



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش کنترل

کنترل مقاوم  $H_\infty$  برای ژنراتور القایی تغذیه دو سویه (DFIG) توربین بادی

رضا قربانی دفرازی

استاد راهنما:

دکتر محمدعلی صدرنیا

بهمن ۱۳۹۴

دانشکده: مهندسی برق

گروه: کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای رضا قربانی دفرازی به شماره دانشجویی ۹۲۱۱۲۲۴ تحت عنوان  
کنترل مقاوم  $H_\infty$  برای ژنراتور القایی تغذیه دو سویه (DFIG) توربین بادی در تاریخ  
۱۳۹۴/۱۱/۲۶ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد در مهندسی برق-کنترل  
مورد ارزیابی و با درجهی ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			دکتر محمد علی صدرنیا

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور

تقدیم نامہ:

سپاس از دو وجود مقدس

آمان کہ ناتوان شدنتا بہ توانایی برسم

مویشان سپید گشت تار و سفید شوم

و عاشقانہ سوختند تا کہ ما بخش وجود و روشکر را ہم باشند

تقدیم بہ پدر و مادر مہربانم

,

تقدیم بہ خواہر عزیزم

کہ وجودش شادی بخش و صفایش مایہ آرامش من است.

## شکر و قدردانی:

انجام پژوهش حاضر، بعد از لطف و عنایت خداوند متعال، که خواست او سرنشاء تمام امور است، مدیون تلاش افراد بیشاری است که در تمام دوران زندگی و تحصیلات، با محبت، تشویق، آموزش و مراد لطف قرار داده اند، بدین وسیله در اینجا بر خود لازم می دانم از همه کسانی که بارها به منی و ر، نمود، تشویق و ترغیب، تذکر و انتقاد، معرفی و یاتید منیع، بنده را در انجام این پژوهش یاری رسانیده اند، شکر نمایم؛ به ویژه از استاد محترم جناب آقای دکتر محمد علی صدرزایا که در طول انجام این پژوهش، همواره مرا مورد الطاف، راهنمایی ها و بزرگواری های خویش قرار داده اند بسیار سپاسگزارم.

همچنین از خانواده عزیزم و بخصوص پدر و مادر که تقدیرم که همواره با دلگرمی های خویش مرا جانی تازه بخشیده اند، کمال سپاس و قدردانی را دارم.

و در نهایت از تمامی اساتید گروه کنترول دانشگاه صنعتی شاهرود که در طول دوران تحصیل، بنده را از راهنمایی های خویش بی نصیب نگذاشته اند، سپاسگزار می کنم.

رضا قربانی دفرازی

## تعهدنامه

اینجانب رضا قربانی دفرازی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق- کنترل دانشکدهی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل مقاوم  $H_{\infty}$  برای ژنراتور القایی تغذیه دو سویه (DFIG) توربین بادی تحت راهنمایی دکتر محمدعلی صدرنیا متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

## چکیده

نیاز روزافزون جهان به انرژی و محدود بودن منابع انرژی فسیلی، ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر را بیش‌ازپیش نمایان می‌نماید با توجه به رشد روزافزون مصرف انرژی در دنیا و محدودیت ذخایر سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصارف منابع انرژی فسیلی و تولید گازهای گلخانه‌ای استفاده از سایر منابع انرژی پاک را ضروری می‌سازد. در این بین استفاده از انرژی بادی با توجه به ظرفیت بالای نیروگاهی این نوع از انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. اصولاً استراتژی طراحی کنترل کننده مقاوم بر این اصل استوار است که کنترل کننده مقاوم به صورتی طراحی گردد که بهترین عملکرد ممکن سیستم حلقه بسته در مجموعه نامعینی مدل بدست آید. با این توصیف واضح است که بهترین عملکرد ممکن یا با اغماض حداقل عملکرد مورد نیاز در مجموعه نامعینی مدل (طراحی کنترل کننده  $H_\infty$ ) نه تنها به خود کنترل کننده بلکه به شکل مجموعه نامعینی مدل ارتباط دارد. کنترل کننده  $H_\infty$  یکی از روش‌های کنترل مقاوم است که می‌تواند با در نظر گرفتن نویز اندازه‌گیری، اغتشاشات ورودی و خروجی سیستم و همچنین عدم قطعیت سیستم در قبال تغییرات شرایط کاری، پارامترها و ساختار سیستم، پایداری و عملکرد سیستم را تضمین کند. در این پایان‌نامه ابتدا یک مدل دینامیکی جامع برای سیستم تبدیل انرژی بادی که قسمت‌های مکانیکی و الکتریکی را با جزئیات مناسبی شامل می‌شود، همچنین با بررسی معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم و تعیین عدم قطعیت سیستم به طراحی کنترل کننده مقاوم با تکنیک  $H_\infty$  با هدف کنترل توان اکتیو و راکتیو برای یک واحد ژنراتور القایی دو سو تغذیه با توربین بادی در حضور تغییرات پارامتری به مدل‌سازی سیستم همراه با نامعینی پرداخته شده است.

**واژگان کلیدی:** انرژی باد، توربین‌های بادی، ژنراتور القایی تغذیه دو سو (DFIG)، کنترل

مقاوم  $H_\infty$ ، کنترل توان اکتیو و راکتیو

## فهرست مطالب

ط	فهرست شکل‌ها	.....
ل	فهرست جدول‌ها	.....
۱	فصل ۱ مروری بر کارهای گذشته	.....
۲	۱-۱ مقدمه	.....
۵	۲-۱ پیشینه پژوهشی	.....
۱۰	۳-۱ هدف از انجام تحقیق	.....
۱۱	۴-۱ ساختار پایان‌نامه	.....
۱۳	فصل ۲ انرژی باد و انواع ژنراتورهای بکار رفته در توربین‌های بادی	.....
۱۴	۱-۲ مقدمه	.....
۱۵	۲-۲ پتانسیل انرژی باد و نیروگاه‌های بادی نصب شده در ایران و جهان	.....
۱۶	۱ ۲ ۲ بازار جهانی نیروگاه‌های بادی در سال ۲۰۱۴	.....
۱۹	۲-۲-۲ روند تحولات تکنولوژی انرژی باد در سال‌های اخیر	.....
۲۰	۳-۲-۲ منشاء باد	.....
۲۰	۳-۲ پارامترهای مهم در انتخاب توربین‌های بادی	.....
۲۱	۴-۲ مزایای انرژی باد و استفاده از توربین‌های بادی	.....
۲۱	۵-۲ محدودیت‌ها انرژی باد و استفاده از توربین‌های بادی	.....
۲۲	۶-۲ اجزای توربین بادی	.....
۲۳	۷-۲ انرژی ذخیره‌شده در باد	.....
۲۳	۱-۷-۲ قدرت نامی	.....
۲۳	۸-۲ محاسبه توان استخراجی از باد	.....
۲۳	۱ ۸ ۲ مدل دیسک محرک در محاسبه توان استخراجی از باد	.....
۲۹	۹-۲ کنترل توان خروجی DFIG	.....



۳۰	.....انواع توربین‌های بادی و مکانیسم کار آن‌ها
۳۱	..... ۱ ۱۰ ۲ توربین‌های بادی با محور چرخش عمودی (VAWT)
۳۲	..... ۲ ۱۰ ۲ توربین‌های بادی با محور چرخش افقی (HAWT)
۳۲	..... ۱۱-۲ انواع ژنراتورهای توربین بادی
۳۳	..... ۱ ۱۱ ۲ ژنراتور سنکرون
۳۴	..... ۲-۱۱-۲ ژنراتورهای آسنکرون (القایی دو سو تغذیه)
۳۸	..... ۳ ۱۱ ۲ کنترل توربین بادی سرعت ثابت
۳۸	..... ۴ ۱۱ ۲ کنترل توربین بادی سرعت متغیر
۴۱	..... فصل ۳ مدل‌سازی توربین بادی با ژنراتور القایی تغذیه دوگانه (DFIG)
۴۲	..... ۱-۳ مقدمه
۴۲	..... ۲-۳ تحلیل آماری داده‌های بادی
۴۴	..... ۳-۳ محاسبه انرژی سالیانه توربین بادی
۴۵	..... ۴-۳ محاسبه توان توربین بادی
۴۵	..... ۵-۳ یک معرفی مختصر از آیرودینامیک توربین بادی
۴۵	..... ۳ ۵ ۱ بلوک آیرودینامیک
۴۸	..... ۶-۳ بلوک مکانیکی
۴۸	..... ۱-۶-۳ مدل جعبه دنده و پیشرانه مکانیکی
۵۲	..... ۷-۳ نمایش فضای حالت بلوک مکانیکی:
۵۲	..... ۸-۳ مدل‌سازی سیستم متحرکه توربین بادی
۵۳	..... ۹-۳ ماشین‌های القایی
۵۳	..... ۱ ۹ ۳ تاریخچه مدل دو محوری ماشین القایی
۵۴	..... ۱۰-۳ مدار معادل ماشین القایی
۵۶	..... ۱۱-۳ مدل‌سازی ژنراتور القایی تغذیه دوگانه (DFIG)

۶۱	۱۲-۳ اصول کلی پایداری در (DFIG).....
۶۳	۱ ۱۲ ۳ چگونگی استفاده از بردار شار روتور در افزایش پایداری دینامیکی.....
۶۴	۱۳-۳ بلوک الکتریکی.....
۶۴	۱۴-۳ بلوک کنترلی.....
۶۵	فصل ۴ کنترل مقاوم $H_{\infty}$ .....
۶۶	۱-۴ مقدمه.....
۶۷	۲-۴ تاریخچه کنترل مقاوم.....
۶۹	۳-۴ عوامل مؤثر بر کاهش پایداری و مقاومت سیستم.....
۷۰	۴-۴ سیستم چند متغیره.....
۷۱	۵-۴ نمایش مدل نامی سیستم چند متغیره (MIMO).....
۷۱	۱ ۴ نمایش ماتریس تابع تبدیل.....
۷۲	۲ ۴ نمایش فضای حالت.....
۷۲	۶-۴ ماتریس حساسیت و حساسیت مکمل.....
۷۴	۷-۴ نامعینی ها.....
۷۴	۱ ۷ ۴ منابع نامعینی.....
۷۴	۲ ۷ ۴ انواع نحوه نمایش نامعینی.....
۷۶	۳ ۷ ۴ انواع نامعینی ها از لحاظ ساختار.....
۷۷	۸-۴ پایداری مقاوم.....
۷۷	۱ ۸ ۴ قضیه بهره کوچک.....
۷۸	۲ ۸ ۴ شرایط پایداری مقاوم.....
۸۰	۹-۴ کارآیی مقاوم.....
۸۱	۱۰-۴ محدودیت های طراحی.....
۸۲	۱ ۱۰ ۴ محدودیت های ریاضی ( جبری).....

۸۳	فصل ۵ نتایج و شبیه‌سازی
۸۴	۱-۵ مقدمه
۸۵	۲-۵ کنترل بهینه $H^\infty$
۸۶	۳-۵ الگوریتم کلی $H^\infty$
۸۶	۴-۵ سه اصل مهم در طراحی
۸۷	۵-۵ تکرار پذیری
۸۷	۶-۵ معرفی سیستم نامی
۸۸	۱-۶-۵ مدل‌سازی ریاضی DFIG
۹۳	۵ ۶ ۲ مدل فضای حالت سیستم
۹۴	۷-۵ انتخاب تابع‌های وزنی
۹۷	۵ ۷ ۱ انتخاب تابع وزنی کارایی
۹۹	۵ ۷ ۲ انتخاب تابع وزنی تلاش کنترلی
۱۰۰	۸-۵ تبدیل به فرم مسئله عمومی تنظیم
۱۰۱	۵-۸-۱ طراحی کنترل کننده $H^\infty$
۱۰۲	۵ ۸ ۲ کاهش مرتبه کنترل کننده
۱۰۴	۹-۵ اهداف طراحی
۱۰۷	۵ ۹ ۱ نتایج شبیه‌سازی روی توربین بادی
۱۱۱	فصل ۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۱۵	مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: میزان استفاده از انرژی بادی در ۱۰ کشور نخست دنیا در این زمینه ..... ۱۵
- شکل ۲-۲: میزان رشد استفاده از انرژی بادی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ ..... ۱۶
- شکل ۳-۲: ظرفیت تجمعی نیروگاه‌های بادی نصب شده دنیا ..... ۱۶
- شکل ۴-۲: ظرفیت تجمعی نیروگاه‌های بادی ۱۰ کشور برتر دنیا ..... ۱۷
- شکل ۵-۲: ساختمان توربین بادی ..... ۲۲
- شکل ۶-۲: جریان باد در حال عبور از دیسک محرک ..... ۲۴
- شکل ۷-۲: تغییر سرعت و فشار هوا در طول مسیر ..... ۲۵
- شکل ۸-۲: نمودار ضریب توان بر اساس سرعت نوک پره و زاویه گام ..... ۲۸
- شکل ۹-۲: مشخصه عملکرد معمول سیستم‌های توربین بادی ..... ۳۰
- شکل ۱۰-۲: قسمت‌های عمده نیروگاه بادی ..... ۳۱
- شکل ۱۱-۲: ژنراتور سنکرون ..... ۳۳
- شکل ۱۲-۲: ژنراتور القایی تغذیه دوگانه ..... ۳۵
- شکل ۱۳-۲: مشخصه گشتاور-سرعت ماشین القایی ..... ۳۵
- شکل ۱۴-۲: نمونه‌ای از ژنراتور آسنکرون ..... ۳۶
- شکل ۱۵-۲: توان انتقالی از روتور و استاتور ماشین القایی DFIG ..... ۳۷
- شکل ۱۶-۲: سهم انواع مختلف ژنراتورها در نیروگاه بادی ..... ۳۹
- شکل ۱-۳: سیستم چرخشی با یک دیسک ..... ۴۸
- شکل ۲-۳: سیستم چرخشی ترکیب شده با چرخ‌دنده ..... ۴۹
- شکل ۳-۳: اجزای متحرک سه جرم مکانیکی، تبدیل انرژی باد ..... ۵۱
- شکل ۴-۳: مدل‌سازی سیستم متحرکه توربین بادی ..... ۵۲
- شکل ۵-۳: مدار معادل ماشین القایی ..... ۵۵

- شکل ۳-۶: مدار معادل با تمامی مقادیر ارجاع یافته به استاتور ..... ۵۵
- شکل ۳-۷: نمایش شماتیک سیم‌پیچ ..... ۵۷
- شکل ۳-۸: مدار معادل ماشین القایی سه فاز ..... ۵۷
- شکل ۳-۹: مدارهای معادل برای یک چارچوب مرجع  $dq^0$  برای ماشین القایی سه فاز ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۰: گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی در یک واحد مولد برق ..... ۶۲
- شکل ۳-۱۱: دیاگرام فازوری یک (DFIG) با ولتاژ استاتور  $V$  ..... ۶۲
- شکل ۳-۱۲: دیاگرام برداری حالت کاری (DFIG) ..... ۶۳
- شکل ۴-۱: انواع سیستم‌های چند متغیره ..... ۷۰
- شکل ۴-۲: نمایش سیستم دو ورودی- دو خروجی ..... ۷۱
- شکل ۴-۳: الگوی سیستم کنترل ..... ۷۲
- شکل ۴-۴: الگوی سیستم کنترل با اغتشاش و نویز ..... ۷۳
- شکل ۴-۵: طراحی طیف فرکانسی  $T$  و طراحی طیف فرکانسی  $S$  ..... ۷۳
- شکل ۵-۱: ژنراتور القایی تغذیه دو سویه با توربین بادی ..... ۸۷
- شکل ۵-۲: محور  $d$  دستگاه مرجع گردان سنکرون  $dq^0$  ..... ۸۹
- شکل ۵-۳: شکل موج  $Cp$  بر حسب  $\lambda$  و  $\theta p$  ..... ۹۱
- شکل ۵-۴: شکل موج توان توربین بادی بر حسب سرعت آن ..... ۹۲
- شکل ۵-۵: مقادیر ویژه تابع وزنی پایداری بدون نامعینی ..... ۹۵
- شکل ۵-۶: مقادیر ویژه تابع وزنی ورودی بدون نامعینی ..... ۹۸
- شکل ۵-۷: کارایی توابع وزنی در حضور اغتشاش ورودی و نویز اندازه‌گیری شده ..... ۹۸
- شکل ۵-۸: مقادیر ویژه تابع وزنی ورودی بدون نامعینی ..... ۹۹
- شکل ۵-۹: دیاگرام بود  $Wp$  و  $Wu$  ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱۰: تابع تبدیل تعمیم یافته و کنترلر در مسئله عمومی تنظیم ..... ۱۰۰

- شکل ۵-۱۱: مقادیر تکین اجزای سیستم حلقه بسته ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۱۲: مقادیر تکین هنکل برای کنترل کننده طراحی شده ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۳: بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقادیر تکین هنکل کنترل کننده اصلی و کاهش مرتبه یافته ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۴: پاسخ پله سیستم بدون حضور نامعینی ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱۵: پاسخ پله سیستم در حضور نامعینی ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱۶: تلاش کنترلی در حضور نامعینی ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۷: تلاش کنترلی بدون حضور نامعینی ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۸: توان اکتیو و راکتیو قبل از اعمال کنترل کننده ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۹: توان اکتیو و راکتیو بعد از اعمال کنترل کننده PID ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۲۰: توان اکتیو تولیدی توربین ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۲۱: توان راکتیو تولیدی توربین ..... ۱۰۹

## فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲: ظرفیت نیروگاه‌های بادی نصب شده در ایران تا انتهای سال ۱۳۹۱ ..... ۱۸

جدول ۲-۲: ظرفیت نصب شده در نیروگاه منجیل و رودبار ..... ۱۹

جدول ۳-۲: ظرفیت نصب شده نیروگاه بینالود ..... ۱۹

جدول ۱-۵: پارامترهای مربوط به توربین بادی و ژنراتور القایی ..... ۱۰۷





## فصل ۱ مروری بر کارهای گذشته

## ۱-۱ مقدمه

عرضه و تقاضای انرژی در جهان به صورت یکی از مهم ترین مسائل روز درآمده است، به طوری که در آینده به طور جدی درگیر آن خواهیم بود. انرژی هایی مانند نفت، گاز و زغال سنگ سرانجام روزی به پایان خواهند رسید و با پایان گرفتن آن ها تمدن بشری که بستگی مستقیمی به انرژی دارد دچار یک چالش جدید بزرگ خواهد شد سبب شده است که کشورهای توسعه یافته صنعتی با جدیت هرچه تمام تر استفاده از سایر انرژی های نو را مورد توجه قرار دهند. استفاده از انرژی خورشید، باد و امواج، زمین گرمایی، هیدروژن، زیست توده و ... که به انرژی های نو (تجدید پذیر) موسوم اند، مستلزم مطالعات و تحقیقات فراوانی است که قبل از استفاده باید انجام گیرند. هم اکنون در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه سال هاست که مطالعات دامنه داری در این زمینه آغاز شده است.

با پیشرفت روز افزون تکنولوژی، استفاده از انرژی بادی به عنوان سرآمد انرژی های موجود، در اختیار بشر قرار گرفته است. چراکه دسترسی به آن آسان و مقدار آن نامحدود است، همچنین انرژی باد از نظر کاربر نبودن، عدم نیاز توربین های بادی به سوخت های فسیلی، تداوم و همیشگی بودن تولید انرژی، سرمایه گذاری کمتر، بازده اقتصادی بالا در بلندمدت، عدم نیاز به آب فراوان، عدم نیاز به زمین زیاد برای نصب توربین های بادی عدم آلودگی زیست محیطی و حتی داشتن زمینه های اشتغال زایی به عنوان یکی از مهم ترین منابع انرژی تجدید پذیر در بسیاری از کشورهای جهان رو به فزونی گذاشته است [۱-۲] و در شرایط کنونی نیز با توجه به موارد ذکر شده، پرداختن به انرژی باد امری حیاتی و ضروری به نظر می رسد.

در زمینه بررسی منابع انرژی باد در ایران جهت تولید برق کارهای متعددی تاکنون انجام شده است که از آن جمله می توان به تهیه اطلس باد کشور توسط سازمان انرژی های نو اشاره کرد [۳]. در کشور ما ایران قابلیت ها و پتانسیل های مناسبی جهت نصب و راه اندازی توربین های برق بادی وجود دارد، که با توجه به توجیه پذیری آن و تحقیقات، مطالعات و سرمایه گذاری که در این زمینه صورت گرفته، توسعه و کاربرد این تکنولوژی چشم انداز روشنی را فراروی سیاست گذاران بخش انرژی کشور در این زمینه قرار داده است.

