

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پژوهشگاه مواد و انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی انرژی های نو و تجدیدپذیر

موضوع

افزایش توان تولیدی توربین بادی با تزریق انرژی ذخیره شده در چرخ طیار در لحظات نیاز به شتابگیری

توربین بادی

استادان راهنما:

دکتر کمال عباسپورثانی

دکتر غلامحسین ریاحی دهکردی

نگارنده:

عادلہ رضائی راد

سال تحصیلی ۱۳۹۰-۱۳۸۹

تقدیم بہ

پدرم کہ عالمانہ بہ من آموخت تا چگونه در عرصہ زندگی، استادگی را تجربہ نمایم

و بہ مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق کہ وجودم برایش ہمہ رنج بود و وجودش برایم ہمہ مہر

باتقدیر و تشکر شایسته از اساتید فرهیخته و فرزانه جناب آقایان دکتر ریاحی و دکتر دی و دکتر عباسپور ثانی که بارها همیانی های

بجا و خردمندانه خویش در ارائه این پایان نامه بنده راییاری نمودند. همچنین بجا است از کماک های جبران ناپذیر دوستان

عزیزم سپاسگذاری و تشکر نمایم.

## حق تالیف / گردآوری و تحقیق

این پروژه تحقیقاتی به شماره شناسه ۵۷۸۸۶۷ در پژوهشگاه مواد و انرژی به ثبت رسیده است و کلیه دستاوردهای تحقیقاتی شامل نتایج نظری، نتایج علمی و عملی، دانش فنی و سایر موارد مربوط به این پروژه متعلق به پژوهشگاه مواد و انرژی می باشد. بهره برداری از نتایج پروژه برای موسسات دولتی و غیر دولتی با مجوز پژوهشگاه مواد و انرژی و درج نام پژوهشگاه مواد و انرژی امکان پذیر است.

## چکیده

با توجه به بالا بودن ممان اینرسی توربین بادی، هنگام تغییرات سرعت باد، تغییر سریع سرعت زاویه-ای پره توربین بادی امکان پذیر نمی باشد. این امر موجب کاهش راندمان آئرو دینامیکی توربین بادی و در نتیجه کاهش انرژی خروجی می گردد، لذا تزریق انرژی در لحظات تغییر ناگهانی سرعت باد می تواند موجب افزایش شتاب محور چرخان توربین شده و بازگشت سریع توربین به نقطه بهینه کار خود حاصل می گردد که این امر می تواند موجب افزایش انرژی خروجی گردد.

در زمان کاهش سرعت باد سرعت توربین کم می شود. با اتصال چرخ طیار و در نتیجه افزایش بار توربین بادی در زمان ترمز، چرخ لنگر شارژ شده و در نتیجه کاهش سرعت توربین سریعتر انجام می پذیرد. در هنگام افزایش سرعت باد با اتصال چرخ لنگر به توربین می توان در زمان کمتری سرعت توربین بادی را به سرعت نامی رساند. چرخ لنگر به نسبت دیگر ذخیره کننده ها دارای چگالی انرژی بالاتر می باشد و همچنین حافظه دار نبوده و در نتیجه می توان دفعات متعددی آن را شارژ و تخلیه نمود. همچنین چرخ لنگر نیاز به تبدیل انرژی ندارد و انرژی مکانیکی را به صورت مکانیکی ذخیره می کند.

در این پروژه به بررسی تزریق انرژی در هنگام تغییر سرعت باد توسط چرخ لنگر به منظور افزایش توان تولیدی توربین بادی پرداخته می شود. همچنین سامانه ترکیبی توربین بادی- چرخ لنگر با استفاده از روابط حاکم بر آن مدل سازی شده مدل حاصل در محیط نرم افزاری MATLAB شبیه سازی شده است.

به لحاظ اینکه عملکرد چرخ لنگر در موقع تغییر سرعت باد در بازه زمانی کوتاه انجام می گیرد، مدل ارائه شده به تابع ورودی باد که در فاصله زمانی کم ثبت شده است، نیاز دارد. لذا جهت راه اندازی مدل از اطلاعات باد شهر ملبورن استرالیا استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که به کارگیری چرخ لنگر در لحظات تغییر ناگهانی سرعت باد، افزایش راندمان توربین را در پی دارد.

