

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

شماره پایان نامه: ۹۰۴۰۲۰۸۵

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی برق-قدرت

### عنوان :

استفاده از کنترل کننده های هیستریزیسی جریان در مولدهای بادی سرعت متغیر

اساتید راهنما:

دکتر سید سعیداله مرتضوی

دکتر علی سعیدیان

استاد مشاور:

دکتر محمود جورابیان

نگارنده :

عماد حمادی

تیرماه سال ۹۰

تقديم به

مادر دلسوز و مشربانم

## تقدیر و تشکر

پیش از هر چیز بر خود لازم می دانم از زحمات بی شائبه استاد گرانمایه جناب آقای دکتر مرتضوی تشکر و قدردانی نمایم. بی شک اتمام این پروژه بدون رهنمودهای این بزرگوار میسر نبود.

همچنین از دیگر استاد ارجمند راهنما جناب آقای دکتر سعیدیان و نیز استاد محترم مشاور جناب آقای دکتر جورابیان نیز کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

## فهرست اختصارها

DFIG	Doubly fed induction generator
GSC	Grid-side converter
HVRT	High voltage ride-through
LVRT	Low voltage ride-through
PCC	Point of common coupling
PI	Proportional-integral
PID	Proportional-integral-derivative
PLL	Phase locked loop
RSC	Rotor-side converter
SVM	Space vector modulation
TSO	Transmission system operator
VBHCCR	Vector-based hysteresis current regulator
PBHCC	Parabolic Band Hysteresis Current Controller
VSC	Voltage source converter
WPP	Wind power plant
WT	Wind turbine

# فهرست مطالب

## فصل اول:

### مقدمه

۱-۱	مقدمه.....	۲
۲-۱	ضرورت استفاده از انرژی باد.....	۲
۳-۱	« مولد القایی با تغذیه دوگانه », پرکارترین نوع مولد بادی.....	۳
۴-۱	روش های کنترل <i>DFIG</i> .....	۴
۵-۱	قوانین حاکم برای نصب مولدهای بادی.....	۶
۶-۱	مقایسه قوانین حاکم در کشورهای مختلف.....	۱۱
۱-۶-۱	قوانین <i>LVRT</i> .....	۱۱
۲-۶-۱	قوانین <i>HVRT</i> .....	۱۲
۳-۶-۱	قوانین مربوط به تغییر فرکانس.....	۱۴
۴-۶-۱	کنترل توان رآکتیو و رگولاسیون ولتاژ.....	۱۷
۷-۱	سیاست های مربوط به میزان هارمونیک در شبکه های بادی.....	۱۸
۸-۱	آینده مربوط به شبکه های بادی.....	۱۸
۹-۱	تعریف مسئله.....	۱۹
۱۰-۱	پژوهش های پیشین.....	۲۰

## فصل دوم:

### انرژی باد

۱-۲	مقدمه.....	۲۵
-----	------------	----

۲-۲	تاریخچه استفاده از انرژی باد.....	۲۵
۳-۲	وضعیت کنونی استفاده از انرژی باد.....	۲۹
۴-۲	میزان انرژی باد و توزیع آن.....	۳۰
۵-۲	پیش بینی پذیری و مکان یابی توربین بادی.....	۳۲
۶-۲	مولدهای برق بادی مقیاس کوچک.....	۳۳
۷-۲	آثار زیست محیطی.....	۳۳
۸-۲	نتیجه گیری.....	۳۵

## فصل سوم:

### توربین های بادی در سیستم های قدرت

۱-۳	مقدمه.....	۳۸
۲-۳	تئوری الکتریکی مهندس قدرت.....	۳۸
۳-۳	انرژی باد و خصوصیات آن.....	۴۱
۴-۳	تکنولوژی توربین های بادی.....	۵۲
۱-۴-۳	توربین های سرعت ثابت.....	۵۲
۲-۴-۳	توربین های سرعت متغیر.....	۵۳
۵-۳	کنترل توربین های بادی.....	۵۳
۶-۳	انواع مولدهای مورد استفاده در توربین های بادی.....	۵۴
۱-۶-۳	توربین نوع A: سرعت ثابت.....	۵۶
۲-۶-۳	نوع B سرعت متغیر محدود.....	۵۷
۳-۶-۳	نوع C: سرعت متغیر با استفاده از کانورتر مقیاس جزئی فرکانس.....	۵۸