در سال ۱۸۸۷ چارلز براش آمریکایی اولین توربین بادی را به منظور تولید الکتریسیته ساخت. پل لاکور (۱۹۰۸-۱۸۴۶) دانمارکی را نیز می توان جزء اولین پیشگامان تولید کننده توربین های بادی مدرن تولید الکتریسیته به حساب آورد. وی که ابتدا در زمینه هواشناسی تحصیل کرده بود برای تولید

گاز هیدروژن جهت روشنایی آزمایشگاه محل کار خود دست به ساخت توربینی زد که از الکتریسیته تولیدی آن جهت هیدرولیز و تولید گاز هیدروژن استفاده می‌کرد. بعدها پل لاکور دوره‌های آموزشی متعددی درزمینه‌ی توربین‌های بادی ارائه داد که اولین گام‌ها در آغاز آکادمیک شدن علم باد جهت تولید الکتریسیته بود. همچنین وی اولین انجمن متخصصان برق و باد و اولین ژورنال تخصصی باد را تشکیل داد.

در طول جنگ جهانی دوم یک شرکت دانمارکی به نام F.L.Smidth تعدادی توربین بادی دو و سه پره ساخت که همگی برق DC تولید می‌کردند. در سال ۱۹۵۱ ژنراتورهای آسنکرون ۳۵ کیلووات AC جایگزین ژنراتورهای DC شدند و در نتیجه تحولی در ساخت توربین‌های بادی جهت تولید برق AC به وجود آمد. توربین بادی Gedser، ۲۰۰ کیلووات در سال ۱۹۵۶-۱۹۵۷ توسط J.Juul برای کمپانی SEAS در ساحل Gedser واقع شده در جنوب دانمارک ساخته شد که جزء اولین توربین‌های نسل جدید با تولید برق AC بود.

در نیمه دوم قرن ۱۹ میلادی تحولات تازه‌ای در استفاده از انرژی باد بوجود آمد و آن استفاده از انرژی باد جهت تولید الکتریسیته بود، توربین‌های بادی ساخته شد که انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کرد.

اما تولید الکتریسیته از باد به دو دلیل عمده چندان فراگیر نشد و مورد توجه قرار نگرفت:

۱- پس از انقلاب صنعتی و مخصوصاً از اوایل قرن بیستم با بهره‌برداری و استفاده از سوخت‌های فسیلی به دلیل ارزانی و قابلیت اطمینان بالا به تدریج جایگزین انرژی باد شدند. توربین‌های بادی قدیمی دیگر از لحاظ اقتصادی قابل رقابت نبودند و به همین دلیل پژوهش بسیار کمی جهت توسعه توربین‌های بادی جدید و کارآمد و قابل رقابت انجام شد.

۲- همه نقاط زمین از پتانسیل باد کافی جهت بهره‌برداری از انرژی باد برخوردار نیستند.

تا اینکه در سال ۱۹۷۳ میلادی جهان با بحران نفتی مواجه شد و این امر ممالک غربی را تشویق به جایگزین کردن منابع انرژی غیر فسیلی به جای منابع انرژی فسیلی برای تولید برق کرد و در نتیجه مطالعات و تحقیقات بر روی روش‌های بهبود و به‌صرفه کردن بهره‌برداری از انرژی باد به‌عنوان یکی از منابع انرژی جدید آغاز گردید.

از سال ۱۹۷۵ پیشرفت‌های بسیاری در زمینه توسعه توربین‌های بادی جهت تولید برق به

عمل آمده است. حدود سال ۱۹۸۰ اولین توربین بادی متصل به شبکه نصب گردید و اولین بازار چند مگاواتی در کالیفرنیا ایجاد گردید. توربین‌های بادی با تولید الکتریسیته حدود ۵۵ کیلووات در سال‌های ۱۹۸۱-۱۹۸۰ شروع به گسترش و پیشرفت نمودند و توربین‌های صنعتی و دارای تکنولوژی ساخته شدند به طوری که تولید یک کیلووات ساعت برق تولیدی توسط این توربین‌ها به حدود ۵۰ سنت افت کرد و در نتیجه صنعت باد به سمت حرفه‌ای شدن و صنعتی شدن حرکت کرد. در سال ۱۹۸۵ در منطقه Palm Spring کالیفرنیا مزرعه‌ای از توربین‌های بادی متشکل از ۱۰۰۰ توربین بادی ۵۵ کیلووات جهت تولید بخشی از برق کالیفرنیا شکل گرفت که هنوز در دست بهره‌برداری قرار دارد.

از آغاز دهه ۹۰ میلادی با کاهش هزینه تولید انرژی الکتریکی از طریق توربین‌های بادی و افزایش بازدهی و قابلیت اطمینان آن‌ها، در نتیجه روند نصب و بهره‌برداری از توربین‌های بادی در جهان از رشد قابل ملاحظه‌ای برخوردار گردیده است. در پایان سال، ۱۹۹۰ ظرفیت نیروگاه‌های بادی متصل به شبکه در جهان بالغ بر ۲۰۰۰ MW با توانایی تولید سالانه ۳۲۰۰ Gwh برق گردید، که تقریباً تمام این تولید مربوط به آمریکا (مزرعه بادی کالیفرنیا) و دانمارک بود.

با آغاز قرن بیستم اندیشه استفاده از انرژی باد و تبدیل آن به انرژی الکتریکی قوت گرفت و کشورهای نظیر فرانسه، انگلیس، آلمان و آمریکا و روسیه کوشش زیادی جهت توسعه توربین‌های بادی به عمل آوردند. بر اساس پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط انجمن انرژی باد جهان (GWEC)<sup>۱</sup> انرژی بادی تا سال ۲۰۲۰ قادر به تأمین حداقل ۱۲٪ از برق مصرفی جهان خواهد بود و همچنین ظرفیت نصب شده جهانی در این سال به حداقل ۱۵۰۰ گیگاوات خواهد رسید. به طور کلی با استفاده از انرژی باد به‌عنوان یک منبع انرژی در درازمدت می‌توان دو برابر مصرف انرژی الکتریکی فعلی را تأمین کرد. در دهه اخیر نیز بوجود آمدن مشکلات زیست‌محیطی و نیز تغییرات آب‌وهوای کره زمین به علت استفاده از منابع انرژی فسیلی این علایق را تشدید کرده است. هم‌اکنون نیز انرژی باد نقش غیر قابل انکاری را در صنعت بازی می‌کند، به‌نحوی که در حال حاضر از این طریق سالانه بیش از ۳۰ هزار فرصت شغلی در اروپا ایجاد می‌شود و ۴۵ هزار خانه در جزایر کانادا و ۱۹ هزار خانه در کالیفرنیا آمریکا برق خود را از طریق انرژی باد تأمین می‌کنند. انرژی باد هنوز هم حدود ۱٪ از توان تولیدی دنیا را تأمین می‌کند، اما سریع‌ترین رشد را در میان کلیه منابع انرژی در جهان دارد.

---

<sup>۱</sup> Global Wind Energy Council

## ۲-۱ پیشینه پژوهشی

استفاده از نیروی باد برای تولید برق با بکار بردن توربین‌های بادی ساده شروع شد ولی برق تولیدی آن‌ها از کیفیت و قابلیت بالایی برخوردار نبود. در ابتدا با اضافه کردن تجهیزاتی به همان نوع توربین‌ها سعی در بهبود برق تولیدی نمودند و تلاش‌ها فقط در جهت شبیه‌سازی خود توربین بادی صورت می‌گرفت [۴-۵]. به عنوان مثال در [۶] با استفاده از مدل درجه پنجم DFIG<sup>۱</sup> یک مدل ساده استخراج نموده و تأثیر خطاهای مختلف را بر مدل پیشنهادی بررسی کرده است. باگذشت زمان به‌طور کلی توربین‌های بادی جدید و پیشرفته‌تری پیشنهاد و به شبکه متصل گردید؛ بنابراین بررسی تأثیر آن‌ها بر شبکه لازم به نظر می‌رسید [۷]. به بررسی تأثیر توربین بادی بر پارامتری شبکه و پایداری آن در هنگام اتصال به شبکه پرداخته ولی روشی را جهت بهبود آن ارائه نداده است [۸].

به طور سنتی، کنترل DFIG به وسیله کنترل برداری (VC)<sup>۲</sup> حاصل می‌شود [۹-۱۰]، که در آن جریان‌های روتور به مؤلفه‌های توان اکتیو (یا گشتاور) و توان اکتیو (یا شار) تجزیه می‌شوند و آن‌ها را جداگانه در یک قالب مرجع با شار استاتور ثابت [۹] یا ولتاژ ثابت شده [۱۰] تنظیم می‌کنند. سپس کنترلرهای جریان برای تنظیم جریان‌های روتور به کار گرفته شدند. عیب اساسی VC طبیعت خطی آن است که عملیات گسسته‌سازی مبدل‌های منبع ولتاژ (VSCs)<sup>۳</sup> را در نظر نمی‌گیرد؛ بنابراین جهت حفظ پایداری سیستم بر روی کل محدوده‌ی کاری و پاسخ دینامیکی مناسب چه در حالت نرمال و چه در حالت خطا و غیرعادی، کنترلر جریان و پارامترهای کنترلی آن باید با دقت تنظیم شوند [۹]. در [۱۱] به‌صورت روابط ریاضی این مفهوم مورد بحث قرار گرفته است.

کنترل گشتاور مستقیم (DTC)<sup>۴</sup> [۱۲] و کنترل توان مستقیم (DPC)<sup>۵</sup> [۱۳]، که خود برای ماشین‌های القایی از (DTC) نشأت گرفته است برای DFIG پیشنهاد شد. چنین روش‌هایی کنترل مستقیم گشتاور یا توان ماشین را فراهم می‌سازد و از پیچیدگی الگوریتم (VC) می‌کاهد. روش‌های (DTC) و (DPC) در خود کنترل هیستریزس توان-گشتاور را دارند و خروجی‌های مبدل از طریق یک جدول مراجعه‌ای (LUT)<sup>۶</sup> از پیش تعیین شده انتخاب می‌شوند.

<sup>۱</sup> Doubly-fed Induction Generator

<sup>۲</sup> Vector Control

<sup>۳</sup> Voltage Source Converters

<sup>۴</sup> Direct Torque Control

<sup>۵</sup> Direct Power Control

<sup>۶</sup> Look-Up Table

مشابه روش‌های (DTC) و (DPC)، کنترل جریان پیش‌گویانه (PCC)<sup>۱</sup> به همراه تکنیک (SVM) برای (VSC) [۱۴]، و درایوهای ماشین‌های AC [۱۵] پیشنهاد شده است. همچنین در [۱۴] یک روش (DPC) پیش‌گویانه را برای سیستم‌های تولیدی از انرژی باد مجهز به DFIG را پیشنهاد می‌دهد که در آن از فرکانس کلید زنی ثابت استفاده شده و عملکرد حالت دائم و گذرا بهبود یافته است.

بخش کنترلی یک سیستم بادی از جمله با اهمیت‌ترین قسمت موجود در سیستم جهت دریافت بهترین راندمان، بشمار می‌آید. تاکنون روش‌های مختلفی نیز ارائه شده است که البته در کنار مزایای آن‌ها، معایبی نیز داشته‌اند. از جمله روش‌های مهم، می‌توان به روش مدولاسیون پهنای پالس (PWM)<sup>۲</sup> که یک روش کنترلی خطی است، اشاره کرد. روش‌های دیگری مانند SPWM، Programmed PWM وجود دارند که زیرشاخه مدولاسیون PWM هستند [۱۶]. روش‌های کنترلی دیگری نیز مانند SVM<sup>۳</sup> و MRAS<sup>۴</sup> نیز استفاده شده است که البته کاربرد کمتری نسبت به PWM دارد [۱۷].

برای کارکرد توربین بادی طرح‌های مختلفی پیشنهاد شده است. روش کنترلی ساختار متغیر یا کنترل مد لغزشی یک روش قدرتمند برای کنترل سیستم‌های غیرخطی همراه با نامعینی است. در [۱۸] استفاده از این کنترل‌کننده در سیستم توربین بادی ذکر شده است و نیز استفاده از کنترل مد لغزشی برای کنترل مستقیم توان در سیستم توربین بادی مورد بررسی قرار گرفته است که با توجه به استفاده از منحنی ردیابی توان از پیش تعیین شده برای سیستم، نتایج به دست آمده در مقایسه با نتایج یک سیستم واقعی چندان مطلوب نمی‌باشد.

رایج‌ترین ساختارهای کنترلی برای کنترل بهینه توان خروجی استفاده از کنترل‌کننده‌های PI برای بهبود رفتار دینامیکی توربین است اما به دلیل اطمینان نداشتن از مدل دقیق رفتار توربین و برخی پارامترها مثل غلظت و سرعت باد و متفاوت بودن آن‌ها در شرایط مختلف بهره‌برداری ناشی از تغییرات دما و رخدادهای غیر قابل پیش‌بینی، آموزش پارامترهای کنترل‌کننده PI یکی از مهم‌ترین مشکلات این سیستم است همچنین زمان رسیدن به نقطه کار مطلوب در این روش زیاد است [۱۹]. با استفاده از کنترل‌کننده فازی بدون نیاز به جزئیات ریاضی سیستم و تنها با اطلاعات کلی از عملکرد

<sup>۱</sup> Predictive Current Control

<sup>۲</sup> Pulse-Width Modulation

<sup>۳</sup> Space Vector Modulation

<sup>۴</sup> Model Reference Adaptive System

و رفتار سیستم، رخدادهای پیش‌بینی نشده در ناحیه وسیعی قابل کنترل خواهند بود. ورودی‌های سیستم فازی برای کنترل توان معمولاً سرعت، گشتاور و جریان توربین هستند. در مقالات [۲۰] روش کنترل بر اساس سرعت زاویه‌ای توربین و تغییرات توان خروجی می‌باشد. کنترل توان اکتیو و ولتاژ بر اساس تغییرات و مشتق تغییرات آن‌ها و تنظیم جریان‌های Id, Iq کنترل تغییرات سرعت توربین و گشتاور نسبت به مقادیر مبنا برای اعمال تغییرات نهایی سرعت توربین صورت گرفته است [۱۹].

در مرجع [۲۱]، از یک کنترلر غیرخطی برای محدود کردن اضافه جریان در مدار روتور استفاده شده است. در این مقاله نشان داده شده که به خاطر ضعف در نقطه بهره‌برداری رفتار کنترلر انتگرال-تناسبی، جریان در مبدل‌های به کار رفته در توربین‌های بادی در هنگام بروز خطا در شبکه از مقدار مجاز خود تجاوز می‌کند. سپس یک کنترلر غیرخطی طراحی می‌کند که نشان می‌دهد جریان‌های مبدل حتی در سطح ولتاژ پایین روی مقدار مجاز خود باقی می‌ماند.

در مرجع [۲۲]، یک عملکرد بی‌وقفه در طی خطای شبکه برای توربین بادی مجهز به DFIG ارائه شده است. در این روش مبدل سمت روتور در زمان اتصال کوتاه مسدود می‌شود و مدار روتور از طریق یک مدار CROWBAR اتصال کوتاه می‌شود. در این حالت DFIG تبدیل به یک ژنراتور القایی می‌شود و شروع به کشیدن توان راکتیو می‌کند. توربین به عملکرد خود ادامه می‌دهد مبدل سمت شبکه می‌تواند برای تأمین توان راکتیو کنترل شود، هنگامی که خطا رفع شد و ولتاژ و فرکانس در شبکه دوباره به حالت عادی بازگشت، مبدل سمت روتور شروع به کار کرده و به عملکرد نرمال خود باز می‌گردد.

در مرجع [۲۳]، یک روش برای عملکرد دائم DFIG در حین اتصال کوتاه در شبکه ارائه شده است. در این روش، با ایجاد یک مسیر کنارگذر در روتور از طریق مقاومت که به سیم‌پیچی‌های روتور متصل می‌شود، جریان در روتور را محدود می‌کند. به خاطر آن که ژنراتور و مبدل به شبکه متصل می‌ماند، عملکرد سنکرونیسم در طی خطا و بعد از خطا باقی می‌ماند و عملکرد نرمال می‌تواند فوراً بعد از رفع خطا ادامه یابد.

در مرجع [۲۴]، با استفاده از یک کنترلر فازی در کنترل مبدل سمت روتور، اضافه جریان را در مدار روتور کاهش می‌دهند. در واقع در این مقاله، به جای کنترلر انتگرال-تناسبی در الگوی کنترلی مبدل سمت روتور، از یک کنترلر فازی استفاده شده است. سپس نتایج شبیه‌سازی با آن و کنترلر انتگرال-تناسبی مقایسه شده است.

در مرجع [۲۵]، یک کنترل ولتاژ هماهنگ DFIG برای عملکرد بی‌وقفه در طی خطای شبکه اجرا شده است. این روش بر این اساس است که هر دو مبدل‌های سمت روتور و سمت شبکه DFIG، در یک رفتار هماهنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. ایده به این صورت است که مبدل سمت روتور به‌عنوان منبع توان راکتیو است در حالی که مبدل سمت شبکه به‌عنوان یک منبع تأمین توان راکتیو هنگامی که سیستم حفاظتی فعال می‌شود، می‌باشد و در نتیجه مبدل سمت روتور قفل می‌شود.

در مرجع [۲۶]، جای استفاده از یک مبدل طرف شبکه سه فاز از سه مبدل تک فاز استفاده شده است که به‌طور سری به شبکه متصل می‌شود. هنگامی که خطا در سیستم بوجود می‌آید مبدلی که در فاز خطا دیده شده واقع شده مقدراری ولتاژ به آن فاز تزریق می‌کند. به این ترتیب ولتاژی که توسط ژنراتور دیده می‌شود بالاتر از ولتاژ خطا می‌باشد و جریان خطا محدود می‌شود.

با استفاده روزافزون از نیروگاه‌های بادی مجهز به ژنراتور DFIG، بررسی تأثیر آن‌ها در پایداری سیستم‌های قدرت از اهمیت خاصی برخوردار است. بدین منظور روش‌های کنترل برداری مختلفی برای کنترل (DFIG) پیشنهاد شده است [۲۷]. یکی از این روش‌های مورد استفاده معمول، کنترل مدار رتور در امتداد شار استاتور می‌باشد. در مرجع [۲۸] نیز پایداری سیستم (DFIG) با نشان دادن مدل دینامیکی (DFIG) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در مراجع [۲۹] بدون ارائه روش طراحی، PSS با وجود کنترل‌کننده از نوع FMAC<sup>۱</sup> ارائه شده است.

با توجه به اینکه ما در این پروژه برای کنترل توان اکتیو و راکتیو ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه از روش کنترل مقاوم به روش  $H_{\infty}$  استفاده کرده‌ایم، در ادامه توضیح مختصری از چند روش کنترلی مقاوم برای سیستم DFIG آورده شده است. کنترل مقاوم برای سیستمی طراحی می‌شود که عدم قطعیت در آن سیستم وجود داشته باشد. با طراحی این نوع کنترلر سیستم باید در برابر عدم قطعیت مقاوم باشد.

در [۳۰]، نویسندگان یک کنترل مقاوم برای سیستم DFIG ارائه کرده‌اند. آن‌ها برای این منظور ابتدا معادلات حاکم بر ماشین را در دستگاه مرجع ساکن بیان کرده‌اند. سپس با تعریف متغیرهای حالت و ورودی‌های کنترلی مدل فضای حالت سیستم را بدست آورده‌اند. بعد با استفاده از روش کنترلی مد لغزشی، در حالی که اغتشاشات و نامعینی را به مدل نامی سیستم وارد کرده‌اند، کنترلر مقاوم برای سیستم DFIG طراحی کرده‌اند. پاسخ رفتار دینامیکی بسیار سریع از مزیت‌های این

---

<sup>۱</sup> Flux Magnitude and Angel Control



روش می‌باشد. در این طرح مقدار فرکانس کلید زنی برای مبدل طرف روتور و شبکه ۱۰ کیلوهرتز اعلام شده است که برای کاربردهای پر قدرت مقدراری قابل توجه می‌باشد.

در [۳۱]، روشی نو برای کنترل مستقیم توان اکتیو و راکتیو DFIG ارائه شده است. در این طرح کنترل مستقیم توان با کنترل مد لغزشی و مدولاسیون فضای برداری ترکیب شده است و ولتاژ کنترلی مورد نیاز روتور برای حذف خطاهای لحظه‌ای توان اکتیو و راکتیو با بکار بردن کنترل مد لغزشی بدست آورده شده است. با استفاده از مدولاسیون فضای برداری فرکانس کلید زنی ثابت بدست آمده است که باعث شده طراحی فیلتر و مبدل قدرت آسان تر شود.

