

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه لرستان

دانشکده فنی و مهندسی

**افزایش توانایی قابلیت عبور از خطا در مزارع بادی با استفاده از
بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR)**

نگارش

میشم خرم خوی

استاد راهنما

دکتر محمود رضا شاکرمی

پایان نامه برای دریافت دانشنامه کارشناسی ارشد

در رشته برق-قدرت

بهمن ۱۳۹۲

همه امتیازات این پایان نامه به دانشگاه لرستان تعلق دارد. در صورت استفاده تمام یا بخشی از مطالب در مجلات، کنفرانس ها یا سخنرانی ها باید نام دانشگاه لرستان (یا استاد یا اساتید راهنمای پایان نامه) و نام دانشجو، ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر اینصورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

دانشگاه لرستان

دانشکده فنی و مهندسی

افزایش توانایی قابلیت عبور از خطا در مزارع بادی با استفاده از بازیاب

دینامیکی ولتاژ (DVR)

نگارش

میثم خرم خوی

استاد راهنما

دکتر محمود رضا شاکرمی

استاد مشاور

دکتر اسماعیل رک رک

پایان نامه برای دریافت دانشنامه کارشناسی ارشد

در رشته برق-قدرت

بهمن ۱۳۹۲

تشکر و قدردانی

از استاد گرامیم جناب آقای دکتر شاکرمی بسیار سپاس گذارم چراکه بدون راهنمایی‌های ایشان تأمین این پایان‌نامه بسیار مشکل می‌نمود، از جناب آقای دکتر رک رک به دلیل یاری‌ها و راهنمایی‌های بی‌چشمداشت ایشان که بسیاری از سختی‌ها را برایم آسان‌تر نمودند. تقدیم به مقدس‌ترین واژه‌ها در لغت‌نامه دلم، مادر مهربانم که زندگی‌ام را مدیون مهر و عطوفت آن می‌دانم . پدر، مهربانی مشفق، بردبار و حامی، برادرم همراه همیشگی و پشتوانه زندگی‌ام.

لازم می‌دانم از دوستان عزیزم که باهم آغاز، در کنار هم آموختیم و به امید هم به آینده چشم می‌دوزیم تشکر و قدردانی کنم. تشکر فراوان از دوست بسیار خوبم رضا غلام‌نژاد که در روزهای سخت انجام این پژوهش به من دلگرمی داد. سپاس خدای را که هر چه دارم از اوست به امید آنکه توفیق یابم جز خدمت به خلق او نکوشم.

چکیده

استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر با توجه به اثرات مخرب زیست محیطی منابع انرژی فسیلی در حال افزایش است. انرژی تولیدی باد به عنوان یکی از منابع انرژی تجدید پذیر با سرعت چشمگیری در حال گسترش است. روند روبه رشد استفاده از منابع بادی موجب تدوین دستورالعمل های جدیدی برای اتصال سیستم های تبدیل انرژی باد (WECS) به شبکه شده است. انجام پشتیبانی های لازم مزارع بادی در طی وقوع خطا و پس از آن در حفظ پایداری و افزایش قابلیت اطمینان شبکه ضروری است. دستورالعمل های شبکه با رشد استفاده از منابع بادی علاوه بر حفظ اتصال این منابع در طی وقوع فرورفتگی های ولتاژ، تأمین توان اکتیو و راکتیو توسط آن ها را ضروری می دانند.

از میان انواع توربین های بادی سرعت متغیر، ژنراتورهای القایی دوسویه تغذیه (DFIG) با عملکرد سرعت متغیر و استفاده از مبدل توان مقرون به صرفه بسیار مورد توجه است. فرورفتگی ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (PCC) باعث اضافه جریان و یا اضافه ولتاژ مدار روتور DFIG می شود که عدم در نظر گرفتن تمهیدات لازم امکان آسیب رسیدن به مبدل روتور را افزایش می دهد. روش های حفاظتی مرسوم مبدل روتور باعث توقف تولید توان اکتیو و راکتیو DFIG در طی وقوع خطا می شود.