۵۸.....	۳-۶-۴ مولد نوع D: سرعت متغیر با کانورتر مقیاس کامل فرکانس
۶۱.....	۳-۶-۶ نتیجه گیری

## فصل چهارم:

### مولد القایی تغذیه دوگانه DFIG

۶۲.....	۴-۱ مقدمه
۶۳.....	۴-۲ مولد القایی با تغذیه دوگانه
۶۵.....	۴-۳ ساختمان و معادلات حاکم بر DFIG
۷۱.....	۴-۴ تکنیک های کنترل جریان
۷۴.....	۴-۵ کنترل کننده های بکار رفته در DFIG
۷۵.....	۴-۶ کنترل کننده PID
۷۸.....	۴-۶-۱ روش زیگلر-نیکولز
۷۹.....	۴-۶-۲ روش چین-هرانس-رسویک (CHR)
۸۰.....	۴-۶-۳ روش کوهن-کن
۸۰.....	۴-۶-۴ دیگر روشها
۸۱.....	۴-۷ کنترل کننده هیستریزس جریان بر مبنای مقادیر برداری VBHCC
۸۵.....	۴-۷-۱ کاهش فرکانس سویچ زنی با استفاده از فضای برداری
۸۸.....	۴-۸ کنترل کننده هیستریزس جریان با مرز بندی کروی PBHCC
۹۹.....	۴-۹ نتیجه گیری

## فصل پنجم:

### شبیه سازی و بررسی نتایج

۹۹.....	۵-۱ مقدمه
---------	-----------



۹۹.....	مدل شبیه سازی شده.....	۲-۵
۱۰۲.....	کنترل کننده <i>HCC</i> .....	۳-۵
۱۱۴.....	روش <i>PBHCC</i> .....	۴-۵

## فصل ششم:

### نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۲۵.....	جمع بندی مطالب و نتیجه گیری.....	
----------	----------------------------------	--

### فهرست جدول ها

۱۲.....	جدول ۱-۱ قوانین <i>LVRT</i> در کشورهای مختلف.....	
۱۳.....	جدول ۲-۱ مقایسه قوانین <i>HVRT</i> در کشورهای مختلف.....	
۱۵.....	جدول ۳-۱ میزان عملکرد مولدهای بادی در تغییرات فرکانس بین کشورهای مختلف.....	
۱۷.....	جدول ۴-۱ محدوده کارکرد مولد بادی از محدوده ضریب توان در کشورهای مختلف.....	
۲۶.....	جدول ۱-۲ ظرفیت مولدهای بادی مورد استفاده طی سال های.....	
۲۷.....	جدول ۲-۲ تاریخچه توربین های بادی.....	
۲۸.....	جدول ۳-۲ تاریخچه نصب اولین توربین های بادی مقیاس بزرگ.....	
۲۹.....	جدول ۴-۲ سهم مناطق مختلف از انرژی باد.....	
۲۹.....	جدول ۵-۲ سهم استفاده از انرژی باد خاورمیانه و آفریقا.....	
۵۵.....	جدول ۱-۳ انواع توربین های بادی.....	
۵۹.....	جدول ۲-۳ کارخانه جات معروف تولید کننده مولدهای بادی.....	
۶۱.....	جدول ۳-۳ سهم هر یک از مولدهای توربین بدی بین سال های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲.....	

