

بررسی آرایش های مختلف سیستم الکتریکی توربینهای بادی سرعت متغیر

بهمن خاکی

شرکت تامین کیفیت صنعت

bahman.khaki@ieee.org

چکیده - انواع انتخاب های سیستم الکتریکی برای کارکرد سرعت متغیر یک ژنراتور توربین بادی مورد بررسی قرار می گیرد. در توربین بادی سرعت متغیر به دلیل استفاده از مبدلها آرایشهای مختلفی برای چنین سیستمی متصور است، به علاوه انواع مختلف ژنراتور، جریان مستقیم، القایی قفسه ای یا دوسو تغذیه و سنکرون در آن به کار می رود، که تمرکز اصلی روی آرایشهای کاربردی و عملی و تقسیم بندی کلی و مقایسه روشها می باشد. مشخصه های کلیدی عملکرد هر سیستم و مزایا و کاستی های هر یک بیان شده است و در صورت وجود کاستی در روشی راه حل آن بحث شده است.

کلیدواژه - توربین بادی، سرعت متغیر، توربین و ژنراتور، دوسو تغذیه ای، مبدل، رابط جریان یا ولتاژ

1- مقدمه

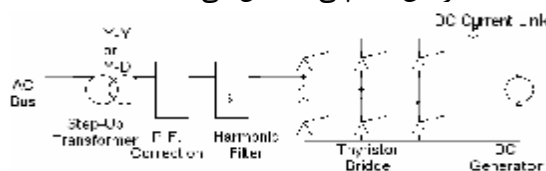
گسترش روز افزون تولید برق از انرژی بادی و افزایش مزارع بادی در چند دهه اخیر از یکسو و بالطبع اثر رفتار نرمال و گذرای این واحدهای تولید انرژی بر شبکه برق و بعضاً شبکه توزیع برق از سوی دیگر، لزوم شناخت اجزای داخلی این واحدها و آرایشهای مختلف آنها را، برای طراحی مناسب و بهینه چنین سیستمی در شرایط مختلف به وضوح نشان میدهد. توربین های بادی همانطور که می دانیم در دو نوع سرعت ثابت و سرعت متغیر به کار می روند، که نوع سرعت متغیر آن به وسیله مبدلها به شبکه متصل میشود، بر خلاف نوع سرعت ثابت که نیازی به مبدل ندارد. همچنین عملکرد تنظیم و کنترل سرعت موتورهای AC با استفاده از مبدل های فرکانسی که رفته رفته راه خود را در بین درایوهای DC باز کرده اند و توسعه سریع این درایوهای تنظیم سرعت AC باعث شده که انتخاب های زیادی در بحث کاربردها آنها در سیستم های تولید توان در نوع سرعت متغیر به وجود آید. در مورد سیستم ژنراتوری توربینهای بادی قبلاً ژنراتور القایی قفسه ای استفاده می شد، اما در حال حاضر به دلیل قابلیت کنترل سرعت در ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه از آنها بیشتر استفاده می شود، و پیش بینی میشود که کاربرد ژنراتورهای سنکرون در آینده افزون گردد. پس سیستم های ژنراتوری مختلفی هم در این سیستمها به کار می رود، که هدف بررسی آرایشها و مدل های مختلف این سیستمها برای توربین بادی با سرعت متغیر و مزایا و کاستی های هر یک خواهد بود. به ویژه بر روی آرایش های کاربردی توربین های بادی با ظرفیت بالا، بالاتر از یک مگا وات، تأکید بیشتری شده است.

2- سیستم های کاربردی برای توربین بادی ظرفیت بالا

2-1- ژنراتور DC با پل اینورتری با کموتاسیون

خط:

مطابق شکل 1 توان AC به توان DC با استفاده از یک پل یکسوساز و کموتاسیون خط (DC) تبدیل شده است. یک فیلتر در ترمینال های AC پل اینورتری برای جلوگیری از شارش جریان هارمونیک به سیستم قدرت به کار رفته است، همچنین یک اصلاح کننده ضریب توان واحد در نظر گرفته شده است. به دلیل فیلتر کردن مشکلی که برای هارمونیک های ناخواسته مورد نیاز است، آرایش های پل دیگری نیز رایج است، مثلاً در شکل 2 آرایش پل شش پالسه دوگانه به کار رفته، که باعث حذف فرکانس های پائین، مولفه های هارمونیک 5ام و 7ام که در آرایش پل شکل 1 وجود داشتند، می شود. از مزایای دیگر آرایش پل دوگانه این است که هریک از دو پل فقط نصف کیلو ولت آمپر مجاز را نسبت به آرایش تک پلی، تحمل می کند.