در این تحقیق، افزایش توانایی قابلیت عبور از خطای (DFIG (FRT) با استفاده از بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR) پیشنهاد شده است. اتصال سری DVR با استاتور DFIG باعث جلوگیری از اثر خطاهای ولتاژ شبکه بر مزرعه بادی می شود. در این تحقیق با پیشنهاد طرح کنترل ولتاژ دوگانه ای، جبران سازی فرورفتگی های ولتاژ متقارن و نامتقارن انجام شده است. در این طرح کنترلی، مؤلفه های توالی مثبت و منفی قاب مرجع dq به طور جداگانه پیاده سازی می شود. با توجه به اینکه چالش اصلی DVR در مقایسه با دیگر روش های بهبود FRT هزینه پیاده سازی این روش است لذا طرح کنترل جدیدی برای تزریق بهینه ولتاژ پیشنهاد شده است. با پیاده سازی طرح مذکور، علاوه بر تزریق بهینه توان توسط DVR از افزایش ولتاژ DC جبران ساز در حین خطا جلوگیری می شود. به این ترتیب استفاده از DVR به عنوان راه حلی مؤثر در افزایش FRT و رعایت دیگر ضروریات دستورالعمل های جدید قابل استفاده است. با انجام شبیه سازی بر روی یک سیستم نمونه، کارایی روش پیشنهادی مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است.

فهرست مطالب

عنوان

فصل اول مقدمه

- ۱-۱ اثرات افزایش استفاده از منابع بادی ۱
- ۲-۱ مشکلات یکپارچه‌سازی مزارع بادی و سیستم قدرت ۲
- ۳-۱ مفهوم توربین بادی و تکنولوژی‌های FRT ۲
- ۴-۱ انواع توربین‌های بادی ۳
- ۵-۱ خلاصه‌ای از انواع ساختار توربینهای بادی ۵
- ۶-۱ اهداف تحقیق ۷
- ۷-۱ نمای کلی تحقیق ۷

فصل دوم مروری بر مطالعات انجام شده

- ۱-۲ مقدمه ۹
- ۲-۲ روشهای کنترل توربین‌های بادی دوسویه تغذیه (DFIG) ۹
- ۳-۲ روشهای افزایش توانایی عبور از خطای توربینهای بادی DFIG ۹
- ۱-۳-۲ روش جبران سازی توان راکتیو ۱۰
- ۲-۳-۲ استفاده از اهم ۱۱
- ۳-۳-۲ استفاده از روشهای کنترلی به منظور افزایش قابلیت FRT ۱۲
- ۴-۳-۲ شبکه غیرفعال امیدانسی ۱۴
- ۵-۳-۲ راه‌حل‌های سخت‌افزاری افزایش قابلیت FRT ۱۴
- ۴-۲ خلاصه ۱۶

فصل سوم مدل‌سازی و طراحی توربین بادی دوسویه تغذیه (DFIG) و بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR)

- ۱-۳ مقدمه ۱۸
- ۲-۳ ساختمان توربین بادی DFIG ۱۸
- ۳-۳ مدل‌سازی توربینهای بادی ۱۹

۱۹	.....مدل مؤلفه آئرو دینامیکی
۲۲	.....مدل مؤلفه مکانیکی
۲۳	.....مشخصات توربین بادی
۲۶	.....مدل کلی سیستم ژنراتور بادی دوسویه تغذیه (DFIG)
۲۶	..... DFIG مفاهیم پایه
۲۹	..... DFIG معادلات در قاب مرجع dq
۳۲	..... DFIG توان ها
۳۲	..... ۱-۶-۳ توپولوژی مدار روتور DFIG
۳۳	..... ۳-۶-۳ مبدل منبع ولتاژ (VSC)
۳۳	..... ۳-۶-۳ فیلترهای مبدل
۳۳	..... ۷-۳ ترانسفورماتور توربین بادی
۳۴	..... DFIG کنترل
۳۴	..... ۱-۸-۳ کنترل برداری
۳۴	..... ۲-۸-۳ کنترل مبدل سمت شبکه (GSC)
۳۶	..... ۳-۸-۳ کنترل مبدل سمت روتور (RSC)
۳۷	..... ۱-۳-۸-۳ تولید توانهای مرجع RSC
۳۷	..... ۲-۳-۸-۳ راستای محور بردارها
۳۷	..... ۳-۳-۸-۳ کنترل جریان RSC
۴۰	..... ۹-۳ استفاده از DVR برای افزایش قابلیت عبور از خطا DFIG
۴۱	..... ۱-۹-۳ اجزای اصلی DVR
۴۲	..... ۲-۹-۳ محل نصب DVR
۴۳	..... ۳-۹-۳ روش اتصال DVR به شبکه
۴۶	..... ۴-۹-۳ پارامترهای مؤثر در طراحی DVR
۴۷	..... ۵-۹-۳ مقادیر نامی ولتاژ، جریان و انرژی
۴۸	..... ۶-۹-۳ طراحی اجزا مختلف DVR
۵۳	..... ۱۰-۳ خلاصه