- جدول ۱-۴ حالات مختلف سویچ زنی، بردار ولتاژ خروجی و مؤلفه  $X, y$  آن..... ۷۱
- جدول ۲-۴ جدول ثابتهای کنترلی در روش زیگر- نیکولز..... ۷۹
- جدول ۳-۴ جدول ثابتهای کنترلی در روش چین- هرانس- رسویک..... ۷۹
- جدول ۴-۴ جدول ثابتهای کنترلی در روش کوهن-کن..... ۸۱
- جدول ۵-۴ کلیه احتمالات سوئیچ زنی و ناحیه های انتخاب شده..... ۸۷
- جدول ۶-۴ جدول سویچ زنی در هر ناحیه..... ۹۰
- جدول ۷-۴ تغییر محورهای  $Y$  و  $X$  بنا به ناحیه قرار گرفتن خطا..... ۹۵
- جدول ۸-۴ شرایط مختلف جریان خطا و اعمال ولتاژ برداری متناسب با آن..... ۹۸
- جدول ۹-۴ جدول تشخیص دهنده ناحیه..... ۹۹

## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱ ظرفیت مزرعه های بادی نصب شده بین سالهای ۲۰۰۱ و ۲۰۱۰..... ۷
- شکل ۲-۱ قانون افت ولتاژ در هنگام خط در اسپانیا..... ۸
- شکل ۳-۱ قانون افت ولتاژ ناشی از بارگذاری شبکه در استرالیا..... ۹
- شکل ۴-۱ قانون میزان تزریق توان رآکتیو بعد از رفع خطا در آلمان..... ۱۰
- شکل ۵-۱ قانون کنترل توان در هنگام تغییرات فرکانس در شبکه ایرلند..... ۱۰
- شکل ۶-۱ قانون تزریق توان رآکتیو در کشور آلمان..... ۱۱
- شکل ۷-۱ قوانین اسپانیا در زمینه تزریق توان رآکتیو..... ۱۴
- شکل ۸-۱ قانون کاهش توان در زمان افزایش فرکانس برای مولدهای بادی در دانمارک..... ۱۶
- شکل ۱-۳ مقادیر لحظه ای جریان، ولتاژ و توان الکتریکی..... ۳۹
- شکل ۲-۳ اتصال مولد بادی به شبکه قدرت..... ۴۰
- شکل ۳-۳ نحوه اعمال نیرو به پره های توربین بادی..... ۴۳

- شکل ۳-۴ شمای مولفه های نیروی وارد شده به پره توربین ..... ۴۳
- شکل ۳-۵ منحنی رابطه بین نسبت نیروی  $Lift/ Drag$  به زاویه پره ..... ۴۴
- شکل ۳-۶ توده باد در استوانه ای به طول  $x$  و سطح مقطع  $A$  ..... ۴۵
- شکل ۳-۷ تغییر مقطع دالان هوا سرعت و دانسیته سیال را تغییر می دهد ..... ۴۶
- شکل ۳-۸ منحنی ضریب بازده بر حسب ضریب  $\lambda$  ..... ۴۸
- شکل ۳-۹ تغییرات نقطه کار روی توربین های سرعت ثابت و متغیر ..... ۴۹
- شکل ۳-۱۰ تغییر  $Pitch$  بر روی نقطه کار تاثیر می گذارد ..... ۵۰
- شکل ۳-۱۱ طبقه بندی توربین های بادی ..... ۵۵
- شکل ۴-۱ شمای  $DFIG$  و نحوه انتقال نیرو ..... ۶۳
- شکل ۴-۲ استفاده از مدل  $\Gamma$  برای معادل سازی  $DFIG$  ..... ۶۷
- شکل ۴-۳ وضعیت دستگاه های مرجع مختلف نسبت به یکدیگر ..... ۶۹
- شکل ۴-۴ مدار کانورتر سمت رتور ..... ۷۰
- شکل ۴-۵ کنترل کننده هیستریزس جریان ..... ۷۲
- شکل ۴-۶ کنترل کننده خطی جریان در PWM ..... ۷۳
- شکل ۴-۷ استفاده از کنترلر هیستریزس برای کنترل جریان ..... ۷۵
- شکل ۴-۸ شمای کلی کنترل کننده PID ..... ۷۶
- شکل ۴-۹ پاسخ به ورودی پله یک سیستم مرتبه دوم با تغییر:  $kp(a), KI(b), kD(c)$  ..... ۷۷
- شکل ۴-۱۰ پاسخ به ورودی پله سیستم در: (a) دستگاه زمان, (b) نمودار نیکولز ..... ۷۸
- شکل ۴-۱۱ مولفه های  $U(t)$  در فضای دو بعدی ..... ۸۱
- شکل ۴-۱۲ (a) دیاگرام یک ماشین الکتریکی با PWM و (b) بردارهای ولتاژ متناظر با آن ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۳ محاسبه مرجع ولتاژ و اعمال بردارهای مناسب ..... ۸۴
- شکل ۴-۱۴ بلوک دیاگرام کنترلر هیستریزس بر مبنای مقادیر برداری ..... ۸۶

