

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
دانشگاه صنعتی سجاد

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

# مدل سازی و تحلیل هارمونیک نیروگاه بادی فراساحلی مجهد به ژنراتور DFIG و با اتصال خط انتقال HVDC به شبکه

امین درری رمضانی

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر قاینی

مهرماه ۱۳۹۳

این پایان نامه با عنوان مدل‌سازی و تحلیل هارمونیک نیروگاه بادی فراساحلی مجهز به ژنراتور DFIG و با اتصال خط انتقال HVDC به شبکه قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد گرایش برق قدرت توسط امین درری رضانی با راهنمایی دکتر محسن قاینی تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه صنعتی سجاد مجاز می‌باشد.

امین درری رضانی

این پایان نامه ۶ واحد درسی شناخته می‌شود و در تاریخ ..... توسط هیئت داوران بررسی و درجه ..... به آن تعلق گرفت.

نام و نام خانوادگی	امضاء	تاریخ
استاد راهنما:	.....	.....
داور ۱:	.....	.....
داور ۲:	.....	.....

تعمدنامه اصالت اثر

اینجانب امین درری رمضانی تعهد می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاورد های پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه پیش از این برای احراز بیچ‌مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی سجاد می‌باشد.

امین درری رمضانی

## تقدیم به پدر و مادرم

خدای راسبی ساگرم که از روی کرم، پدر و مادری فدکار نصیبم ساخته تا سایه درخت پر بار وجودشان بیایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند و دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگاری که برایم زندگی و انسان بودن را معنا کردند... پروردگارا تو فیتقم ده که هر لحظه سگ کز ارشان باشم و ثانیه‌ای عمرم را در عصای دست بودشان بگذرانم.

## پاسکزاری

شکرشایان نثار ایزدمنان که توفیق رارفتیق را هم ساخت تا این پایان نامه را به سرانجام برسانم. از استاد کرامی جناب آقای دکتر محسن قاینی به عنوان استاد راهنما که اینجانب را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند و همواره در این عرصه در کمال سعادت و از هیچ لگلی دریغ ننمودند آرزوی توفیق و بهروزی دارم. از اساتید فریخته و محترم جناب آقای دکتر رجبی مهدی و سرکار خانم دکتر حسن پورنیز که زحمت مطالعه و ارزیابی این رساله را متقبل شدند کمال شکر و قدردانی را دارم.

## چکیده

نیاز روزافزون به انرژی الکتریکی، محدود بودن سوخت منابع فسیلی و افزایش آلودگی‌های زیست محیطی، استفاده از منابع انرژی پاک هم‌چون انرژی باد را در صنعت برق به امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده است. از طرفی با توجه به کمبود مساحت خشکی و سهمیم بودن بخش وسیعی از کره زمین به جغرافیای دریایی، رویکرد توسعه مزارع بادی فراساحلی امری توجیه‌پذیر است. توربین‌های بادی سرعت متغیر به دلیل کیفیت توان بهتر به سرعت در حال جایگزینی به جای توربین‌های بادی سرعت ثابت هستند و از طرف دیگر ژنراتورهای DFIG نیز به دلیل توانایی تزریق و کنترل توان راکتیو و عدم نیاز به بانک‌های خازنی، موارد استفاده بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند. هم‌چنین، افزایش ظرفیت مزارع بادی موجب شده است که شبکه انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا مبتنی بر مبدل‌های منبع ولتاژ (VSC-HVDC) یکی از گزینه‌های ارجح جهت انتقال توان این منابع به مسافت‌های دوردست باشد. وجود کنترل‌کننده‌های توان اکتیو و راکتیو جهت کنترل توان خروجی توربین بادی مبتنی بر DFIG و نیز وجود کنترل‌کننده‌های ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو جهت کنترل ولتاژ و توان انتقالی خطوط VSC-HVDC، زمینه‌ی ایجاد کنترل بهتر و بهبود کیفیت توان انتقالی مزارع بادی به شبکه قدرت را مهیا کرده است.

پیشنهاد این رساله که در قالب نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی شده است، مدل‌سازی مزرعه‌ی بادی ۹ مگاواتی متصل به خط انتقال VSC-HVDC می‌باشد. لذا جهت مدل‌کردن سیستم، هریک از مدل‌های توربین، ژنراتور، کانورترهای توربین بادی، سیستم کنترلی مبدل‌ها، خط انتقال VSC-HVDC و ... در قالب یک مزرعه‌ی بادی متشکل از ۶ توربین ۱/۵ مگاواتی انجام می‌گیرد. پس از شبیه‌سازی‌های فوق، بحث کنترل برداری جهت کنترل کانورترهای توربین بادی و هم‌چنین کانورترهای سیستم انتقال پراهمیت است، که با اتخاذ روش کنترلی، مقاصد موردنظر که عملاً کنترل توان اکتیو، راکتیو و ولتاژ سیستم است، به عنوان نتایج شبیه‌سازی در قالب جداول و نمودارهایی ارائه می‌گردد و نهایتاً استاندارد بودن میزان اعوجاج هارمونیک ولتاژ نقطه اتصال سیستم به شین بی‌نهایت گواه بر کنترل مطلوب سیستم است. لذا روش اتخاذ شده که مبتنی بر کنترل برداری است، تاحد زیادی کاربرد ادوات جانبی جهت کنترل سیستم را کاهش داده است و منتج به انتقال توانی پایدار به شبکه شده است.