فصل چهارم بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR) برای افزایش قابلیت عبور از خطا (FRT)

۵۶	۱-۴ مقدمه
۵۶	۲-۴ ضرورت های فنی دستورالعمل های مزارع بادی
۵۷	۲-۱-۴ پشتیبانی توان راکتیو توسط DFIG
۶۰	۳-۴ مقایسه ای از دستورالعمل های FRT
۶۳	۴-۴ محدودیتهای بهره برداری از DVR
۶۴	۵-۴ کنترل DVR برای افزایش قابلیت FRT مزارع بادی DFIG
۶۴	۱-۵-۴ تحلیل تزریق توان DVR در طی فرورفتگی ولتاژ
۶۷	۲-۵-۴ روش جبران سازی هم فاز
۶۷	۲-۵-۴ روش جبران سازی ولتاژ به مقدار قبل از فرورفتگی
۶۹	۳-۵-۴ روش بهینه سازی انرژی
۷۱	۶-۴ جبران سازی فرورفتگی های نامتقارن به روش بهینه سازی انرژی
۷۳	۷-۴ روش کنترل برداری دو گانه مبدل DVR
۷۴	۱-۷-۴ کنترل کننده ولتاژ DVR
۷۶	۲-۷-۴ طراحی کنترل کننده ولتاژ دو گانه
۸۰	۸-۴ خلاصه

فصل پنجم تشریح مطالب و نتیجه گیری

۸۲	۱-۵ مقدمه
۸۲	۲-۵ شرح سیستم شبیه سازی شده
۸۳	۳-۵ شبیه سازی عملکرد عادی DFIG
۸۷	۴-۵ عملکرد DFIG در صورت وقوع خطا
۸۷	۱-۴-۵ رفتار DFIG با خطای متقارن
۸۹	۲-۴-۵ رفتار DFIG با وقوع خطای نامتقارن
۹۳	۵-۵ عملکرد DFIG جبران سازی شده با DVR در حالت فرورفتگی ولتاژ
۹۳	۱-۵-۵ عملکرد DFIG جبران سازی شده با DVR در حالت فرورفتگی ولتاژ متقارن
۹۷	۱-۵-۵ عملکرد DFIG جبران سازی شده با DVR در حالت فرورفتگی ولتاژ نامتقارن