در [۳۲]، نویسندگان طرحی با کنترل مقاوم بر اساس روش  $H_{\infty}$  برای کنترل مستقل اندازه و فرکانس ولتاژ استاتور DFIG ارائه داده‌اند. در این طرح نامعینی به صورت حاصل ضرب در خروجی فرض شده است. برای کنترل آن‌ها پس از نوشتن معادلات ماشین، مدل فضای حالت سیستم را با توجه به در نظر گرفتن ولتاژ و جریان استاتور به عنوان خروجی و اغتشاش به دست آورده‌اند. سپس با محاسبه تابع تبدیل مورد نظر و تعیین توابع وزنی، مسئله کنترل  $H_{\infty}$  را به روش معادله ریکاتی به صورت بهینه حل کرده‌اند. طرح فوق بر روی ماشین با توان کم اجرا شده و با اینکه ردیابی مناسب مرجع و عملکرد مقاوم با این روش بدست آمده است اما نویسندگان اعلام کرده‌اند طرح برای پیاده‌سازی روی ماشین با توان بالا دارای محدودیت اجرایی می‌باشد.

در [۳۳]، طراحی کنترل مقاوم با استفاده از روش  $H_{\infty}$  برای مبدل سمت شبکه سیستم DFIG ارائه شده است. نویسندگان با این روش توانسته‌اند با وجود نامتعادلی بزرگ در ولتاژ شبکه، ولتاژ استاتور را متعادل نگه دارند.

## ۳-۱ هدف از انجام تحقیق

ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه اغلب در توربین‌های بادی با سرعت متغیر به علت مزایایی که نسبت به دیگر ماشین‌ها دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهم‌ترین ویژگی این ژنراتورها این است که حدود ۳۰٪ از توان ژنراتور توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت از طریق روتور منتقل می‌شود. بنابراین، این مبدل‌ها باید به صورت مؤثر و مقرون به صرفه طراحی شوند.

کنترل‌های متداول در ژنراتور القایی دو سو تغذیه اغلب با تکیه بر این فرضیه که پارامترهای ماشین دقیقاً در مقدار نامی خود قرار دارند، طراحی شوند. اما پارامترهای ماشین الکتریکی معمولاً با گذشت زمان و به علت تغییر در شرایط کاری ماشین مانند تغییر در دمای ماشین و اشباع مغناطیسی تغییر می‌کنند. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد کنترل برداری با کنترلرهای PI به شدت به پارامترهای سیستم حساس است و با انحراف پارامترها از مقدار نامی خود خروجی سیستم تقلیل می‌یابد. همچنین، اگر چه روش کنترل مستقیم توان کنترلی مقاوم است ولی دامنه نسبتاً قابل توجه ضربان توان، تغییرات زیاد فرکانس کلید زنی و نیاز به میکروپروسسورهای سریع استفاده از این روش را محدود می‌کند.

با بررسی دو روش عمده کنترل ژنراتور القایی دو سو تغذیه مشاهده شد که هر کدام از دو روش دارای مزایا و معایبی می‌باشند. در چنین شرایطی استفاده از کنترل‌های پیشرفته‌تر به منظور پایداری و بهبود عملکرد سیستم در برابر تغییرات پارامترهای سیستم و دیگر نامعینی‌های سیستم لازم است. استفاده از روشی کنترلی که علاوه بر این که دارای عملکرد مقاوم باشد، مزایای روش‌های کنترلهای دیگر را نیز داشته باشد، هدف این پایان‌نامه است.

## ۴-۱ ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم پایان‌نامه درباره انرژی باد، پتانسیل انرژی باد و نیروگاه‌های بادی نصب شده در ایران و جهان، محاسبه توان استخراجی از باد و در ادامه معرفی انواع ژنراتورهای بکار رفته در توربین‌های بادی و با توجه به مزایا و معایب هر یک جایگاه استفاده از ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه (DFIG) در نیروگاه‌های بادی بیان شده است.

در فصل سوم؛ مدل‌سازی نیروگاه بادی شامل مدل‌سازی آئرودینامیکی پره‌ها و مدل جعبه‌دنده به‌عنوان مدل‌سازی بخش مکانیکی و در ادامه مدل‌سازی ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه (DFIG) انجام شده است.

در فصل چهارم؛ کنترل مقاوم  $H_{\infty}$  شامل انواع نامعینی‌ها، پایداری و کارایی مقاوم، محدودیت‌های طراحی و ... آمده است.

در فصل پنجم؛ روش کنترلی بکار رفته در این پایان‌نامه (کنترل مقاوم  $H_{\infty}$ ) بررسی شده و با استفاده از شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار MATLAB نشان داده شده است.

در فصل آخر؛ خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده در فصل‌های قبل و همچنین پیشنهادهایی جهت ادامه تحقیقات ارائه شده است.



## فصل ۲ انرژی باد و انواع ژنراتورهای بکار رفته در توربین‌های بادی

## ۱-۲ مقدمه

امروزه یکی از بزرگ‌ترین معضلات بشر کمبود سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی آن می‌باشد. با پیشرفت روزافزون تکنولوژی استفاده از انرژی بادی به‌عنوان سرآمد انرژی‌های موجود، در اختیار بشر قرار گرفته است. در سال‌های اخیر بحران‌های نفتی و آلودگی‌های ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی و شتاب فزاینده بشر در جهت پایان بردن این منابع، تمایلات جدیدی در زمینه فن‌آوری استفاده از باد جهت تولید برق، متصل به شبکه ایجاد کرده است. با توجه به محدودیت منابع انرژی سوخت فسیلی و افزایش روزافزون قیمت آن و از سوی دیگر مسئله آلودگی‌های ناشی از این منابع، استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در تولید انرژی برق اهمیت ویژه‌ای یافته است و در سال‌های اخیر به یکی از موضوعات مورد بحث مبدل گشته و پیشرفت‌های جهانی نیز در این زمینه حاصل شده است [۲-۳۴].

باد یکی از مظاهر انرژی خورشیدی و همان هوای متحرک است و پیوسته جزء کوچکی از تابش خورشید که از خارج به اتمسفر می‌رسد، به انرژی باد تبدیل می‌شود. گرم شدن زمین و جو آن به‌طور نامساوی سبب تولید جریان‌های همرفت (جابجایی) می‌شود و نیز حرکت نسبی جو نسبت به زمین سبب تولید باد است. دو درصد از انرژی خورشید که به زمین می‌رسد به باد تبدیل می‌گردد. ۳۵٪ انرژی باد در ضخامت یک کیلومتری از سطح زمین موجود است. محاسبات نشان می‌دهد، که برای تمام سیاره زمین، انرژی موجود بیست برابر انرژی مصرفی فعلی دنیا است [۲].

آلودگی محیطی و کمبود انرژی منجر به توجهات زیادی در رابطه با تکنولوژی‌های تولید انرژی الکتریکی تجدید-پذیر شده است. از میان منابع انرژی تجدید پذیر مختلف، انرژی بادی یک منبع پیش‌تاز در صنعت برق می‌باشد [۳۵].

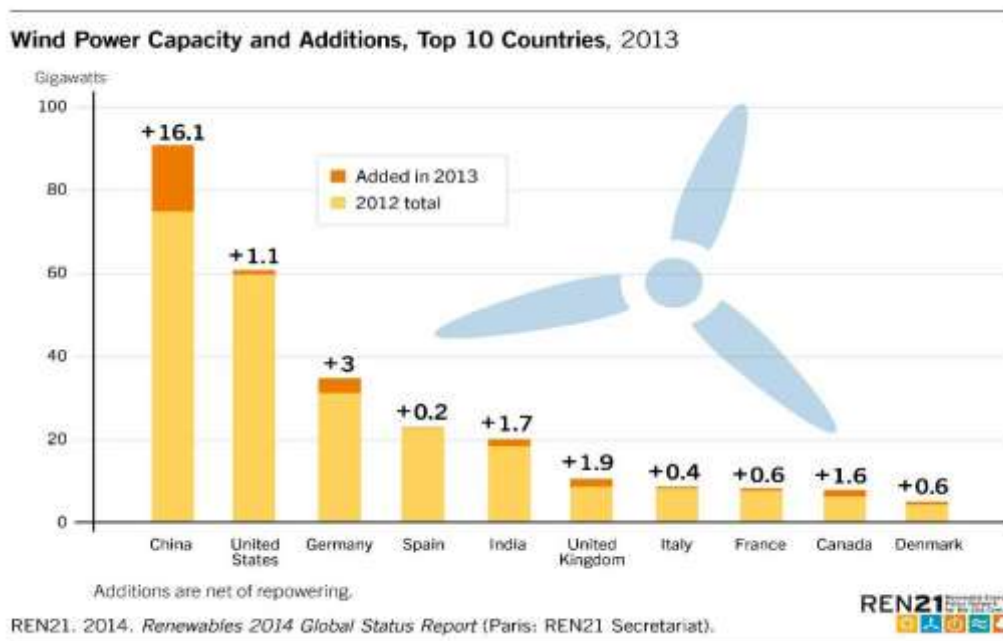
استفاده از انرژی باد برای تولید انرژی الکتریکی از سال ۱۹۲۵ میلادی در آمریکا آغاز شد. در آن زمان از ژنراتورهای DC که به شارژهای باتری وصل شده بودند برای تولید انرژی الکتریکی از انرژی باد استفاده می‌شد. از سال ۱۹۳۹ با تشکیل شبکه‌های AC در آمریکا، ژنراتورهای سنکرون سرعت ثابت برای تولید انرژی الکتریکی از باد مورد استفاده قرار گرفتند و استفاده از ژنراتورهای DC کاهش یافت. استفاده از انرژی باد برای تولید برق از اواسط سال ۱۹۷۰ به‌خصوص بعد از افزایش ناگهانی قیمت سوخت شدت گرفت. در این دهه‌ها تولید انرژی الکتریکی با استفاده از ژنراتورهای سنکرون سرعت ثابت صورت می‌گرفت اما از اواسط دهه ۹۰ به علت برخی مزایای ماشین‌های القایی نسبت به ماشین‌های سنکرون، استفاده از ژنراتورهای سنکرون کاهش یافت و استفاده از

ماشین‌های القایی افزایش یافت [۳۶-۳۷]. در بین ژنراتورهای القایی نیز، ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه دارای عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به سایر ژنراتورهای القایی می‌باشند. از جمله‌ی این مزایا را می‌توان به کنترل توان اکتیو و راکتیو، کنترل ولتاژ شبکه، کنترل فرکانس در حالت مستقل از شبکه و عدم نیاز به بانک خازنی جهت تأمین توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور القایی نام برد.

## ۲-۲ پتانسیل انرژی باد و نیروگاه‌های بادی نصب شده در ایران و جهان

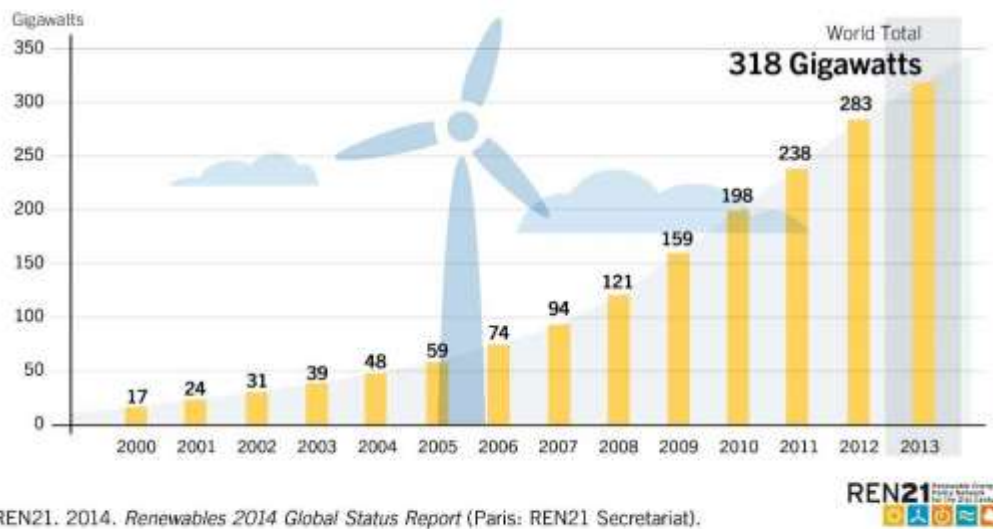
تا پایان سال ۲۰۱۳ ظرفیت مزارع بادی در سراسر دنیا ۳۱۸ GW بوده است که رشدی ۲۱/۴٪ در سال را مشاهده کرده و انرژی باد ۱/۳ درصد از برق مصرفی جهان را تأمین می‌نماید.

در شکل‌های زیر میزان استفاده از انرژی بادی در ۱۰ کشور نخست دنیا در این زمینه و میزان رشد استفاده از این انرژی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱: میزان استفاده از انرژی بادی در ۱۰ کشور نخست دنیا در این زمینه

Wind Power Total World Capacity, 2000-2013

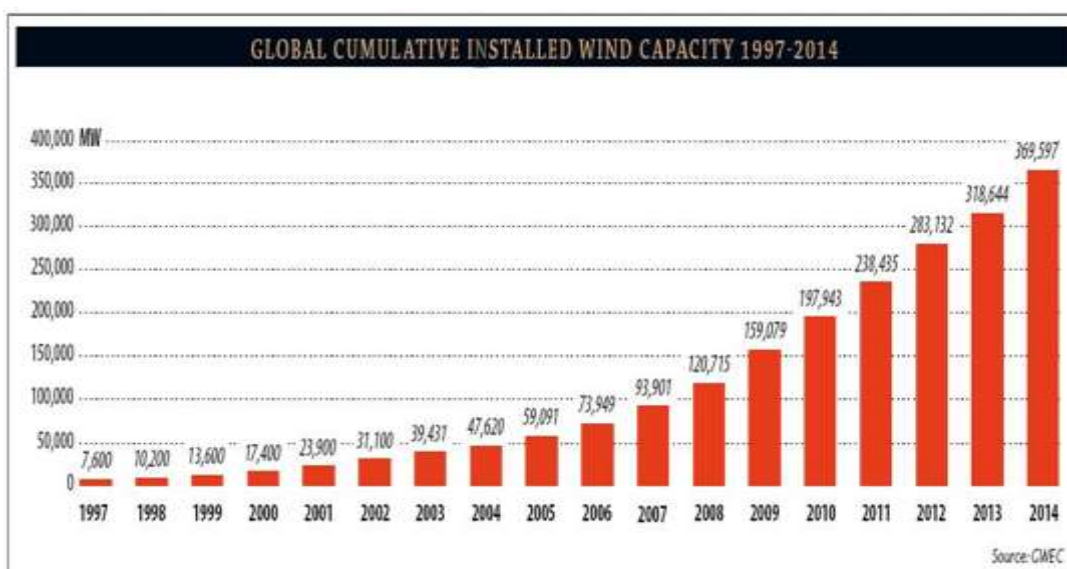


REN21. 2014. *Renewables 2014 Global Status Report* (Paris: REN21 Secretariat).

شکل ۲-۲: میزان رشد استفاده از انرژی بادی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳

## ۲۲۱ بازار جهانی نیروگاه‌های بادی در سال ۲۰۱۴

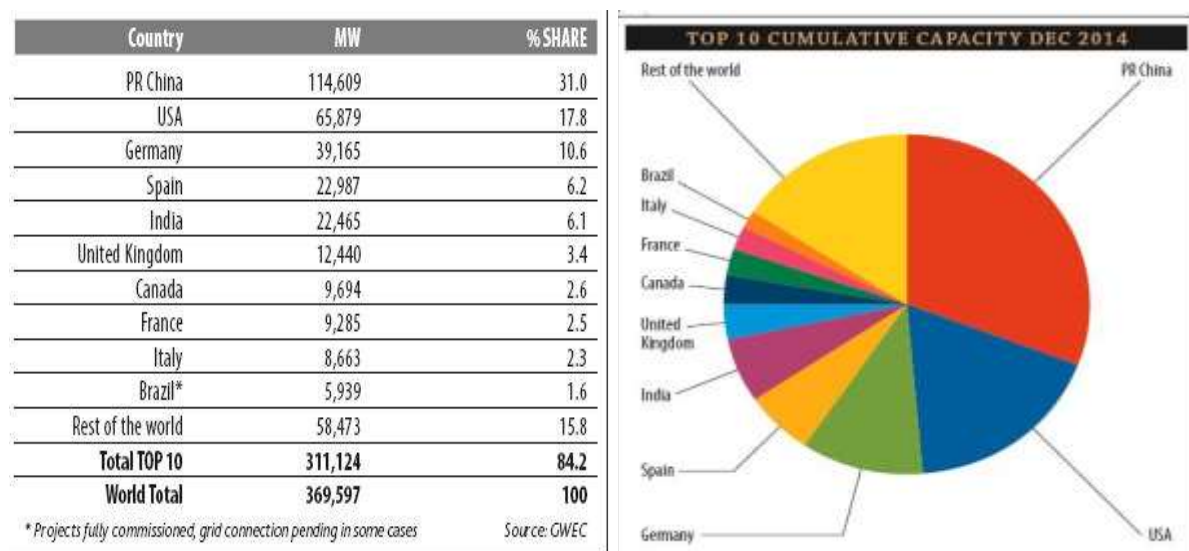
نیروگاه‌های بادی سراسر دنیا را از سال ۱۹۹۷ تا دسامبر ۲۰۱۴ نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود از سال ۲۰۱۳ تا سال ۲۰۱۴ حدود ۵۰ گیگاوات به ظرفیت مجموع نیروگاه‌های بادی افزوده شده است. بر اساس گزارش منتشر شده از طرف آژانس جهانی انرژی بادی تا پایان ماه DEC سال ۲۰۱۴ ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی جهان از مرز ۳۶۰ گیگاوات گذشته است.



شکل ۲-۳: ظرفیت تجمعی نیروگاه‌های بادی نصب شده دنیا



همچنین نمودار دایره‌ای ظرفیت تجمعی نیروگاه‌ها برای ۱۰ کشور برتر دنیا توسط GWEC ترسیم شده است. همان‌گونه که می‌بینیم کشور چین تا سال ۲۰۱۴ با ظرفیت تولید ۱۱۴۶۰۹ مگاوات در رتبه نخست دنیا در زمینه‌ی نیروگاه‌های بادی قرار دارد که سهم ۳۱ درصدی از نیروگاه‌های بادی جهان را داراست. پس از آن آمریکا با ظرفیت تولید ۶۵۸۷۹ مگاوات در جایگاه دوم قرار می‌گیرد و ۱۷/۸ درصد از مجموع نیروگاه‌های بادی دنیا را از آن خود کرده است. غیر از ۱۰ کشور نامبرده شده، سهم باقی کشورهای دنیا که کشور ما نیز جزء این دسته قرار می‌گیرد تنها ۱۵/۸ درصد از کل نیروگاه‌هاست، بنابراین در مقایسه ایران با کشورهای توسعه یافته لزوم هر چه بیشتر توسعه انرژی‌های تجدید پذیر و به ویژه انرژی بادی آشکار می‌شود.



شکل ۲-۴: ظرفیت تجمعی نیروگاه‌های بادی ۱۰ کشور برتر دنیا

تاکنون مطالعات و بررسی‌های علمی محدودی در جهت شناسایی انرژی بالقوه باد، با نگرش به تولید انرژی در کشور صورت گرفته است. از جمله می‌توان به بررسی‌های انجام یافته در مورد بادهای دشت قزوین در سال ۱۳۴۹ و بادهای دره منجیل در سال ۱۳۵۹ اشاره نمود. در طی سالیان اخیر نیز توسط دفتر انرژی‌های نو، امور انرژی وزارت نیرو، ۲۶ منطقه کشور شامل ۴۵ سایت مورد مطالعه و پتانسیل سنجی قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج این مطالعه، ایران به طور کلی کشوری با باد متوسط است، ولی برخی از مناطق آن باد مناسب و مداومی برای تولید برق را دارا هستند. بر اساس بررسی‌های انجام شده در بررسی فوق‌الذکر، توان بالقوه انرژی باد در سایت‌های مطالعه شده حدود ۶۵۰۰ مگاوات برآورد شده است.

استفاده از انرژی باد برای تولید برق در کشور، در سال ۱۳۷۲ با خرید ۲ توربین ۵۰۰ کیلوواتی سه پره ساخت کمپانی Nordtank دانمارک توسط سازمان انرژی اتمی و نصب آنها در منجیل آغاز گردید. نیروگاه منجیل اکنون دارای بیش از ۲۰ توربین بادی ۵۰۰ کیلوواتی می باشد و توسعه آن هنوز ادامه دارد.

مطالعات و محاسبات انجام شده در زمینه ی تخمین پتانسیل انرژی باد در ایران نشان داده اند که تنها در ۲۶ منطقه از کشور ( شامل بیش از ۴۵ سایت مناسب) میزان ظرفیت اسمی سایت ها، با در نظر گرفتن یک راندمان کلی ۳۳٪، در حدود ۶۵۰۰ مگاوات است و این شرایطی است که ظرفیت اسمی کل نیروگاه های برق کشور، (در حال حاضر) ۳۶۰۰۰ مگاوات است.