- شکل ۴-۱۵ بردار ولتاژ مرجع و مولفه های متناظر با آن ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۶ زمان سویچ زنی اینورترها در ناحیه ۱ ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۷ استفاده از کنترلر هیستریزیس برای کنترل جریان ..... ۹۱
- شکل ۴-۱۸ مسیر حرکت جریان خطا در مدل DFIG شبیه سازی شده ..... ۹۲
- شکل ۴-۱۹ مسیر حرکت خطای جریان در سرعت های مختلف در یک موتور القایی ..... ۹۲
- شکل ۴-۲۰ مرز بندی پیشنهادی برای خطای جریان در سرعت های مختلف ..... ۹۳
- شکل ۴-۲۱ مرز تقریبی حرکت خطای جریان و منحنی های تشکیل دهنده آن ..... ۹۳
- شکل ۵-۱ شمای مدل DFIG بکار رفته در مولد بادی در برنامه سیمولینک MATLAB ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۲ کنترل کننده های هیستریزیس طراحی شده ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۳ کنترل مجزای توان های اکتیو و راکتیو بوسیله تغییر در  $I_r$  و  $I_q$  ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۴ مقایسه بین رفتار کنترلر هیستریزیس و کنترل PI در تغییرات توان اکتیو ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۵ مقایسه بین رفتار کنترلر هیستریزیس و کنترل PI در تغییرات توان راکتیو ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۶ ایجاد تغییر پله و قدرت کنترلر در حفظ مقادیر در باند هیستریزیس ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۷ خطای انتخاب ناحیه در «بلوک تعیین کننده ناحیه» ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۸ خطای ناحیه باعث خارج شدن جریان از باند هیستریزیس نمی شود ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۹ نحوه بکار بردن کنترلر PID در RSC مدل شبیه سازی شده ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۰ نحوه بکار بردن کنترلر PID در GSC مدل شبیه سازی شده ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۱ افت ولتاژ سه فاز متقارن به مدت ۰.۱ ثانیه ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۲ جریان سه فاز رتور به هنگام افت ولتاژ سه فاز متقارن ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۳ جریان سه فاز رتور به هنگام خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۴ اعوجاج شکل موج جریان بدلیل نوسان در باند هیستریزیس ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۵ شکل موج جریان استاتور در هر سه کنترلر در زمان وقوع افت ولتاژ ..... ۱۱۱

- شکل ۵-۱۶ تغییرات توان اکتیو هنگام استفاده از هر سه کنترلر در هنگام افت ولتاژ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۷ تغییرات توان راکتیو هنگام استفاده از هر سه کنترلر در هنگام افت ولتاژ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۸ تغییرات توان راکتیو هنگام استفاده از هر سه کنترلر در هنگام خطا..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۹ تغییرات ولتاژ DC هنگام استفاده از هر سه کنترلر در هنگام خطا..... ۱۱۳
- شکل ۵-۲۰ تغییرات گشتاور هنگام استفاده از هر سه کنترلر هنگام خطای اتصال کوتاه..... ۱۱۴
- شکل ۵-۲۱ الگوریتم پیاده سازی روش BPHCC..... ۱۱۶
- شکل ۵-۲۲ تغییر در مولفه های جریان رتور و تغییرات توانهای اکتیو و راکتیو..... ۱۱۹
- شکل ۵-۲۳ مقایسه سویچ زنی بین کنترلرهای HCC و PBHCC..... ۱۲۰
- شکل ۵-۲۴ مقایسه سویچ زنی بین کنترلرهای VBHCC و PBHCC..... ۱۲۰
- شکل ۵-۲۵ محدود شدن مولفه های  $d$  و  $q$  جریان خطا توسط PBHCC..... ۱۲۱
- شکل ۵-۲۶ جریان سه فاز استاتور در طول یک تغییر پله ای توان..... ۱۲۱
- شکل ۵-۲۷ ولتاژ سه فاز استاتور در طول یک تغییر پله ای توان..... ۱۲۲
- شکل ۵-۲۸ شکل موج جریان و ولتاژ فاز  $a$  استاتور و طیف هارمونیک هر یک..... ۱۲۳