۱۰۲..... ۶-۵ افزایش قابلیت عبور از خطا DFIG توسط DVR بهینه

۱۰۷..... ۷-۵ خلاصه

فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۰۹..... ۱-۶ نتیجه گیری

۱۱۰..... ۲-۶ پیشنهادات

فهرست اختصارات و نشانه‌ها

DFIG: Doubly Feed Induction Generator

FRT: Fault Ride Through

NGC: National Grid Code

PCC: Point of Common Coupling

LVRT: Low Voltage Ride Through

FACT: Flexible Ac Transmission System

RSC: Rotor Side Converter

GSC: Grid Side Converter

DVR: Dynamic Voltage Restorer

FC-TCR: Fixed-capacitor Thyristor Controlled Reactor

SVC: Static VAR Compensator

STATCOM: Static Synchronous Compensator

WECS: Wind Energy Conversion System

EMF: Electromagnetic Motive Force

VSWT: Variable Speed Wind Turbine

FSIG: Fix Speed Induction Generator

TSO: Transmission System Operator

VSC: Voltage Source Converter

CSC: Current Source Converter

HVDC: High Voltage Direct Current

MPPT : Maximum Power Point Tracking

Pu: Per Unit

فهرست اشکال و جداول

- شکل ۱-۱ ظرفیت کل منابع بادی نصب شده در سراسر جهان..... ۱
- جدول ۱-۱ ظرفیت توان بادی نصب شده در منطقه آفریقا و خاورمیانه..... ۱
- جدول ۱-۲ تکنولوژی ها و ادوات افزایش قابلیت FRT..... ۳
- شکل ۱-۲ انواع طبقه بندی توربین های بادی..... ۴
- شکل ۱-۳ سهم انواع توربین های بادی از بازار..... ۳
- جدول ۱-۳ خلاصه ای از ساختارهای گوناگون توربین های بادی..... ۶
- شکل ۲-۱ راکتور کنترل شده با تریستور به همراه خازن ثابت (FC-TCR)..... ۱۱
- شکل ۲-۲ SVC..... ۱۱
- شکل ۲-۳ مدار معادل تکفاز DFIG با شبکه غیرفعال امپدانسی..... ۱۴
- شکل ۳-۱ ساختمان متداول توربین بادی DFIG..... ۱۸
- شکل ۳-۲ مؤلفه های اصلی توربین بادی..... ۱۹
- شکل ۳-۳ مدل تک جرمی مجموعه محرک برای مؤلفه مکانیکی..... ۲۳
- شکل ۳-۴ ضریب عملکرد (C_p) تابعی از نسبت سرعت پره (λ) با زاویه گام های مختلف (β)..... ۲۴
- شکل ۳-۵ کنترل کننده زاویه گام..... ۲۵
- شکل ۳-۶ بلوک ورودی و خروجی DFIG..... ۲۶
- شکل ۳-۷ فلوجارت توربین بادی..... ۲۶
- شکل ۳-۸ مدار معادل تکفاز DFIG..... ۲۷
- شکل ۳-۹ پخش توان اکتیو DFIG با مدهای مختلف عملکردی بر اساس علامت لغزش..... ۲۸
- شکل ۳-۱۰ دیاگرام برداری DFIG..... ۲۹

- شکل ۱۱-۳ مدل DFIG در قاب dq ۲۹
- شکل ۱۲-۳ اینورتر پل سه فاز ۳۳
- شکل ۱۳-۳ ساختار مبدل GSC ۳۵
- شکل ۱۴-۳ طرح کنترل برداری GSC ۳۶
- شکل ۱۵-۳ طرح کنترل برداری RSC ۴۰
- شکل ۱۶-۳ دیاگرام تک خطی اتصال توربین بادی DFIG به شبکه ۴۱
- شکل ۱۷-۳ نمایش تک خطی اجزا اصلی DVR ۴۲
- شکل ۱۸-۳ مدل ساده تک خطی DVR ۴۲
- شکل ۱۹-۳ استفاده از ترانسفورماتور برای جداسازی الکتریکی مبدل ۴۴
- شکل ۲۰-۳ ساختار DVR با منبع ذخیره انرژی و ولتاژ اتصال DC ثابت ۴۵
- شکل ۲۱-۳ ساختار DVR با خازن اتصال DC و ولتاژ اتصال DC متغیر ۴۶
- شکل ۲۲-۳ مدل تک خطی ساده ای از DVR متصل به DFIG ۴۶
- شکل ۲۳-۳ طرح تکفاز از مبدل پل کامل ۴۹
- شکل ۲۴-۳ الف) مبدل سری ب) رسم مجدد مبدل با حذف PCC ۵۲
- شکل ۲۵-۳ فیلتر LCL جبران ساز سری ۵۲
- شکل ۱-۴ ضرورت های FRT دستورالعمل کشور اسپانیا ۵۷
- شکل ۲-۴ کنترل توان راکتیو بصورت تابعی از ولتاژ PCC (E.on) ۵۷
- شکل ۳-۴ مشخصه P-Q برای DFIG ۵۸
- شکل ۴-۴ مشخصه کنترل ولتاژ توربین بادی ۵۹
- شکل ۵-۴ طبقه بندی ولتاژ گذرا بر اساس درصد نامی ولتاژ ۵۹
- جدول ۱-۴ محدوده توان راکتیو دستورالعمل های مختلف ۶۰