## فهرست:

۱	فصل اول: پیشگفتار.....
۱-۱	مقدمه.....
۲-۱	اهداف پایان نامه.....
۳-۱	ساختار پایان نامه.....
۵	فصل دوم: مزارع بادی فراساحلی.....
۱-۲	مقدمه.....
۲-۲	رویکرد توسعه‌ی مزارع بادی فراساحلی.....
۳-۲	هارمونیک در مزارع بادی فراساحلی.....
۱-۳-۲	معرفی شاخص هارمونیک.....
۲-۳-۲	علت ایجاد اعوجاج هارمونیک، عواقب تولید هارمونیک و راه‌های کاهش آن.....
۳-۳-۲	نحوه محاسبه‌ی پارامترهای مهم در هارمونیک.....
۴-۳-۲	استانداردهای هارمونیک مزارع بادی.....
۴-۲	سیستم‌های توان بادی.....
۵-۲	مدل‌سازی واحد بادی.....
۱-۵-۲	مدل باد.....
۲-۵-۲	مدل توربین.....
۳-۵-۲	مدل کنترلرهای زاویه پره و ردیابی نقطه حداکثر توان.....
۴-۵-۲	مدل Drive Train.....
۵-۵-۲	مدل ژنراتور تغذیه دوگانه DFIG.....
۶-۵-۲	استراتژی کنترل کانورترهای RSC و GSC مبتنی بر کنترل برداری.....
۲۷	فصل سوم: سیستم انتقال توان مزارع بادی فراساحلی.....
۱-۳	مقدمه.....
۲-۳	سیستم انتقال جریان متناوب HVAC.....
۳-۳	سیستم انتقال HVDC.....



۳۱	.....سیستم انتقال HVDC کلاسیک (LCC-HVDC)
۳۲	.....سیستم انتقال جریان مستقیم مبتنی بر مبدل‌های منبع ولتاژ (VSC-HVDC)
۳۵	..... ظرفیت توان سیستم VSC-HVDC
۳۶	..... مدولاسیون پهنای پالس (PWM) در سیستم VSC-HVDC
۳۷	..... کنترل برداری کانورترهای سیستم انتقال VSC-HVDC
۴۱	<b>فصل چهارم: طرح پیشنهادی مدل سازی مزرعه بادی فراساحلی</b>
۴۲	..... ۱-۴ مقدمه
۴۲	..... ۲-۴ مدل سازی مزرعه‌ی بادی
۴۲	..... ۱-۲-۴ مدل توربین بادی
۴۳	..... ۲-۲-۴ مدل Drive Train
۴۴	..... ۳-۲-۴ مدل ژنراتور DFIG
۴۸	..... ۳-۴ مدل سازی خط انتقال VSC-HVDC
۵۱	<b>فصل پنجم: نتایج شبیه سازی</b>
۵۲	..... ۱-۵ مقدمه
۵۲	..... ۲-۵ نتایج شبیه سازی مزرعه‌ی بادی
۵۲	..... ۱-۲-۵ خروجی لینک خازنی کانورترهای ژنراتور تغذیه دوگانه
۵۲	..... ۲-۲-۵ خروجی توان اکتیو مزرعه‌ی بادی
۵۳	..... ۳-۲-۵ خروجی توان راکتیو مزرعه‌ی بادی
۵۳	..... ۴-۲-۵ ولتاژ خروجی مزرعه‌ی بادی
۵۴	..... ۳-۵ نتایج شبیه سازی سیستم انتقال VSC-HVDC مزرعه‌ی یادی
۵۶	..... ۱-۳-۵ نتایج خروجی ولتاژ در شرایط بدون خطا و بدون حضور فیلترها
۵۷	..... ۲-۳-۵ نتایج خروجی ولتاژ در شرایط خطای سه فاز و با حضور هر دو فیلتر موازی خط انتقال
۵۹	..... ۳-۳-۵ نتایج خروجی ولتاژ در شرایط خطای سه فاز و بدون فیلتر موازی سمت WFVSC
۵۹	..... ۴-۳-۵ نتایج خروجی ولتاژ در شرایط خطای سه فاز و بدون فیلتر موازی سمت GSVSC
۶۲	<b>فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات</b>
۶۵	.....مراجع