جدول ۱-۲: ظرفیت نیروگاه های بادی نصب شده در ایران تا انتهای سال ۱۳۹۱ [۳]

ردیف	نوع توربین	تعداد و ظرفیت نصب شده	مکان
۱	۳۰۰ کیلووات	۲۷ (۸۱۰۰ کیلووات)	سایت نیروگاهی منجیل
۲	۵۰۰ کیلووات	۲ (۱۰۰۰ کیلووات)	سایت نیروگاهی منجیل
۳	۵۵۰ کیلووات	۱۸ (۹۹۰۰ کیلووات)	سایت نیروگاهی منجیل
۴	۶۰۰ کیلووات	۱ (۶۰۰ کیلووات)	سایت نیروگاهی منجیل
۵	۶۶۰ کیلووات	۷۰ (۴۶۲۰۰ کیلووات)	سایت نیروگاهی منجیل
۶	۶۶۰ کیلووات	۹ (۵۹۴۰ کیلووات)	سایت نیروگاهی منجیل
۷	۶۶۰ کیلووات	۴۳ (۲۸۳۸۰ کیلووات)	سایت نیروگاهی بینالود
۸	۶۶۰ کیلووات	۱ (۶۶۰ کیلووات)	زابل سیستان
۹	۶۶۰ کیلووات	۱ (۶۶۰ کیلووات)	بابا کوهی شیراز
۱۰	۶۶۰ کیلووات	۳ (۱۹۸۰ کیلووات)	عون ابن علی تبریز
۱۱	۶۶۰ کیلووات	۱ (۶۶۰ کیلووات)	سرعین اردبیل
۱۲	۶۶۰ کیلووات	۱ (۶۶۰ کیلووات)	اصفهان
۱۳	۶۶۰ کیلووات	۱ (۶۶۰ کیلووات)	ماهشهر
۱۴	۱/۵ کیلووات	۱ (۱/۵ مگاوات)	خواف خراسان رضوی
۱۵	۲/۵ کیلووات	۱ (۲/۵ مگاوات)	خواف خراسان رضوی
		مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)	
			۱۰۹/۴

مجموع ظرفیت مزارع بادی نصب شده در ایران تا پایان سال ۱۳۹۱، ۱۰۹/۴ مگاوات بوده است.

نیروگاه بادی منجیل، هرزویل، سیاه‌پوش و رودبار واقع در استان گیلان به عنوان اولین نیروگاه بادی است که در ایران در تولید انرژی الکتریکی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است [۳].

جدول ۲-۲: ظرفیت نصب شده در نیروگاه منجیل و رودبار [۳].

ردیف	توان نامی توربین (کیلووات)	تعداد	مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)	سال
۱	۳۰۰ و ۵۵۰	۲۸	۱۲	۱۳۸۲
۲	۳۰۰	۱۰	۳	۱۳۸۴
۳	۵۵۰	۱۰	۵/۵	۱۳۸۵
۴	۶۶۰	۲۲	۱۴/۵۲	۱۳۸۵
۵	۶۶۰	۱۷	۱۱/۲۲	۱۳۸۶
۶	۶۶۰	۱۵	۹/۹	۱۳۸۷
۷	۶۶۰	۹	۵/۹۴	۱۳۸۸
۸	۶۰۰ و ۶۶۰	۱۶	۹/۶۶	تا ۱۳۹۱
		مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)		۷۱/۷۴

نیروگاه دیگری که در شبکه برق ایران قرار گرفته نیروگاه بادی بینالود واقع در استان خراسان رضوی است. این نیروگاه با هزینه‌ای معادل ۲۸۰ میلیارد ریال و در زمینی به مساحت ۷۰۰ هکتار ساخته شده است. ظرفیت نصب شده این نیروگاه به میزان ۲۸/۳ مگاوات است که شامل ۴۳ دستگاه توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی است [۳].

جدول ۳-۲: ظرفیت نصب شده نیروگاه بینالود [۳].

ردیف	توان نامی توربین (کیلووات)	تعداد	مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)	سال
۱	۶۶۰	۲۰	۱۳/۲	۱۳۸۴ و ۱۳۸۳
۲	۶۶۰	۲۳	۱۵/۱۸	۱۳۸۶
		مجموع ظرفیت نصب شده (مگاوات)		۲/۳۸

## ۲ ۲ ۲ روند تحولات تکنولوژی انرژی باد در سال‌های اخیر

بزرگ‌ترین شرکت‌های سازنده توربین بادی در جهان در حال حاضر شرکت وستاس، شرکت‌های انرکون و شرکت NEG مایکون هستند که به ترتیب ۲۳/۳، ۱۴/۶ و ۱۲/۴ درصد از بازار جهان را در اختیار دارند.

لذا روند آشکاری از افزایش سائز توربین‌های بادی مدرن قابل مشاهده است. در بازار توربین‌های

بادی ۵۸ مدل توربین وجود دارد که از این ۵۸ مدل فقط ۴ مدل آن بدون گیربکس هستند که روی سائیزهای متوسط و بزرگ آزمایش شده‌اند. اما ۵۴ مدل دیگر (شامل سائیزهای متوسط، بزرگ و خیلی بزرگ) هنوز از گیربکس استفاده می‌کنند. بنابراین توربین‌های بدون گیربکس هنوز در ابتدای راه هستند و وضعیت آن‌ها پس از مهر و موم‌ها تجربه و بهره‌برداری روشن خواهد شد. در گذشته توربین‌های بادی با یک سرعت دورانی ثابت (دور روتور) کار می‌کردند، اما مدل‌های امروزی تقریباً سیستم یک سرعت را کنار گذاشته و به سیستم‌های دو سرعت یا سرعت متغیر روی آورده‌اند. از میان ۵۸ مدل موجود در بازار، فقط ۲ مدل از نوع یک سرعت هستند و ۲۲ مدل دو سرعت و ۳۴ مدل با سرعت متغیر دیده می‌شوند.

## ۳ ۲ ۲ منشاء باد

هنگامی که تابش خورشید به‌طور نامساوی به سطوح ناهموار زمین می‌رسد سبب ایجاد تغییرات در دما و فشار می‌گردد و در اثر این تغییرات باد بوجود می‌آید. همچنین اتمسفر کره زمین به دلیل حرکت وضعی زمین، گرما را از مناطق گرمسیری به مناطق قطبی انتقال می‌دهد که این امر نیز باعث بوجود آمدن باد می‌گردد. جریانات اقیانوسی نیز به‌صورت مشابه عمل نموده و عامل انتقال ۳۰٪ حرارت کلی در جهان می‌باشند. همان‌طور که عنوان شد باد یکی از صورت‌های مختلف انرژی حرارت خورشیدی می‌باشد که دارای یک الگوی نیمه‌پیوسته می‌باشد. تغییرات سرعت باد متأثر از هوا و توپوگرافی سطح زمین می‌باشد. بیشتر منابع انرژی باد در نواحی ساحلی و کوهستانی واقع شده‌اند.

## ۳-۲ پارامترهای مهم در انتخاب توربین‌های بادی

مهم‌ترین مواردی را که بایستی در انتخاب توربین جهت تولید الکتریسیته در نظر گرفت عبارت‌اند از:

الف - قدرت نسبی: در این ارتباط توربین‌های بادی از نوع محور افقی به سبب تولید ضریب کارایی بهتر و توان بالا نسبت به توربین‌های محور عمودی ارجحیت دارند.

ب - ظرفیت اقتصادی: توربین‌های با ظرفیت بالا به سبب توان تولیدی بیشتر که اولاً قابل اتصال به شبکه و ثانیاً دارای توجیه اقتصادی شامل سرمایه‌گذاری اولیه و برگشت سرمایه مناسب‌تری هستند، مورد توجه بیشتری می‌باشند. هر چه توربین با ظرفیت بالاتری انتخاب شود انرژی بیشتری تولید خواهد نمود و از نظر اقتصادی هزینه واحد انرژی پائین خواهد بود. لذا مناسب‌ترین آن‌ها در حال حاضر توربین‌های با قدرت ۴۰۰ کیلووات تا یک و نیم مگاوات می‌باشند.

ج - اندازه: ماشین‌های بادی که نسبت به ماشین‌های مشابه خود از قطر کمتر و توان بالاتر، در نتیجه انرژی تولید سالانه بیشتر برخوردار باشند و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشند.

د - سرعت: مولدهایی که سرعت شروع پائین داشته باشند و سرعت نامی آن‌ها نزدیک به سرعت متوسط باد در منطقه با گرایش به سمت سرعت حامل بیشترین مقدار انرژی باشند و برای سرعت انفصال بالاتری طراحی شده باشند مناسب‌ترند.

ه - نوع ساختار تعمیرات و نگهداری: هر چه ساختار توربین بادی ساده‌تر و تعمیرات آن آسان‌تر باشد هزینه نگهداری آن کمتر است و برای نصب در مزارع پیشنهادی اولویت دارد.

و - خدمات پس از فروش: انتخاب توربینی بهتر است که از خدمات پس از فروش مطمئن و مناسب برخوردار باشد و بیشترین امکان انتقال تکنولوژی را داشته باشد.

## ۲-۴ مزایای انرژی باد و استفاده از توربین‌های بادی

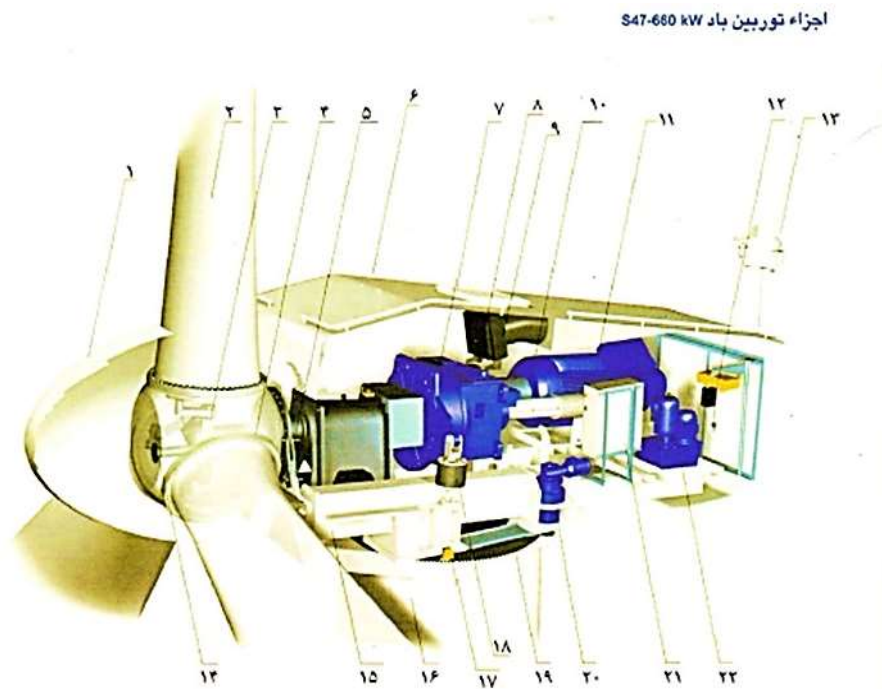
۱. عدم نیاز توربین‌های بادی به سوخت و رایگان بودن انرژی باد
۲. استفاده از انرژی تجدید پذیر موجود در طبیعت و صرفه‌جویی در هزینه‌های سوخت فسیلی
۳. کمک به کاهش آلودگی محیط‌زیست و ایجاد محیط نشاط آور برای زیستن
۴. کاهش طول شبکه انتقال انرژی برق، کاهش قطعی برق، و کاهش هزینه نصب پست‌های برق جهت افزایش و کاهش ولتاژ
۵. امکان نصب سریع هر دستگاه توربین باد و بهره‌برداری در زمان بسیار کوتاه
۶. قطع وابستگی تولید برق به مسائل سیاسی دنیا از بابت تغییر قیمت نفت
۷. کمک به اشتغال بیشتر در داخل کشور و راه‌گشایی برای فرصت‌های مطالعاتی و پژوهشی

## ۲-۵ محدودیت‌ها انرژی باد و استفاده از توربین‌های بادی

- ۱- هزینه اولیه طراحی، ساخت، و یا خرید بالا
- ۲- محدودیت در دسترسی به منابع بادی مناسب
- ۳- نیازمندی به سیستم ذخیره و یکنواخت سازی

## ۶-۲ اجزای توربین بادی

شکل زیر اجزای به کار رفته در توربین بادی ساخت کارخانه Nordtank را نشان می‌دهد [۳۸].



شکل ۲-۵: ساختمان توربین بادی

- |                        |   |
|------------------------|---|
| ۱-دماغه                | ۱۲-بالابر                                       |
| ۲-پره                  | ۱۳-بادسنج و بادنما                              |
| ۳-توپی پره             | ۱۴-محور تغییر زاویه گام پره                     |
| ۴-یاتاقان پره          | ۱۵-شاسی   |
| ۵-محور اصلی            | ۱۶-برج  |
| ۶-پوشش ناسل            | ۱۷-شمارنده میزان دوران Yaw (تنظیم زاویه توربین) |
| ۷-گیربکس               | ۱۸-دسته گیربکس                                  |
| ۸-ترمز دیسکی           | ۱۹-چرخ دنده Yaw                                 |
| ۹-خنک کن روغن          | ۲۰-گیربکس Yaw                                   |
| ۱۰-کوپلینگ             | ۲۱-سیستم کنترل فوقانی VMP                       |
| ۱۱-مولد اصلی (ژنراتور) | ۲۲-واحد هیدرولیک                                |

## ۷-۲ انرژی ذخیره شده در باد

انرژی جنبشی باد همواره متناسب با توان دوم سرعت باد است هنگامی که باد به یک سطح برخورد می کند انرژی جنبشی آن به فشار (نیرو) روی آن سطح تبدیل می شود. حاصل ضرب نیروی باد در سرعت باد مساوی قدرت باد می شود نیروی باد متناسب با مربع سرعت باد است پس قدرت باد متناسب با مکعب سرعت باد خواهد بود. بنابراین هر چه سرعت باد بیشتر باشد قدرت آن نیز بیشتر خواهد شد. مثلاً اگر سرعت باد سه برابر گردد قدرت باد بیست و هفت برابر خواهد شد.

### ۲ ۷ ۱ قدرت نامی

قدرت نامی موجود در باد را می توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$P = \text{زمان/کار} \quad (1-2)$$

$$P = \frac{1}{\tau} mv^2 / t = \frac{1}{\tau} (\rho A d) v^2 / t = \frac{1}{\tau} \rho A v^2 (d/t) \quad (2-2)$$

$$d/t = v \quad (3-2)$$

$$P = \frac{1}{\tau} \rho A v^3 \quad (4-2)$$

که در آن  $P$  قدرت باد بر حسب وات،  $\rho$  وزن مخصوص هوا (چگالی یا دانسیته)، سطح دایره ای شکل جاروب شده توسط پره های روتور و  $V$  سرعت نسبی باد که حاصل از برآیند دو سرعت واقعی در محیط و سرعت روتور می باشد. که با انتگرال گیری از رابطه بالا در یک بازه زمانی  $T_p$ ، که معمولاً حدود یک سال می باشد، انرژی ذخیره شده در باد به این صورت بدست می آید:

$$\text{انرژی متوسط} = \frac{1}{\tau} \rho A \int_0^{T_p} V^3 dt \quad (5-2)$$

که می توان با داشتن بیشترین سرعت باد محتمل و یا سرعت باد متوسط از توزیع ویبول انرژی متوسط را تخمین زد.

## ۸-۲ محاسبه توان استخراجی از باد

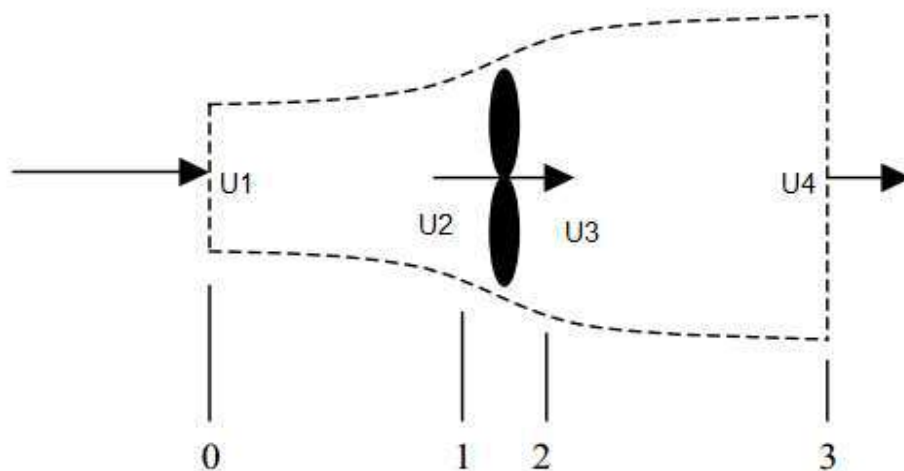
توان واقعی که به وسیله پره های روتور استخراج می شود برابر با تفاوت بین توان باد جریان بالا و جریان پایین است [۳۹].

### ۲ ۸ ۱ مدل دیسک محرک در محاسبه توان استخراجی از باد

در این مدل که بر اساس تئوری حرکت شکل گرفته است، توربین را به عنوان یک دیسک

محرك در نظر می‌گیرند که توانایی استخراج انرژی باد را دارد. فرض شود که یک دیسک محرك در یک جریان باد شناور است و قابل جابجا شدن نیز نمی‌باشد. مدل ساده ارائه شده توسط بتز برای یک توربین ایده‌آل در شکل زیر نمایش داده شده است.

دو حجم کنترلی در شکل زیر دیده می‌شود که برای آن‌ها مرزهایی برای حجم هوای عبوری از دیسک در نظر گرفته شده است. توربین توسط یک دیسک محرك در میان دو حجم کنترلی نمایش داده شده است. مدل ارائه شده برای انواع توربین‌های بادی قابل تعمیم است [۴۰].



شکل ۲-۶: جریان باد در حال عبور از دیسک محرك

فرض‌های سیستم عبارت‌اند از:

- أ. تعداد پره‌ها نامحدود است.
- ب. نیروی پیشرانه در تمام فضای روتور یکسان است.
- ت. جریان حلقوی پره‌ها در نظر گرفته نشده است.

نیروی وارد شده از طرف باد بر توربین در جهت مخالف با نیروی پیشرانه است. برای جریان تک جهتی هوا که قابل فشردن نیست و نسبت به زمان ثابت است، نیروی پیشرانه متناسب با تغییرات لحظه‌ای جریان هوا می‌باشد و عبارت است از:

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 \quad (۶-۲)$$

که در آن  $U$  سرعت باد،  $A$  مساحت دیسک و  $\rho$  چگالی هوا.



اندیس‌ها مربوط به بخش مورد نظر در شکل فوق است. برای جریان حالت پایدار روابط زیر برقرار است:

$$U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 = \dot{m} \quad (7-2)$$

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (8-2)$$

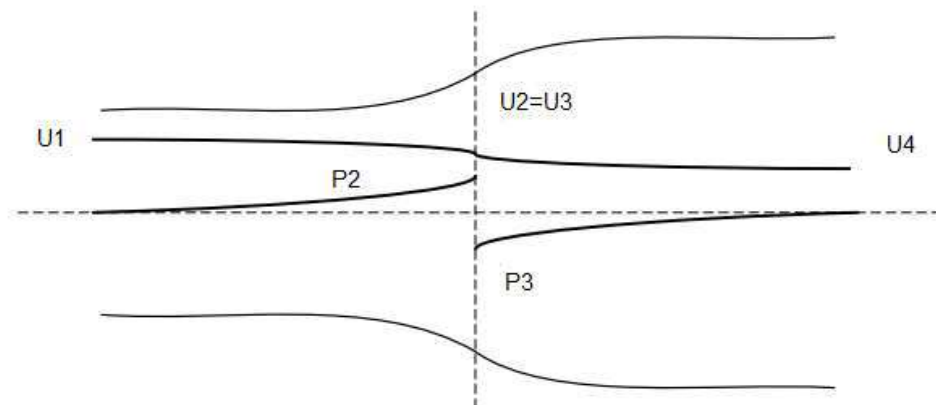
که در آن  $\dot{m}$ : دبی جرمی و اگر  $U_1 > U_4$  باشد آنگاه نیروی پیشرانه مثبت است.

در دو طرف دیسک کاری انجام نمی‌شود، پس رابطه برنولی در دو حجم کنترلی در هر طرف دیسک می‌تواند استفاده شود:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (9-2)$$

$$P_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = P_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (10-2)$$

اگر فرض شود که فشار ورودی و خروجی و همچنین سرعت در دو طرف دیسک با هم برابر است، یعنی  $P_1 = P_4$  ,  $U_2 = U_3$  :



شکل ۷-۲: تغییر سرعت و فشار هوا در طول مسیر.

