اشاره کرد. این آزمون‌ها در ایستگاه شبیه‌سازی عملکرد توربین بادی در شرکت نیان الکترونیک صورت گرفته است [۷].

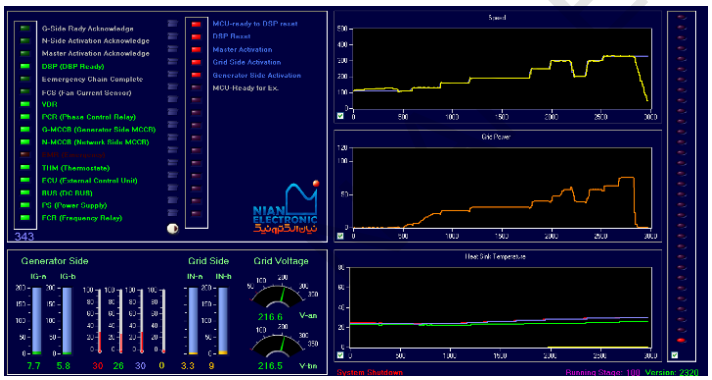
پاسخ کنترلر سرعت ژنراتور با این کانورتر در یکی از آزمون‌های عملی در «شکل ۷» نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، سرعت ژنراتور، مقدار مرجع خود را که از الگوریتم ردیابی نقطه‌ی بیشینه‌ی توان اعمال می‌شود، به خوبی دنبال می‌کند.



شکل ۷: پاسخ عملی سرعت ژنراتور در یکی از آزمون‌ها

تصویری از نرم‌افزار مانیتورینگ کانورتر ۱۰۰کیلووات در «شکل ۸» نشان داده شده است. این نرم افزار از طریق ارتباط اترنت و پروتکل Modbus/TCP، اطلاعات پارامترهای مختلف کانورتر را برای کاربر منتقل می‌کند.اطلاعاتی مثل مقادیر ولتاژ شبکه، جریان‌های ژنراتور و شبکه، دمای داخلی دستگاه و دمای محیط، سرعت ژنراتور و وضعیت کلیدهای حفاظتی.

کانورتر ۱۰۰کیلووات شرکت نیان الکترونیک پس از آزمون‌های میدانی مختلف، به مرحله تولید انبوه رسیده است و از جمله موارد کاربرد آن می‌توان به نیروگاه بادی بینالود اشاره کرد.



شکل ۸: نرم افزار مانیتورینگ و کنترل کانورتر ۱۰۰کیلووات

منابع

[1] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari and S. Kouro, Power Conversion and Control of Wind Energy Systems, John Wiley & Sons Inc, New Jersey, 2011.

[2] A. Uehara and A. Pratap, "A Coordinated Control Method to Smooth Wind Power Fluctuations of a PMSG-Based WECS," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, no. 2, pp. 550-558, 2011.

[3] K. Huang, S. Huang and F. She, A Control Strategy for Direct-drive Permanent-Magnet Wind Power Generator Using Back-to-Back PWM Converter, Project Supported by National Eleventh-five 863 Research Program.

[4] D.I. Stroe and A.I. Stan, "Modeling and Control of Variable Speed Wind Turbine Equipped with PMSG," in 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, Mexico, 2011.

[5] M. Mora, Sensorless Vector Control of PMSG for Wind Turbine Applications, Aalborg University, Master's Thesis, 2009.

[6] D. Mehrzad, J. Luque and M. Capella, Vector Control of PMSG for Grid Connected Wind Turbine Applications, Aalborg University, Master's Thesis, 2009.

[۷] شرکت نیان الکترونیک، گروه تحقیق و توسعه، سند فنی شماره NW046658، اسفند ۱۳۹۲

NIAN ELECTRONICS