**کلید واژه:** تزریق انرژی، توربین بادی، تغییرات سرعت باد، چرخ طیار، ذخیره انرژی.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د.....	فهرست جدول ها
ه.....	فهرست شکل ها
ح.....	فهرست علائم و نشانه ها
۱.....	<b>فصل ۱- مقدمه</b>
۱.....	۱-۱- مقدمه
۲.....	۲-۱- تشریح بیان مسئله
۳.....	۳-۱- اهداف پروژه
۳.....	۴-۱- مراحل انجام پروژه
۳.....	۵-۱- ساختار پایان نامه
۵.....	<b>فصل ۲- پیشینه پژوهش</b>
۸.....	<b>فصل ۳- مرور بر انواع توری بنیاد یا ز نظر کارایبوا اتصال الکتریکی</b>
۸.....	۱-۳- منحنی های کارایبوا توری بنیادی
۸.....	۱-۱-۳- منحنی $C_P - \lambda$
۹.....	۲-۱-۳- اثر صلبیت بر اندمان
۱۱.....	۳-۱-۳- منحنی $C_Q - \lambda$
۱۲.....	۴-۱-۳- منحنی $C_T - \lambda$
۱۲.....	۵-۱-۳- منحنی $P - V$
۱۳.....	۲-۳- انواع توری بنیادی
۱۶.....	۳-۳- انواع سیستم های الکتریکی توری بنیادی
۱۶.....	۱-۳-۳- انواع سیستم سرعته ثابت
۱۷.....	۱-۱-۳-۳- ژنراتور سنکرونیبا اتصال مستقیم به شبکه
۱۷.....	۲-۱-۳-۳- ژنراتور القاییبا اتصال مستقیم به شبکه
۱۸.....	۳-۱-۳-۳- ژنراتور القایی با لغز شتغیر
۱۸.....	۴-۱-۳-۳- ژنراتور های چند سرعته
۱۹.....	۲-۳-۳- انواع سیستم سرعته متغیر
۱۹.....	۱-۲-۳-۳- ژنراتور سنکرونیبا مغناطیس دایم با اتصال به شبکه توسط مبدل

۲۰	..... ژنراتور القای تغذیه دوسویه (DFIG)
۲۱	..... ژنراتور القای تغذیه دوسویه
<b>۲۵</b>	<b>فصل ۴- ذخیره‌کننده‌های انرژی</b>
۲۵	..... ۱-۴ نیروگاه برق آبی تلمبه - ذخیره‌ای
۲۶	..... ۲-۴ ذخیره‌انرژی هوا فشرده
۲۷	..... ۳-۴ باتری
۲۷	..... ۱-۳-۴ باتری سرب - اسید
۲۸	..... ۲-۳-۴ باتری نیکل - کادمیوم
۲۸	..... ۳-۳-۴ باتری سدیم - سولفور
	..... ۲۸ ابرخازن
۲۹	..... ۵-۴ ابررسانای ذخیره‌انرژی مغناطیسی
۳۰	..... ۶-۴ پیل سوختی
۳۰	..... ۷-۴ چرخلنگر
<b>۳۶</b>	<b>فصل ۵- مدل‌سازی توریون باد چرخلنگر</b>
۳۶	..... ۱-۵ مدل‌سازی توریون بادی
	..... ۱-۱-۵ مدل باد ۳۶
۳۹	..... ۲-۱-۵ مدل توریون
۴۰	..... ۳-۱-۵ مدل سیستم انتقال قدرت
۴۳	..... ۴-۱-۵ کنترل توریون بادی
	..... ۱-۴-۱-۵ کنترل استال ۴۳
	..... ۲-۴-۱-۵ کنترل زاویه گام ۴۳
	..... ۳-۴-۱-۵ کنترل استال فعال ۴۴
	..... ۴-۴-۱-۵ کنترل گشتاور ۴۷
۴۸	..... ۵-۴-۱-۵ کنترل سرعت
۴۹	..... ۲-۵ مدل‌سازی چرخلنگر
۴۹	..... ۱-۲-۵ پارامترهای طراحی
	..... ۱-۱-۲-۵ ضریب تغییرات سرعت ۵۰
	..... ۲-۱-۲-۵ تنش وارده بر چرخلنگر ۵۰
۵۰	..... ۳-۵ مدل‌سازی سامانه‌ترکیب توریون بادی - چرخلنگر
<b>۵۳</b>	<b>فصل ۶- شبیه‌سازی یونتاچ</b>