## فهرست اشکال

۳	شکل ۱-۱- سیستم مورد مطالعه
۹	شکل ۱-۲- توسعه‌ی مزارع بادی فراساحلی
۱۲	شکل ۲-۲- تفاوت میان شکل موج ولتاژ و جریان بارخطی و غیرخطی
۱۲	شکل ۳-۲- شکل موج غیرسینوسی و تبدیل آن به مؤلفه‌های اول و سوم
۱۵	شکل ۴-۲- نمودار تک خطی توربین بادی تغذیه دوگانه
۱۶	شکل ۵-۲- مراحل مدل‌سازی واحد بادی از چپ به راست
۱۶	شکل ۶-۲- مشخصه‌ی توان- سرعت توربین بادی
۱۷	شکل ۷-۲- منحنی مشخصه‌ی توربین بادی مورد مطالعه نسبت به $\lambda$
۱۹	شکل ۸-۲- مشخصه‌ی پروینیت توان- سرعت توربین بادی مورد مطالعه و منحنی حداکثر توان
۱۹	شکل ۹-۲- نمایش بلوکی سیستم کنترل زاویه پره نوع اول
۱۹	شکل ۱۰-۲- نمایش بلوکی سیستم زاویه پره
۲۰	شکل ۱۱-۲- سیستم کنترل زاویه پره نوع دوم
۲۰	شکل ۱۲-۲- سیستم کنترل زاویه پره نوع سوم
۲۰	شکل ۱۳-۲- مدل دو جرمی Drive Train
۲۱	شکل ۱۴-۲- بلوک مدل‌سازی کلی توربین، ژنراتور، شافت و گیربکس
۲۲	شکل ۱۵-۲- مدار معادل ماشین القایی از دوسوتغذیه
۲۳	شکل ۱۶-۲- مدار معادل ماشین القایی از دوسوتغذیه در فضای dq
۲۴	شکل ۱۷-۲- کانورتر پشت به پشت مبتنی بر PWM
۲۵	شکل ۱۸-۲- طرح کنترلی کلی کانورتر RSC
۲۶	شکل ۱۹-۲- طرح کنترلی کلی کانورتر GSC
۲۹	شکل ۱-۳- مقایسه هزینه احداث خط انتقال HVDC با HVAC جهت مزارع بادی فراساحلی
۲۹	شکل ۲-۳- سیستم HVDC پشت به پشت
۳۰	شکل ۳-۳- سیستم HVDC تک قطبی
۳۰	شکل ۴-۳- سیستم HVDC دو قطبی
۳۱	شکل ۵-۳- سیستم HVDC چند ترمیناله
۳۱	شکل ۶-۳- ساختمان سیستم LCC-HVDC مبتنی بر تایریستور
۳۱	شکل ۷-۳- ساختمان تایریستور ۶ و ۱۲ پالسه
۳۲	شکل ۸-۳- شکل موج ولتاژ و جریان واحد تایریستوری ۶ و ۱۲ پالسه
۳۳	شکل ۹-۳- ساختمان سیستم VSC-HVDC مبتنی بر IGBT
۳۳	شکل ۱۰-۳- شکل موج ولتاژ و جریان IGBT-Based -VSC-HVDC
۳۳	شکل ۱۱-۳- ساختار IGBT دوسطحی (سمت چپ) و سه سطحی (سمت راست)
۳۶	شکل ۱۲-۳- منحنی ظرفیت توان سیستم VSC-HVDC