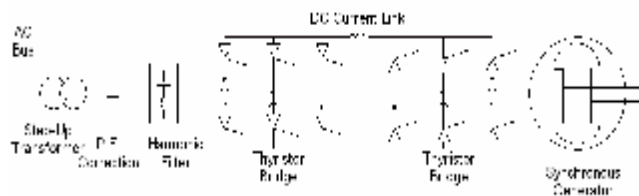


شکل 1: ژنراتور DC همراه با سیستم اینورتری (DC/AC)

(2) حفاظت از خطای DC: در اتصال این سیستم به آرایش‌های دیگر، ایزوله‌سازی با طراحی یک سیستم کنترل عملکرد سریع برای پل مبدل سه فاز، که از شارش جریان خطا به ماشین DC حین خطا در طرف AC مبدل، جلوگیری کند لازم است. (3) محدودیت‌ها در پاسخ کنترلی: یکی از مزیت‌های توربین بادی سرعت متغیر نسبت به توربین بادی سرعت ثابت توانایی آن در میرا کردن نوسان‌های پیچشی (torsional oscillation) است که نیاز به کنترل گشتاور دارد که سیستم DC که کنترل گشتاور در آن توسط تنظیم جریان میدان آن صورت می‌گیرد خیلی کندتر از سیستم‌های AC است که بحث خواهند شد، که این مشکل با استفاده از کنترل آرمیچر و چارپا قابل حل است، اما چارپا با کموتاسیون اجباری در سیستم‌های توربین بادی ظرفیت بالا توصیه نمی‌گردد و کاربرد توان پایین دارد.

2-2- کاربرد ژنراتور سنکرون و اینورتر/یکسو ساز در توربین‌های بادی:

آرایش دیگر استفاده از ژنراتور سنکرون در توربین بادی است، که متصل به سیستم یکسوساز/اینورتر مطابق شکل 4 است. کموتاسیون اینورتر طرف خط، دوباره به صورت جذب توان راکتیو از سیستم قدرت صورت می‌پذیرد و تحریک ژنراتور توسط یک محرک بدون جاروبک انجام می‌شود.

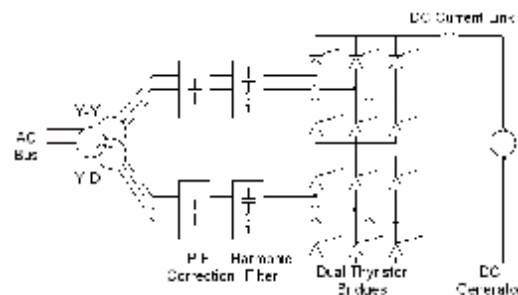


شکل 4: آرایش ژنراتور سنکرون با سیستم اینورتر (DC/AC)

مزایای این سیستم: (1) محدوده سرعت وسیع. (2) نوسانات گشتاور فرکانس بالا: اندازه پالسهای گشتاور در حدود 6 برابر فرکانس مبدل طرف ماشین است. اگر فرکانس نوعی آن در کاربردهای توربین بادی بین 30 تا 90 هرتز باشد، محدوده نوسان گشتاور بین 180 تا 540 هرتز خواهد بود که نگران کننده نیست، چون از رزونانس‌های اندازه‌گیری شده توربین بادی بالاتر خواهد بود. و مشکلات این آرایش:

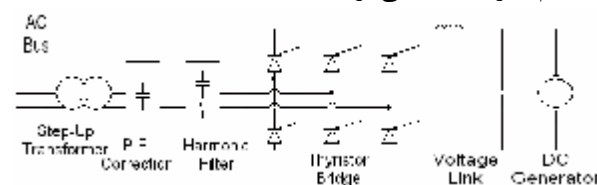
- (1) نوسانات گشتاور فرکانس پائین در نزدیک سرعت سنکرون
- (2) اعوجاج هارمونیکی: حذف مؤلفه‌های هارمونیکی مانند سیستم ژنراتور DC با افزودن تعداد آرایش پل قابل حل است.