- شکل ۴-۶ مقایسه ضرورت های دستورالعمل های مختلف..... ۶۲
- جدول ۴-۲ ضرورت FRT دستورالعمل های مختلف..... ۶۱
- شکل ۴-۷ حداقل ضرورت های مزارع بادی در صورت وقوع خطا در دستورالعمل سیستم انتقال کشور آلمان..... ۶۲
- شکل ۴-۸ الف) دیاگرام ساده سیستم متصل به DVR ب) دیاگرام فازوری طرح های مختلف تزریق ولتاژ..... ۶۳
- شکل ۴-۹ دیاگرام تک خطی توربین بادی DFIG با قابلیت FRT..... ۶۴
- شکل ۴-۱۰ دیاگرام فازوری جبران سازی ولتاژ توسط DVR..... ۶۶
- شکل ۴-۱۱ روش جبران سازی ولتاژ هم فاز..... ۶۷
- شکل ۴-۱۲ روش جبران سازی ولتاژ قبل فرورفتگی ولتاژ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۳ نمایش فازوری روش جبران سازی قبل از فرورفتگی ولتاژ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۴ روش بهینه سازی انرژی..... ۷۰
- شکل ۴-۱۵ روش تزریق توان صفر..... ۷۱
- شکل ۴-۱۶ دیاگرام فازوری ولتاژ شبکه با وقوع خطای نامتقارن..... ۷۲
- شکل ۴-۱۷ دیاگرام تک خطی اتصال DVR..... ۷۶
- شکل ۴-۱۸ دیاگرام کنترلی توالی مثبت و منفی DVR..... ۷۸
- شکل ۴-۱۹ فلوچارت الگوریتم جبران سازی ولتاژ توسط DVR..... ۷۹
- شکل ۵-۱ دیاگرام تک خطی توربین بادی DFIG با قابلیت FRT..... ۸۲
- جدول ۵-۱ پارامترهای DFIG..... ۸۳
- جدول ۵-۲ پارامترهای توربین بادی..... ۸۳
- شکل ۵-۲ مشخصه توربین بادی..... ۸۴
- شکل ۵-۳ عملکرد توربین بادی با سرعت باد مختلف..... ۸۵
- شکل ۵-۴ شکل موج جریان و ولتاژ روتور و استاتور..... ۸۶

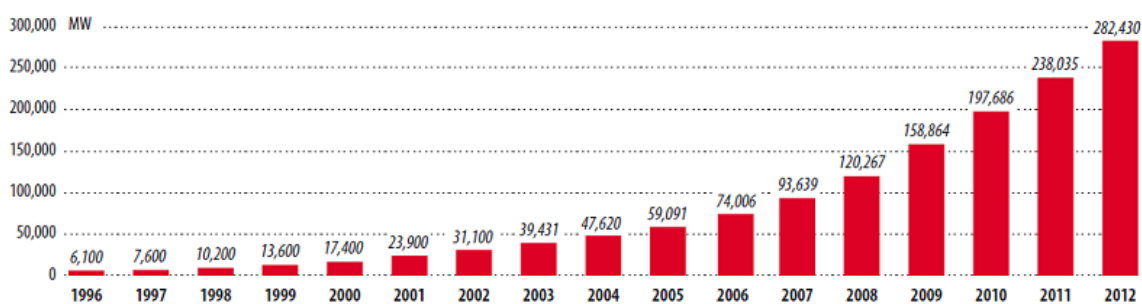
- شکل ۵-۵ شکل موج جریان و ولتاژ روتور و استاتور در صورت وقوع خطای سه فاز متقارن..... ۸۸
- شکل ۵-۶ ناحیه عبور از خطا DFIG با خطای سه فاز متقارن..... ۸۹
- شکل ۵-۷ تاثیر جابجایی فاز ولتاژ بر عملکرد FRT توربین بادی DFIG..... ۸۹
- شکل ۵-۸ شکل موج جریان و ولتاژ روتور و استاتور در صورت وقوع خطای دو فاز به زمین..... ۹۱
- شکل ۵-۹ شکل موج جریان و ولتاژ روتور و استاتور در صورت وقوع خطای تک فاز..... ۹۲
- شکل ۵-۱۰ قابلیت عبور از خطا DFIG با تغییر سرعت لغزش برای خطای تک فاز..... ۹۳
- جدول ۳-۵ پارامترهای DVR..... ۹۵
- شکل ۵-۱۱ شبیه سازی وقوع خطای سه فاز متقارن با جبران سازی DVR..... ۹۶
- شکل ۵-۱۲ ولتاژ تولیدی DVR برای خطای سه فاز متقارن در قاب dq..... ۹۷
- شکل ۵-۱۳ شبیه سازی وقوع خطای تک فاز با جبران سازی توسط DVR..... ۹۹
- شکل ۵-۱۴ شبیه سازی جبران سازی DVR با وقوع خطای دو فاز به زمین..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱۵ ولتاژ تولیدی DVR در قاب dq برای خطای تکفاز نامتقارن..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱۶ مقادیر RMS ولتاژ PCC و استاتور با انجام جبران سازی..... ۱۰۲
- شکل ۵-۱۷ جبران سازی خطای تکفاز با مبادله توان اکتیو صفر توسط DVR..... ۱۰۴
- شکل ۵-۱۸ تغییرات توان اکتیو DVR با روش جبران سازی پیش از خطا..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۹ تغییرات توان اکتیو DVR با روش جبران سازی تزریق توان اکتیو بهینه..... ۱۰۵
- شکل ۵-۲۰ تغییرات ولتاژ پایانه استاتور با وقوع خطا..... ۱۰۶
- شکل ۵-۲۱ ولتاژ شینه ۵۷۵ ولت با پشتیبانی توان راکتیو توسط DFIG..... ۱۰۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱ اثرات افزایش استفاده از منابع بادی