- شکل ۳-۱۳- روش PWM سینوسی دوسطحی ۳۶
- شکل ۳-۱۴- سیستم VSC-HVDC تک قطبی دوسطحی ۳۳ ۳۷
- شکل ۳-۱۵- مدار معادل کانورتر WFVSC ۳۸
- شکل ۳-۱۶- مدار معادل کانورتر GSVSC ۳۸
- شکل ۳-۱۷- سلسه مراتب سیستم کنترل کانورترهای VSC-HVDC ۳۹
- شکل ۳-۱۸- ساختار کنترلی کلی سیستم VSC-HVDC ۴۰
- شکل ۳-۱۹- حلقه کنترلی داخلی جریان ۴۰
- شکل ۴-۱- مشخصه ی پربونیت توان - سرعت توربین بادی ۴۳
- شکل ۴-۲- مدل شبیه سازی شده ی توربین بادی ۴۳
- شکل ۴-۳- مدل شبیه سازی شده ی Drive Train ۴۴
- شکل ۴-۴- مجموعه مدل شبیه سازی شده ی توربین بادی و Drive Train ۴۴
- شکل ۴-۵- مدل شبیه سازی شده ی ژنراتور به همراه چوک، فیلترها و کانورترهای توربین بادی ۴۵
- شکل ۴-۶- مدل شبیه سازی شده ی کانورتر سمت شبکه ۴۶
- شکل ۴-۷- مدل شبیه سازی شده ی کانورتر سمت روتور ۴۷
- شکل ۴-۸- سیستم انتقال VSC-HVDC شبیه سازی شده ۴۹
- شکل ۴-۹- مدل کانورتر WFVSC شبیه سازی شده ۴۹
- شکل ۴-۱۰- مدل کانورتر GSVSC شبیه سازی شده ۵۰
- شکل ۵-۱- خروجی لینک خازنی کانورترهای ژنراتور ۵۲
- شکل ۵-۲- خروجی توان اکتیو مزرعه ی بادی ۵۳
- شکل ۵-۳- خروجی توان راکتیو مزرعه ی بادی ۵۳
- شکل ۵-۴- ولتاژ متناوب نقطه ی اتصال مزرعه ی بادی به شبکه انتقال ۵۴
- شکل ۵-۵- توان اکتیو و راکتیو انتقالی سمت مزرعه بادی به سیستم انتقال ۵۴
- شکل ۵-۶- توان اکتیو و راکتیو انتقالی سمت سیستم انتقال به شبکه ی شین بینهایت ۵۵
- شکل ۵-۷- منحنی ولتاژ نقطه ی PCC ۵۵
- شکل ۵-۸- THD شکل موج ولتاژ نقطه ی PCC ۵۶
- شکل ۵-۹- منحنی ولتاژ نقطه ی PCC در شرایط عادی بدون حضور فیلترها ۵۶
- شکل ۵-۱۰- THD شکل موج ولتاژ نقطه PCC در شرایط عادی بدون حضور فیلترها ۵۷
- شکل ۵-۱۱- منحنی ولتاژ نقطه ی PCC در شرایط خطا در PCC با حضور فیلترها ۵۷
- شکل ۵-۱۲- THD شکل موج ولتاژ نقطه PCC در شرایط خطا در PCC و با حضور فیلترها ۵۸
- شکل ۵-۱۳- منحنی ولتاژ نقطه ی PCC در شرایط خطا با حضور فیلترها ۵۸
- شکل ۵-۱۴- THD شکل موج ولتاژ نقطه PCC در شرایط خطا با حضور فیلترها ۵۸
- شکل ۵-۱۵- THD شکل موج ولتاژ نقطه PCC در شرایط خطا بدون حضور فیلتر WFVSC ۵۹
- شکل ۵-۱۶- THD شکل موج ولتاژ نقطه اتصال مزرعه به خط انتقال در شرایط خطا بدون حضور فیلتر WFVSC ۵۹

- شکل ۵-۱۷-THD شکل موج ولتاژ نقطه PCC در شرایط خطا بدون حضور فیلتر GSVSC ۶۰
- شکل ۵-۱۸-THD شکل موج ولتاژ نقطه اتصال مزرعه به خط در شرایط خطا بدون حضور فیلتر GSVSC ۶۰
- شکل ۵-۱۹-THD شکل موج ولتاژ نقطه PCC در شرایط خطا بدون حضور فیلترهای موازی ۶۰
- شکل ۵-۲۰-THD شکل موج ولتاژ نقطه اتصال مزرعه به خط انتقال در شرایط خطا بدون حضور فیلترها ۶۱

## فهرست جدول ها

۱۰	جدول ۱-۲- بزرگترین مزارع بادی فراساحلی دنیا
۱۴	جدول ۲-۲- محدوده‌ی مجاز THD در استاندارد ER G5/4
۱۴	جدول ۳-۲- محدوده‌ی مجاز هارمونیک در استاندارد IEEE 1547
۳۴	جدول ۱-۳- پروژه‌های انجام شده با سیستم انتقال VSC-HVDC بر اساس سطوح کانورتر
۳۵	جدول ۲-۳- تعدادی از مزارع بادی بهره‌برداری شده با استفاده از سیستم انتقال VSC-HVDC
۴۳	جدول ۱-۴- پارامترهای توربین
۴۴	جدول ۲-۴- پارامترهای Drive Train
۴۵	جدول ۳-۴- پارامترهای زنراتور القایی
۴۸	جدول ۴-۴- پارامترهای کنترل کانورترهای RSC و GSC
۴۹	جدول ۵-۴- مشخصات خط AC و شین بی‌نهایت
۵۰	جدول ۶-۴- مشخصات خط انتقال VSC-HVDC شبیه‌سازی شده

# فصل اول: پیشگفتار

## ۱-۱- مقدمه

نیاز روزافزون به انرژی الکتریکی، محدود بودن سوخت منابع فسیلی و افزایش آلودگی‌های زیست محیطی، استفاده از منابع انرژی پاک هم‌چون انرژی باد را در صنعت برق به امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده است. از طرفی با توجه به کمبود مساحت خشکی و سهیم بودن بخش وسیعی از کره زمین به جغرافیای دریایی، رویکرد توسعه مزارع بادی فراساحلی امری توجیه‌پذیر است. اخیراً توربین‌های بادی سرعت متغیر به دلیل کیفیت توان بهتر به سرعت در حال جایگزینی به جای توربین‌های بادی سرعت ثابت هستند و از طرف دیگر ژنراتورهای DFIG<sup>۱</sup> نیز به دلیل توانایی تزریق و کنترل توان راکتیو و عدم نیاز به بانک‌های خازنی موارد استفاده بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند.