# فصل اول:

## مقدمه

# فصل اول

## مقدمه

### ۱-۱ مقدمه

در سال های اخیر مسئله بحران انرژی و استفاده از انرژی های نو به عنوان جایگزین سوخت های فسیلی، نمود بسیار پیدا کرده است. امروزه کشورهای مختلف استفاده از انرژی های تجدید پذیر را سر لوحه سیاست های خود قرار داده اند. در بین انواع انرژی های تجدید پذیر، انرژی باد از جایگاه ویژه ای برخوردار است. سهل الوصول بودن، عدم ایجاد آلودگی، ارزان بودن و... باعث شده این انرژی بیشترین سهم استفاده را در بین انواع انرژی های نو داشته باشد.

### ۲-۱ ضرورت استفاده از انرژی باد

منظور از توان بادی تبدیل انرژی باد به نوعی مفید از انرژی الکتریکی است که این کار به وسیله توربین های بادی صورت می گیرد. در آسیاب بادی از انرژی باد مستقیماً برای خرد کردن دانه ها و یا پمپ کردن آب استفاده میشود در انتهای سال ۲۰۰۶ میزان ظرفیت تولیدی برق بادی در سراسر جهان برابر ۹/۷۳ گیگاوات بود گرچه این میزان چیزی در حدود یک درصد از کل انرژی الکتریکی تولیدی در جهان محسوب میشود اما در طول بازه زمانی بین سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ تقریباً چهار برابر شده است. در این میان کشورهای دانمارک با ۲۰ درصد اسپانیا با ۹ درصد و آلمان

با ۷ درصد از نظر درصد تولید برق بادی از کل تولید انرژی الکتریکی در جایگاه های نخست قرار دارند.

انرژی بادی در مقادیر زیاد در مزارع بادی تولید و به شبکه الکتریکی متصل می شود از توربین ها در تعداد کم معمولاً فقط برای تامین برق در مناطق دور افتاده استفاده می شود. اما از جمله دلایل تمایل کشورها برای افزایش ظرفیت تولید برق-بادی مزایای بسیار زیاد این روش است چرا که انرژی بادی، فراوان، تجدید پذیر و پاک است و همچنین در مقایسه با استفاده از انرژی سوخت های فسیلی میزان کمتری گاز گلخانه ای منتشر می کند.

### ۳-۱ « مولد القایی با تغذیه دوگانه »، پرکاربردترین نوع مولد بادی

در نوعی تقسیم بندی، توربین های بادی را به دو نوع سرعت ثابت و سرعت متغیر تقسیم کرده اند که در این بین توربین های سرعت متغیر به دلیل استرس مکانیکی کمتر، بازده بالاتر و عدم نیاز به یک شبکه مستحکم از جایگاه ویژه ای برخوردارند [۱]. یکی از مولدهایی که با پیدایش توربین های سرعت متغیر مورد استفاده قرار گرفت، «مولد القایی با تغذیه دوگانه»<sup>۱</sup> (*DFIG*) است [۱]. این نوع مولد به دلیل رنج وسیع کنترل سرعت، ارزان تر بودن و انعطاف پذیری بیشتر، بیشترین استفاده را در بین دیگر توربین های سرعت متغیر دارد [۱]. در *DFIG* یک ماشین القایی رتور سیم پیچی شده قرار دارد که استاتور آن به طور مستقیم توسط یک ترانسفورماتور کوپلینگ سه سیم پیچه به شبکه متصل است و رتور آن به وسیله دو عدد کانورتر و اینورتر که به صورت پشت به پشت به هم متصل اند، به سیم پیچ سوم ترانسفورماتور وصل می شود. انتقال توان هم از طریق رتور و هم از طریق استاتور انجام می گیرد. در بین اینورتر و کانورتر یک عدد خازن تعبیه شده که حکم منبع *DC* را دارد. به اینورتر سمت رتور<sup>۲</sup> *RSI* (یا *GSC*) و به کانورتر سمت شبکه<sup>۳</sup> *GSI* (یا *GSC*) گویند. در بین استراتژی های کنترلی در *DFIG* کنترل برداری جریان رتور