در طی دو دهه اخیر مخالفت همگانی با نصب بیشتر منابع انرژی فسیلی به دلیل انتشار فراوان CO₂ رو به افزایش است. انرژی حاصل از باد با توجه به محدودیت منابع فسیلی، در حال تبدیل به یکی از عمده ترین منابع تولید انرژی الکتریکی کره زمین است. ظرفیت کل منابع بادی نصب شده تا انتهای سال ۲۰۱۲ میلادی در شکل ۱-۱ نشان داده شده است [۳].



شکل ۱-۱ ظرفیت کل منابع بادی نصب شده در سراسر جهان [۳]

بر اساس گزارش سال ۲۰۱۲ شورای جهانی انرژی باد (QWEC)، ایران رتبه چهارم ظرفیت انرژی بادی نصب شده منطقه خاورمیانه را دارا است (جدول ۱-۱) [۳].

جدول ۱-۱ ظرفیت توان بادی نصب شده در منطقه آفریقا و خاورمیانه

کشورهای آفریقا و خاورمیانه	تا انتهای سال ۲۰۱۱	سال ۲۰۱۲	مجموع (تا انتهای ۲۰۱۲)
تونس	۵۴	۵۰	۱۰۴
اتیوپی	عدم دسترسی اطلاعات	۵۲	۵۲
مصر	۵۵۰	عدم دسترسی اطلاعات	۵۵۰
مراکش	۲۹۱	=	۲۹۱
ایران	۹۱	=	۹۱
کیپ ورد	۲۴	=	۲۴
کشورهای دیگر	۲۳	=	۲۳

در اوایل دهه گذشته با گسترش استفاده از منابع باد، دستورالعمل‌های شبکه (ضرورت‌های فنی ژنراتورهای بزرگ) تغییرات فراوانی را تجربه نموده‌اند. با مروری بر دستورالعمل‌های اخیر مواردی چون: ۱- عبور از خطا در صورت وقوع انواع فرورفتگی و برآمدگی‌های ولتاژ ۲- پشتیبانی توان راکتیو در طی دوره خطا ۳- بازیابی سریع تولید توان اکتیو پس از وقوع خطا برای مزارع بادی ضروری می‌باشند. به مجموعه ضرورت‌های موردنیاز برای برآورده شدن این سه شرط، قابلیت عبور از خطا (FRT) اطلاق می‌شود [۱]. ضرورت‌های FRT بر اساس مشخصات دینامیکی هر سیستم تغییر می‌کند. سیستم‌های قدرت کوچک/بدون یکپارچگی نسبت به ناپایداری فرکانس مستعد می‌باشند، لذا دستورالعمل‌های آن‌ها به‌طور کلی بر مدیریت توان اکتیو و مسائل مرتبط با بازیابی^۱ تأکید دارند [۴]. مشکل اصلی در سیستم‌های قدرت به‌هم‌پیوسته پراکنده جغرافیایی تولید و مصرف‌کننده‌ها است که در این صورت تأکید دستورالعمل‌ها بر کنترل ولتاژ محلی و مشارکت در تأمین توان راکتیو در طی وقوع خطا است [۵].