۵۳	شبییهسازیتوربینبادیوچرخلنگر	۱-۶
۶۲	معتبرسازیمدل	۲-۶
۶۳	تغییراتبادورودیبهتوربین	۳-۶
۶۵	خروجیهایشبیهسازی	۴-۶
۶۶	نتایجشبیهسازی	۵-۶
۷۵	نتیجهگیریوپیشنهادات	۷
۷۶	مشخصاتتوربینبادی GE 1.5 MW	ضمیمه أ
۷۹	سیستمنسبتبهواحد	ضمیمه ب
		فهرستمرجع ۸۰
۸۴	واژهنامهمفارسیبهانگلیسی	
۸۶	واژهنامهانگلیسیبهفارسی	

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۲۱	جدول ۱-۳: راندمان ترا تور و هزینه نسبی آن‌ها در انواع سیستم‌های توربین بادی
۳۲	جدول ۱-۴: فاکتور شکل‌گیری چندمدل چرخلنگر
۳۲	جدول ۲-۴: پارامترهای فیزیکی مواد مختلف
۳۴	جدول ۳-۴: مشخصات سیستم‌های ذخیره انرژی
۳۸	جدول ۱-۵: ضریب‌های مواریب بر خیس طوح
۵۵	جدول ۱-۶: ضرایب $\alpha_{i,j}$
۶۰	جدول ۲-۶: پارامترهای کنترلر
۶۷	جدول ۳-۶: انرژی بدست‌آمده از توربین بادی در دوره پیله
۷۱	جدول ۴-۶: انرژی بدست‌آمده از توربین واقع‌یاب و رودیاد واقع‌یاب بر شده
۷۳	جدول ۵-۶: انرژی بدست‌آمده از توربین بادی و رودیاد مدل شده

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱	شکل ۱-۱: ظرفیت انرژی باد نصب شده در جهان بر حسب MW.....
۹	شکل ۱-۳: منحنی $C_p$ - $\lambda$ برای یک توربین باد سه پره‌ای.....
۹	شکل ۲-۳: منحنیمشخصه $C_p$ - $\lambda$ برای یک توربین بادی.....
۱۰	شکل ۳-۳: اثر تغییر بر صلبیت و میسریت توان.....
۱۱	شکل ۴-۳: اثر صلبیت بر ضریب گشتاور.....
۱۲	شکل ۵-۳: اثر صلبیت بر نیروی پیشرانه.....
۱۳	شکل ۶-۳: منحنی توان یک توربین بادی.....
۱۴	شکل ۷-۳: توربین نو عیسا.....
۱۵	شکل ۸-۳: سرعت نسبی در توربین نو عیسا.....
۱۷	شکل ۹-۳: ژنراتور سنکرو و نایا اتصال مستقیم به شبکه.....
۱۸	شکل ۱۰-۳: ژنراتور القای با اتصال مستقیم به شبکه.....
۱۸	شکل ۱۱-۳: ژنراتور القای متصل به شبکه مقاوم متغیر برای کنترل لغزش.....
۲۰	شکل ۱۲-۳: ژنراتور سنکرو و متصل به شبکه توسط مبدل.....
۲۰	شکل ۱۳-۳: ژنراتور القای تغذیه دو سو به متصل به شبکه.....
۲۲	شکل ۱۴-۳: توربین بادی سرعت متغیر با یک ژنراتور القای دو سو تغذیه.....
۲۳	شکل ۱۵-۳: روابط توان DFIG.....
۲۴	شکل ۱۶-۳: دیاگرام عملکرد سرعت DFIG.....
۳۳	شکل ۱-۴: مدل چرخلنگر.....
۳۳	شکل ۲-۴: مشخصه مانپاسخبر ایسیستم‌های مختلف ذخیره انرژی.....
۴۰	شکل ۱-۵: منحنی $C_p$ - $\lambda$ .....
۴۲	شکل ۲-۵: مدل‌های سیستم انتقال قدرت توربین بادی.....
۴۴	شکل ۳-۵: نمونه‌ای از منحنی توان و زاویه گام بر حسب سرعت باد.....
۴۴	شکل ۴-۵: مقایسه بین کنترل زاویه گام و کنترل استال غیر فعال.....
۴۵	شکل ۵-۵: کنترل استال غیر فعال در سرعت‌های باد مختلف.....
۴۶	شکل ۶-۵: کنترل زاویه گام در سرعت‌های متغیر و باد.....
۵۱	شکل ۷-۵: جریان توان در یک توربین بادی.....