وجود کنترل‌کننده‌های توان اکتیو و راکتیو جهت کنترل توان خروجی توربین بادی مبتنی بر DFIG که اساساً با نحوه الگوی کلیدزنی کانورترهای رکتیفایر و اینورتر عمل کنترل را صورت می‌دهند، قادر به انتقال توان با کیفیت مناسب به شبکه خواهند بود. علاوه بر این نحوه مدل‌سازی باد، توربین، سیستم محرک (شامل گیربکس و شافت)، کنترلر زایه پره<sup>۲</sup>، کنترلر دنبال‌کننده‌ی حداکثر توان<sup>۳</sup> و ... نیز در بحث مدل‌سازی مطلوب که نهایتاً جهت تحلیل خاصی از شبکه در شرایط مختلف هم‌چون شرایط گذرایی، ماندگار و ... صورت می‌پذیرد، حائز اهمیت می‌باشد.

انتقال برق تولیدی مزارع بادی فراساحلی از طریق خطوط HVDC و HVAC صورت می‌گیرد. خطوط انتقال بلند با ولتاژ بالای AC (HVAC) منجر به جریان راکتیو بالایی می‌شود که معضلی برای نیروگاه بادی فراساحلی است. لذا رویکرد انتقال توان با استفاده از خطوط انتقال HVDC وجود دارد که با دو روش مختلف تحت عنوان LCC-HVDC و VSC-HVDC از آن‌ها یاد می‌شود. از طرفی افزایش ظرفیت مزارع بادی موجب شده است که شبکه انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا مبتنی بر مبدل‌های منبع ولتاژ VSC-HVDC یکی از گزینه‌های ارجح جهت انتقال توان این منابع به مسافت‌های دور دست باشد. مزایا و معایب این نوع خطوط بطور مفصل در فصل سوم اشاره خواهد شد.

همانند سیستم کنترلی کانورترهای DFIG در تک‌تک توربین‌های مزرعه بادی، وجود کنترلرهای ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو جهت کنترل ولتاژ و توان انتقالی خطوط VSC-HVDC، زمینه‌ی ایجاد کنترل بهتر و بهبود کیفیت توان انتقالی به شبکه قدرت مهیا شده است. لذا مبنای کنترلرهای کانورترهای توربین بادی و سیستم خط انتقال به علت حضور کانورترهای رکتیفایری و اینورتری تا حدودی شبیه هم می‌باشد، زیرا هر دو سیستم کنترلی به نحوی عمل می‌کند تا با سوئیچینگ صحیح کانورترها کنترل دلخواه شبکه امکان‌پذیر باشد.

در حالت ایده آل سیستم‌های قدرت فرض بر آن است که ولتاژ و جریان دارای شکل موج سینوسی‌اند که در عمل، این اتفاق نمی‌افتد. اغتشاشاتی بصورت پریودیک تحت عنوان هارمونیک در شکل موج‌های ولتاژ و جریان دیده می‌شود که میزان این اغتشاش گویای میزان کیفیت توان است.

به وجود آمدن هارمونیک در سیستم‌های برق اولین پیامد عناصر غیرخطی در شبکه است. در اواخر دهه ۱۹۷۰، هنگامی که استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت معمول شد، بسیاری از مهندسين شرکت‌های برق توانایی پذیرش اعوجاج

1-Doubly-Fed Induction Generator

2- Pitch Angle Controller

3- MPPT Controller

4- Line-Commutated High Voltage Direct Current

هارمونیکی تولید شده توسط سیستم‌های قدرت را مورد بررسی قرار دادند. با گسترش فزاینده استفاده از عناصر غیرخطی در سیستم‌های برق، مانند راه‌اندازها (درایورهای تنظیم سرعت) و مبدل‌های الکترونیکی قدرت، مقدار هارمونیک شکل موج جریان و ولتاژ به طور چشمگیری افزایش یافته است و بنابراین اهمیت موضوع کاملاً مشخص است. در سیستم مزارع بادی فراساحلی نیز وجود عناصر غیرخطی و همچنین عمل سوئیچینگ کانورترها عوامل تخریب کننده کیفیت توان خصوصاً تولید هارمونیک هستند. حضور سیستم انتقال HVDC سبب آن است که هارمونیک تولیدی مزرعه بادی به شبکه منتقل نگردد. لذا در این رساله بحث تحلیل هارمونیکی سیستم نیز پس از مدل‌سازی صحیح و جزء به جزء شبکه انتقال و مزرعه بادی انجام خواهد گرفت.

