

بهبود پایداری شبکه مستقل کوچک باد- خورشید با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار بهبود یافته

ناصر خردمند^۱، عبدالرضا شیخ‌الاسلامی^۲

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۲/۸/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۳/۲/۳۱

چکیده:

در برخی مناطق دورافتاده و بافاصله زیاد از شبکه سراسری برق، یکی از گزینه‌ها برای تأمین انرژی الکتریکی استفاده از شبکه‌های مستقل با تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر انرژی است. اینرسی شبکه الکتریکی، انرژی جنبشی ذخیره‌شده در بخش چرخان ژنراتورهای متصل به شبکه است. ژنراتورهای تولید توان از منابع تجدیدپذیر دارای اینرسی کمی هستند درحالی‌که برخی منابع تجدیدپذیر (مانند سلول‌های خورشیدی) ذاتاً بدون اینرسی‌اند. لذا این نوع شبکه‌ها، شبکه با اینرسی کم نیز نامیده می‌شود. شبکه با اینرسی کم در برابر خطاهای ناگهانی آسیب‌پذیر بوده و امکان ناپایداری آنها در اثر اختلال‌های فرکانسی معمولی نیز وجود دارد. در صورت اغتشاش در شبکه‌های مستقل، برای حفظ پایداری شبکه و کنترل فرکانس معمولاً بارزدایی یا خارج نمودن بخشی از ظرفیت تولید نیاز است. جهت افزایش پایداری در شبکه با اینرسی کم، باید در شبکه انرژی ذخیره‌شده‌ای را که بتوان به صورت آنی به آن دسترسی داشت، افزایش داد. یکی از روش‌های بهبود پایداری در شبکه‌های با اینرسی کم، ایجاد اینرسی مجازی با استفاده از ذخیره‌ساز با سرعت پاسخ بالا می‌باشد. با تزریق یا جذب لحظه‌ای و بموقع توان توسط یک ذخیره‌ساز مناسب، می‌توان پایداری شبکه را بدون وقفه در تأمین بار حفظ نمود. در این مقاله، استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار جهت ایجاد اینرسی مجازی در شبکه‌های مستقل با اینرسی کم پیشنهاد می‌گردد. مزیت ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار نسبت به دیگر ذخیره‌سازها، سرعت پاسخ بالاتر، طول عمر بیشتر و عدم محدودیت در تعداد عملیات شارژ و دشارژ می‌باشد. جهت پیاده‌سازی طرح پیشنهادی از شبیه‌ساز سیمولینک متلب استفاده شده و شبکه مورد مطالعه شبکه‌ای کوچک است که برای کاهش اینرسی در آن بیشتر توان از طریق سلول‌های خورشیدی تأمین می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی اثبات می‌کند عکس‌العمل سریع سیستم ذخیره‌ساز چرخ‌طیار در شبکه با اینرسی کم مورد مطالعه، اینرسی را به صورت مجازی در شبکه به وجود آورده و باعث بالا رفتن حاشیه پایداری و کاهش نوسان فرکانس شده است.

کلمات کلیدی:

بهبود کنترل فرکانس، سیستم ذخیره‌ساز چرخ‌طیار، شبکه‌های مستقل برق، نوسان فرکانس

مقدمه

در برخی مناطق دور از شبکه سراسری برق استفاده از شبکه مستقل به جای احداث خطوط انتقال توان و اتصال به شبکه سراسری برق ترجیح داده می‌شود. اخیراً گرایش به تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر انرژی به دلیل دسترسی آسان و عدم آلودگی زیست‌محیطی در شبکه‌های کوچک مستقل افزایش یافته است. دو منبع انرژی تجدیدپذیر باد و خورشید برای تولید توان در این شبکه‌ها به علت دسترسی آسانتر و پیشرفت فن‌آوری ژنراتورهای آنها بیشتر مورد توجه قرار دارند که در اغلب موارد از ترکیب دو منبع انرژی در کنار هم در شبکه‌های مستقل استفاده می‌شود. تحقیقات مختلفی به روی استفاده ترکیبی از منبع باد و خورشید انجام شده است [۱۷،۵،۳،۷]. استفاده از منابع تجدیدپذیر به علت نوسانی بودن منبع انرژی آنها با مشکلاتی روبروست. از این رو، برای کاهش نوسانات توان در این نوع شبکه‌ها از مبدل‌های الکترونیک قدرت برای تزریق توان تولیدی به شبکه استفاده می‌گردد. استفاده از مبدل باعث مخفی ماندن اینرسی ژنراتور از دید شبکه خواهد شد [۲۵]، یعنی اینرسی ژنراتور از شبکه جدا می‌شود در حالی که برخی از ژنراتورهای منابع تجدیدپذیر (سلول‌های خورشیدی و سلول‌های سوختی) اساساً بدون اینرسی‌اند. بنابراین، اینرسی کلی این نوع شبکه‌ها نیز کاهش یافته و شبکه به شبکه‌ای با اینرسی کم یا بدون اینرسی تبدیل می‌شود [۲۳]. شبکه با اینرسی کم به علت کاهش اینرسی که همان انرژی جنبشی ذخیره شده در روتور ژنراتورهای بزرگ در شبکه‌های مرسوم است، با مشکل عدم پایداری مواجه خواهد بود. از آنجایی که معمولاً شبکه‌های قدرت در نزدیکی حاشیه پایداری خود مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، با کاهش اینرسی شبکه نوسان‌های کوچک فرکانسی نیز می‌توانند باعث ناپایداری در شبکه با اینرسی کم شوند.