2-3- کاربرد ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه متصل به اینورتر/یکسوساز با رابط جریان DC:



شکل 2: آرایش ژنراتور DC همراه با سیستم اینورتر دوگانه

اگر چه فیلتر کردن ولتاژ DC، در این کاربرد خیلی مورد نیاز نیست، اما برای کاهش دادن تلفات (Stray) در ژنراتور با توجه به جریان‌های هارمونیک به کار می‌رود. ساده‌ترین فیلتر می‌تواند یک راکتور برای صاف کردن شکل موج جریان باشد، که وقتی اندازه القاگر بزرگ باشد، سیستم ژنراتوری مبدل بیشتر به یک منبع جریان شبیه می‌گردد. یک انتخاب دیگر به کار بردن خازن در ترمینال‌های دو سر ماشین است، که نتیجه آن اندازه کوچکتر راکتور بکار رفته برای فیلتر کردن است. شکل 3 نشان دهنده این آرایش است، در این راهکار جریان ماشین، با فراهم شدن مسیر امپدانس پایین برای جریان‌های هارمونیک، صاف تر می‌شود. و وقتی که اندازه خازن بزرگتر باشد، سیستم ژنراتوری مبدل بیشتر به یک منبع ولتاژ برای سیستم قدرت شبیه می‌گردد.

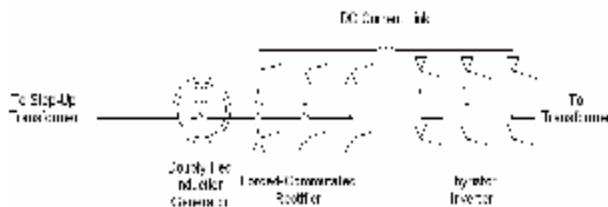


شکل 3: کاربرد ژنراتور DC با اضافه شدن خازن در سیستم اینورتر

از مزایای این روش می‌توان موارد زیر را بیان کرد:

- (1) کمتر شدن نوسانات گشتاور: با توجه به اینکه ژنراتور DC است برخلاف ژنراتور AC پالسهای گشتاور مربوط به جریانهای هارمونیک با توجه به کلیدزنی مبدل سمت ژنراتور، حذف شده اند. اما با توجه به درجه فیلتر کردن، نوسانات اضافی با فرکانس نوسانات 360 هرتز یا مضربی از آن که باعث مشکلات رزونانسی میشوند، در این سیستم به وجود می‌آید.
- (2) الگوریتم کنترل ساده برخلاف کنترل ژنراتور AC در کاربردهای سرعت متغیر. و اما کاستی‌های این سیستم:
- (1) از نقطه نظرهای نگهداری و قابلیت اطمینان: اگر چه عملکرد پیوسته و همیشگی در توربین‌های بادی مد نظر نیست، اما موضوعاتی چون نگهداری و تعمیر کموتاتور، و بحث قابلیت اطمینان سیستم‌های ژنراتوری که کموتاسیون آنها توسط سیستم مکانیکی انجام شده است، همچنان وجود دارد.

(1) بازه سرعتی محدود: وقتی سرعت ماشین از سرعت سنکرون بالا می‌زند، پخش توان به سوی روتور بالعکس می‌گردد و نتیجه آن از دست رفتن انرژی کموتاسیون در پل طرف روتور است که با بکارگیری کموتاسیون اجباری برای پل سمت روتور قابل حل است و در شکل (6) آمده است.

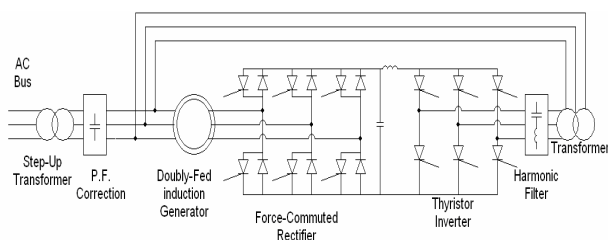


شکل 6: آرایش ژنراتور القایی دوسو تغذیه و یکسوساز کموتاسیون اجباری (2) نوسانات گشتاور: جریان‌های سیم پیچ‌های روتور باعث هارمونیک‌های مضارب 5ام، 7ام، 11ام و 13ام، فرکانس لغزش می‌گردد، که ممکن است مقادیر بزرگ آن در فرکانس‌های رزونانس مکانیکی اتفاق افتد.

(3) ضریب توان پسفاز: به دلیل اینکه هم یکسوساز و هم اینورتر توان اکتیو جذب می‌کنند، پس ضریب قدرت کلی این سیستم نمی‌تواند به واحد برسد و بانک خازنی بزرگی برای تصحیح ضریب توان و تأمین VAR برای ماشین و مبدل، مورد نیاز است.