- شکل ۵-۸: مدل دینامیکی اتصال چرخلنگر بهتر بینبادی ..... ۵۲
- شکل ۶-۱: ورودی ها و خروجی های توربینبادی ..... ۵۳
- شکل ۶-۲: بلو کد یاگرام سیستم تبدیل انرژی توربینبادی ..... ۵۴
- شکل ۶-۳: منحنی  $C_p$  ..... ۵۵
- شکل ۶-۴: بلو کد یاگرام کنترل سرعت ..... ۵۶
- شکل ۶-۵: بلو کد یاگرام کنترل لگشتاور ..... ۵۶
- شکل ۶-۶: نسبت سرعت نوک و بدو نوک کنترل سرعت ..... ۵۷
- شکل ۶-۷: بلو کد توربینبادی مجهز به ژنراتور القایی ..... ۵۷
- شکل ۶-۸: پنجره مشخصات توربینبادی در MATLAB ..... ۵۸
- شکل ۶-۹: پنجره مشخصات توربینبادی و ورودی گشتاور ..... ۵۹
- شکل ۶-۱۰: روش بدست آوردن مشخصات توربین برای بدست آوردن بیشینه توان ..... ۵۹
- شکل ۶-۱۱: نمونه مشخصات توربینبادی در MATLAB ..... ۵۹
- شکل ۶-۱۲: بلو کد یاگرام کنترل زاویه گام ..... ۶۰
- شکل ۶-۱۳: بلو کد یاگرام اتصال چرخلنگر بهتر بینبادی ..... ۶۱
- شکل ۶-۱۴: جریانه توانی چرخلنگر و توربینبادی هنگام افزایش کاهش سرعت باد ..... ۶۱
- شکل ۶-۱۵: سامانه ترکیبی توربینبادی - چرخلنگر شبیه سازی شده ..... ۶۱
- شکل ۶-۱۶: باد ورودی ..... ۶۲
- شکل ۶-۱۷: تغییرات زاویه گام در پاسخ به ورودی پله ..... ۶۲
- شکل ۶-۱۸: تغییرات سرعت تورژنر توربین در پاسخ به ورودی پله ..... ۶۳
- شکل ۶-۱۹: باد پله ای ورودی به سامانه ..... ۶۴
- شکل ۶-۲۰: باد شهر ملبورن استرالیا ..... ۶۴
- شکل ۶-۲۱: بازه ایاز باد شهر ملبورن استرالیا ..... ۶۴
- شکل ۶-۲۲: باد ورودی مدلبارفتار باد ملبورن استرالیا ..... ۶۵
- شکل ۶-۲۳: باد ورودی مدلبارفتار ..... ۶۵
- شکل ۶-۲۴: توان خروجی ژنراتور با چرخلنگر و بدوآن ..... ۶۷
- شکل ۶-۲۵: سرعت تورژنر توربینبادی با چرخلنگر و بدوآن ..... ۶۷
- شکل ۶-۲۶: سرعت تورژنر توربینبادی با چرخلنگر و بدوآن ..... ۶۸
- شکل ۶-۲۷: توان خروجی توربینبادی و باد واقعی چند برابر ..... ۶۸
- شکل ۶-۲۸: سرعت توربینبادی با باد واقعی چند برابر ..... ۶۹
- شکل ۶-۲۹: بازه ۵۰ ثانیه از باد ورودی بارفتار واقعی ..... ۶۹