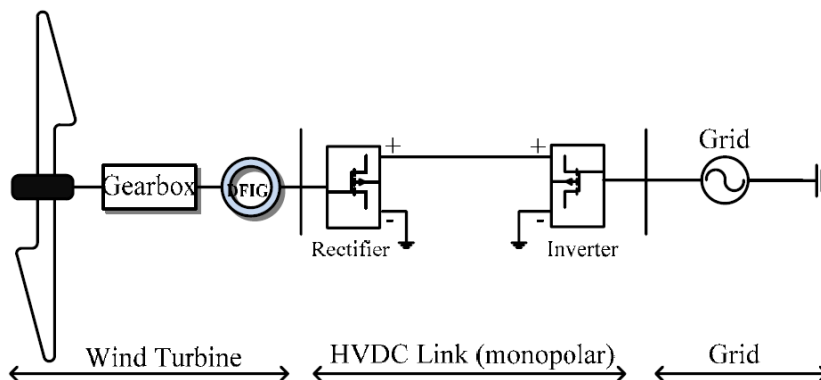
## ۱-۲- اهداف پایان‌نامه

توربین‌های بادی سرعت متغیر به همراه ژنراتورهای القایی DFIG بدلیل توانایی تولید توان با کیفیت بهتر در حال جایگزینی به جای توربین‌های بادی سرعت ثابت و ژنراتورهای مرسوم هستند. لذا هدف اول این رساله مدل‌سازی دقیق مزرعه بادی شامل ۶ توربین ۱.۵ مگاواتی از نوع ژنراتور تغذیه دوگانه است. مدل‌سازی مزرعه نیاز به تحلیل دقیق مدل‌های زیر دارد: مدل باد، مدل سیستم محرک (شافت و گیربکس)، مدل توربین، مدل ژنراتور، سیستم کنترلی کانورترهای رکتیفایر و اینورتر سمت شبکه و سمت استاتور، مدل فیلتر، مدل لینک DC و... . لذا پس از مدل‌سازی مزرعه بادی مبتنی بر کنترلرهای PI، تحلیل هارمونیک تولیدی مزرعه بادی صورت می‌گیرد.

هدف ثانویه این رساله مدل‌سازی کامل خط انتقال از نوع VSC-HVDC می‌باشد، که این مدل نیز نیاز به بررسی کامل نحوه کنترل کانورتر سمت ساحل و کانورتر نصب شده روی دریا دارد. در مرحله بعد اتصال مزرعه به خط انتقال بعنوان چالش بعدی مطرح می‌شود.

تنظیم کنترلرهای شبکه و نهایتاً انتخاب فیلترهای مناسب در هر دو مدل مزرعه بادی و VSC-HVDC با هدف انتقال توان اکتیو ثابت با کمترین اعوجاج و وجود ولتاژی سینوسی با اعوجاجی در حد استاندارد - به بیانی دیگر حد هارمونیکی مطلوب - هدف اصلی این رساله است.

لازم به ذکر است، که پیرامون موضوع این رساله هیچ مقاله داخلی ثبت نشده است و سایر مقالات خارجی نیز مدل کامل شبکه را توأماً با هم مدنظر نداشته‌اند. یعنی برای مدل VSC-HVDC یا مدل مزرعه بادی، از مدل متراکم بهره برده‌اند تا تحلیل ساده‌تری از شبکه صورت دهند. لذا مدل پیشنهادی این رساله به مدل واقعی سیستم نزدیکتر است. سیستم مورد نظر جهت شبیه‌سازی در محیط نرم افزار Matlab/Simulink انجام پذیرفته است و شمای کلی سیستم در شکل ۱-۱ آمده است.



شکل ۱-۱- سیستم مورد مطالعه



### ۱-۳- ساختار پایان نامه

مفاد پایان نامه در شش فصل به شرح زیر تنظیم شده است:

در فصل دوم مقدمه‌ای کوتاه در زمینه‌ی انرژی باد، تاریخچه، نقش و روند گسترش توربین‌ها، ضرورت رویکرد توسعه‌ی انرژی بادی و بطور خاص مزارع بادی فراساحلی در شبکه قدرت بیان می‌گردد. کیفیت توان نیروگاه بادی فراساحلی و بطور خاص شاخص هارمونیک در این فصل بطور مختصر اشاره می‌گردد. هم‌چنین نگاهی مشروحتر به سیستم‌های توان بادی، انواع توربین‌های بکار رفته در آن‌ها خواهیم داشت. بطور خاص بدلیل آن‌چه که در بخش قبل ذکر شد، نگاهی کامل به سیستم ژنراتور DFIG انجام می‌پذیرد. آن‌چه در طراحی یک مزرعه بادی اعم از: سیستم توربین، سیستم محرک و جعبه دنده، سیستم کنترل زاویه پره، کنترل انتقال حداکثر توان، کنترلرهای کانورترهای سمت شبکه و سمت ژنراتور و ... نیاز است، بطور کامل تشریح می‌گردد.