بنابراین رابطه زیر برقرار است:

$$T = A_2(P_2 - P_3) \quad (11-2)$$

که در آن  $A_2$  سطح حجم کنترلی می‌باشد. اگر  $(P_2 - P_3)$  از روابط بالا بدست آید و در رابطه اخیر جایگذاری شود، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$T = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2) \quad (12-2)$$

اگر معادلات اخیر بر پایه  $T$  حل شود، با توجه به اینکه  $\dot{m} = A_2 U_2$  می‌باشد:

$$U_2 = \frac{1}{2}(U_1 + U_4) \quad (13-2)$$

بنابراین برای این مدل ساده، سرعت باد در صفحه روتور، میانگین سرعت باد ورودی و خروجی می‌باشد. اگر ضریب تداخل جریان محوری به صورت  $a$  تعریف شود، یعنی میزان افت سرعت باد هنگام مواجهه با پره‌های توربین بادی.

آنگاه:

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (14-2)$$

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (15-2)$$

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (16-2)$$

مقدار  $U_1 a$  اغلب موارد سرعت القاء شده در روتور می‌باشد. به عبارت دیگر سرعت باد در روی روتور، ترکیبی از سرعت جریان هوای آزاد و سرعت باد القاء شده می‌باشد. هنگامی که ضریب تداخل محوری از مقدار صفر افزایش می‌یابد، سرعت باد در پشت روتور مرتباً کاهش می‌یابد. اگر مقدار  $a = \frac{1}{2}$  باشد، سرعت باد پشت روتور به مقدار صفر کاهش می‌یابد. با جایگذاری روابط قبل در نیروی پیشرانده، خواهیم داشت:

$$T = \frac{1}{2} \rho A_2 U_1^2 4a(1 - a) \quad (17-2)$$

حال توان استخراج شده توسط توربین بادی، یعنی  $P$ ، برابر با حاصل ضرب سرعت سطح دیسک در نیروی پیشرانده می‌باشد:

$$T = \frac{1}{2} \rho A_2 U_1^2 4a(1 - a) \quad (18-2)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 U_1^3 4a(1 - a)^2 \quad (19-2)$$

یک روش مرسوم برای نشان دادن قابلیت یک توربین بادی برای جذب انرژی باد، استفاده از ضریب توان است که آن به صورت نسبت توان جذب شده، یعنی  $P$ ، به انرژی باد، یعنی  $P_m$ ، تعریف می‌شود:

$$C_p = \frac{P}{P_m} \quad (20-2)$$

که با استفاده از روابط ذکر شده در قبل، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$C_p = \frac{\rho A_r U_1^3 4a(1-a)^2}{0.5 \rho A_r U_1^3} = 4a(1-a)^2 \quad (21-2)$$

که به حد بتز<sup>۱</sup> معروف است [۴۱].

حد ماکزیمم برای  $C_p$  که با  $C_p \max$  نمایش داده می‌شود، با مشتق‌گیری از رابطه قبل نسبت به  $a$  و حل آن بدست می‌آید:

$$\frac{\partial C_p}{\partial a} = 4(1-3a^2) = 0 \rightarrow a = \frac{1}{3} \quad (22-2)$$

حال با جایگذاری این مقدار در رابطه مربوط به  $C_p$  مقدار حد بتز بدست می‌آید:

$$C_p \max = \frac{16}{27} \approx 0.59259 \quad (23-2)$$

این کران بالا برای  $C_p$ ، برای تمام توربین‌های بادی حتی از نوع محور عمودی نیز صادق است. مقدار بیشینه  $C_p$  از لحاظ تئوری برابر با  $0.59$  می‌باشد. اما در طرح‌های عملی، مقدار بیشینه  $C_p$  برای توربین‌های دو پره‌ای سرعت بالا کمتر از  $0.5$  و برای توربین‌های با تعداد پره‌های بیشتر سرعت پایین بین  $0.4-0.2$  است [۳۹]. ضریب توان برای توربین‌های بادی تجاری مدرن، حدود  $0.45$  است که فاصله نسبتاً کمی تا مقدار ایده آل دارد. هرچند که مقادیر بزرگتری نیز برای بعضی از طراحی‌های خاص بدست آمده است. ضریب توان معمولاً توسط سازنده توربین بادی داده می‌شود.

از روابط بالا نیروی پیشرانه محوری بر روی دیسک به دست آمد:

$$T = \frac{1}{2} \rho A_r U_1^2 4a(1-a) \quad (24-2)$$

مشابه با توان، مقدار نیروی پیشرانه توربین باد توسط ضریب پیشرانه مشخص می‌شود:

$$C_T = \frac{T}{P_m} 4a(1-a) \quad (25-2)$$

ماکزیمم مقدار  $C_T$ ، هنگامی که  $a = 0.5$  است، رخ می‌دهد و برابر با  $1$  می‌باشد. در توان

ماکزیمم که  $a = \frac{1}{3}$  است، مقدار  $C_T$  برابر  $\frac{8}{9}$  می‌باشد.

<sup>۱</sup> Betz

در عمل سه عامل مانع از رسیدن به مقدار تئوری  $C_p$  ماکزیمم توربین بادی می‌شود:

أ. جریان حلقوی پره‌ها

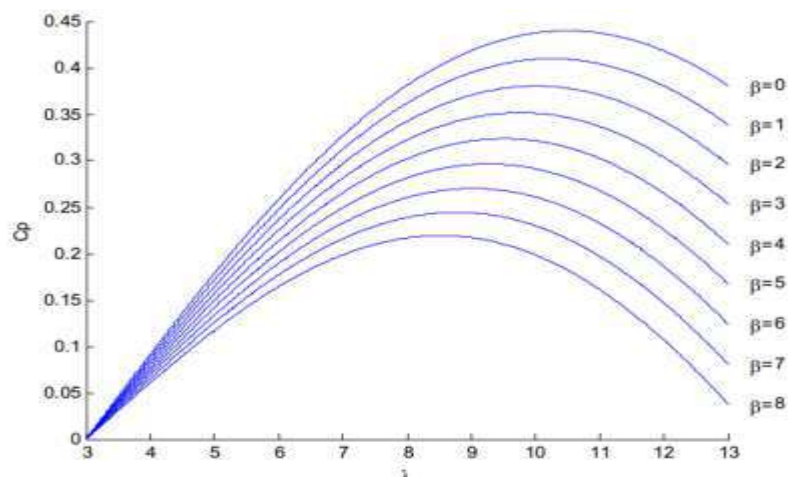
ب. تعداد محدود پره‌ها

ت. جریان چسبنده که باعث نیروی کششی آئرو دینامیکی غیر صفر می‌شود

$C_p$  با سرعت باد، سرعت چرخشی توربین و با پارامترهای پره مانند زاویه گام تغییر می‌کند.

سرعت نامی نوک پره مطابق رابطه زیر به صورت نسبت سرعت خطی نوک توربین  $\omega_r R^2$  و

سرعت باد تعریف می‌شود که  $\lambda$  سرعت نوک پره و  $\beta$  زاویه گام نامیده می‌شود.



شکل ۲-۸: نمودار ضریب توان بر اساس سرعت نوک پره و زاویه گام<sup>۱</sup>

در ملاحظات فنی برای بهبود عملکرد ژنراتور  $C_p$  را تا حد امکان کنترل می‌کنند و آن را

به صورت تابعی از  $\lambda$ ،  $\theta$  در نظر می‌گیرند. که در آن  $\lambda$  نسبت سرعت خطی نوک پره‌ها و به سرعت باد

یا  $TSR$  است و رابطه آن به صورت زیر است [۴۲].

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_w} \quad (۲۶-۲)$$

که در رابطه فوق،  $R$  طول پره و یا شعاع دایره‌ای است که پره‌ها در بر می‌گیرند.  $\omega_r$  سرعت

زاویه‌ای نوک پره‌ها و  $v_w$  سرعت باد است. همچنین ضریب پیشرانه یا گشتاور  $C_T$  تابع سرعت نوک

پره  $\lambda$  و زاویه گام یعنی  $\beta$  می‌باشد و با ضریب توان به وسیله رابطه زیر مربوط می‌شود:

$$C_p(\lambda, \beta) = \lambda C_T(\lambda, \beta) \quad (۲۷-۲)$$

<sup>۱</sup> Pitch

در شرایطی که کنترل زاویه پره مد نظر نباشد، مقدار  $\beta$  ثابت در نظر گرفته می‌شود [۴۳] و  $C_p$  تنها به  $\lambda$  وابسته خواهد شد، رابطه بین  $C_p$  و  $\lambda$  به صورت شکل فوق نمایش داده می‌شود. این نمودار، نمودار ضریب توان بر اساس سرعت نوک پره و زاویه گام است. ضریب توان، کارایی یک توربین بادی را بیان می‌نماید و به شدت غیرخطی می‌باشد. تغییرات این منحنی بدین صورت است که با افزایش سرعت نوک پره، به صورت صعودی افزایش پیدا کرده تا در  $C_p$  و  $\lambda_{opt}$  به مقدار ماکزیمم خودش برسد، سپس بعد از  $\lambda_{opt}$ ، این منحنی با افزایش سرعت نوک پره، مقدارش کاهش می‌یابد. مقدار ماکزیمم  $C_p$  با افزایش  $\beta$  کاهش می‌یابد. رابطه بین ضریب توان و سرعت نوک پره و زاویه پیچش را می‌توان به صورت معادلات زیر بیان کرد [۴۴].

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (2-28)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2-29)$$

که ضریب‌های مجهول  $C_j$  ها، به مشخصات توربین مورد بررسی بستگی دارد.

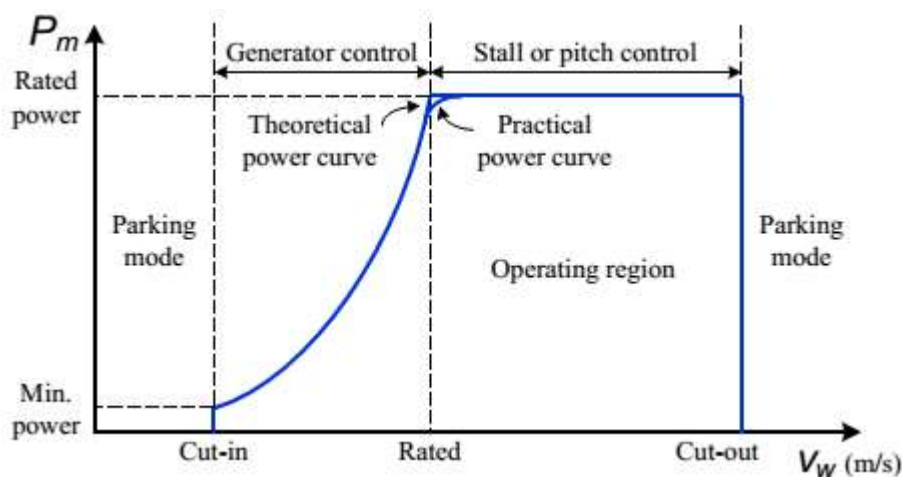
برای مثال برای توربین منجیل که مدل ۶۶۰kw - ۵۴۷ ساخت شرکت وستاس است، دارای پارامترهای زیر می‌باشد:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-22.5}{\lambda_i}} \quad (2-30)$$

عامل مؤثر دیگر بر ضریب عملکرد  $\theta$ ، زاویه گام پره است. این عامل را می‌توان با تغییر زاویه پره کنترل کرد.

## ۹-۲ کنترل توان خروجی DFIG

در کاربرد سرعت ثابت، ضریب عملکرد به ازای سرعت مشخصی از باد ماکزیمم بوده و در سرعت‌هایی غیر از این سرعت مشخص انرژی تولیدی توربین بهینه نخواهد بود. حداکثر بهره‌برداری از انرژی باد زمانی روی می‌دهد که به ازای سرعت‌های مختلف باد ضریب عملکرد توربین در مقدار ماکزیمم خود قرار می‌گیرد که بدین منظور سرعت روتور در سرعت‌های مختلف باد به گونه‌ای مناسب تغییر داده می‌شود. روش فوق در توربین‌هایی که توربین سرعت متغیر نامیده می‌شوند، بکار گرفته می‌شود.



شکل ۲-۹: مشخصه عملکرد معمول سیستم‌های توربین بادی [۴۲]

شکل فوق به چهار ناحیه عملکردی تقسیم شده است [۴۲]:

- (۱) ناحیه‌ای که به دلیل محتوای کم انرژی باد توربین به چرخش خود ادامه می‌دهد ولی توانی تولید نمی‌کند. سرعت‌های باد کمتر از  $4 \text{ m/s}$  در این ناحیه تعریف می‌شوند.
- (۲) در ناحیه ۲ هدف دست یافتن به ضریب عملکرد بهینه و ماکزیمم انرژی دریافتی از باد است. در این ناحیه سیستم کنترلی در جهت عمل می‌کند تا بتوان بیشترین توان را از باد دریافت کرد.
- (۳) در ناحیه ۳ محتوای انرژی باد کافی است و با کنترل ضریب عملکرد توان نامی به دست می‌آید و مانع از افزایش توان به بیش از حد مجاز می‌شود.
- (۴) در ناحیه ۴ به دلیل سرعت خیلی زیاد باد در طول طوفان‌ها و تندبادها، برای ممانعت از صدمه دیدن سیستم مکانیکی، سیستم از شبکه خارج می‌شود و توانی تولید نمی‌کند و سیستم ترمز مکانیکی نیز عمل می‌کند به طور معمول سرعت باد بالاتر از حدود  $30 \text{ m/s}$  - ۲۵ در این ناحیه قرار می‌گیرد.

اعمال اهداف فوق با استراتژی‌های کنترلی مختلفی در توربین‌های باد مورد استفاده قرار گرفته است. در سرعت‌های بالای باد در تمام توربین‌های بادی لازم است تا توان خروجی محدود شود در غیر این صورت در حین عملکرد، توربین با اضافه بار در روتور همراه خواهد بود و قسمت‌گردنده مکانیکی و همچنین ژنراتور الکتریکی با مشکل مواجه خواهد شد.

## ۱۰-۲ انواع توربین‌های بادی و مکانیسم کار آن‌ها

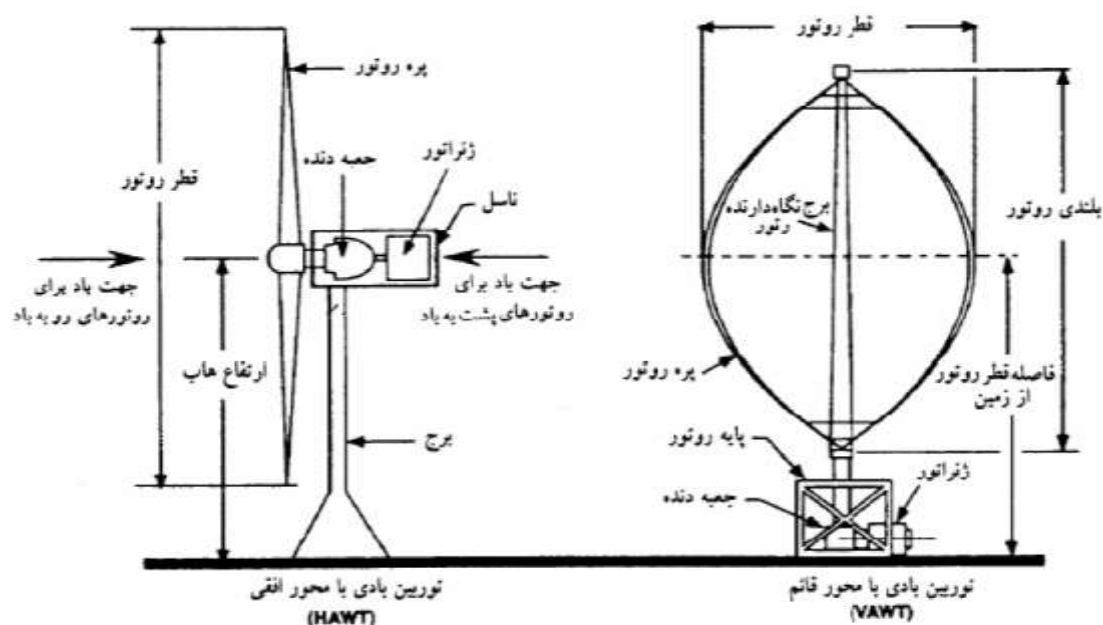
توربین‌های بادی را می‌توان به صورت توربین‌های بادی موازی با باد و یا محور افقی و

توربین‌های بادی محور عمودی، یا اینکه توربین با استفاده از نیروی برآ کار می‌کند یا نیروی پسا (برآیی است یا پسایی) و همچنین بر اساس حرکت اجزا (اجزای گردان (روتور) - اجزای با حرکت انتقالی) تقسیم‌بندی نمود.

به طور کلی یک تقسیم‌بندی کلی از توربین‌ها عبارت است از:

(الف) توربین‌های بادی با محور چرخش عمودی (VAWT)

(ب) توربین‌های بادی با محور چرخش افقی (HAWT)



شکل ۱-۲: قسمت‌های عمده نیروگاه بادی

## ۲ ۱۰ ۱ توربین‌های بادی با محور چرخش عمودی (VAWT)

این توربین‌ها از دو بخش اصلی تشکیل شده‌اند: یک میله اصلی که رو به باد قرار می‌گیرد و میله‌های عمودی دیگر که عمود بر جهت باد کار گذاشته می‌شوند. این توربین‌ها شامل قطعاتی با اشکال گوناگون بوده که باد را در خود جمع کرده و باعث چرخش محور اصلی می‌گردد. ساخت این توربین‌ها بسیار ساده بوده و همچنین بازده پایین نیز دارند. عمده‌ترین توربین‌های بادی محور عمودی عبارت‌اند (سلاوینیوس، داریوس، صفحه‌ای و کاسه‌ای). در این نوع توربین‌ها در یک طرف توربین، باد بیشتر از طرف دیگر جذب می‌شود و باعث می‌گردد که سیستم لنگر پیدا کرده و بچرخد. یکی از مزایای این سیستم وابسته نبودن آن به جهت وزش باد می‌باشد. این دسته از ماشین‌ها گشتاور راه‌اندازی پایین و ضریب توان  $0/4$  تا  $0/5$  دارند. روتور نوع داریوس، توسط *G.J.M. Darrieus* در

سال ۱۹۲۰ ساخته شده است. این روتور، پره‌های شکل داده شده با سطح مقطع بالواره<sup>۱</sup> دارد. نسبت سرعت نوک به سرعت باد در آن‌ها بالا است. بنابراین به طور نسبی توان خروجی بالایی را نسبت به وزن و هزینه روتور مشخص تولید می‌کنند.

## ۲-۱۰ توربین‌های بادی با محور چرخش افقی (HAWT)

این توربین‌ها نسبت به مدل محور عمودی رایج‌تر بوده همچنین از لحاظ تکنولوژیک پیچیده‌تر و گران‌تر نیز می‌باشند. ساخت آن‌ها مشکل‌تر از نوع محور عمودی بوده ولی راندمان بسیار بالایی دارند. در سرعت‌های پایین نیز توانایی تولید انرژی الکتریکی را داشته و توانایی تنظیم جهت در مسیر وزش باد را نیز دارند. این توربین‌ها ۳ یا در مواردی ۲ پره می‌باشند که روی یک برج بلند نصب می‌شوند. این پره‌ها همواره در جهت وزش باد قرار می‌گیرند.

خود این گروه می‌تواند به دو گروه دیگر تقسیم گردد، یک دسته توربین‌هایی هستند که در آن‌ها نیاز به گشتاور بالا و سرعت دورانی پایین است. نوع مزرعه‌ای و هلندی توربین‌ها از این جمله هستند. دسته دیگر ماشین‌هایی که در آن‌ها نیاز به سرعت دورانی بالا و گشتاور پایین است، این نوع ماشین‌ها از نوع ملخی می‌باشند و ماشین‌هایی که برای تولید الکتریسیته استفاده می‌شوند در این رده قرار می‌گیرند و ضریب توانی بین ۰/۴ تا ۰/۵ دارند.

ماشین‌های بادی گروه اول، صلبیت بالا و روتورهای سرعت پایین دارند و تعداد پره‌ها در آن‌ها زیاد می‌باشد و در گروه دوم روتورها سرعت بالایی دارند و تعداد پره‌ها هم کم می‌باشد و عموماً این دسته از توربین‌ها دارای ۲ پره یا ۳ می‌باشند. پره این توربین‌ها مقطع بالواره دارد. نتیجه حاصل از بررسی محاسن و محدودیت‌های توربین‌های بادی محور عمودی و محور افقی این است که نوع محور عمودی مناسب‌تر بوده و در نهایت برای طرح انتخاب می‌گردد.