در اختلال‌های فرکانسی، اینرسی جنبشی شبکه نقش مهمی را در حفظ پایداری گذرای شبکه ایفا می‌کند. با استفاده از ژنراتورهای با اینرسی کم به جای ژنراتورهای سنکرون مرسوم در شبکه‌ها، اینرسی شبکه کاهش خواهد یافت. در واقع، اینرسی شبکه که انرژی جنبشی ذخیره شده در قسمت چرخان ژنراتورهای مرسوم است و در زمان اختلال فرکانسی به پایداری شبکه کمک می‌کند، کاهش خواهد یافت. سیستم ذخیره‌ساز انرژی با سرعت پاسخ بالا می‌تواند عملکردی همانند اینرسی در شبکه با اینرسی کم ایفا کند. به عبارتی، استفاده از سیستم ذخیره‌ساز با سرعت پاسخ بالا در شبکه‌های با اینرسی کم می‌تواند اینرسی را به صورت مجازی در شبکه به وجود آورد [۲۱]. این نکته اثبات شده است که استفاده از ذخیره‌سازهای با سرعت پاسخ بالا در کنترل فرکانس عملکرد بهتری نسبت به منابع مرسوم کنترل فرکانس دارند [۱۹]. استفاده از ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند در هنگام اختلال فرکانسی حتی بهتر از منابع مرسوم موجود [۲۲] با هزینه [۸] و آلاینده‌گی [۱۴] کمتر به نوسان فرکانس پاسخ دهد. در این مقاله، بهبود کنترل فرکانس و ایجاد اینرسی مجازی در شبکه مستقل با اینرسی کم با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار پیشنهاد می‌شود و بهبودهایی در طراحی آن صورت

گرفته است. سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار از چهار بخش کلی چرخ‌طیار، ماشین‌الکتریکی، مبدل‌های الکترونیک قدرت پشت به پشت^۱ و یاتاقان‌ها تشکیل شده است [۲۸]. ذخیره‌سازهای انرژی اغلب از مبدل‌های الکترونیک قدرت برای اتصال به شبکه استفاده می‌کنند و معمولاً به صورت مداوم به شبکه متصل می‌باشند، لذا راندمان بالا و تولید اغتشاشات هارمونیکی کم توسط ذخیره‌سازها بسیار پراهمیت خواهد بود. در این ذخیره‌ساز، ماشین‌الکتریکی وظیفه به چرخش درآوردن چرخ‌طیار را بر عهده دارد و در این مقاله از ماشین‌سنکرون مغناطیس دائم در طراحی ذخیره‌ساز استفاده شده است. مبدل پشت به پشت این ذخیره‌ساز از دو مبدل مجزای مبدل سمت ماشین و مبدل سمت شبکه تشکیل شده که سمت DC آن‌ها توسط خازن DC به هم متصل می‌شود.

مرجع [۲۰] سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار را برای کاهش نوسان فرکانس در کنار مزرعه بادی مورد استفاده قرار داده است. در حالی که شبکه مورد مطالعه در این مقاله علاوه بر مزرعه بادی، بخش زیادی از توان آن توسط سلول خورشیدی که اساساً بدون اینرسی است تأمین می‌شود. بنابراین، اینرسی در شبکه کمتر است. مرجع [۱۰] از اینرسی روتور توربین بادی با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم برای بالا بردن پایداری شبکه استفاده می‌کند در حالی که اینرسی توربین به دلیل ماهیت غیرقابل کنترل بودن و نوسانی بودن باد دارای محدودیت است [۹] که در این کار در صورت استفاده از ذخیره‌ساز نیازی به استفاده از اینرسی توربین بادی که دارای محدودیت است، نمی‌باشد. همچنین مرجع [۴] بهبود کنترل فرکانس در شبکه ترکیبی دیزل و سلول خورشیدی را با استفاده از ذخیره‌ساز با پاسخ ابرسانا بهبود بخشیده است در حالی که در این مقاله از شبکه‌ای استفاده شده که بیشتر توان آن از طریق سلول خورشیدی تأمین می‌شود و نیز ژنراتور سنکرونی در شبکه وجود ندارد، بلکه توربین بادی با ژنراتور القایی در کنار سلول خورشیدی استفاده شده است که اینرسی شبکه را به مراتب کاهش داده و کنترل فرکانس را مشکل‌تر می‌سازد. تفاوت شبکه مورد مطالعه در این مقاله با شبکه مورد استفاده در [۲۰] نیز تفاوت در اینرسی شبکه است، به عبارتی، در شبکه مورد استفاده در این مقاله اینرسی کمتر است که دلیل آن تأمین بیشتر توان از طریق سلول خورشیدی می‌باشد. لذا شبکه، شبکه‌ای با اینرسی کم‌تر و ضعیف‌تر می‌باشد. شبکه مستقل استفاده شده از سلول خورشیدی با توان ۵۰KW و توان باد ۱۵KW استفاده می‌کند. استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار با توان ۸KW جهت ایجاد اینرسی مجازی در شبکه با اینرسی کم مورد استفاده قرار گرفته است. بر خلاف اکثر تحقیقات انجام شده در گذشته که از تابع تبدیل شبکه و ذخیره‌ساز استفاده شده است، در این مقاله سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار متصل به شبکه سه فازه طراحی شده است. همچنین سیستم کنترل مناسب مبدل سمت ماشین جهت کنترل ماشین سنکرون مغناطیس دائم مورد استفاده در ذخیره‌ساز و نیز کنترل مبدل سمت شبکه در شبکه سه فازه طراحی شده است. برای نشان دادن وجود چرخ‌طیار متصل به محور ماشین سنکرون مغناطیس دائم اینرسی ماشین افزایش داده شده است.

1) Back to Back Converter

در ادامه مقاله در بخش دوم، شبکه مستقل شرح داده می‌شود و مدل سازی سلول خورشیدی و ژنراتور القایی توضیح داده می‌شود. در بخش سوم، بهبودهای اعمال شده در سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار بیان می‌شود و در بخش چهارم، از سیستم ذخیره‌ساز طراحی شده برای بهبود پایداری و کنترل فرکانس شبکه مستقل مورد مطالعه استفاده می‌شود و نتایج شبیه‌سازی شرح داده می‌شود.