- شکل ۶-۳۰: سرعت توربین بادی در بازه زمانی ۵۰ ثانیه ..... ۷۰
- شکل ۶-۳۱: تغییرات سرعت چرخش خنجر ..... ۷۰
- شکل ۶-۳۲: ولتاژ خروجی توربین بادی ..... ۷۰
- شکل ۶-۳۳: تغییرات زاویه گام توربین بادی ..... ۷۱
- شکل ۶-۳۴: توان خروجی توربین بادی در دوره دیمدلشده ..... ۷۲
- شکل ۶-۳۵: تغییرات سرعت توربین بادی در دوره دیمدلشده ..... ۷۲
- شکل ۶-۳۶: میزان افزایش انرژی توربین بادی بر حسب مقدار مختلف مانایز سیچر خنجر ..... ۷۳
- شکل ۷-۱: منحنی توان مشخصات توربین بادی GE 1.5 ..... ۷۸

## فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
زاویه حمله	$\alpha$
زاویه گام	$\beta$
چگالی هوا [ $\text{kg/m}^3$ ]	$\rho$
نسبت ضریب پسا به برا	$\gamma$
راندمان	$\eta$
نسبت سرعت نوک	$\lambda$
ماکزیمم مقاومت کششی [MPa]	$\sigma_m$
تنش مماسی [MPa]	$\sigma_\theta$
تنش شعاعی [MPa]	$\sigma_r$
ضریب پواسون	$\nu$
سرعت زاویه‌ای ولتاژ استاتور [rad/s]	$\omega_s$
سرعت زاویه‌ای ولتاژ رتور [rad/s]	$\omega_r$
سرعت زاویه‌ای محور ژنراتور [rad/s]	$\omega_{sh}$
سرعت زاویه‌ای رتور توربین [rad/s]	$\omega_t$
سرعت زاویه‌ای چرخ لنگر [rad/s]	$\omega_{fw}$
چگالی آب [ $\text{kg/m}^3$ ]	$\rho_w$
ثابت دی الکتریک	$\epsilon_r$
قابلیت گذردهی خلأ [F/m]	$\epsilon_0$
نسبت سرعت نوک بهینه	$\lambda_*$
نرخ تغییرات سرعت توربین [ $\text{rad/s}^2$ ]	$\dot{\omega}_t$
نرخ تغییرات سرعت چرخ لنگر [ $\text{rad/s}^2$ ]	$\dot{\omega}_{fw}$
سرعت مرجع توربین [rad/s]	$\omega_*$
چگالی رتور چرخ لنگر [ $\text{kg/m}^3$ ]	$\rho_{fw}$
فاصله بین صفحات خازن [m]	$d$
شتاب گرانش [ $\text{m/s}^2$ ]	$g$
سرعت چرخشی [rpm]	$n$