<sup>۱</sup> Doubly fed induction generator

<sup>۲</sup> Rotor Side Inverter(or Rotor Side Converter)

<sup>۳</sup> Grid Side Inverter(or Grid Side Converter)



معروف‌ترین آنهاست [۱۵]-[۲]. اغلب کسانی که در این زمینه فعالیت داشته اند در مدل های خود از این روش استفاده کرده اند [۱۲]- [۲]، [۱۷]، [۱۹].

در این استراتژی، کنترل توان اکتیو (یا گشتاور) و راکتیو (یا شار) بر اساس کنترل مولفه های جریان رتور انجام می گیرد. امتیاز این روش در این است که کنترل هر دو توان اکتیو و راکتیو مستقل از یکدیگر است. این در واقع اساس پیدایش مولدهای القایی با تغذیه دوگانه می باشد. پنا<sup>۱</sup>، کلار<sup>۲</sup>، مولر<sup>۳</sup> و تاپیا<sup>۴</sup> کسانی بودند که در زمینه بهینه سازی روش کنترل جریان تلاش زیادی کردند [۴]-[۲].

به دلیل ماهیت متغیر انرژی های تجدیدپذیر، اغتشاشات و نیز حالت های گذرا و دائمی سیستم نسبت به انرژی های قدیمی متفاوت خواهد بود. نکته حائز اهمیت محل اتصال این شبکه ها به شبکه سراسری است، در برخی کشورها مانند دانمارک، آلمان و اسپانیا، اتصال مزرعه ای بادی به شبکه سیستم قدرت مسئله ای بحرانی بوده و نیاز است این محل از استحکام زیادی برخوردار باشد تا تحت تاثیر اغتشاشات شبکه کوچک بادی قرار نگیرد [۱].

حتی در شبکه های مدرن از مزرعه های باد انتظار دارند که نه تنها در زمان اغتشاشات از شبکه جدا نشوند بلکه به پایداری شبکه نیز، همانند ژنراتورهای عادی کمک کنند. بنابراین امروزه یک شبکه بادی مدرن باید قادر باشد که اولاً در شرایط نامساعد و لتاژی (مانند فرورفتگی یا برآمدگی و لتاژها) به کار خود ادامه دهند و ثانیاً در زمان خطا بتواند توان راکتور مورد نیاز را به شبکه تزریق کند و ثالثاً بعد از رفع خطا به سرعت به شرایط عادی برگردند.

#### ۴-۱ روش های کنترل DFIG

استفاده از کنترل های  $PI$  در دستگاه برداری گردان معمول ترین تکنیک های مورد استفاده در  $DFIG$  ها هستند. در این روش دو کنترل کننده حلقه بسته تودرتو وجود دارد که حلقه خارجی

<sup>۱</sup> Pena

<sup>۲</sup> Clare

<sup>۳</sup> Muller

<sup>۴</sup> Tapia

جهت کنترل جداگانه توان های اکتیو و رآکتیو ماشین مورد استفاده قرار می گیرد. در روش های کنترلی  $PI$  نیز عمدتاً از روش کنترلی جریان در قالب گردان با سرعت سنکرون<sup>۱</sup> برای حلقه خارجی در  $RSC$  و  $GSC$  استفاده می شود.