شبکه مستقل

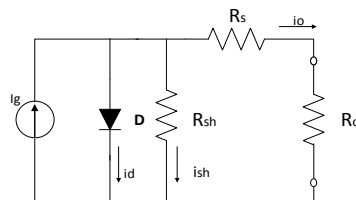
در برخی مناطق دورافتاده و بافاصله زیاد از شبکه سراسری قدرت، یکی از گزینه‌ها برای تأمین انرژی الکتریکی استفاده از شبکه‌های مستقل با تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر در دسترس است. در واقع، استفاده از این نوع شبکه به جای احداث خطوط انتقال جدید هم از نظر اقتصادی مقرون بصرفه‌تر خواهد بود و هم تلفات انرژی کمتر خواهد شد. از طرفی، با افزایش تقاضای انرژی در سال‌های اخیر رویکرد استفاده از منابع تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی افزایش پیدا کرده است. باد و خورشید از منابع تجدیدپذیری هستند که فناوری تولید انرژی الکتریکی آن‌ها بیشتر از منابع دیگر مورد توجه قرار گرفته است. هر کدام از منابع باد و خورشید دارای معایب خاص خود می‌باشند که با استفاده ترکیبی از این دو منبع در شبکه مستقل می‌توان بر برخی محدودیت‌های آنها مانند عدم قطعیت و وقفه در تأمین بار و ... غلبه کرد [۶]. به عبارتی، این دو منبع انرژی تجدیدپذیر تا حدودی مکمل هم می‌باشند و تقریباً با کاهش یکی از منابع، انرژی دیگر افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، هنگام ابری شدن هوا وزش باد افزایش خواهد یافت و کاهش تولید توان از انرژی خورشیدی با افزایش تولید از انرژی باد تا حدودی جبران خواهد شد.

در هنگام اغتشاش فرکانسی در شبکه قدرت، تعادل بین عرضه و تقاضای توان از بین می‌رود [۱۶] و فرکانس در لحظات اولیه متناسب با اینرسی شبکه تغییر خواهد کرد [۲]. اینرسی شبکه، انرژی ذخیره‌شده در قسمت‌های چرخان ژنراتور و موتورهای موجود در شبکه می‌باشد و میزان توانایی شبکه در حفظ پایداری گذرا هنگام نوسان فرکانس را نشان می‌دهد و واحد آن ثانیه است [۲۴]. اساساً اینرسی در ماشین‌های چرخان مقاومت در برابر تغییرات سریع سرعت است که در شبکه قدرت به مفهوم مقاومت در برابر تغییرات فرکانس می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین مسائل در شبکه‌های مستقل با اینرسی کم که از منابع تجدیدپذیر باد برای تولید انرژی استفاده می‌کنند، حفظ پایداری شبکه در زمانی است که سرعت وزش باد دارای تغییرات سریع می‌باشد. اهمیت این موضوع به این دلیل است که در این نوع شبکه‌های با اینرسی کم، مقدار اندک اینرسی شبکه مربوط به اینرسی توربین‌های بادی می‌باشد که در هنگام تغییرات وزش باد، این اینرسی نیز دچار نوسان شده و شبکه بیشتر از هر زمانی آسیب‌پذیر خواهد شد.

سلول خورشیدی

سلول خورشیدی یک عنصر غیرخطی در سیستم‌های الکتریکی است که به صورت یک منبع جریان، همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، مدل می‌گردد.



شکل (۱) مدار معادل سلول خورشیدی

توربین بادی با استفاده از ژنراتور القایی

در تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی، فناوری‌های گوناگون ماشین الکتریکی مانند ماشین القایی [۲۹] یا ماشین سنکرون مغناطیس دائم [۱] و ... را با توجه به مزایا و معایب آنها می‌توان به کار برد. در تولید برق بادی معمولاً از ژنراتورهای القایی به دلیل مزایایی مانند ساختار محکم، نیاز به تعمیرات کمتر و ارزان بودن بیشتر استفاده می‌شود. بنابراین، در مطالعات شبکه‌های مستقل بر پایه تولید انرژی از باد این نوع ژنراتور بیشتر مورد توجه بوده و مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲]. یک موتور القایی معمولی بدون نیاز به هیچ‌گونه اصلاحات یا تغییراتی در ساختمان داخلی آن می‌تواند به یک ژنراتور القایی تبدیل شود. برای این عمل نیاز است تا یک گرداننده خارجی مانند توربین بادی به صورت مکانیکی روتور موتور القایی را با سرعتی بیش از سرعت سنکرون به حرکت درآورد که در این حالت لغزش ماشین منفی شده و موتور القایی به عنوان یک ژنراتور عمل می‌کند [۱۱]. رابطه (۱) معادله لغزش در ماشین القایی را نشان می‌دهد.

(۱)

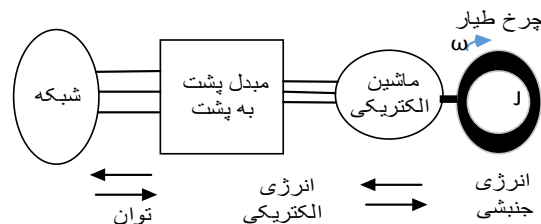
$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

در رابطه (۱) ω_s سرعت سنکرون و ω_r سرعت چرخش روتور می‌باشد. با اعمال نیروی خارجی به محور موتور، سرعت افزایش یافته و لغزش منفی می‌گردد. ژنراتورهای القایی به این دلیل که تقریباً به هیچ تنظیمی نیاز نداشته و کنترل نسبتاً ساده‌ای دارند، به طور معمول در نیروگاه‌های بادی، نیروگاه‌های آبی کوچک و یا سیستم‌های بازیابی گرما و کاهش فشار گاز بالا به فشار پایین به کار گرفته می‌شوند. ژنراتورهای القایی برای تأمین توان باید همواره به یک سیستم قدرت

متصل باشند و این توانایی را ندارند تا به صورت مجزا راه‌اندازی شده و شبکه را برق دار کنند.