$r_o$	شعاع خارجی چرخ لنگر [m]
$r_i$	شعاع داخلی چرخ لنگر [m]
$v_c$	ولتاژ خازن [V]
$A$	مساحت جاروب شده [m <sup>2</sup> ]
$C$	ظرفیت خازن [F]
$E$	انرژی تولید شده [J]
$H$	ارتفاع [m]
$I$	جریان [A]
$L$	اندوکتانس سیم‌پیچی [H]
$P$	توان [W]
$R$	شعاع رتور توربین [m]
$V$	سرعت باد [m/s]
$A_c$	مساحت صفحات موازی خازن [m <sup>2</sup> ]
$C_s$	ضریب تغییرات سرعت چرخ لنگر
$C_p$	ضریب توان
$C_q$	ضریب گشتاور
$C_T$	ضریب نیروی پیشرانده
$C_D$	ضریب نیروی پسا
$C_L$	ضریب نیروی برا
$D_t$	ضریب تلفات توربین بادی
$D_{fw}$	ضریب تلفات چرخ لنگر
$E_c$	انرژی ذخیره شده [J]
$E_{sp}$	چگالی انرژی در واحد جرم [Wh/Kg]
$F_D$	نیروی پسا [N]
$F_L$	نیروی برا [N]
$J_{eq}$	ممان اینرسی انتقال داده شده [Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_a$	ممان اینرسی واقعی [Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_t$	ممان اینرسی توربین بادی [Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_{fw}$	ممان اینرسی چرخ لنگر [Kg.m <sup>2</sup> ]
$K_s$	ضریب شکل چرخ لنگر

$N_{GB}$	ضریب چرخ دنده
$P_c$	ظرفیت توان [W]
$P_m$	توان مکانیکی توربین [W]
$P_r$	توان رتور ژنراتور [W]
$P_s$	توان استاتور [W]
$P_g$	توان کلی ژنراتور [W]
$P_N$	مؤلفه عمودی نیروی آئرو دینامیکی وارد بر پره [N]
$P_T$	مؤلفه افقی نیروی آئرو دینامیکی وارد بر پره [N]
$P_{air}$	توان باد [W]
$P_{air-gap}$	توان در فاصله هوایی ژنراتور [W]
$Q_w$	نرخ حجم آب عبوری [m <sup>3</sup> /s]
$T_t$	گشتاور توربین بادی [N.m]
$T_g$	گشتاور ژنراتور [N.m]
$T_{fw}$	گشتاور چرخ لنگر [N.m]
$T_l$	گشتاور بار [N.m]
$T_c$	گشتاور مرجع کنترل [N.m]
$\hat{T}_t$	تخمین گشتاور توربین [N.m]
$T_{aero}$	گشتاور مکانیکی وارد بر توربین بادی [N.m]
$V_r$	سرعت نسبی باد [m/s]
DC	جریان مستقیم
AC	جریان متناوب
TSR	نسبت سرعت نوک
CAES	ذخیره انرژی هوای فشرده
DFIG	ژنراتور القایی تغذیه دوسویه
LA	باتری سرب-اسید
MPPT	ردیابی نقطه ماکزیمم توان
NiCd	باتری نیکل - کادمیوم
NaS	باتری سدیم-سولفور
PMSG	ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم
PHES	نیروگاه برق آبی تلمبه-ذخیره‌ای



*SG*

ژنراتور سنکرون

*SCIG*

ژنراتور القایی قفس سنجابی

*SMES*

ابرسانای ذخیره انرژی مغناطیسی

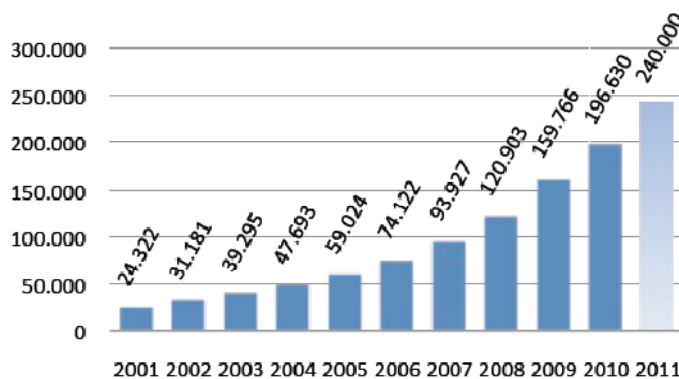
## فصل ۱ - مقدمه

### ۱-۱ - مقدمه

پیشرفت فناوری جامعه بشری و نیاز روزافزون به دسترسی آسان منابع انرژی کارا به منظور پیشبرد اهداف جامعه، سبب شده است موضوع انرژی همواره به عنوان مسئله‌ای حائز اهمیت و پر چالش در سطح جهان مد نظر قرار گیرد. مصرف گسترده انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی اگرچه رشد سریع اقتصادی جوامع مدرن را میسر نمود، اما پیامدهای آن از قبیل نشر آلاینده‌های حاصل از احتراق و گرمایش روزافزون جو کره زمین، جهان را با چالش عظیمی مواجه کرده است.