۲-۱ مشکلات یکپارچه‌سازی مزارع بادی و سیستم قدرت

اتصال مزارع بادی به سیستم قدرت اثرات مختلفی را در پی دارد. با گسترش چشمگیر اتصال منابع بادی به شبکه رعایت ملاحظات قابلیت اطمینان و پایداری سیستم ضروری می‌باشند. در بسیاری از کشورها دستورالعمل‌های مختلفی برای تعیین محدوده عملکرد حالت دائم و گذرای اتصال مزارع بادی وضع گردیده است. تمرکز اصلی این دستورالعمل‌ها، کنترل فرکانس و ولتاژ سیستم‌های قدرت با پشتیبانی توان اکتیو و راکتیو مزارع بادی است. دستورالعمل‌های مختلفی توسط کشورها یا شرکت‌های توزیع به‌منظور تعیین چگونگی پشتیبانی توان اکتیو و راکتیو، مدت‌زمان حفظ اتصال و نحوه رفتار مزارع بادی در زمان وقوع خطا وضع شده است. اتصال مزارع بادی به شبکه با تغییر ولتاژ در حین وقوع خطا تعیین می‌شود [۶].

۳-۱ مفهوم توربین بادی و تکنولوژی‌های FRT

ضرورت‌های FRT بسته به نوع فناوری توربین بادی متفاوت است. توربین‌های بادی با توجه به پاسخ FRT به چهار نوع اصلی طبقه‌بندی می‌شود (شکل ۲-۱) [۱، ۲]. ادوات اضافه‌شده برای افزایش FRT مجموعه توربین بادی در شکل ۲-۱ با نقطه‌چین نشان داده شده است. ویژگی این ادوات به‌اختصار در جدول ۲-۱ توضیح داده شده است.

¹ Restoration

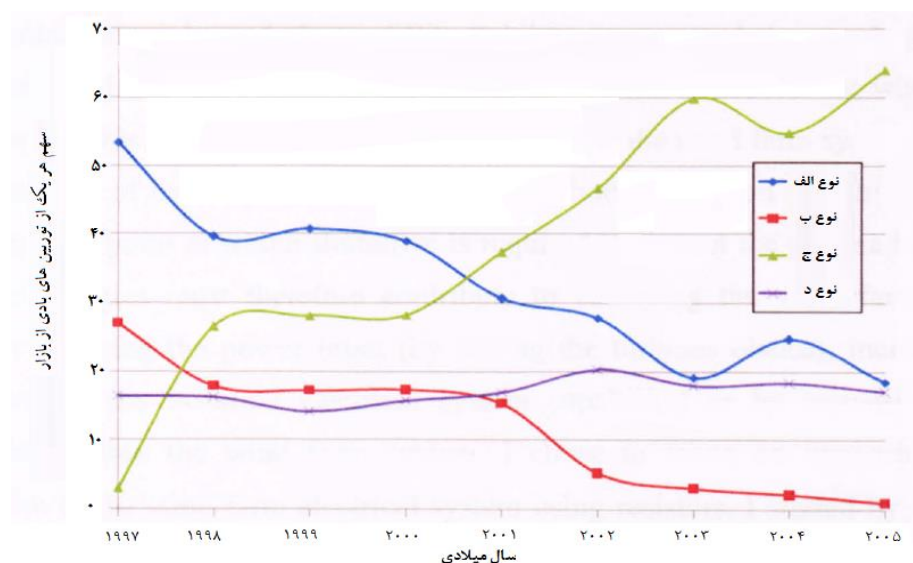
تنظیم زاویه پره از مشخصه اصلی تمامی روش‌های افزایش قابلیت FRT جدول ۱-۲ است. علی‌رغم پاسخ عمل‌کننده^۲ زاویه تیغه در کسری از ثانیه، کماکان به علت وجود نیروهای دینامیک محوری بر روی برج توربین این روش دارای محدودیت قابل توجه برای پاسخ FRT است. در نتیجه تنظیم زاویه پره راه‌حل نهایی افزایش قابلیت FRT نیست و شانس پیشنهاد روش‌های جدید بدون نیاز به کنترل توان وجود دارد.