بهینه‌سازی سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار

در دهه اخیر، فناوری‌های جدیدی در زمینه ذخیره‌سازی انرژی به بازار آمده‌اند که انتقال سریع انرژی را فراهم می‌نمایند. سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ‌طیار یکی از ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی با سرعت پاسخ بالا می‌باشد. اساس کار سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ‌طیار به این صورت است که در حالت افزایش توان (افزایش فرکانس) در شبکه سرعت چرخ‌طیار توسط موتور/ژنراتور سیستم افزایش می‌یابد. در این صورت، انرژی به صورت جنبشی در بخش چرخان سیستم ذخیره‌شده و در صورت وقوع کمبود توان در شبکه (کاهش فرکانس)، سیستم با کاهش سرعت انرژی جنبشی ذخیره شده را توسط موتور/ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. توان تولید شده توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه تزریق می‌شود. سیستم کنترلی وظیفه ایجاد هماهنگی بین بخش‌های مختلف ذخیره‌ساز برای داشتن عملکردی مناسب در برابر نوسان‌های فرکانس شبکه را بر عهده دارد. شمای کلی عملکرد این ذخیره‌ساز در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲) عملکرد کلی سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار

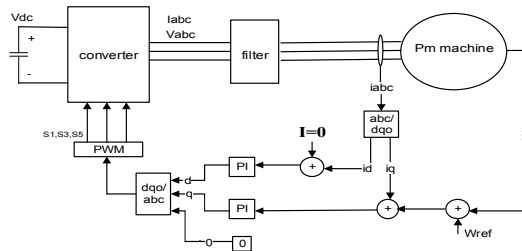
سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار از چرخش حجم چرخان با سرعت بالا جهت ذخیره انرژی به صورت انرژی جنبشی استفاده می‌کند [۱۳]. در سیستم‌های مکانیکی اصولاً از چرخ‌طیار برای یکنواخت کردن حرکت در سیستم‌های دورانی استفاده می‌گردد. به عبارتی، چرخ‌طیار ارتباط توان ورودی و خروجی را با کاهش نوسان در حرکت امکان‌پذیر می‌سازد که علت این امر توانایی یک حجم چرخنده در ذخیره کردن انرژی جنبشی است. مقدار انرژی ذخیره‌شده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$E_{fess} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (2)$$

$$J = \int r^2 dm \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳)، J ممان اینرسی است و از رابطه (۳) به دست می‌آید که در آن فاصله هر جزء دیفرانسیلی حجم از محور سیستم است و ω سرعت زاویه‌ای است. با توجه به رابطه (۲) با استفاده از حجم چرخان در سرعت بالا می‌توان میزان قابل توجهی انرژی را ذخیره نمود که در صورت نیاز با توجه به ساختار چرخش طیار با کاهش سرعت می‌توان انرژی ذخیره‌شده را با چگالی توان بالا بازیافت نمود. با استفاده از این اصل می‌توان ذخیره‌سازی را طراحی نمود که توانایی ارائه سریع انرژی ذخیره‌شده با چگالی بالا را دارد.

در سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار، تبدیل انرژی جنبشی به انرژی الکتریکی و بالعکس توسط ماشین الکتریکی صورت می‌گیرد. در ذخیره‌ساز چرخ‌طیار طراحی شده در این مقاله از ماشین سنکرون مغناطیس دائم استفاده شده است. موتورهای سنکرون آهنربای دائم (PM^1) تغذیه شده توسط اینورتر، به طور گسترده‌ای در کاربردهای صنعتی استفاده می‌شوند. موتورهای PM دارای چندین مزیت نظیر بازده بالا، ضریب توان بالا، چگالی توان بالا در مقایسه با موتورهای DC و موتورهای القایی هستند [۲۶]. در کاربردهای عملکرد طولانی بدون وقفه مانند خودروهای الکتریکی و محرکه‌های کمپرسور، بازده یکی از کاندیداهای مناسب ماشین الکتریکی می‌باشد. لذا برای کاربرد در شبکه، ذخیره‌ساز چرخ‌طیار با ماشین الکتریکی سنکرون مغناطیس دائم بیشتر مورد توجه قرار دارد [۱۸]. شکل ۳ شمای کلی کنترل‌کننده ماشین سنکرون مغناطیس دائم مورد استفاده را نشان می‌دهد. مشخصات ماشین سنکرون مغناطیس دائم مورد استفاده در این مقاله در جدول ۱ داده شده است. ماشین PM از طریق یک مبدل پشت به پشت به شبکه متصل است. مبدل پشت به پشت از دو مبدل مجزا تشکیل شده است که این مبدل‌ها با قرارگیری مناسب در حالت یکسو سازی و اینورتری امکان تبادل دوطرفه توان را محیا می‌کنند [۱۵]. در کلیدزنی مبدل‌های مورد استفاده در مبدل سمت ماشین از روش PWM سینوسی با حامل موج مثلثی و در مبدل سمت جهت کاهش هارمونیک توان تولیدی از روش مدولاسیون حذف هارمونیک استفاده شده است.



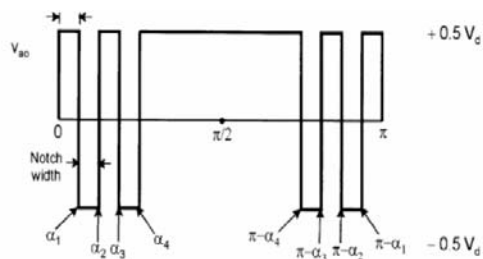
شکل ۳) شمای کلی کنترل کننده ماشین سنکرون مغناطیس دائم مورد استفاده در سیستم ذخیره ساز چرخ طیار

جدول ۱) مشخصات ماشین سنکرون مغناطیس دائم مورد استفاده [۲۷]

L_d	۰/۰۰۸۵	P	۴
L_q	۰/۰۰۸۵	J	۰/۰۵۸
R_c	۲۰۰	B	۰/۰۰۱۸۸۹
R_a	۲/۸۷۵	λ_f	۰/۱۹۲

با اعمال روش‌های کنترلی مناسب، هارمونیک‌های نامطلوب مرتب هیپینیک موج مربعی را می‌توان حذف و مؤلفه ولتاژ اصلی را کنترل نمود که این روش با عنوان حذف انتخابی هارمونیک (SHE) شناخته می‌شود. در این روش، شکاف‌هایی بر روی موج مربعی در زوایای از پیش تعیین شده برای حذف مؤلفه‌های هارمونیک موثر و همچنین کنترل مؤلفه اصلی ولتاژ، ایجاد می‌شوند. حذف هارمونیک‌های مرتب هیپین با استفاده از PWM برنامه‌ریزی شده، طیف خروجی با کیفیت بالا تولید می‌کند که این عمل باعث کاهش ضربان جریان و نهایتاً بهبود عملکرد کلی سیستم خواهد شد.