## ۲-۱۱ انواع ژنراتورهای توربین بادی

انواع مختلفی از ژنراتورهای AC به منظور تبدیل انرژی مکانیکی باد به انرژی الکتریکی، چه در سطح تحقیقات و چه در سطح صنعت، به کار گرفته شده است. از جمله این ژنراتورها می‌توان به ژنراتورهای القایی با روتور قفسه سنجابی و سیم‌پیچی شده، ژنراتورهای سنکرون با روتور سیم‌پیچی شده و مغناطیس دائم و ماشین‌های خاص از جمله سویچ رلوکتانس، دو ماشین القایی سری شده با تغذیه دوگانه، ماشین القایی بدون جاروبک با تغذیه دوگانه، ماشین رلوکتانسی بدون جاروبک با تغذیه

<sup>۱</sup> Airfoil

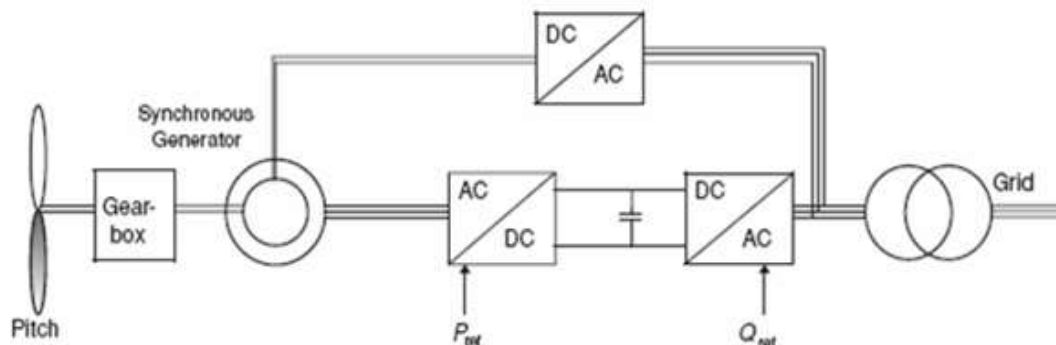


دوگانه و ... اشاره کرد.

## ۲ ۱۱ ۱ ژنراتور سنکرون

ژنراتورهای سنکرون جزء ماشین‌های الکتریکی AC هستند که قادرند توان مکانیکی را به توان الکتریکی متناوب تبدیل کنند. این نوع از ژنراتورها به این دلیل سنکرون نامیده می‌شوند که سرعت گردش قسمت مکانیکی آن برابر سرعت گردش فرکانس یا قسمت الکتریکی آن است.

بیشتر ژنراتورهای سنکرون سه فاز هستند و بحث در مورد این نوع از ژنراتورها معطوف به نوع سه فاز آن است. این نوع از ژنراتورها ساختاری متفاوت با ژنراتورهای القایی دارند و این تفاوت در تعداد و نوع تحریک این ژنراتورهاست. در ژنراتورهای سنکرون سیم‌پیچی‌های روتور، به یک منبع تغذیه DC وصل می‌شود تا تحریک روتور انجام پذیرد و در قسمتی دیگر از استاتور آن‌ها جریان متناوب (AC) عبور می‌کند شاری که در فاصله هوایی<sup>۱</sup> بین روتور و استاتور بوجود می‌آید حاصل از جریان‌های استاتور و روتور است.



شکل ۲-۱۱: ژنراتور سنکرون

در ژنراتور سنکرون سیم‌پیچی استاتور ولتاژ اصلی ماشین را تولید می‌کند به سیم‌پیچی آرمیچر، و سیم‌پیچی روتور میدان اصلی مغناطیسی ماشین را تولید می‌کند به سیم‌پیچی میدان معروف است. یک ژنراتور سنکرون معمولاً شامل یک استاتور سیم‌پیچی شده ۳ فاز است که بار خارجی را تغذیه می‌کند و یک روتور (مغناطیس دائم - سیم‌پیچی میدان) که یک منبع میدان مغناطیسی است.

ژنراتور سنکرون در قیاس با یک ژنراتور القایی با مشخصات مشابه و با اندازه مشابه، بسیار

<sup>۱</sup> Air gap

گران تر و پیچیده تر است، مهم ترین مزیت آن، نیاز نداشتن به جریان جهت مغناطیس کنندگی است و از طریق یک کانورتر (الکترونیک قدرت)، به شبکه اصلی متصل می شود.

کانورتر دو هدف مهم زیر را به دنبال دارد:

۱. برای عمل کردن به عنوان یک تقویت کننده توان در مقابل ارتعاشات توان (ناشی از انرژی متغیر باد و طوفان) و حالت های گذرای سمت سیستم قدرت
۲. برای کنترل میدان مغناطیسی برای حفظ سنکرونیزم و جلوگیری از مشکلات سنکرونیزاسیون شدن با شبکه قدرت

به دلیل مشخص بودن عملکرد ماندگار و گذرای این نوع ژنراتورها، بحث زیادی روی آن ها نمی شود.

## ۲ ۱۱ ۲ ژنراتورهای آسنکرون (القایی دو سو تغذیه)

ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه (DFIG)، متداول ترین نوع ژنراتور مورد استفاده در توربین های بادی هستند. این بخش جزئیات عملکردی DFIG و اصول مربوط به آن را بررسی می کند.

به یک ماشین در حال چرخش ژنراتور گفته می شود در صورتی که ورودی مکانیکی را به توان خروجی الکتریکی تبدیل کند.

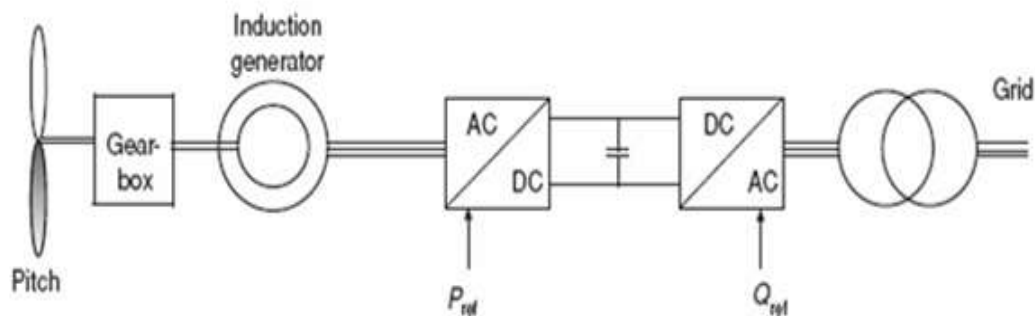
DFIG ها با اصول الکترومغناطیسی ماشین های القایی روتور سیم پیچی شده کار می کنند و مدارهای الکترونیک قدرت خارجی بر روی سیم پیچی روتور و استاتور آن ها نصب می شود تا عملکرد توربین بادی بهبود یابد. این مدارها به بهبود استخراج و تنظیم توان مکانیکی از طریق سیم پیچی کمک می کنند. یک نمایش شماتیک از سیستم توربین بادی در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است.

در توربین های DFIG، از حلقه های لغزان و جاروبک معمولاً برای اتصال به مدار روتور استفاده می شود. سیم پیچی سه فاز استاتور به طور مستقیم توسط منبع ولتاژ سه فاز تغذیه می شود که نوعاً در فرکانس سیستم قدرت (۵۰-۶۰ Hz) کمتر از ۱ KV است. یک مبدل الکترونیک قدرت AC-DC-AC پشت به پشت<sup>۱</sup>، برای یکسوسازی منبع ولتاژ و سپس تبدیل آن به سه فاز AC با فرکانس مطلوب برای تحریک روتور به کار می رود. مبدل توان به سیم پیچی روتور وصل می شود تا توان حاصل شود. بنابراین، بر خلاف ماشین القایی قفس سنجایی تک تحریکه، سیم پیچی استاتور و روتور DFIG به طور

---

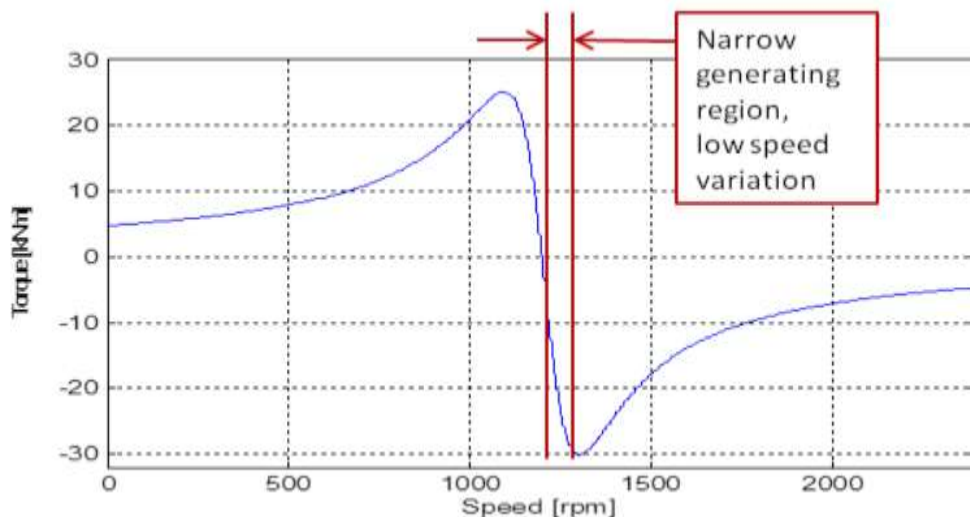
<sup>۱</sup> Back to Back Converter

مستقل تحریک می‌شوند. از آنجایی که، تنها قسمتی از توان اکتیو از مدار روتور عبور می‌کند، نرخ توان مبدل باید حدود ۲۰٪ تا ۳۰٪ توان نامی توربین باشد. یک سیستم کنترلی برای تنظیم توان اکتیو و راکتی و (با تنظیم جریان جاری در سیم‌پیچی روتور) برای استخراج حداکثر توان ممکن از باد و تنظیم خروجی توان راکتیو ژنراتور به کار می‌رود.



شکل ۲-۱۲: ژنراتور القایی تغذیه دوگانه

ماشین القایی دارای منحنی گشتاور-سرعتی همانند شکل ۲-۱۳ می‌باشد. طبق این مشخصه اگر موتور القایی سرعتی بیش از  $n_s$  داشته باشد جهت گشتاور القایی معکوس می‌شود و به عنوان ژنراتور عمل خواهد کرد. با افزایش گشتاور اعمالی به شفت مقدار توان تولیدی افزایش می‌یابد.

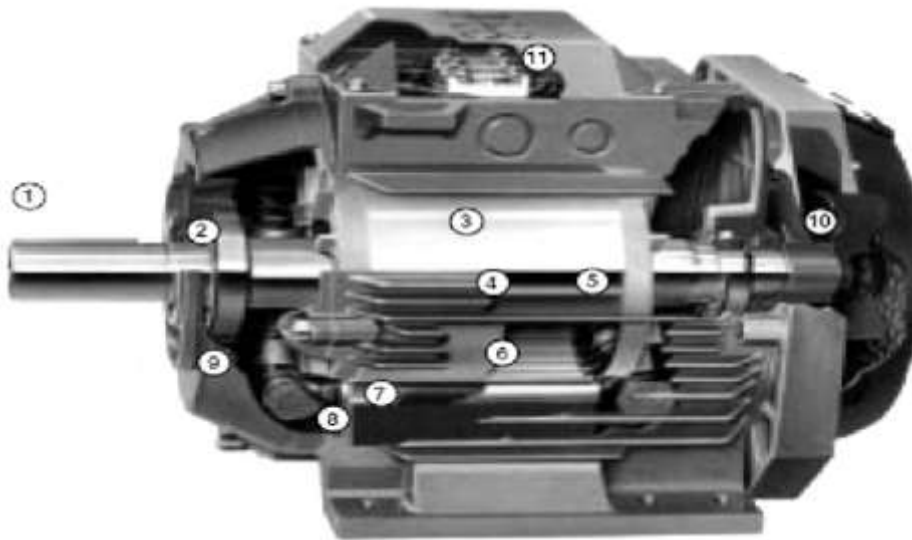


شکل ۲-۱۳: مشخصه گشتاور-سرعت ماشین القایی

همان طوری که از شکل ۲-۱۳ معلوم است در مد ژنراتوری یک گشتاور القایی  $max$  دارد که با افزایش توان ورودی گشتاور القایی به حد  $max$  رسیده و بعد از آن ژنراتور به ناحیه ناپایدار وارد می‌شود. در این حالت فلوی پیوندی بین روتور و استاتور می‌شکند و به طور ناگهانی روتور آزادانه

می چرخد و هیچ توانی تولید نمی‌شود.

### ژنراتور آسنکرون



شکل ۲-۱۴: نمونه‌ای از ژنراتور آسنکرون

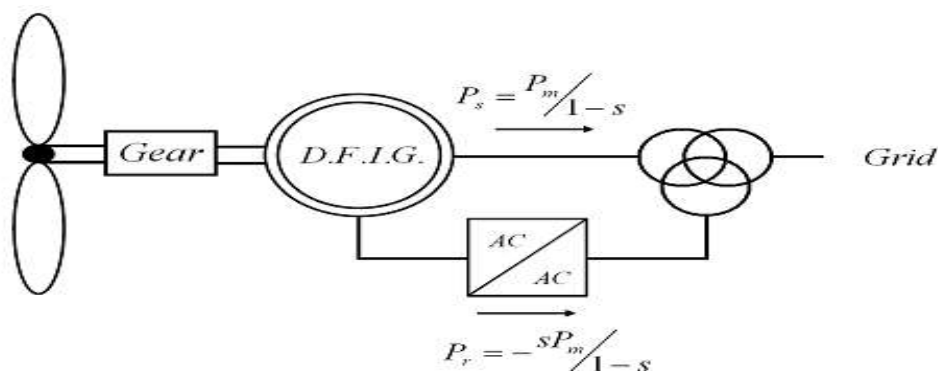
اجزاء این ژنراتورها عبارت‌اند از:

- |                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| ۱- محور ژنراتور                | ۷- سیم‌پیچ       |
| ۲- یاتاقان‌های غلتان           | ۸- صفحه استاتور  |
| ۳- روتور                       | ۹- دماغه سیم‌پیچ |
| ۴- میله آلومینیومی روتور       | ۱۰- هواکش.       |
| ۵- حلقه آلومینیومی روتور       | ۱۱- جعبه اتصال   |
| ۶- استاتور (قسمت ثابت - پوسته) |                  |

یکی از مزایای بزرگ ژنراتورهای آسنکرون، قابلیت این ژنراتورها در استفاده از سیستمی است که به ژنراتور اجازه می‌دهد تا هنگام وزش بادهای شدید دور روتور و ژنراتور تا حدود ۱۰٪ نسبت به سرعت گردش میدان مغناطیسی در استاتور تغییر کند و با به حداقل رساندن نوسانات احتمالی ناخواسته در شبکه و کاهش اعمال شوک به اجزاء حیاتی توربین، به میزان محسوسی کیفیت قدرت خروجی افزایش یابد. با این عمل فرسایش و استهلاک در گیربکس کاهش پیدا خواهد کرد. به همین دلیل در توربین‌های بادی که ژنراتور آن‌ها به طور مستقیم به شبکه برق سراسری متصل می‌شود،

استفاده از ژنراتورهای آسنکرون ارجحیت دارد.

در صورتی که تغییرات سرعت ژنراتور تنها به  $\pm 3\%$  سرعت سنکرون محدود شود، مطابق شکل ۲-۱۵ می‌توان گفت که توانی که از طریق مبدل روتور مبادله می‌شود تنها برابر  $\frac{1}{p}$  توان مبادله شده از طریق استاتور ماشین می‌باشد. بنابراین توان مبدل سمت روتور به  $\frac{1}{p}$  توان نامی ماشین محدود می‌شود. بیشتر ژنراتورهای توان بالا را به علت کوچک بودن مبدل فرکانسی و کم بودن هزینه آن، این دسته از ژنراتورها تشکیل می‌دهند.



شکل ۲-۱۵: توان انتقالی از روتور و استاتور ماشین القایی DFIG

به دلیل محدود شدن تغییرات سرعت و در نتیجه عبور تنها بخشی از توان ماشین از مبدل فرکانسی، هزینه و تلفات این دسته از ژنراتورها، در مقایسه با ژنراتورهای با مبدل فرکانسی با توان نامی، کمتر می‌باشد که موجب محبوبیت زیاد این دسته از ژنراتورها شده است. به این نوع ژنراتورها ژنراتورهای فرکانس ثابت سرعت متغیر نیز می‌گویند.

## ۲-۱۱-۲-۱ مزایای ژنراتور القایی:

۱. کنترل توان اکتیو و راکتیو به طور مستقل ممکن است.
۲. استخراج توان آیرودینامیک حداکثر و تنش‌های مکانیکی را به حداقل برسانند.
۳. راه‌اندازی و بهره‌برداری از آن آسان است، زیرا نیازی به سنکرونیزاسیون یا تنظیم تحریک ندارد.
۴. جریان اتصال کوتاه آن کم و زمان کاهش آن در مقایسه با ماشین‌های سنکرون کوتاه‌تر است، زیرا در هنگام اتصال کوتاه، تحریک قطع می‌شود و جریان اتصال کوتاه فقط در یک مدت زمان فوق‌العاده کوتاه، جریان می‌یابد تا اینکه فلو مغناطیسی ناپدید شود.

بخاطر مزایای فوق و سادگی کنترل نسبت به ژنراتور سنکرون و قابلیت اطمینان بالا باعث

شده این ژنراتور، انتخاب بسیار مناسبی برای نیروگاه‌های بادی باشد.

## ۲-۱۱-۲-۲ معایب ژنراتور القایی:

۱. چون جریان اولیه ژنراتور در ارتباط با ولتاژ خروجی در پیش فاز است لذا فقط می‌تواند برای بارهای قدرتی تأمین کند که نیاز به جریان پیش فاز دارند.
۲. ضریب قدرت جریان بار بوسیله ضریب قدرت بار تعیین نمی‌شود، بلکه بوسیله ضریب قدرت ذاتی خود ژنراتور تعیین می‌شود. به این معنی که ضریب قدرت بوسیله ظرفیت تعیین می‌شود و قابل کنترل نیست.
۳. در بهره برداری موازی، جریان هجومی بالایی جریان می‌یابد و روی ولتاژ سیستم اثر می‌گذارد.
۴. ماشین‌های القایی با سرعت‌های پایین و قطب‌های زیاد، نسبت به ماشین‌های سنکرون از لحاظ ضریب قدرت و ابعاد ماشین نامرغوب‌ترند.

## ۲ ۱۱ ۳ کنترل توربین بادی سرعت ثابت

در توربین بادی سرعت ثابت، توربین‌ها مکانیزم کنترل زاویه فراز ندارند و زاویه انحراف آن‌ها ثابت است. تغییرات ضریب توان با تغییرات ( $\lambda$ ) نشان داده می‌شود. در توربین‌های بادی سرعت ثابت، سرعت روتور همواره ثابت است. بنابراین، وقتی که سرعت باد تغییر کند، مقدار ( $\lambda$ ) و در نهایت ضریب توان تغییر خواهد کرد. از آنجایی که منحنی مشخصه ضریب توان تنها در یک مقدار ( $\lambda$ ) ماکزیمم دارد، می‌توان نتیجه گرفت که توربین‌های بادی سرعت ثابت تنها در یک سرعت باد دارای ضریب بهینه ماکزیمم می‌باشند.

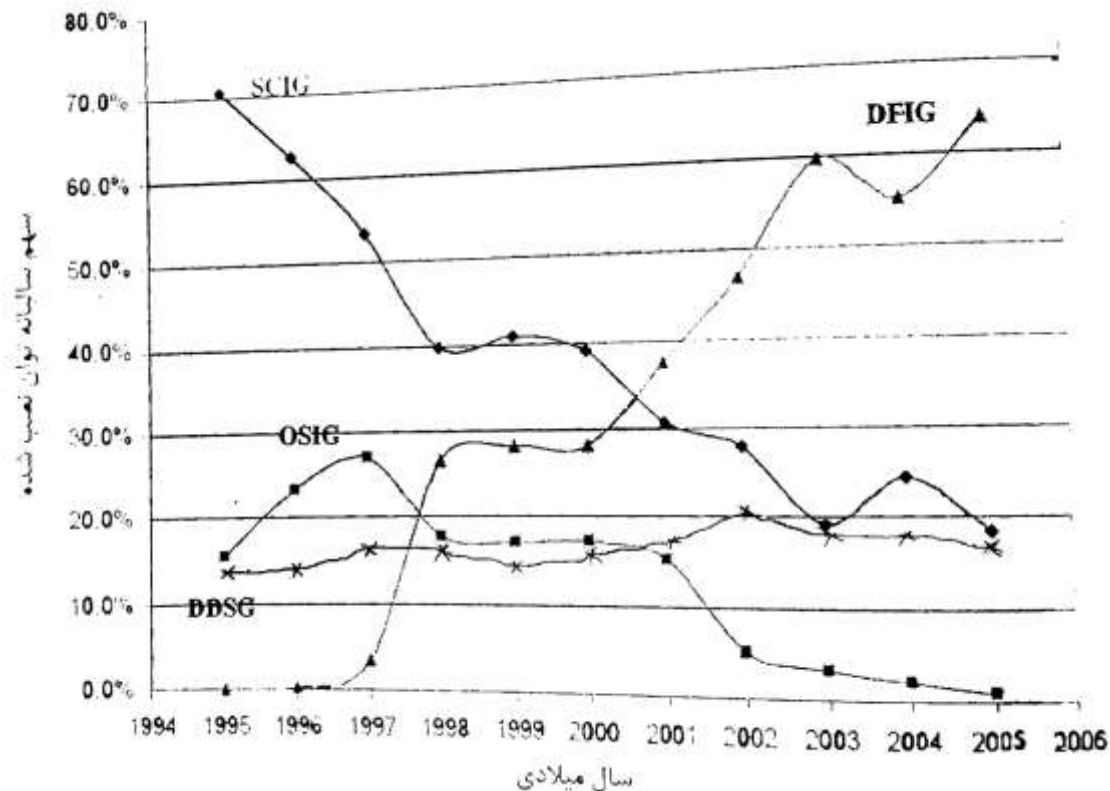
## ۲ ۱۱ ۴ کنترل توربین بادی سرعت متغیر

در توربین بادی سرعت متغیر، برخلاف حالت سرعت ثابت، تغییرات سرعت روتور در ازای تغییرات سرعت باد خواهد بود. در نتیجه همواره در نقطه بهینه ضریب توان خواهیم بود. در نتیجه، برای هر سرعت خاص باد، یک منحنی توان بر حسب سرعت روتور وجود دارد.