2-3-2 ژنراتور القایی دو سو تغذیه متصل به اینورتر/ یکسوساز با رابط ولتاژ DC:

همانطوری که آرایش‌های مبدل با رابط جریان DC، ولت-آمپر کموتاسیون خود را از منبع وصل شده کسب می‌کنند، سیستم‌های با رابط و کنترل ولتاژ DC نیز نوعاً انرژی کموتاسیون را از مدارات خازنی ویژه دریافت می‌کنند، (یا توسط کلیدهای کموتاسیون خودی از قبیل ترانزیستورها یا GTOها). که چنین مبدل‌هایی از سیستم قبلی یعنی کنترل جریان DC پر هزینه‌ترند، چنین سیستمی در شکل (7) نشان داده شده است، که در آن مبدل متصل به روتور در حالت کموتاسیون اجباری کار می‌کند، در حالی که مبدل متصل به استاتور، کموتاسیون طبیعی دارد. آرایش‌های دیگر می‌تواند، کموتاسیون اجباری برای مبدل طرف استاتور و یا هر دو طرف داشته باشد.



نوع دیگر از سیستم‌های توربین بادی که به نسبت آرایش‌های دیگر به دلیل قابل کنترل بودن سرعت روتور ماشین ساختار مناسبی نیز می‌باشد، استفاده از سیستم ژنراتوری القایی دو سو تغذیه (DFIG) مطابق شکل 5 است.

سیستم مانند قبل، شامل یک آرایش اینورتری/ یکسوسازی است، که در آن مبدل طرف ژنراتور با حلقه‌های لغزان به سیم پیچی‌های روتور سه فاز متصل می‌گردد و اصولاً عملکرد فوق سرعت سنکرون یا تحت سرعت سنکرون آن امکان‌پذیر است. قابل ذکر است که مبدل طرف روتور در سرعت تحت سنکرون، به عنوان یک اینورتر فرکانس متغیر عمل می‌کند. بالعکس، عملکرد سرعت فوق سنکرون آن، تولید توان می‌کند، و توان الکتریکی نیز از روتور توسط حلقه‌های لغزان گرفته می‌شود که در این حالت مبدل طرف روتور به عنوان یک یکسوساز عمل می‌کند.



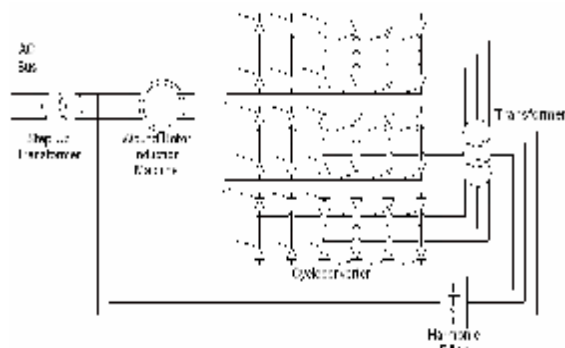
شکل 5: ژنراتور القایی دوسو تغذیه با اینورتر/ یکسوساز (AC/ DC/ AC) در این نوع سیستم، علاوه بر ترانسفورمر کاهنده برای سطح ولتاژ توزیع، یک ترانسفورماتور دیگر برای یکنواختی ولتاژ سیم‌پیچی روتور و استاتور به کار می‌رود، که خود حفاظت اتصال کوتاه اضافی نیاز دارد، این ترانسفورمر در کاهش جریان ریبیل در پل نیز کمک می‌کند. برخی مزایای این مدل:

(1) توانی که مبدل متحمل می‌شود تنها توان لغزش است که بخشی از توان کل مجاز است، برای مثال اگر محدوده سرعت 0/1 تا 0/15 پریونیت باشد، توان مجاز مبدل فقط 0/1 تا 0/15 پریونیت کل توان خواهد بود. (2) به دلیل کنترل توان در فرکانس لغزش، پاسخ این سیستم از سیستم ژنراتور سنکرون کندتر، اما از حالت ژنراتور DC سریعتر است. (3) هارمونیک: از آنجایی که پل‌ها فقط با توان لغزش سر و کار دارند، جریان‌های هارمونیک نیز به تناسب توان لغزش کاهش یافته و فیلتر کردن آسانتری دارند. (4) کنترل توان راکتیو: در حالی که توان اکتیو در این سیستم پسفاز است یعنی مثبت، مقداری معینی توان راکتیو نیز برای هماهنگ ساختن زوایای کنترل یکسو ساز و اینورتر، نیاز داریم. بنابراین عملکرد با ضریب توان واحد، به طور پیوسته تنها با استفاده از بانک خازنی ثابت و بدون نیاز به خازن‌های کلیدزنی، قابل حصول است. برخی کاستی‌های این مدل:

شکل 7: آرایش ژنراتور القایی دوسو تغذیه با رابط ولتاژ DC

2-3-3- سیستم ژنراتور القایی دو سو تغذیه و سیکلکانورتر (مبدل AC/ AC):

شکل (9) نشان دهنده آرایش این سیستم است. می دانیم سیکلکانورتر، توان خط را مستقیماً و بدون واسطه رابط DC به توان قابل تنظیم تبدیل می کند، شکل 36 ترستوری زیر پرکاربردترین آن است که مانند یک منبع ولتاژ عمل می کند، برای تحقق ایزولاسیون جهت جلوگیری اتصال کوتاه ها، این مدارات به همراه ترانسفورماتوری با سه ثانویه ایزوله از هم به کار می روند، اگر سه فاز روتور از هم ایزوله باشند، این ترانسفورماتور می تواند حذف گردد، اما این روش به دلیل اینکه ژنراتور توربین بادی 6 حلقه لغزان نه 3 حلقه نیاز دارد، پیشنهاد نمی شود. مزیت این روش کنترل ضریب توان است که تنظیم مناسب توان راکتیو مورد نیاز برای کلیدزنی سیکلکانورتر، توسط خود استاتور ماشین صورت می گیرد، یعنی ماشین خود پشتیبان است و می تواند توان را در ضریب توان 1 فراهم سازی کند.



شکل 9: کاربرد ژنراتور آسنکرون دوسو تغذیه و سیکلکانورتر

کاستی های این روش:

- 1) در حالت عادی چون گشتاورهای هارمونیک ایجاد شده توسط کلیدزنی سیکلکانورتر و فرکانسهای آن مضاربی از 360 هرتز است و خیلی بالاتر از فرکانسهای رزونانس سیستم مکانیکی است، مورد توجه قرار نمی گیرند، اما به دلیل عدم همزمانی کلیدزنی سیکلکانورتر با فرکانس خروجی، نوسانات گشتاور و فرکانس پائین افزایش یافته و باعث نوسانات مکانیکی می گردد، که در مضارب بزرگتر از 60 هرتز مثلاً به نسبت (3:1) و (2:1) دامنه نوسانات بزرگ می شود.
- 2) ساختار هارمونیک های تزریق شده توسط جریان های خط به راحتی قابل پیش بینی نیستند، چون فرکانسهای کلیدزنی ترستورهای سیکلکانورتر نیز باعث هارمونیک ها می گردند، پس در این حالت فیلتر کردن مشکل تر است.

به طور کلی مبدل های کموتاسیون اجباری دو حالت کاری دارند:

- 1) حالت 6 گامی که در آن کلیدهای مبدل در کمترین سرعت ممکن تریگر شده و ولتاژهای هارمونیک مرتبه 5، 7، 11 و 13 و بالطبع جریان های القایی ناشی از این فرکانس ها ایجاد می گردند.

- 2) حالت کاری مدولاسیون پهنای پالس (PWM)، که در آن فرکانس کلیدزنی، برای حذف هارمونیک های ناخواسته، مدوله می گردد، این فرکانسهای کلیدزنی به اندازه کافی بالا هستند که گشتاورهای هارمونیک، به طور مؤثری حذف می گردند. مزایای این سیستم DFIG با رابط ولتاژ عبارتند از:

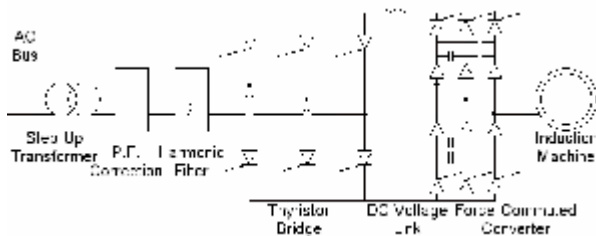
- 1) رفتار منحنی در حوالی سرعت سنکرون، بدلیل فراهم سازی کموتاسیون داخلی برای مبدل طرف روتور بدون نوسان است.
- 2) نوسانی بودن گشتاور فقط در فرکانس بالا: به خاطر وجود اینورتر PWM و اینکه فرکانس آن بالاتر از فرکانس های رزونانسی سیستم مکانیکی است و در نتیجه عدم ایجاد هارمونیک های گشتاور.
- 3) کنترل توان راکتیو: از آنجائی که مبدل کموتاسیون اجباری نیاز به توان اکتیو ندارد و خود توان راکتیو ژنراتور را تأمین می سازد. کاستی های این سیستم:
- 1) هزینه بالا: به دلیل نیاز به کلیدهای سطوح بالاتر و یا اجزای اضافی برای انجام کموتاسیون اجباری، که البته این هزینه روز به روز، به دلیل استفاده از ترانزیستورهای قدرت بالا جدید و GTOها، کاهش می یابد.