با در نظر گرفتن شکل ۴، ضرایب فوریه الگوی کلیدزنی PWM-SHE برای ولتاژهای خطبه زمین در یک سیستم سه فاز در ادامه محاسبه می‌شوند.



شکل ۴) الگوی کلیدزنی در روش SHE [۲۹]

$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (4)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V(t) \cos n\omega t d\omega t$$

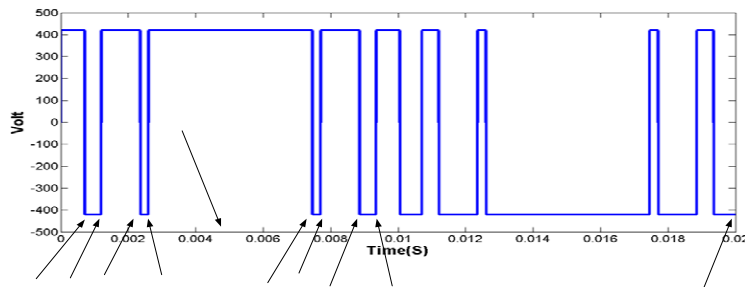
$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V(t) \sin n\omega t d\omega t$$

که در رابطه $V(t)$ ولتاژ ورودی می‌باشد. روش SHE بر اساس حذف هارمونیک‌های دلخواه است، به این صورت که سری ولتاژ را نوشته سپس عبارات هارمونیک‌هایی که میل به حذف آنها را داریم مساوی صفر قرار می‌دهیم. مقادیر بدست آمده در جدول ۲ نشان داده شده است. با استفاده از این مقادیر و با توجه به شکل ۴، الگوی کلیدزنی برای روش حذف انتخابی هارمونیک قابل پیاده‌سازی است. به منظور پیاده‌سازی روش SHE، فاز سیگنال مرجع با فرکانس ۵۰ هرتز تولید و به کنترل‌کننده تولیدکننده فرمان کلیدزنی اعمال می‌گردد. سپس کنترل‌کننده در هر لحظه فاز را با مقادیر α_1 و α_2 و α_3 و α_4 مقایسه کرده و بر اساس آن کلیدزنی انجام می‌گیرد.

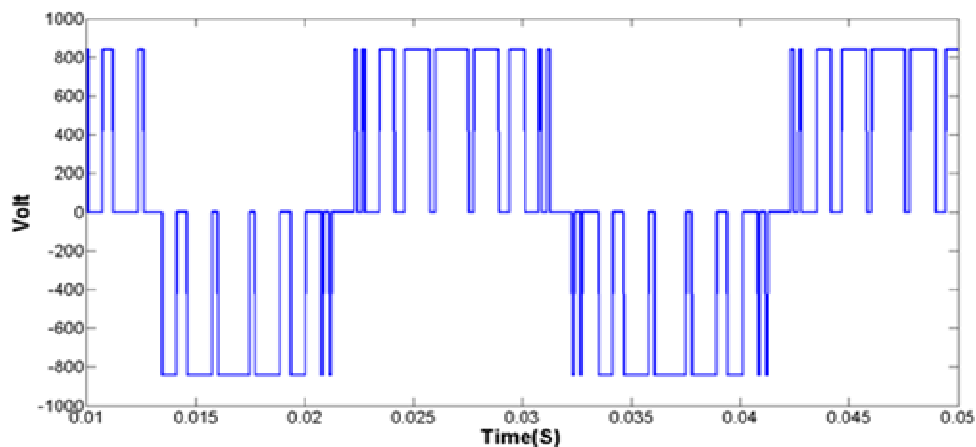
جدول ۲) زوایای بدست آمده در نرم افزار ممتیکا برای حذف هارمونیک های ۵ و ۷ و ۱۱

α_1	α_2	α_3	α_4
۰/۲۱۷۳۶۲۵۹۸۷۶۹۴	۰/۳۶۱۴۵۹۹۲۸۸۶۴	۰/۷۳۴۱۲۹۴۰۱۱۶۳	۰/۸۱۲۳۲۴۰۴۶۹۱۵

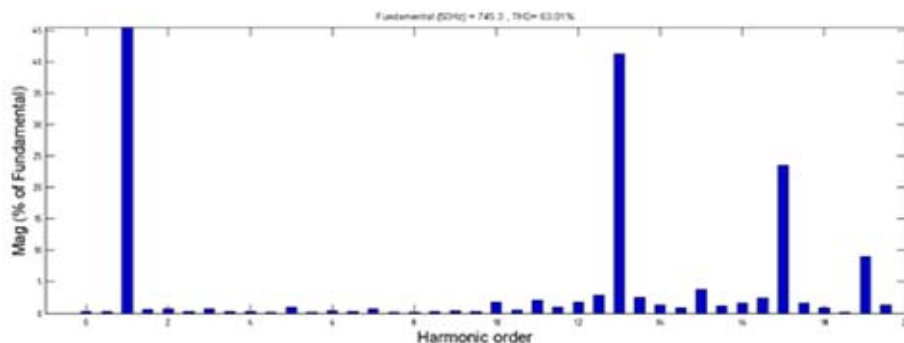
شکل ۵) شکل موج ولتاژ فاز به خنثی اینورتر دو سطحی شبیه‌سازی شده روش SHE-PWM یکی از فازها را نشان می‌دهد. با مقایسه و سیگنال مورد نظر در شکل ۴) درستی عملکرد سیستم شبیه‌سازی شده اثبات می‌گردد. همچنین شکل ۶) ولتاژ فاز به فاز خروجی اینورتر را نشان می‌دهد.



شکل ۵) خروجی فاز به خنثی اینورتر دو سطحی با روش کلید زنی SHE



شکل ۶) خروجی فاز به فاز اینورتر دو سطحی با روش کلیدزنی SHE



شکل ۷) تحلیل فوریه ولتاژ فاز به فاز خروجی اینورتر دو سطحی با روش کلیدزنی SHE

همان طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، هارمونیک‌های پنجم، هفتم و یازدهم تقریباً صفر شده‌اند. همچنین در این روش مقدار مؤلفه اصلی $V_{50Hz} = 745/3$ و مقدار اعوجاج هارمونیک کل $THD = 63/01$ می‌باشد.