کلید روش‌های کنترلی در جهت برقراری و قرار دادن توربین بادی در نقطه پیک توان خود می‌باشند [۴۵].

شکل ۲-۱۶ منحنی نصب انواع ژنراتورها در نیروگاه‌های بادی را تا سال ۲۰۰۵ نشان می‌دهد که در آن با توجه به شکل افت شدید استفاده از ژنراتورهای القایی قفس سنجابی معمولی را در

سال‌های اخیر مشاهده شده است که با پیشرفت دیگر انواع ژنراتورها جای خود را به آن‌ها داده که در این میان ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه (منحنی مثلثی) از ۰٪ در سال ۱۹۶۶ به ۶۴٪ در سال ۲۰۰۵ بیشترین رشد از لحاظ نصب در جهان را داشته و در طول مدت کوتاهی به ژنراتور غالب در نیروگاه‌های بادی تبدیل شده است. استفاده از ژنراتور القایی با روتور سیم‌پیچی شده که از روش مقاومت متغیر بهره می‌برند (منحنی مربعی) نیز با ظهور ژنراتور القایی تغذیه دوگانه و مزایای آن کاهش زیادی یافته است. کاربرد ژنراتور سنکرون نیز در این مدت تقریباً ثابت مانده است [۴۶].



شکل ۲-۱۶: سهم انواع مختلف ژنراتورها در نیروگاه بادی [۴۶].





فصل ۳ مدل سازی توربین بادی با ژنراتور القایی  
تغذیه دوگانه (DFIG)

## ۱-۳ مقدمه

باد یکی از مظاهر انرژی خورشیدی و همان هوای متحرک است که بوسیله گرمای غیر یکنواخت سطح کره زمین که حاصل عملکرد خورشید است، به وجود می‌آید. از آنجایی که سطح زمین از سازنده‌های خشکی و آبی تشکیل شده است، اشعه خورشید را به طور غیریکنواخت جذب می‌کند. وقتی خورشید در طول روز می‌تابد، هوای روی سرزمین‌های خشکی سریع‌تر از هوای روی سرزمین‌های آبی گرم می‌شود. هوای گرم روی خشکی ضبط شده و بالا می‌رود و هوای خنک‌تر و سنگین‌تر روی آب جای آن را می‌گیرد که این فرآیند بادهای محلی را می‌سازد. در شب، از آنجا که هوا روی خشکی سریع‌تر از هوای روی آب خنک می‌شود، جهت باد برعکس می‌شود. به همین طریق بادهای بزرگ جوی که زمین را دور می‌زنند به این علت است که هوای سطحی نزدیک استوا در اثر گرمای خورشید بیشتر از هوای قطب شمال و جنوب گرم شده، و از آنجا که باد تا زمانی که خورشید به زمین می‌تابد، به طور پیوسته تولید خواهد شد، آن را منبع انرژی تجدید شونده می‌نامند [۴۷]. دو درصد از انرژی خورشید که به زمین می‌رسد به باد تبدیل می‌گردد. ۳۵٪ انرژی باد در ضخامت یک کیلومتری از سطح زمین موجود است. محاسبات نشان می‌دهد، که برای تمام سیاره زمین، انرژی موجود بیست برابر انرژی مصرفی فعلی دنیا می‌باشد این در حالی است که پتانسیل انرژی باد به عنوان یکی از منابع تجدید پذیر انرژی حدود ۱۵ برابر مصرف انرژی جهان است [۴۸-۴۹].

## ۲-۳ تحلیل آماری داده‌های بادی

برای تعیین پتانسیل انرژی باد در یک سایت مورد نظر و تخمین انرژی خروجی از این سایت از روش‌های آماری استفاده می‌شود. یکی از این توابع، که صحت آن با اندازه‌گیری در نقاط مختلف جهان ثابت شده است، تابع توزیع چگالی احتمال ویبول است که انطباق خوبی با داده‌های سرعت باد، به خصوص در محدوده‌ی سرعت توربین‌های بادی نشان می‌دهد [۵۰].

تابع توزیع ویبول مطابق رابطه زیر، با دو پارامتر  $k$  (ضریب شکل) و  $c$  (ضریب مقیاس) مشخص می‌شود، ( $k > 0$  و  $c > 1$ ).

$$P(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \left(\frac{U}{c}\right)^k \right) \right] \quad (1-3)$$

در اینجا برای تعیین  $k$  و  $c$  از روابط تحلیلی یا نیمه تجربی جاستاس (Justus, ۱۹۷۸) استفاده نمودیم.

$$k = \left(\frac{\sigma_U}{\bar{U}}\right)^{-1/0.86} \quad (2-3)$$

$$\frac{c}{\bar{U}} = \frac{k^{2/6674}}{0.184 + 0.116k^{2/73855}} \quad (3-3)$$

که در آن،  $\sigma_U$  انحراف معیار استاندارد و  $\bar{U}$  سرعت متوسط داده‌ها است. همچنین می‌توان از فرمول‌های زیر، جهت محاسبه  $c$  پس از به دست آوردن  $k$  از قسمت اول معادله ۳ استفاده نمود.

$$\frac{c}{\bar{U}} = \frac{1}{\Gamma(1 + 1/k)} \quad (4-3)$$

البته این فرمول نیاز به استفاده از تابع گاما دارد. فرمول نیمه تجربی لایسن (Lysen, ۱۹۸۳) نیز به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{c}{\bar{U}} = (0.568 + 0.433/k)^{1/k} \quad (5-3)$$

چگالی توان باد (توان باد بر واحد سطح) به دانسیته هوا (در شرایط استاندارد سطح دریا)  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  و توان سوم سرعت باد بستگی دارد. توان باد علاوه بر این به مساحت جاروب شده توسط روتور توربین باد (قطر روتور) وابسته است.

چگالی توان متوسط به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{\gamma} \rho \int_0^{\infty} U^3 P(U) dU = \frac{1}{\gamma} \rho c^3 \Gamma(1 + 3/k) \quad (6-3)$$

همچنین نسبت  $k_e = \frac{\bar{U}^3}{(\bar{U})^3} = \frac{\Gamma(1+3/k)}{\Gamma^3(1+1/k)}$  به عنوان ضریب شکل انرژی تعریف شده که برابر توان کل در دسترس باد به توانی که از مکعب کردن سرعت متوسط حاصل می‌شود، است.

هر گاه بخواهیم در برآورد انرژی باد یک منطقه مورد مطالعه، بیشترین مقدار انرژی در طول سال را به دست آوریم، از سرعت نامی باد،  $U_{me}$ ، به عنوان سرعتی که بیشترین انرژی را در طول سال تولید می‌کند استفاده می‌کنیم.

این سرعت از پارامترهای مهم طراحی توربین می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$U_{me} = c \left( \frac{k+2}{k} \right)^{1/k} \quad (7-3)$$

همچنین می‌توان محتمل‌ترین سرعت باد که برای یک ناحیه می‌توان انتظار داشت را از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$U_{me} = c \left( 1 - \frac{1}{k} \right)^{1/k} \quad (8-3)$$

### ۳-۳ محاسبه انرژی سالیانه توربین بادی

یک روش برای تعیین تولید انرژی سالیانه نیروگاه بادی، تعیین میزان تولید توان آن با توجه به توزیع سرعت باد است. با توجه به ماهیت تصادفی باد و با اندازه‌گیری‌های فراوان در بازه‌های مختلف زمانی تابع چگالی احتمال سرعت باد بدست می‌آید [۵۱].

برای هر چارچوب زمانی، سرعت باد به عنوان یک متغیر تصادفی به صورت یک توزیع احتمال ویبول است که تابع احتمال آن به صورت زیر است.

$$f(v) = \left( \frac{k}{c} \right) \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad (9-3)$$

که در آن  $v$  سرعت باد به صورت متر بر ثانیه و  $c$  فاکتور قیاس و  $k$  فاکتور شکل است. که بسته به رژیم باد در هر نقطه از کره زمین فرق می‌کند. بایستی توجه داشت که مقادیر  $c$ ،  $k$  از توزیع سالیانه سرعت باد و نمونه‌گیری ساعت به ساعت در مدت یک سال (۸۶۴۰ نمونه) حاصل می‌شود.

متوسط سرعت باد از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\bar{v} = c \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \quad (10-3)$$

که  $\Gamma$  تابع گاما است؛ که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx \quad (11-3)$$

همچنین واریانس باد به صورت تابعی از گاما و  $k$  به دست می‌آید.

$$S^2 = c^2 \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \right] \quad (12-3)$$

همچنین سرعت حاوی بیشترین مقدار انرژی از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$v_{mec} = c \left(1 + \frac{2}{k}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (13-3)$$

در ادامه سرعت بیشترین احتمال وقوع باد ( $v_{mp}$ ) نیز از رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$v_{mp} = c \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (14-3)$$

### ۳-۴ محاسبه توان توربین بادی

میزان توان تولیدی یک توربین بادی، به سرعت باد و سرعت روتور و زاویه فراز توربین بادی بستگی دارد. با تعریف فوق رابطه توان به شکل رابطه زیر نوشته خواهد شد.

$$P_T = \frac{1}{2} C_p \rho A_R V^3 \quad (15-3)$$

که در رابطه فوق  $P_T$  قدرت مکانیکی توربین،  $A_R$  سطح جاروب شده پره‌های روتور،  $\rho$  چگالی هوا،  $V$  سرعت متوسط ورودی باد و  $C_p$  ثابت قدرت توربین می‌باشد [۵۲].

ثابت قدرت  $C_p$  را می‌توان از طریق اندازه‌گیری مستقیم و یا از طریق محاسبات آیرودینامیکی به دست آورد. ثابت قدرت تابعی از زاویه پره‌ها و نسبت سرعت نوک پره به سرعت باد و تعداد پره‌ها می‌باشد. ( $C_p(\lambda, \beta)$ ) معمولاً توسط سازندگان در اختیار مصرف کنندگان قرار می‌گیرد [۵۳].

### ۳-۵ یک معرفی مختصر از آیرودینامیک توربین بادی

تولید توان توربین بادی بستگی به اثر متقابل میان روتور توربین بادی و باد دارد. توان خروجی متوسط با سرعت متوسط باد مشخص می‌شود، بنابراین تنها آیرودینامیک حالت دائمی در این مسأله مهم تلقی می‌شود و از حالت‌های گذرای ناشی از اغتشاشات جانبی صرف نظر می‌شود. اولین تحلیل آیرودینامیک توربین بادی توسط Betz [۵۴] و Glauret [۵۵] در اواخر دهه ۱۹۲۰ و اوایل دهه ۱۹۳۰ انجام شد.

### ۳ ۵ ۱ بلوک آیرودینامیک

بلوک آیرودینامیک شامل سه زیر سیستم می‌باشد. محاسبات نسبت سرعت رأس، محاسبات ضریب سرعت روتور ( $C_p$ ) و محاسبات گشتاور آیرودینامیک.

سرعت باد و زاویه‌ی گام ورودی‌های تعیین شده توسط کاربر هستند. از آنجایی که مدل‌سازی به مطالعه‌ی پاسخ دینامیکی توربین بادی در حوادث شبکه نیاز دارد، عموماً این فرض می‌شود که در

طی عیوب شبکه سرعت باد ثابت می ماند. با این حال، این مدل به سیگنال ورودی سرعت باد اجازه می دهد در آغاز زمان راه اندازی شبیه سازی در هر مقداری تنظیم شود و همچنین در طی اجرای شبیه سازی تغییر کند. همچنین ممکن است از داده های سرعت باد واقعی در حوزه زمان استفاده شود. بنابراین توربین بادی در سرعت باد نامی به توان نامی، می رسد.

### ۳-۵-۱-۱ محاسبات نسبت سرعت رأس

نسبت سرعت رأس یا TSR که با  $\lambda$  مشخص می شود، نسبت سرعت خطی رأس تیغه به سرعت باد است [۵۶].

TSR نسبت توان در دسترس و قابل استخراج از باد با روتور توربین بادی را مشخص می کند. در یک توربین بادی را مشخص می کند. در یک توربین بادی با سرعت ثابت، سرعت رأس تیغه به خاطر اینکه روتور از طریق یک جعبه دنده به طور مستقیم به یک ژنراتور القایی وصل می شود، تقریباً ثابت نگه داشته می شود و ژنراتور القایی به صورت مستقیم به شبکه وصل می شود. TSR به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\lambda = \frac{\omega_{rotor} \cdot R_{rotor}}{V_{wind}} \quad (۱۶-۳)$$

که  $\omega_{rotor}$  سرعت زاویه ای روتور بر حسب  $[rad/s]$ ، و  $R_{rotor}$  شعاع روتور بر حسب  $[m]$  و  $V_{wind}$  سرعت باد بر حسب  $[m/s]$  می باشد.

### ۳-۵-۱-۲ محاسبات ضریب توان روتور ( $C_p$ )

TSR، همراه با زاویه گام تیغه (B) که توسط کاربر مشخص می شود، برای محاسبه ضریب توان روتور به کار می روند که با  $C_p$  مشخص شد. ضریب توان روتور معیاری از بازده روتور است و به صورت زیر مشخص می شود.

$$C_p = \frac{P_{rotor}}{P_{wind}} \quad (۱۷-۳)$$

مقدار ثابتی از  $\lambda$  وجود دارد که اگر برای تمامی سرعت های باد نگه داشته شوند، یک منحنی  $C_p$  بهینه استخراج می گردد و توان بهینه را از باد خواهیم داشت. توربین های بادی با سرعت متغیر با یک مکانیزم تغییر گام تجهیز شده اند تا زاویه ی گام تیغه را تنظیم کرده و مشخصه ی ضریب توان بهتری حاصل شود.

در شرایط عملی توربین بادی با سرعت ثابت که به طور مستقیم به شبکه وصل شده باشند، ناگزیر سرعت ژنراتور الکتریکی  $\omega_{gen}$ ، با فرکانس شبکه ثابت نگه داشته می‌شود، به نوبت، سرعت روتور  $\omega_m$ ، نیز ثابت است، چون به طور مستقیم از طریق جعبه دنده به ژنراتور وصل است. در نتیجه، سرعت رأس تیغه، به طور عملی تغییر ناپذیر است، با افزایش سرعت باد،  $C_p$  مربوط به توربین بادی سرعت ثابت که مستقیماً وصل شده است در ابتدا افزایش خواهد یافت، سپس به مقدار بهینه در سرعت باد نامی می‌رسد (سرعت باد به توان خروجی نامی) و سرانجام در سرعت‌های باد بالاتر کاهش می‌یابد. در مدل، یک دسته از منحنی نوعی  $C_p$  که در شکل زیر نشان داده شده‌اند برای محاسبه  $C_p$  استفاده می‌شوند [۵۷].

### ۳-۱-۵-۳ محاسبات گشتاور آیرودینامیک

گشتاور آیرودینامیک بهینه شده با تیغه‌های روتور در این زیر سیستم با استفاده از تئوری آورده شده در [۵۶] محاسبه می‌شود.

انرژی جنبشی  $E$  بر حسب  $(j)$  از هوای  $m$  به جرم  $(Kg)$  که با سرعت  $V_{wind}$  به  $(m/s)$

حرکت می‌کند به صورت زیر بدست می‌آید:

$$E = \frac{1}{2} m V_{wind}^2 \quad (18-3)$$

اگر چگالی هوا  $\rho$  بر حسب  $(Kg/m^3)$  باشد، دبی جرم در فضای  $A$  به صورت زیر است:

$$\dot{m} = \frac{1}{2} \rho A V_{wind}^2 \quad (19-3)$$

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_{wind}^3 \quad (20-3)$$

در ناحیه  $A$ ، ناحیه‌ای است که با تیغه‌های روتور جاروب می‌شود.

$$P_{rotor} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot \pi R_{rotor}^2 \cdot V_{wind}^3 \quad (21-3)$$

گشتاور آیرودینامیک  $(Nm)$  از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Gamma_{rotor} = \frac{P_{rotor}}{\omega_{rotor}} = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot \pi R_{rotor}^2 \cdot V_{wind}^3}{\omega_{rotor}} \quad (22-3)$$

### ۶-۳ بلوک مکانیکی

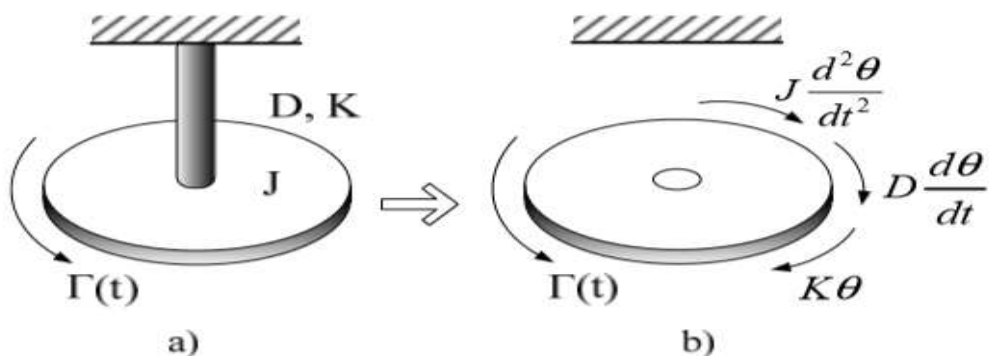
بلوک مکانیکی، یا سیستم انتقال نیروی روتور-ژنراتور توربین بادی، شامل شفت توربین بادی و شفت ژنراتور و یک گیربکس می‌باشد. ژنراتور توربین بادی و گیربکس توسط یک نمایش اینرسی یک یا چند جرمی مدل‌سازی می‌شوند.

#### ۳-۶-۱ مدل جعبه دنده و پیشرانه مکانیکی

یکی دیگر از اجزایی که باید در مدل‌سازی توربین بادی مورد توجه قرار گیرد، جعبه دنده<sup>۱</sup> می‌باشد. رایج‌ترین روش برای مدل‌سازی دینامیک توربین‌های بادی این است که روتور به صورت تعدادی جرم گسسته که به وسیله فنرهایی که به صورت ضریب سختی و ثابت میرایی تعریف می‌شوند و به هم اتصال دارند، تعریف شود. در اکثر مقالات ژنراتور القایی دو سو تغذیه با روتوری با مرتبه یک مدل‌سازی شده است [۵۸].

#### ۳-۶-۱-۱ مدل یک جرم

بلوک مکانیکی شامل میله روتور و یک جعبه دنده است. میله‌ها و جعبه دنده با یک نمایش اینرسی دو جرمی مدل می‌شوند. برای یک سیستم چرخشی مانند شکل ۱-۳ که شامل یک دیسک با ممان اینرسی  $J$  متصل به میله ثابت در یک انتها می‌باشد، فرض می‌کنیم که ضریب اصطکاک بین دو سطح (میرا کنندگی)  $D$  و ثابت پیچشی فنر (سختی فنر)  $K$  می‌باشد و  $\theta$  چرخش زاویه‌ای است [۵۹].