شکل 8: ژنراتور القایی دوتغذیه با دو حالت کار سرعت فوق و تحت سنکرون

- 2) پیچیدگی: به دلیل بکارگیری روش PWM و احتیاج به الگوریتم کنترل ولتاژ پیچیده تر و اینکه کارکرد مبدل PWM در دو حالت فوق و تحت سرعت سنکرون، مطابق شکل (8)، نیاز به یک پل دیودی اضافی دارد.

تغییراتی زیاد ولتاژ در نتیجه بار و نیز به صفر شدن آن در بی باری می باشد ، و کنترل مبدل طرف خط با توجه به تغییرات زاویه ای زیاد مشکل دیگری در خصوص اصلاح ضریب قدرت ایجاد می کند.



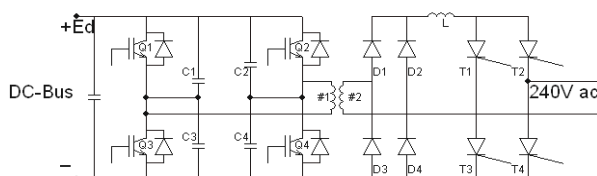
شکل 12: آرایش ژنراتور القایی با رابط جریان DC و مبدل AC/DC/AC

3-2-3- آرایش ژنراتور القایی و سیکلکانوتر:

سیکلکانوترتر فرم سوم از مبدل های بحث شده در کاربردهای توربین بادی بود که همانند ژنراتور سنکرون یا ژنراتور القایی دو تغذیه ای، ژنراتور القایی قفس سنجایی هم بکار می رود اما کاستی های آن خیلی بیشتر از مزایای آن است ، مثلاً فرکانس ژنراتور باید نسبتی از فرکانس خط نگه داشته شود یا توان راکتیو برای کموتاسیون سیکلکانوترتر و نیز مغناطیس کردن ژنراتور القایی مورد نیاز است.

3-2-4- ژنراتور القایی و مبدلی با رابط فرکانسی بالا:

چنین آرایشی در شکل 13 آمده است ، که در واقع یک سیکلکانوترتر دو طرفه است که از کموتاسیون نوع رزونانسی برای افزایش فرکانس ورودی به سطوح 10 کیلوهرتز و دوباره کاهش آن توسط سیکلکانوترتر دیگر به فرکانس کم معمولاً 60 یا 50 هرتز، استفاده می کند، آرایش های مختلفی برای آن متصور است [4 و 5] . تعداد اجزاء داخلی زیاد است ، مثلاً حدود 72 تریتور بایستی به کار رود . در شکل زیر فقط مدار تکفاز آن آمده است، که مشابه آن در فازهای دیگر نیز به کار می رود.



شکل 13: آرایش اینورتر خودکموتاسیون با رابط فرکانس بالا (تکفاز)

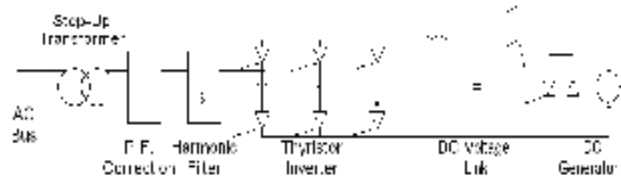
3-3- آرایش های ژنراتورهای آهنربائی دائم:

3- آرایشهای توربین بادی سرعت متغیر با ظرفیت کم:

وقتی که ظرفیت و توان توربین بادی کاهش می یابد، آرایش های ممکن افزایش می یابد ، البته تمام آرایشهای بیان شده در بخشهای قبل در ظرفیت کمتر نیز کاربرد دارند.