اما یک اشکال عمده در استفاده از کنترلهای  $PI$  در روش برداری کنترل جریان در  $DFIG$  وجود دارد و آن این است که در این روش  $DFIG$  به صورت یک مدل خطی تغییرناپذیرد با زمان در نظر گرفته می شود در نتیجه ضرایب کنترلی  $PI$  براساس آنالیز سیگنال کوچک از معادله های غیرخطی  $DFIG$  تنظیم می شوند [۱۳]-[۱۵]. طبیعتاً این خطی سازی تنها در ناحیه نقطه کارکرد مولد معتبر می باشد لذا در گستره تغییرات سرعت باد معتبر نبوده و کارکرد مولد در تمام رنج تغییرات بهینه نخواهد بود. این مسئله در افت ولتاژ یا اضافه ولتاژهای ناگهانی باعث تشدید میزان انحراف ولتاژ خواهد شد [۲۴] بنابراین تنظیم کنترلی  $PI$  باید به دقت و تحت شرایط مختلف به صورت  $off-line$  تنظیم گردیده و به صورت یک تنظیم دینامیکی به کنترل اعمال شود. البته این روش به طور قابل ملاحظه ای سبب تخریب رفتار گذرای سیستم و تهدید پایداری سیستم تحت تغییرات شدید خواهد شد [۲۴].

علاوه بر روش های خطی، روش های غیرخطی نیز برای کنترل  $DFIG$  اتخاذ می شود مانند روش های مستقیم کنترل گشتاور / قدرت ( $DTC/DPC$ )<sup>۲</sup> [۳۱]. در این روش ها حلقه کنترل جریان کاملاً حذف شده و کنترل سیگنال مستقیماً از یک جدول  $LOCK UP$  فرمان می گیرد. در این جدول کنترل، هر دو توان اکتیو و رآکتیو از قبل مقداردهی شده است. از امتیاز روش  $DTC/DPC$  می توان به رفتار گذرای نسبتاً خوب و وابستگی بسیار کم نسبت به پارامترهای ماشین و نیز غیر پیچیده بودن سیستم کنترلی نام برد. در مقابل، نوسانات قابل توجه توان/گشتاور، متغیر بودن فرکانس سویچ زنی و نیز عملکرد ضعیف در هنگام راه اندازی و در سرعت های پایین نیز از ایرادات این سیستم می باشد. البته تغییرات جدید بر روی سیستم مذکور باعث بهبود نتایج شده است [۲۸]-[۳۲] اما ایرادات عمده آن همچون به کار بردن کنترلهای  $PI$  اضافی

<sup>۱</sup> Synchronous-frame PI current regulator

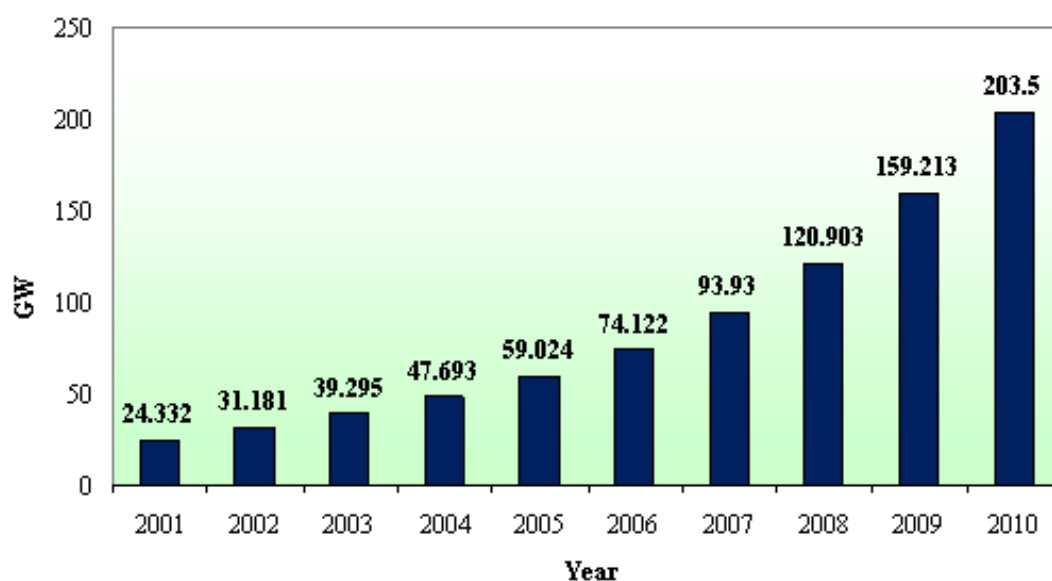
<sup>۲</sup> Direct Torque Control/Direct Power control