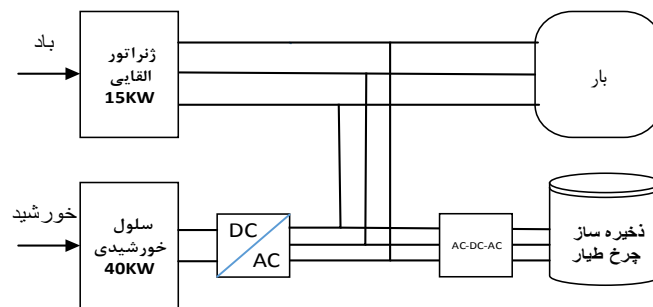
بررسی عملکرد سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار بهینه‌شده در ایجاد اینرسی مجازی در شبکه مستقل با اینرسی کم مورد مطالعه

در برخی مناطق مانند مناطق کویری استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید انرژی نسبت به تولید انرژی از منابع دیگر دارای برتری است. همچنین در برخی موارد استفاده از پیل سوختی برای تولید انرژی مورد توجه قرار دارد. از آنجایی که ژنراتورهایی مانند پیل سوختی و سلول خورشیدی اساساً بدون اینرسی‌اند، لذا در شبکه‌هایی که بخش عمده تولید آنها از

این منابع تأمین می‌گردد، شبکه‌ها با اینرسی کم و در برابر تغییرات فرکانسی ضعیف خواهند شد. هدف این مقاله بررسی ایجاد اینرسی مجازی و افزایش پایداری گذرای شبکه‌های مستقل با اینرسی کم با استفاده از ذخیره‌ساز با سرعت بالا می‌باشد. شبکه مورد مطالعه در این مقاله یک شبکه کوچک با اینرسی کم ۶۵KW است که بخش عمده تولید آن (۵۰KW) توسط ژنراتور بدون اینرسی خورشیدی تأمین می‌گردد و ۱۵KW آن نیز توسط توربین بادی تغذیه خواهد شد. مشخصات ماشین القایی مورد در توربین بادی در جدول (۳) نشان داده شده است. جهت بهبود کنترل فرکانس و افزایش پایداری گذرای شبکه مورد مطالعه یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار با توان ۸KW مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (۸) شمای کلی شبکه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول (۳) مشخصات ژنراتور القایی مورد استفاده

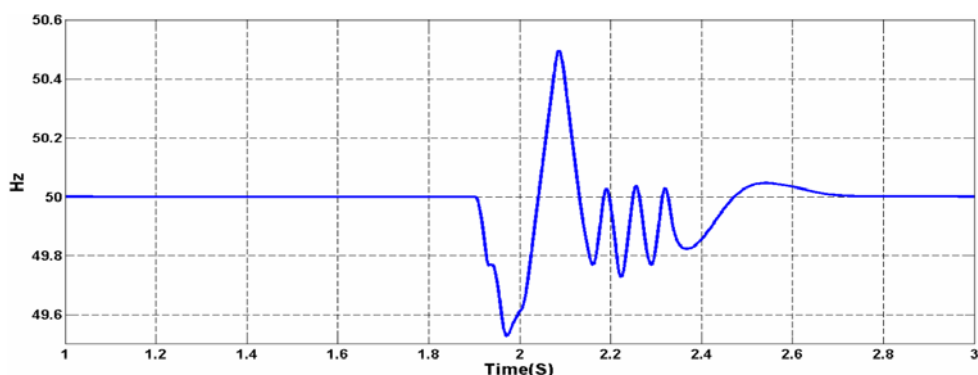
L_s	۰/۰۰۵۸۳۹	P	۲
L_r	۰/۰۰۵۸۳۹	J	۱/۰
R_r	۱/۳۵	B	۰/۰۰۲۹۸۵
R_s	۱/۴۰۵	Pn	۱۵ KW



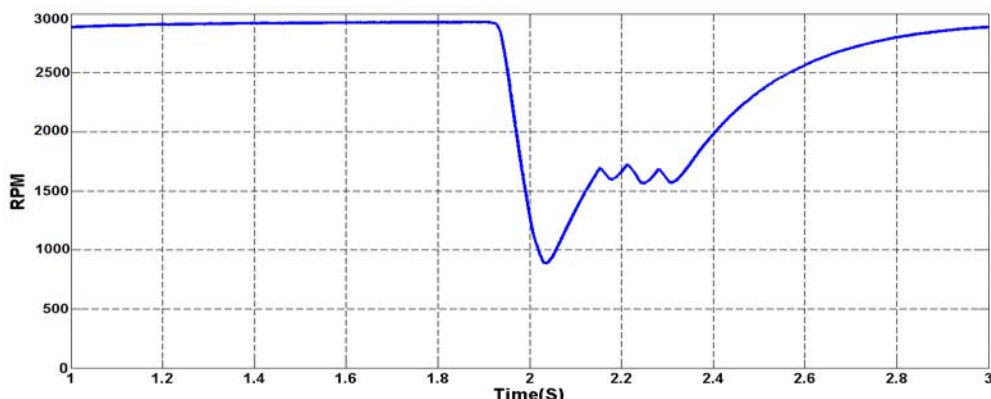
شکل (۸) شمای کلی شبکه مستقل مورد مطالعه

جهت مشاهده عملکرد شبکه مستقل مورد مطالعه در برابر اغتشاشات مختلف فرکانسی مانند تغییرات در تولید و بار، شبکه مستقل مورد مطالعه در سیمولینک متلب شبیه‌سازی شده است. سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده دارای توان ۵۰KW و ولتاژ ۳۸۰V در بار نامی است و جهت تزریق توان آن به شبکه از مبدل دو سطحی سه فاز با روش کلیدزنی PWM سینوسی با حامل موج مثلثی استفاده شده است. در توربین بادی از ژنراتور القایی برای تولید انرژی استفاده شده است که توان نامی ماشین القایی ۱۵KW و ولتاژ نامی آن در بار نامی ۳۸۰V است. شبکه دارای دو بار مجزای ۴۰KW و