3-1- ژنراتور DC با رابط ولتاژ DC و بکارگیری چابرها:

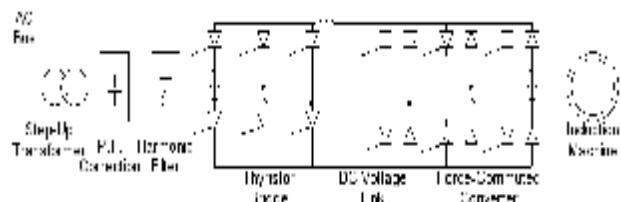
همانند شکل (10) که توربین بادی و ژنراتور DC به یک چابرا کاهنده وصل است ، ولتاژ سمت شبکه چابرا می تواند به بکارگیری روش PWM ثابت بماند. آرایش چابرا افزاینده نیز به کار می رود، که در آن تغییرات ولتاژ ژنراتور DC بیشتر است و فیلترکردن چنین آرایشی نیز ساده است.



شکل 10: آرایش ژنراتور DC با دو چابرا افزاینده (DC/AC)

3-1-2- ژنراتور القایی با رابط ولتاژ DC:

چنین آرایشی در شکل 11 آمده است ، یک اینورتر متصل به ژنراتور القایی روتور قفسه ای که همچون قبل به کمک روش PWM در مبدل سمت ماشین ، ولتاژ رابط DC ثابت می ماند ، و چون این ژنراتور نیاز به توان اکتیو دارد ، مبدل بایستی دارای کموتاسیون اجباری باشد.



شکل 11: آرایش ژنراتور القایی با رابط ولتاژ DC و مبدل (AC/DC/AC)

3-2-2- ژنراتور القایی با رابط جریان DC:

نوع دیگر آرایش ژنراتور القایی با رابط جریان DC است و از آنجا که تحریک ژنراتور باید توسط مبدل سمت ماشین تأمین گردد، کموتاسیون اجباری لازم است .

شکل 12 آرایش چنین سیستمی را با به کارگیری مبدل توالی اتوماتیک (ASK) را نشان می دهد که کاستی آن در محدوده

ظرفیت کمتر مد نظر قرار گرفت، که آرایشهای همچون ژنراتور DC همراه چاپر، ژنراتور سنکرون آهنربا دائم، و چند آرایش ژنراتور القائی بررسی شدند، البته با توجه به ترانزیستورهای توان بالا GTO ها و یا استفاده از IGBT، یا انواع روشهای کنترل زاویه آتش، روش شش گامی، مدولاسیون پهنای باند چند سطحی، یا بردار فضایی، و یا اینکه مبدل منبع ولتاژی یا جریانی باشد، آرایش های متفاوتی ایجاد میگردد که هریک جداگانه قابل بررسی اند. زمینه های تحقیقاتی بیشتر می تواند شبیه سازی های موردی هر یک از این سیستمها به همراه توربین بادی و مقایسه نتایج آنها باشد، یا تحلیل اتصال آنها به شبکه و اثرات آنها روی شبکه برق و مقایسه اثرات مختلف این آرایشها باشد، که نیازمند اطلاعات شبکه برق ایران و پارامترهای توربین های بادی و ژنراتورها و مدل مناسبی از باد می باشد.

6- مراجع :

[1] H.L. Hess and E. Muljadi, "Power converter for wind turbine application," . *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. Vol. 2, pp.1275-1276, 2000.

وقتی ظرفیت سیستم به 10-20 کیلو وات یا کمتر برسد، انواع آرایش های سرعت متغیر باز هم افزایش می یابد، که در این محدوده توانی ژنراتورهای آهنربای دائم کاربرد بیشتری دارند، که برای آن سیستم های دوگانه بحث شده در بخش های قبل، به طور ویژه شکل های 4 و 11 و 13 اولویت بررسی دارند، تفاوت اساسی ژنراتورهای آهنربای دائم و ژنراتورهای سنکرون بحث شده در قبل، فقدان سیم پیچی تحریک قابل کنترل و در نتیجه آن تغییرات ولتاژ ترمینال ژنراتور و نیاز به کنترل مبدل طرف خط و نیز تغییرات ضریب توان تحت تغییرات بار و شرایط بار داری می باشد.

4- مقایسه انواع سیستم های الکتریکی توربین بادی :