در فصل سوم سیستم‌های متداول انتقال برق مزارع بادی فراساحلی معرفی می‌گردد و بطور خاص از آنجا که در این پایان‌نامه مدل سیستم انتقال VSC-HVDC مدنظر قرار گرفته است، بطور مفصل تشریح می‌شود.

در فصل چهارم، مدل پیشنهادی این رساله جهت مدل‌سازی و تحلیل هارمونیک نیروگاه بادی فراساحلی ارائه می‌گردد و نتایج شبیه‌سازی در قالب جداول و اشکال در فصل پنجم بیان می‌شود.

فصل پایانی نیز به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی تحلیل‌های انجام شده در فصول گذشته اختصاص یافته و پیشنهاداتی به منظور ادامه تحقیق در این زمینه ارائه شده است.

فصل دوم:  
مزارع بادی فراساحلی

## ۲-۱- مقدمه

انرژی برای همه مردم مسئله اساسی است. انرژی در تمام شئون جامعه انسانی رسوخ کرده و جنبه‌های مختلف آن از زندگی روزانه خانوادگی گرفته تا تأسیسات جهانی و بین‌المللی و طرح‌های توسعه‌ی ملی را تحت تأثیر قرار داده است. با گسترش روز افزون جوامع انسانی و توسعه‌ی صنعتی جوامع مختلف، نیاز به منابع انرژی در حال افزایش است. ازسویی دیگر منابع فسیلی جهان رو به اتمام هستند. این منابع، از نظر اندازه و مقدار محدود بوده و در ضمن آلاینده‌ی محیط زیست نیز محسوب می‌گردند.

مصرف جهانی انرژی در دهه‌ی اخیر به علت نرخ بالای رشد جهانی به طرز چشم‌گیری افزایش پیدا کرده است. محاسبات نشان می‌دهد که تقاضای برق در بین سال‌های ۲۰۳۰ - ۲۰۰۴ با نرخ ۲/۶ درصد در هر سال افزایش پیدا می‌کند و در مقابل میزان گاز دی‌اکسیدکربن موجود در جو زمین با نرخ رشد ۱/۷ درصد در هر سال به عدد بی‌سابقه<sup>۹</sup>  $۴۰/۴ \times ۱۰^۹$  تن در انتهای سال ۲۰۳۰ می‌رسد و در این میان، متأسفانه تولید توان الکتریکی، مقدار تقریبی ۵۰ درصد از این گاز تولیدی را به همراه دارد [۱]. در دنیای امروز، منابع کافی انرژی وجود دارد و برای استفاده از آن در زمینه‌های فناوری و تولید، به سرمایه‌گذاری نیاز است. این کار بخشی از راهبرد توسعه است که نقش فعالی در جریان رشد اقتصادی خواهد داشت. از این رو در سال‌های اخیر، گرایش به استفاده از منابع نوین و تجدیدپذیر انرژی، رو به فزونی گذاشته است و در آینده‌ی نزدیک، بهره‌وری جدی از منابع انرژی تجدیدپذیر غیرقابل انکار خواهد بود. از آنجایی که این منابع از رابطه دوستی با طبیعت در مقایسه با انرژی‌های فسیلی برخوردارند، تمایل زیادی به استفاده از آن‌ها به عنوان انرژی کمکی یا جانشینی برای انرژی فسیلی وجود دارد و به‌خصوص این علاقه در زمینه‌ی تولید الکتریسیته بیشتر است.

منابع آبی، بادی، خورشیدی، زمین گرمایی و زیست توده از جمله رایج‌ترین گزینه‌های انرژی تجدیدپذیر هستند. سیستم‌های تولید توان آبی به علت استحکام، قابلیت اطمینان و سطوح توان نامی بالا بسیار جذاب بوده و گوی سبقت را از سایر منابع تجدیدپذیر ربوده‌اند. باین وجود، اشکال عمده‌ی این منبع، کمیابی موقعیت‌های قابل دسترس، تهدید به از بین رفتن موقعیت‌های موجود و تأثیر منفی بر روی زیستگاه‌های محلی با ایجاد حوزه‌های وسیع سیل‌گیر می‌باشد. در حال حاضر، یکی از منابع انرژی و حتی می‌توان گفت مناسب‌ترین و در دسترس‌ترین آن‌ها انرژی حاصل از باد می‌باشد که تحصیل آن در واقع بدون صرف هزینه و خدادادی بوده و در اطراف و اکناف جهان به طور نسبی در اختیار بشر قرار دارد. تاریخچه‌ی بهره‌گیری بشر از انرژی باد نیز به سال‌های بسیار دور برمی‌گردد.