گسترش نیروگاه‌های کوچک در دنیا، پس از بحران انرژی در اوایل دهه ۷۰ میلادی رشد چشمگیری داشت. این نیروگاه‌ها اغلب بر مبنای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر عمل می‌کنند. در این میان آب و باد به عنوان منابع انرژی ارزان و تجدیدپذیر بیشتر مورد توجه قرار گرفتند. سازگار کردن منابع تجدیدپذیر با روند فعلی مصرفی انرژی در جهان هنوز با مشکلاتی همراه است، که بررسی و رفع آنها حجم عظیمی از تحقیقات علمی در دهه‌های اخیر جهان را بخود اختصاص داده است، به طوری که هر روز شاهد پیشرفت‌هایی در زمینه فن‌آوری استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر هستیم. در مقایسه با دیگر منابع تجدیدپذیر، انرژی بادی مقرون به صرفه بوده و بیشترین رشد را داشته است [۱]. شکل ۱-۱ ظرفیت بادی نصب شده در جهان را طی سال‌های مختلف نشان می‌دهد.

توربین‌های بادی، انرژی جنبشی باد را به انرژی مکانیکی و سپس به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. توربین‌های بادی می‌توانند به صورت متصل به شبکه و منفصل از آن بکار گرفته شوند، اما بیشترین ظرفیت توربین‌های بکار گرفته شده در سال‌های اخیر بصورت متصل به شبکه بوده است. در نواحی دور افتاده بیشتر از توربین‌های منفصل استفاده می‌شود.



شکل ۱-۱: ظرفیت انرژی بادی نصب شده در جهان بر حسب MW [۲]

توربین‌های بادی را می‌توان از نقطه نظر سرعت چرخش رتور به دو نوع سرعت ثابت<sup>۱</sup> و سرعت متغیر<sup>۲</sup> تقسیم کرد. برای توربین‌های بادی با سرعت ثابت، ژنراتور مورد استفاده معمولاً از نوع القایی (آسنکرون)<sup>۳</sup> است و غالباً به صورت مستقیم به شبکه متصل می‌گردد. سرعت رتور این نوع توربین‌ها توسط فرکانس شبکه، جعبه دنده و تعداد قطبهای ژنراتور تعیین می‌شود. توربین‌های سرعت ثابت نسبت به سرعت متغیر ساختاری ساده‌تر و در نتیجه هزینه تمام شده کمتری دارند. اما این توربین‌ها به علت عملکرد در یک سرعت ثابت، تنها در یک سرعت مشخص باد، بیشینه راندمان را دارند.

توربین‌های سرعت متغیر برای کار در بازه وسیعی از سرعت‌های باد طراحی شده‌اند. در دهه‌های اخیر با بزرگتر شدن توربین‌های بادی و همچنین با کاهش قیمت ادوات الکترونیک قدرت، طراحی توربین‌ها از سرعت ثابت با کنترل استال<sup>۴</sup> به سرعت متغیر با کنترل زاویه گام<sup>۵</sup> تغییر کرده است. از مزایای توربین‌های سرعت متغیر می‌توان به راندمان بیشتر، قابلیت کنترل توان راکتیو و اعمال بار کمتر بر سیستم انتقال قدرت<sup>۶</sup> توربین نام برد [۳]. بازده تولید انرژی در توربین‌های بادی با سرعت متغیر، ۲۸ تا ۳۰ درصد بیشتر از توربین‌های با سرعت ثابت است. معمولی‌ترین و به صرفه‌ترین ژنراتور مورد استفاده در توربین‌های بادی سرعت متغیر، ژنراتور القایی تغذیه دوسویه می‌باشد [۴].