[۱۶] - [۱۵] ، کاهش استحکام ماشین در مقابل تغییر پارامترها [۱۶] - [۱۴] و پیچیدگی محاسبات آنلاین [۲۹] و [۳۰] هم چنان به قوت خود باقی مانده اند. بر پایه همین کنترل کننده *DTC/DPC* ، آقای زوات ال<sup>۱</sup> پیشنهاد داد به جای کنترلرهای قدیمی *PI* یک کنترل کننده جریانی غیرخطی جایگزین شود [۱۹]. این روش که با ساختار کنترل دیجیتال قابل اجرا بوده پاسخ گذرای بسیار سریع و حالت گذرای بسیار خوبی حتی در تغییرات بسیار شدید از خود نشان می داد. اما اشکال آن وابستگی زیادش به دقت پارامترهای ماشین و نیز ساختار کنترلی پیچیده بود.

## ۵-۱ قوانین حاکم برای نصب مولدهای بادی

سابق بر این هیچ گونه قانونی برای بهره وری از مولدهای بادی در شبکه های قدرت وجود نداشت زیرا انعطاف پذیری این مولدها بسیار کم بود. از طرف دیگر توان مزرعه های بادی در قیاس با دیگر مولدهای نیروی برق ناچیز بود. اما اخیراً افزایش قابل توجهی در میزان ظرفیت این موارد در اکثر کشورها مشاهده شده است لذا مسائل مربوط به پایداری شبکه و اتصال مزارع باد به شبکه به مراتب جدی تر شده اند به طوری که شبکه مدرن قوانین ویژه ای برای اتصال مزارع بادی تصویب کردند و از لحاظ پایداری شبکه بادی و نحوه پاسخ دینامیکی، مولدهای بادی را مورد تست قرار می دهد [۱]. به طوری که بعضی از مزارع قدیمی باد در دانمارک، استرالیا، نیوزلند که با قوانین جدید مطابقت ندارند مجبور به تعویض کلیه توربین های خود شدند. ظرفیت نیروگاه های برق بادی و قوانین موجود جهت نصب مزرعه های بادی در دهه اخیر رشد قابل توجهی داشته است. شکل ۱-۱ میزان ظرفیت مزرعه های بادی نصب شد از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ را در دنیا نشان می دهد. در این آمار شاهد این هستیم که تقریباً هر سه سال ظرفیت مزرعه های بادی دو برابر خواهد شد. قوانین حاکم بر نصب مزرعه باد از یک کشور به کشور دیگر متغیر است و بستگی به مسائل چون سطح ولتاژ اتصال، میزان استحکام شبکه سراسری در آن نقطه و قوانین دولت در زمینه انرژی های تجدیدپذیری دارد.

<sup>۱</sup> - Xu et al



شکل ۱-۱ ظرفیت مزرعه های بادی نصب شده بین سالهای ۲۰۰۱ و ۲۰۱۰

در حالت کلی مدارک فنی ارائه شده توسط شرکت نصب کننده مزرعه بادی که باید توسط کارفرما به تایید رسیده و قوانین مربوط به اتصال شبکه بادی به شبکه سراسری را رعایت کرده باشد به پنج گروه کلی تقسیم می شود:

۱- نمودارهای ولتاژ پایین و ولتاژ بالا

۲- پاسخ های سیستم در زمان خطا

۳- رنج کنترل فرکانس

۴- قابلیت های کنترل توان اکتیو هنگام تغییرات فرکانس

۵- نحوه کنترل ولتاژ و توان رآکتیو

هنگام رخداد خطا در شبکه افت ولتاژ تا زمان تشخیص خطا توسط ادوات حفاظتی و قطع ناحیه خطا ادامه خواهد داشت. در این بازه زمانی، مزرعه باد مانند دیگر ادوات سیستم قدرت شاهد افت ولتاژ در ترمینال های خود خواهد بود که این میزان بستگی به نوع و مکان خطا خواهد داشت.