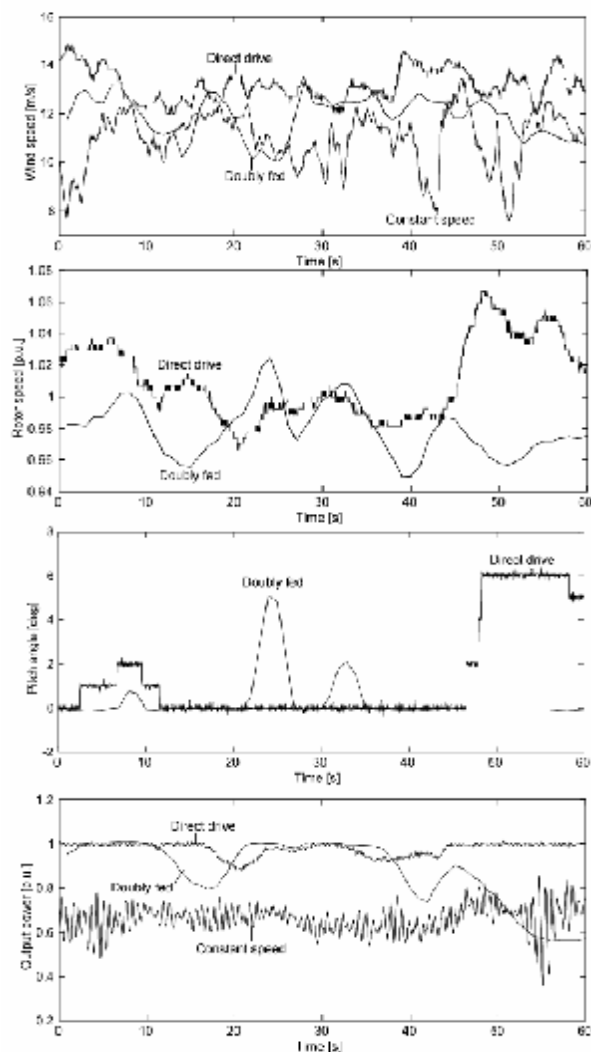
برای طراحی یک سیستم مقایسه خروجی های هر آرایش با نیازهای طراحی ضروری است، در این بخش به مقایسه سه آرایش کلی سیستمهای الکتریکی توربین بادی، 1) سرعت ثابت (Constant speed) 2) ژنراتور القایی دوسو تغذیه ای (Doubly fed) و 3) راه اندازی مستقیم، مانند ژنراتور سنکرون (Direct Drive)، در شکل 14 می پردازیم. در این مقاله به طور کلی آرایشهای توربین های بادی سرعت متغیر بررسی شد، که مدل های شماره 2 و 3 تقسیم بندی بالا را در بر می گرفت، نوع دیگر، سرعت ثابت است که مشخصه های آن نیز برای مقایسه در شکل زیر آمده است.

بدیهی است با وارد کردن تغییرات در اجزای هر مدل، که چندین آرایش آن در بخشهای قبل بحث شد، تغییراتی در مشخصه های خروجی به وجود خواهد آمد.

توان لحظه ای (کوتاه مدت) خروجی در حالت سرعت ثابت تغییرات زیادی نسبت به دو حالت دیگر دارد. شکل 14 پاسخ های اندازه گیری شده انواع توربین بادی است، که به ترتیب نمودارهای سرعت باد بر حسب زمان، سرعت روتور بر حسب زمان، تغییرات زاویه گام یا زاویه بین پره های توربین (pitch)، که خود دارای کنترل پسخورد است، بر حسب زمان و در انتها درصد توان خروجی بر حسب زمان آمده است [6].

5- نتایج و پیشنهادات :

انواع آرایش های ممکن در بحث توربین های بادی سرعت متغیر بررسی شد، بخش اول انواع ژنراتورهای DC و القایی قفس سنجابی و دو سو تغذیه و نیز ژنراتور سنکرون در کاربردهای ظرفیت بالا بحث شد، در بخش دوم کاربردهای با



شکل 14: مقایسه مشخصه های نوعی خروجی

- [2] L. Helle and S. Munk-Nielsen, "Comparison of converter efficiency in large variable speed wind turbines," . *Applied Power Electronics Conference and Exposition, Sixteenth Annual IEEE APEC 2001*, vol.1, pp.628 – 634, March 2001.
- [3] M.N. Eskander and M.T. El Hagry, "Optimal performance of double output induction generator used in WECS,". *Fifth European Conference on Power Electronics and Applications*. Vol.8, pp.276-281, 1993.
- [4] P.M. Espelage and B.K. Bose, "High-Frequency Link power conversion" *IEEE Trans. on Industry Applications*. Vol.13, No.5, pp.387-394, 1988.
- [5] F. Schwartz, "A Double sided cycloconverter" *IEEE Trans. on Industrial Electronics and Control Instrumentation* Vol. IECI-28, No.4, pp.282-291, 1981.
- [6] J.G. Slootweg, "Wind Power: Modeling and Impact on Power System Dynamics". PhD thesis , Delft University of Technology, Delft, Netherlands. , 2003.