۱۰KW است که در حالت معمول که سلول خورشیدی در حال تولید توان است، کل بار به شبکه متصل می‌باشد و هنگامی که توان خورشیدی تولید نمی‌شود بار ۴۰KW نیز از شبکه جدا می‌گردد. پایداری گذرای شبکه با اضافه کردن سیستم ذخیره‌ساز شرح داده شده در بخش ۳ توسط ایجاد اینرسی مجازی با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار بهبود داده شده است. جهت بررسی عملکرد سیستم ذخیره‌ساز چرخ‌طیار در افزایش اینرسی در شبکه با اینرسی کم، این ذخیره‌ساز در یک اختلال بوجود آمده در شبکه با اینرسی کم مورد بررسی قرار گرفته است. این اختلال فرکانسی در زمان $t=1.9$ تا $t=2$ در شبکه ایجاد شده و باعث نوسان فرکانس در شبکه شده است. این نوسان فرکانس در شکل (۹) نشان داده شده است. سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار در برابر این نوسان فرکانس در شبکه عکس‌العمل نشان داده و جهت ایجاد اینرسی مجازی، سرعت چرخ‌طیار را متناسب با نوسان فرکانس تغییر می‌دهد. این تغییرات سرعت چرخ‌طیار در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

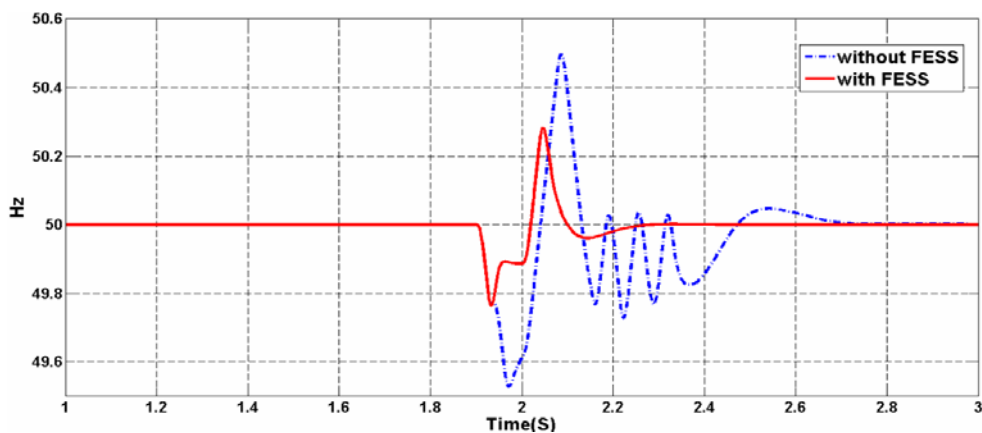


شکل ۹) فرکانس شبکه در لحظه خطا



شکل ۱۰) تغییرات سرعت سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار برای پاسخ به نوسان فرکانس

با عملکرد مناسب سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار و تزریق بموقع و مناسب توان به شبکه، شبکه در حضور سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار در برابر اختلال فرکانسی عملکرد بهتری داشته و افت فرکانس از $49/6$ به حدود $49/8$ رسیده است. همچنین فرکانس شبکه زودتر به حالت پایدار رسیده است. فرکانس شبکه بعد از عملکرد سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار در هنگام اختلال فرکانس در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، حضور سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار در شبکه با اینرسی کم باعث افزایش اینرسی شبکه شده و نوسان فرکانس را کاهش داده است.



شکل (۱۱) افزایش اینرسی در شبکه توسط سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار

نتیجه‌گیری

اخیرا شبکه مستقل و تولید انرژی الکتریکی با استفاده از منابع تجدیدپذیر در مناطق دورافتاده و دور از شبکه قدرت مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از ژنراتورهای غیر سنکرون (ژنراتورهایی که اساسا بدون اینرسی‌اند مانند سلول خورشیدی) در این شبکه‌ها باعث کاهش قابل توجه اینرسی در آنها شده است و لذا به شبکه با اینرسی کم نیز معروف‌اند. در این مقاله، بهبود پایداری گذرا و کنترل فرکانس شبکه‌های با اینرسی کم توسط ایجاد اینرسی مجازی با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار پیشنهاد شده است. جهت بررسی بهبود پایداری شبکه و ایجاد اینرسی مجازی توسط سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار، یک شبکه مستقل کوچک که توان آن از منابع تجدید پذیر باد و خورشید تأمین می‌گردد مورد مطالعه قرار گرفته است. در شبکه مورد مطالعه، بیشتر از انرژی خورشید که اساسا بدون اینرسی است، برای تولید انرژی استفاده شده است لذا شبکه مورد مطالعه، شبکه‌ای با اینرسی کم می‌باشد. جهت مشاهده تأثیر عملکرد سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار در پایداری شبکه، فرکانس بعد از یک نوسان در شبکه در حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز پایش گردید. با طراحی و استفاده از سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار در شبکه با اینرسی کم پایداری گذرای شبکه مستقل بهبود یافته و شبکه قادر به پاسخ بهتر به نوسان‌های فرکانسی شبکه می‌شود. همان طور که در نتایج شبیه‌سازی مشاهده گردید، با استفاده از

سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار در شبکه با اینرسی کم، بعد از اختلال، فرکانس کمتر افت کرده یعنی اینرسی به صورت مجازی در شبکه به وجود آمده است. همچنین نوسان‌های فرکانس کمتر شده و فرکانس بعد از نوسان زودتر به مقدار نامی خود باز می‌گردد که افزایش پایداری گذرا در شبکه با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار در شبکه را اثبات می‌کند.