جدول ۱-۲ تکنولوژی‌ها و ادوات افزایش قابلیت FRT

روش افزایش FRT	توربین بادی
جبران سازی توان راکتیو دینامیک (drPC)	سرعت ثابت (FSWT)
جبران سازی توان راکتیو دینامیکی و تنظیم زاویه پره (تنظیم توان)	سرعت ثابت با کنترل لغزش

۴-۱ انواع توربین‌های بادی

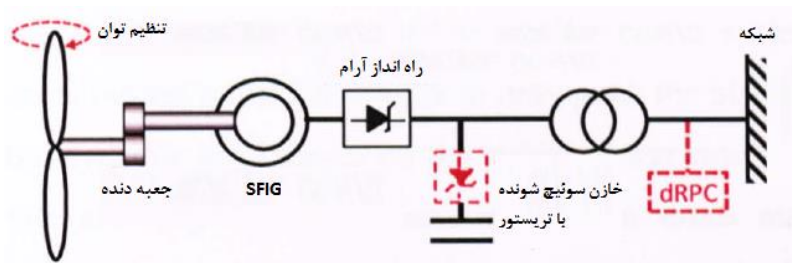
تغییرات سهم استفاده از چهار نوع توربین بادی مرسوم طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۵ میلادی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



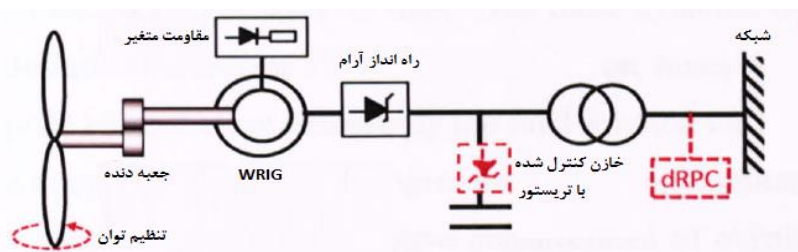
شکل ۱-۳ سهم انواع توربین‌های بادی در سیستم قدرت [۷]

شکل ۱-۳ افزایش سریع سهم استفاده از DFIGها (نوع ج) از ۵٪ در سال ۱۹۹۷ به حدود ۶۴٪ در سال ۲۰۰۵ را نشان می‌دهد. در نقطه مقابل توربین‌های بادی سرعت ثابت (نوع الف) و سرعت ثابت با کنترل

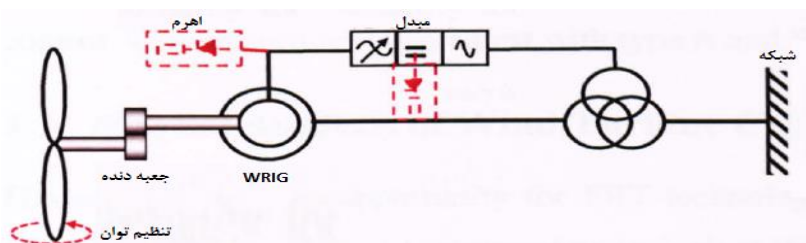
² Actuator



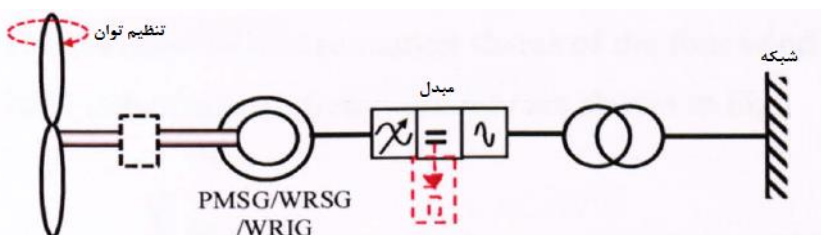
الف) سرعت ثابت (FSWT)



ب) سرعت ثابت با کنترل لغزش



ج) سرعت متغیر جزئی (DFIG-VSWT)



د) سرعت متغیر کامل (Full-VSWT)

شکل ۱-۲ طبقه بندی انواع توربین های بادی [۱, ۲]