اما استفاده از باد برای تولید انرژی الکتریکی از قرن نوزدهم آغاز شد. در سال ۱۸۸۷، جیمز بلیث آزمایش‌هایی در این زمینه انجام داد و یک سال بعد چالز براش نیز در ایالات متحده یک مولد توان بادی ساخت که برق مورد نیاز منزل و آزمایشگاه وی را تا سال ۱۹۰۰ تأمین می‌کرد. در دهه ۱۸۹۰ نیز دانشمندان دانمارکی و مخترعی به نام پل لاکور تعدادی توربین بادی جهت تولید الکتریسیته ساختند. در نیمه اول قرن بیستم، توربین‌های بادی کوچک برای تأمین روشنایی روستاهای دورافتاده مورد استفاده قرار می‌گرفت. واحدهای بزرگتری نیز برای اتصال به شبکه توزیع طراحی شد. واحد ۱/۲۵ مگاواتی نصب شده در ناحیه ورمونت در سال ۱۹۴۱ از این جمله است. با این وجود صنعت توان بادی از سال ۱۹۷۹ آغاز شد.

اولین توربین‌ها توسط شرکت‌های دانمارکی ساخته شد. ظرفیت تولیدی این واحدها در قیاس با استانداردهای امروزی خیلی کم بود و هرکدام قادر به تولید ۲۰ تا ۳۰ کیلووات توان بود. از آن پس، کشورهای مختلفی روی به ساخت این توربین‌ها

آوردند و با گذشت زمان، توربین‌هایی با اندازه‌های خیلی بزرگتر ساخته شد [۲]. بزرگترین توربین ساخته شده تاکنون دارای ظرفیت تولید ۷/۵۸ مگاوات می‌باشد و ارتفاع آن به بیش از ۱۳۲ متر می‌رسد [۳]. اما شرکت GE اعلام کرده است که در یک توافق با دانمارک اجازه یافته تأسیسات خود را برای تست توربین‌های ۱۰ مگاواتی برپاسازد. در حال حاضر موانع زیادی پیش روی تولیدکنندگان برای توربین با ظرفیت ۱۰ مگاواتی وجود دارد، از جمله بزرگتر شدن اندازه و بالارفتن وزن توربین که مشکلات و هزینه‌های زیادی برای نصب و حمل‌ونقل بوجود می‌آورد [۴]. هزینه‌ی ساخت توربین‌های بادی نیز به مرور زمان افت کرده، به طوری که این هزینه نسبت به بیست سال گذشته ۸۰ درصد کاهش داشته است [۵]. لذا بررسی استفاده از این انرژی در سال‌های اخیر به خوبی گویای اهمیت و جایگاه آن در تأمین انرژی در سطح جهان می‌باشد.

در سال‌های اخیر تولید توان بادی رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است و علاوه بر قرارگیری در زمره‌ی سریع‌ترین فن‌آوری‌های در حال رشد در دنیا، دارای بیشترین رشد در قرن بیست و یکم نیز بوده است به طوری که تولید توان بادی جهان در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ چهار برابر شده است [۹-۶]. مجموع ظرفیت توان بادی مورد بهره‌برداری قرار گرفته در جهان از مقدار تقریبی ۲ گیگاوات در سال ۱۹۹۰ به بیش از در پایان سال ۲۰۱۳ به ۳۱۸ گیگاوات رسیده است [۱۰] و برآوردها حاکی از وجود ۷۲ تراوات انرژی باد بر روی زمین است که پتانسیل تبدیل به انرژی بادی را دارد.

دلایل این توسعه در استفاده از انرژی بادی را می‌توان در گزینه‌های زیر خلاصه کرد:

۱. پشتیبانی‌های سازمانی و دولتی بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر [۷]، [۸]، [۱۱]
۲. هشیاری‌های عمومی و فهم جامعه در مورد پتانسیل انرژی بادی [۸]، [۹]، [۱۱]
۳. محدودیت منابع سنتی مصرف انرژی و در حال اتمام بودن سوخت‌های فسیلی [۹]، [۱۲]
۴. افزایش نگرانی‌های زیست محیطی، مناقشه‌ها و مجادله‌های انجمن بین‌المللی برق در مورد محیط زیست و رشد روزافزون جنبش‌های حمایت از محیط زیست [۸]، [۹]، [۱۳]، [۱۴]
۵. امنیت و سلامت عمومی جامعه و افزایش کیفیت زندگی [۹]
۶. وجود منابع بادی وسیع در سرتاسر جهان [۱۳]
۷. بهبود بازدهی در فن‌آوری‌های جدید بادی [۸]، [۱۳]
۸. پاک بودن، فراوانی و تجدیدپذیری کامل این انرژی [۱۴]
۹. افزایش آلودگی شهرها، مشکلات ایجاد شده برای لایه‌های جو زمین ناشی از پدیده‌ی گلخانه‌ای و تغییر وضعیت جهانی آب و هوا [۱۲]
۱۰. رشد و توسعه‌ی سریع الکترونیک قدرت [۹]
۱۱. قدرت مانور زیاد در بهره‌برداری (از چند صدوات تا چندین مگاوات)
۱۲. عدم نیاز به آب
۱۳. هزینه پایین تعمیر و نگهداری