## ۱-۲- تشریح بیانی مسئله

سرعت رتور توربین‌های بادی سرعت متغیر با تغییر سرعت باد، تغییر می‌کند. برای قرار دادن توربین بادی در بیشینه ضریب توان، از سیستم ردیابی نقطه ماکزیمم توان (MPPT)<sup>۷</sup> استفاده می‌شود. اینرسی بالای توربین و پاسخ زمانی زیاد آن و در نتیجه عدم پاسخ سریع به تغییرات سرعت بادیکی از مشکلات عمده‌ای است که MPPT با آن مواجه می‌باشد. به این معنی که توربین بادی به دلیل اینرسی بالای خود، نمی‌تواند تغییرات باد را در همان لحظه دنبال کند. در این پروژه به بررسی احتمال کاهش ثابت زمانی توربین بادی، با اتصال چرخ لنگر در مواقع تغییر سرعت باد، پرداخته می‌شود. در این حالت توربین بادی سریعتر به نقطه کار بهینه خود رسیده و افزایش راندمان را در پی خواهد داشت.

---

<sup>1</sup> Fixed Speed Wind Turbine

<sup>2</sup> Variable Speed Wind Turbine

<sup>3</sup> Induction (Asynchronous) Generator

<sup>4</sup> Stall Control

<sup>5</sup> Pitch Control

<sup>6</sup> Drive Train System

<sup>7</sup> Maximum Power Point Tracking

## ۱-۳- اهداف پروژه

هدف از انجام این پژوهش افزایش انرژی بدست آمده از توربین بادی سرعت متغیر و در نتیجه افزایش راندمان آن می‌باشد. به این منظور از یک سیستم ذخیره کننده انرژی برای شتابدهی به توربین بادی استفاده شده است. به دلیل ممان اینرسی بالا، پاسخ توربین بادی به تغییرات سرعت باد سریع نمی‌باشد. در این پروژه با به کارگیری چرخ لنگر به عنوان شتابدهنده یا کاهنده سرعت توربین بادی، اثر آن بر کاهش زمان صرف شده برای رسیدن توربین به سرعت بهینه بررسی می‌گردد.

## ۱-۴- مراحل انجام پروژه

برای به پایان رساندن این پروژه مراحل زیر انجام شده است:

- بررسی توربین‌های بادی موجود و مطالعه روش‌های انجام شده جهت افزایش راندمان این توربین‌ها.
- مطالعه بر روی معادلات حاکم بر توربین بادی و چرخ لنگر.
- مدل‌سازی و شبیه‌سازی توربین بادی و چرخ لنگر.
- مطالعه بر روی نوع ژنراتور استفاده شده برای شبیه‌سازی.
- شبیه‌سازی سامانه توربین بادی- چرخ لنگر.
- بررسی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی.

## ۱-۵- ساختار پایان‌نامه

در این رساله در فصل دوم پیشینه پژوهش بیان می‌شود. در فصل سوم بعد از معرفی منحنی مشخصه‌های توربین بادی به بررسی کارایی انواع توربین بادی از نوع برا و پسا پرداخته و راندمان آئرودینامیکی آنها مقایسه می‌شود. پس از آن، انواع سیستم‌های الکتریکی توربین بادی به صورت مختصر بیان می‌شود. در پایان فصل نیز ژنراتور القایی تغذیه دو سویه تشریح خواهد شد.

در فصل چهارم به بررسی انواع روش‌های ذخیره انرژی پرداخته شده‌است. در این بخش روش‌های مختلف ذخیره انرژی مقایسه و دلیل انتخاب چرخ لنگر برای اهداف این پروژه بیان شده است.

با توجه به اهمیت مدل‌سازی صحیح یک سیستم توان در مطالعات دینامیکی و گذرا، فصل پنجم این پایان‌نامه به مدل‌سازی توربین‌های بادی اختصاص یافته است. در این فصل پس از مدل‌سازی رتور توربین و سیستم انتقال قدرت، به بررسی انواع کنترل توربین بادی پرداخته شده است و معادلات حاکم بر این