منابع

- [1] A. Ahmed. Mahmoud,(2010) "Power conditioning unit for small scale hybrid PV-Wind generation system," DURHAM university, PHD Thesis.
- [2]] A. and Erlich, I Azmy, (2003)"Dynamic Simulation of Fuel Cells and Micro turbines Integrated with a Multi-Machine Network," *Proc. Int. Conf. on Power Tech Conference Proceedings*, Bologna, Italy, pp. 550- 555.
- [3] Abderrezak Bouharchouche, El Madjid Berkouk, and Tarrak Ghennam,(2013) "Control and energy management of a grid connected hybrid energy system PV-wind with battery energy storage for residential applications," *Proc. Int. Conf. on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte Carlo, pp. 1 - 11.
- [4] Bruno François, Gilles Malarange Gauthier Delille, "Dynamic Frequency Control Support by Energy Storage to Reduce the Impact of Wind and Solar Generation on Isolated Power System's Inertia," *IEEE trans*, vol. 3, pp. 931-939, OCTOBER 2012.
- [5] C. Chapelsky and A Knight,(2007) "Control of a High-Inertia Flywheel as part of a High Capacity," *Proc. Int. Conf. on IEEE Electrical and Computer Engineering*, Vancouver, pp. 1437 - 1440.
- [6] Djamila Rekioua, Toufik Rekioua, and Abdelmouna im Tounzi Kassa Idjdarene, "Performance of an Isolated Induction Generator Under Unbalanced Loads," *IEEE trans , ENERGY CONVERSION*, vol. 25, no. 2, pp. 303-311, JUNE 2010.
- [7] E. Hiraki, M. Nakaoka, and O. Noro T. Ahmed, "Three-phase self-excited induction generator driven by variable speed primemover for clean renewable energy utilizations and its terminal voltage regulation, Characteristics by static VAR compensator," *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 2, pp. 693–700, Oct 2003.
- [8] . Gonzalez-Longatt, E. Chikuni, W. Stemmet, and K. Folly,(2012) "Effects of the Synthetic Inertia from Wind Power on the Total System Inertia after a," in *IEEE PES PowerAfrica 2012 Conference and Exposition* , Johannesburg, South Africa, July, pp. 1-7.
- [9] G. Barakat, B. Dakyo, and X. Roboam E. J. R. Sambatra,(2003) "Safety operation locations of permanent magnets synchronous machine for stand alone wind energy converter," *Proc. Int. Conf. on Power ElectApp.*, Toulouse, France, p. CDROM.

- [10] G. Delille, B. Francois, and G. Malarange, (2010) "Dynamic frequency control support: A virtual inertia provided by distributed energy storage to isolated power systems," *Proc. Int. Conf. on Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), IEEE PES, Gothenburg*, pp. 1-8.
- [11]. Mandic and A. Nasiri A. Abedini, (2008) "Wind power smoothing using rotor inertia aimed at reducing grid susceptibility," *Proc. Int. Conf. on Industrial Electronics. IECON*, Orlando, pp. 1445 - 1451.
- [12] Haifeng Wang Song Xu, (2012) "Simulation and analysis of back-to-back PWM converter for flywheel energy storage system," *IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS*, pp. 1-5.
- [13] J. Driesen and K. Visscher, (2008) "Virtual Synchronous Generators," *Proc. Int. Conf. on Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE, Pittsburgh, pp. 1 - 3.
- [14] Johan Enslin Gerard Thijssen, (2007) "Cost Comparison for a 20 MW Flywheel-based Frequency Regulation Power Plant," in *KEMA, BPCC.0003.002*.
- [15] Khoi Vu, R. Masiello, and R. Fioravanti, (2009) "Benefits of fast-response storage devices for system regulation in ISO markets," *Power & Energy Society General Meeting, PES. IEEE*, Calgary, AB, pp. 1-8.
- [16] M. Amin, (2012) "Efficiency and Power Density Improvement of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy Systems utilizing High Frequency-Based Power Converter," Florida International University, PHD Thesis.
- [17] M. Benidris and J. Mitra, (2012) "Enhancing stability performance of renewable energy generators by utilizing virtual inertia," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, pp. 1 - 6.
- [18] M. Datta, H. Naitoh, and T. Senjyu, "frequency Control Improvement in a PV-Diesel Hybrid Power System with a Virtual Inertia Controller," *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, , Singapore, July 2012, pp. 1167 - 1172.
- [19] M. H. Nehrir, C. Wang, "Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 23, no. 3, September 2008.
- [20] Mohamed Orabi, Mutsuo Nakaoka Tarek bed, and M. Z. Youssef, (2004) "Efficient Performances of Induction Generator for Wind Energy Utilization ," *Proc. Int. Conf. on the IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, Korea, pp. 1-6.
- [21] Nguyen Van Nho and Myung Joong Youn, (2005) "A Simple On-line SHE PWM With Extension to Six Step Mode in Two-Level Inverters," *Proc. Int. Conf. on Power Electronics and Drives Systems, PEDS*, pp. 1419 - 1424.
- [22] P. F. Puleston F. Valenciaga, "Supervisor Control for a Stand-Alone Hybrid Generation System Using Wind and Photovoltaic Energy," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 23, no. 3, June 2005.

- [23] R. Sebastián, J. Quesada, A. Colmenar R. Peña-Alzola, (2011) "Review of Flywheel based Energy Storage Systems," *Proc. Int. Conf. on IEEE*.
- [24] Richard Fioravanti, (2007) "Emissions Comparison for a 20 MW Flywheel based Frequency Regulation Plant," in *KEMA, BPCC.0003.001*.
- [25] Rion Takahashi and Junji Tamura, (2007) "Frequency Stabilization of Small Power System with Wind Farm by Using Flywheel Energy Storage System," *Proc. Int. Conf. on IEEE International Symposium, Power Electronics and Drives*, Cracow, pp. 393 - 398.
- [26] S. Morimoto, Y. Takeda, and T. Hirasu, "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 41, no. 5, pp. 511 - 517, Oct 1994.
- [27] W. Bialek, and R. Bumby J. Machowski, (2008), *Power System Dynamics: Stability and Control*, 2nd ed., John Wiley, Ed. Oxford.
- [28] X. Yingcheng and T. Nengling, (2011) "Review of contribution to frequency control through variable speed wind turbine," *Proc. Int. Conf. Renew. Energy*, pp. 1671-1677.
- [29] Xiang Rong, Wang Xiaoru, and Tan Jin, (2011) "Operation control of flywheel energy storage system with wind farm," *Proc. Int. Conf. IEEE Control Conference*, Yantai, July 2011, pp. 6208 - 6212.