شکل ۱-۳: سیستم چرخشی با یک دیسک

گشتاور عمل کننده روی دیسک می‌تواند از دیاگرام بدون بدنه دیسک مطابق شکل ۱-۳ به

<sup>۱</sup> Gearbox

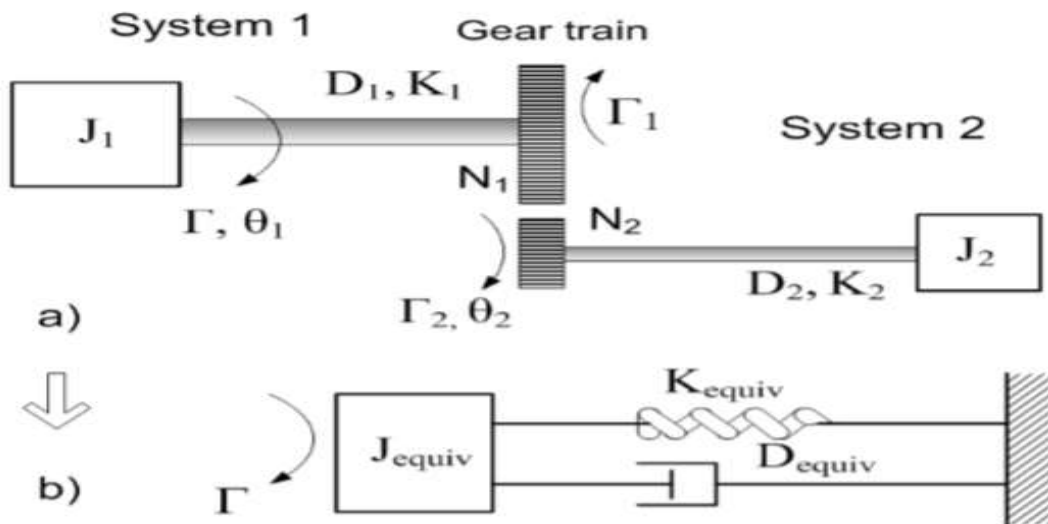


صورت زیر محاسبه شود.

$$\Gamma(t) = J \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} + D \frac{d\theta(t)}{dt} + K\theta(t) \quad (23-3)$$

### ۳-۶-۱-۲ مدل دو جرم:

یک سیستم چرخشی پیچیده‌تر، شامل دو عدد از چنین سیستم‌هایی، در شکل ۲-۳ نشان داده شده است که دو سیستم از طریق یک چرخ دنده جفت شده‌اند و  $\Gamma$  گشتاور خارجی اعمال شده به دیسک سیستم ۱ است،  $\Gamma_1$  و  $\Gamma_2$  گشتاورهای ارسالی،  $N_1$  و  $N_2$  تعداد دندانه‌های چرخ دنده ۱ و ۲ و  $J_1$  و  $J_2$ ،  $D_1$  و  $D_2$ ،  $K_1$  و  $K_2$  به ترتیب ممان اینرسی، میرایی و سختی سیستم‌های ۱ و ۲ هستند [۵۹].



شکل ۲-۳: سیستم چرخشی ترکیب شده با چرخ‌دنده

با اعمال (۲۳-۳) به سیستم شکل ۲-۳ a، معادله‌ی گشتاور  $J_1$  به صورت زیر است:

$$\Gamma(t) = J_1 \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} + D_1 \frac{d\theta_1}{dt} + K_1 \theta_1 \quad (24-3)$$

معادله‌ی گشتاور  $J_r$  نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$\Gamma(t) = J_r \frac{d^2 \theta_r}{dt^2} + D_r \frac{d\theta_r}{dt} + K_r \theta_r \quad (25-3)$$

از آنجایی که  $\theta_r = (N_1/N_r)\theta_1$  و  $\Gamma_1 = (N_1/N_r)\Gamma_r$  مقادیر سمت دنده ۱ به سمت ۲ قابل ارجاع هستند.

$$\Gamma_1 = \left(\frac{N_1}{N_r}\right) \left( J_r \frac{d^2 \theta_r}{dt^2} + D_r \frac{d\theta_r}{dt} + K_r \theta_r \right)$$

$$\Gamma_1 = \left(\frac{N_1}{N_r}\right) \left( J_r \left(\frac{N_1}{N_r}\right) \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} + D_r \left(\frac{N_1}{N_r}\right) \frac{d\theta_1}{dt} + K_r \left(\frac{N_1}{N_r}\right) \theta_1 \right) \quad (26-3)$$

$$\Gamma_1 = J_{ref1} \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} + D_{ref1} \frac{d\theta_1}{dt} + K_{ref1} \theta_1 \quad (27-3)$$

که  $J_{ref1}$ ،  $D_{ref1}$ ،  $K_{ref1}$  مقادیری هستند که در سمت چرخ دنده ۱ به دست آمده‌اند.

در این روابط  $N_1$  شعاع گیربکس سمت پره‌ها و  $N_r$  شعاع سمت ژنراتور و  $\theta_1$  چرخش زاویه‌ای سمت پره‌ها و  $\theta_r$  چرخش زاویه‌ای سمت ژنراتور و  $\Gamma_1$  گشتاور چرخش سمت پره‌ها و نیز  $\Gamma_r$  گشتاور چرخش سمت ژنراتور می‌باشد.

با جایگزینی (۲۷-۳) در (۲۴-۳) و دوباره مرتب‌سازی، برای گشتاور اعمالی، معادله‌ی (۲۸-۳) را به دست می‌آوریم.

$$\Gamma = J_{equiv} \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} + D_{equiv} \frac{d\theta_1}{dt} + K_{equiv} \theta_1 \quad (28-3)$$

که در رابطه فوق:

$$J_{equiv} = J_1 + J_r \left(\frac{N_1}{N_r}\right)^2 = J_1 + J_{ref1} \quad \text{الف (29-3)}$$

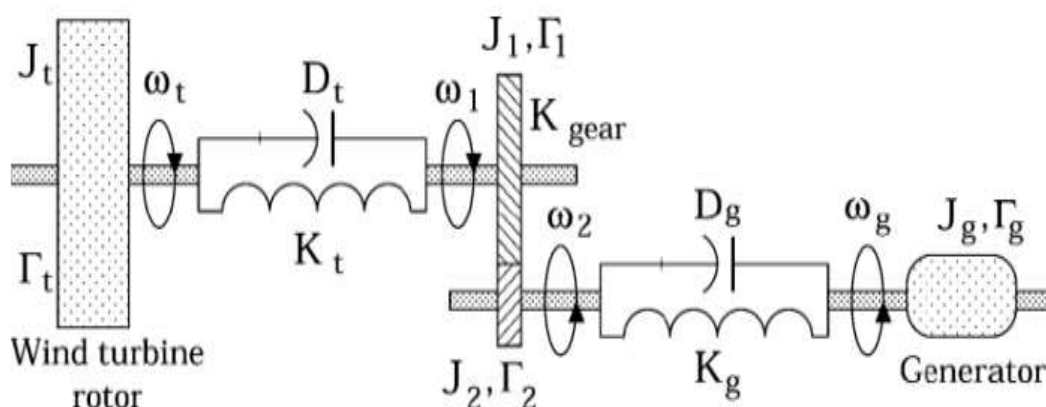
$$D_{equiv} = D_1 + D_r \left(\frac{N_1}{N_r}\right)^2 = D_1 + D_{ref1} \quad \text{ب (30-3)}$$

$$K_{equiv} = K_1 + K_r \left(\frac{N_1}{N_r}\right)^2 = K_1 + K_{ref1} \quad \text{پ (31-3)}$$

جایی که  $\Gamma_{\{ \}}$  گشتاورهای آیرودینامیک می‌باشد و  $\theta_{\{ \}}$  موقعیت زاویه‌ای و  $D_{\{ \}}$  و  $K_{\{ \}}$  نیز ضریب اصطکاک و سختی معادله می‌باشند.

### ۳-۱-۶-۳ مدل سه جرمی

برای آنالیز گذرا، اجزاء متحرکه را با مدل سه جرم نمایش می‌دهند شکل ۳-۳ جرم‌های دوار (روتور توربین، گیربکس و ژنراتور الکتریکی) توسط سه جرم قابل کشسان متصل به هم بیان شده است. فاکتور معادل میرایی و سختی در سمت روتور توربین بادی در نظر گرفته می‌شوند [۶۰-۶۱].



شکل ۳-۳: اجزای متحرک سه جرم مکانیکی، تبدیل انرژی باد [۶۲]

روابط دینامیکی در اینجا مشخص شده‌اند:

$$\Gamma_t = J_t \frac{d\omega_t}{dt} + D_t \omega_t + K_t (\theta_t - \theta_1) \quad (32-3)$$

$$\Gamma_r = J_r \frac{d\omega_r}{dt} + D_r \frac{d\omega_r}{dt} + K_g (\theta_r - \theta_g) \quad (33-3)$$

$$K_{equiv} = K_1 + K_r \left( \frac{N_1}{N_r} \right)^2 = K_1 + K_{ref1} \quad (34-3)$$

$$-\Gamma_g = J_g \frac{d\omega_g}{dt} + D_g \omega_g + K_g (\theta_g - \theta_r) \quad (35-3)$$

که در این رابطه  $\Gamma_1$  گشتاور ورودی به گیربکس،  $\Gamma_r = \left( \frac{\Gamma_1}{K_{gear}} \right)$  گشتاور خروجی گیربکس

و  $\theta_{\{ \}}$  موقعیت زاویه‌ای و  $D_{\{ \}}$  و  $K_{\{ \}}$  نیز ضریب اصطکاک و سختی معادله می‌باشند همچنین  $\omega_{\{ \}}$

سرعت زاویه‌ای و  $\omega_r = K_{gear} \omega_1$  نرخ گیربکس می‌باشد، همچنین  $\omega_t = \dot{\theta}_t$  ،  $\omega_1 = \dot{\theta}_1$  ،

$\omega_g = \dot{\theta}_g$  و  $\omega_r = \dot{\theta}_r$  .

### ۷-۳ نمایش فضای حالت بلوک مکانیکی:

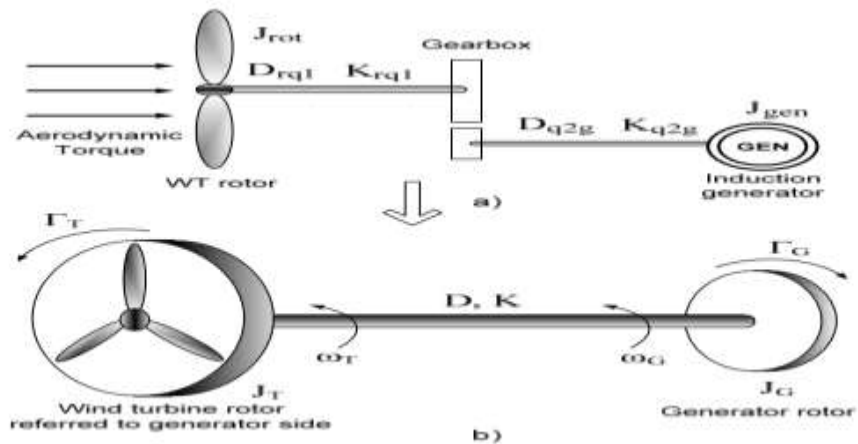
این بلوک شامل: پره‌ها، محور سرعت پایین، گیربکس، محور سرعت بالا و روتور ژنراتور الکتریکی می‌باشد لذا خواهیم داشت [۶۳-۶۴].

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_{\omega t} \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{\theta}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{D_{\omega t}}{2H_{\omega t}} & \cdot & -\frac{K_s}{2H_{\omega t}} \\ -\frac{D_g}{2H_g} & \cdot & -\frac{K_s}{2H_g} \\ \omega_b & -\omega_b & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{\omega t} \\ \omega_g \\ \theta_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{2H_{\omega t}} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \frac{1}{2H_g} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{\omega t} \\ \pm T_e \\ \cdot \end{pmatrix} \quad (3-36)$$

که در آن  $D_{\omega t}$  ضریب میرایی روتور توربین بادی،  $D_g$  ضریب میرایی روتور ژنراتور القایی،  $2H_{\omega t}$  ثابت میرایی روتور توربین بادی و  $2H_g$  ثابت میرایی روتور ژنراتور القایی و نیز  $\omega_{\omega t}$  سرعت مکانیکی توربین بادی،  $T$  دما و  $K_s$  سفتی شفت می‌باشند.

### ۸-۳ مدل‌سازی سیستم متحرکه توربین بادی

ساختار توربین بادی ساده شده نشان داده شده در شکل ۴-۳ a مشابه با سیستم شکل ۲-۳ a است. بنابراین پیشرانه توربین بادی می‌تواند به شکل یک سیستم دو جرمی جفت شده با چرخ دنده مدل شود. کمیت‌های روی سمت روتور توربین بادی جعبه دنده می‌تواند به سمت ژنراتور برده شوند. این موجب حذف نسبت دنده و نمایش دو جرمی شکل ۲-۳ b می‌شود. صرف‌نظر از اثر ممان اینرسی جعبه دنده توجیه پذیر است، چون ممان اینرسی روتور توربین بادی بسیار بزرگ است. توجه شود که ممان اینرسی (گشتاور ماند) گیربکس در مقایسه با ممان اینرسی روتور توربین بادی خیلی کوچک است، و ضریب اصطکاک و سختی به نظر قابل اغماض می‌رسند.



شکل ۴-۳: مدل‌سازی سیستم متحرکه توربین بادی [۶۵]

حال می‌توان توصیف روابط گشتاور رفتار مکانیکی سیستم توربین بادی را بر پایه مدل دو جرم نوشت، توجه کنید که گشتاور آیرودینامیکی روتور توربین بادی توسط گشتاور الکترومکانیکی ناشی از ژنراتور الکتریکی اتصال مستقیم خنثی می‌شود.

رابطه گشتاور با همه کمیت‌های سمت روتور به جای قالب ژنراتور بیان می‌شوند. داریم:

$$J_T \ddot{\theta}_T + D(\omega_T - \omega_G) + K(\theta_T - \theta_G) = \Gamma_T \quad (37-3)$$

$$J_G \ddot{\theta}_G + D(\omega_G - \omega_T) + K(\theta_G - \theta_T) = -\Gamma_G \quad (38-3)$$

سرعت‌ها و گشتاورهای ژنراتور و روتور توربین بادی برای هر پله زمان شبیه‌سازی توسط حل دو معادله بالا با استفاده از فضای حالت، بیان می‌شوند. معادلات حالت به صورت زیر پیاده‌سازی می‌گردد:

$$\frac{d}{dt}(\theta_G - \theta_T) = (\omega_T - \omega_G) \quad (39-3)$$

$$\dot{\omega}_T = \left(\frac{1}{J_T}\right)[\Gamma_T - D(\omega_T - \omega_G) - K(\theta_T - \theta_G)] \quad (40-3)$$

$$\dot{\omega}_G = \left(\frac{1}{J_G}\right)[D(\omega_T - \omega_G) + K(\theta_T - \theta_G) - \Gamma_G] \quad (41-3)$$

که  $J_T$  و  $J_G$  ممان اینرسی روتور و ژنراتور توربین بادی،  $\Gamma_T$  و  $\Gamma_G$  گشتاورهای آیرودینامیک توربین بادی و گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور الکتریکی می‌باشد،  $\omega_T$  و  $\omega_G$  سرعت‌های زاویه‌ای روتور و ژنراتور توربین بادی،  $\theta_T$  و  $\theta_G$  موقعیت زاویه‌ای روتور و ژنراتور توربین بادی،  $D$  میرایی معادله و  $K$  سختی معادله می‌باشند.

### ۹-۳ ماشین‌های القایی

ماشین‌های القایی صد سال قبل اختراع شده و تقریباً به خوبی مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. در اثر ولتاژهای اعمال شده به سیم‌پیچی سه فازه استاتور جریان‌های سه فاز حاصل می‌شوند که میدان گردان را ایجاد می‌کنند. این میدان ولتاژهایی را (و بنابراین جریان‌هایی را) در مدار روتور القاء می‌کند فعل‌وانفعال میان میدان ایجاد شده در استاتور و جریان‌های القاء شده در روتور گشتاور را بوجود می‌آورد.

### ۳ ۹ ۱ تاریخچه مدل دو محوری ماشین القایی

مدل ریاضی ماشین القایی برحسب کمیت‌های فازی از معادلات دیفرانسیل خطی تشکیل

یافته است که با فرض سرعت ثابت روتور ضرایب آن‌ها اندوکتانس‌های پریودیک متغیر با زمان می‌باشد. درک طبیعت رفتار ماشین در رابطه با اندوکتانس‌های متغیر بسیار مشکل است. در اواخر سال ۱۹۲۰، پارک شیوه جدیدی برای آنالیز ماشین الکتریکی پیشنهاد کرد. او متغیرهای استاتور ماشین سنکرون را به دستگاه مرجعی که روی روتور قرار دارد، تبدیل کرد. تبدیل پارک انقلابی بزرگ در آنالیز ماشین الکتریکی بوجود آورد و دارای خاصیت منحصر به فردی است که باعث حذف اندوکتانس‌های متغیر با زمان در معادلات ولتاژ ماشین سنکرون می‌شود که این تغییرات از حرکت نسبی و تغییر رلوکتانس مغناطیسی بوجود می‌آیند. بنابراین از آن زمان یک ساده‌سازی بزرگی در توضیح ریاضی ماشین القایی بدست آمد.

بعدها استانلی، کران و بررتن کار پارک را برای آنالیز ماشین القایی توسعه دادند. آن‌ها سه دستگاه مرجع متفاوت را به کار بردند:

۱. دستگاه مرجع ساکن: دستگاه مرجعی که ساکن است.
۲. دستگاه مرجع سنکرون: دستگاه مرجعی که با سرعت سنکرون می‌چرخد.
۳. دستگاه مرجع روتور: دستگاه مرجعی که روی روتور قرار دارد و با سرعت آن می‌چرخد.

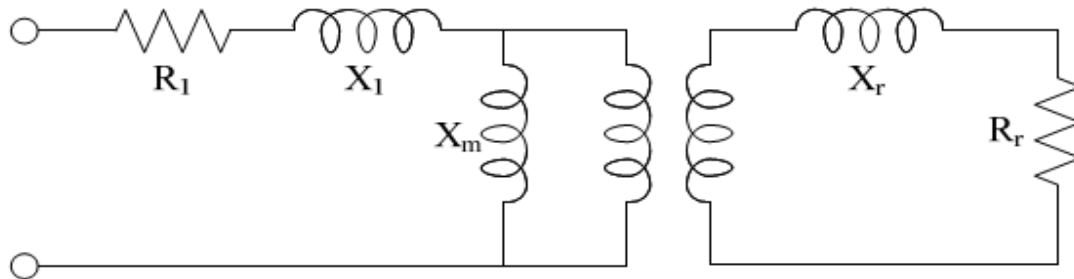
معنی فیزیکی تبدیل پارک<sup>۱</sup> و سایر تبدیل‌های ماتریسی حقیقی، تعریف یک مجموعه جدیدی از متغیرهای استاتور و روتور  $dqo$  برحسب متغیرهای سیم بندی واقعی  $(abc)$  است. کمیت‌های جدید از تصویر متغیرهای واقعی روی مجموعه دو محوری جدید یعنی  $d, q$  بدست می‌آیند و مؤلفه صفر توزیع نیروی محرکه مغناطیسی برآیند را در سرتاسر فاصله هوایی یکسان نگه می‌دارد. از نظر ریاضی، تبدیل پارک فقط یک تبدیل خطی است که ماتریس اندوکتانس استاتور و روتور را قطری می‌سازد و همه اندوکتانس‌ها را ثابت و بدون تغییر می‌کند بنابراین در آنالیز گذرای ماشین‌های سنکرون و القایی اغلب از معادلات تبدیل یافته استفاده می‌شود.

### ۳-۱۰ مدار معادل ماشین القایی

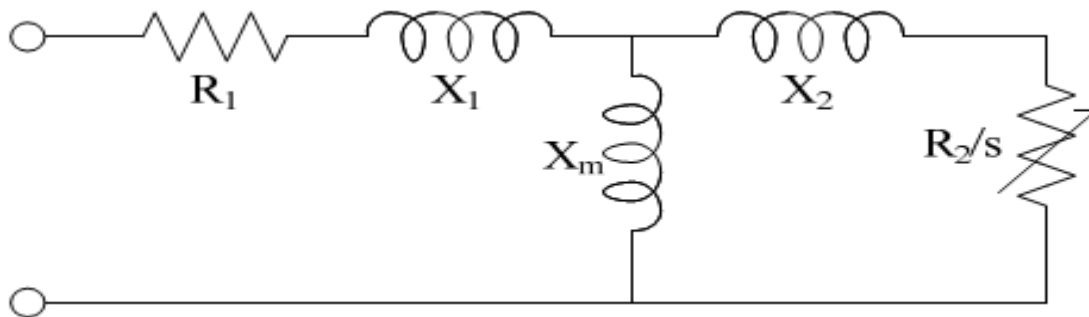
مدار معادل حالت دائمی یک ماشین القایی که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است که بسیار مشابه با مدار معادل ترانسفورماتور است. مدار معادل تنها برای یک فاز نشان داده شده است.  $R_1$  مقاومت اهمی سیم‌پیچی استاتور و  $X_1$  راکتانس پراکندگی می‌باشد.  $X_m$  راکتانس سمت مغناطیس‌کنندگی است. مقاومت روتور  $R_r$  و راکتانس روتور  $X_r$  می‌توانند به سمت استاتور ارجاع داده شوند (با

<sup>۱</sup> Park

مجذور نسبت دور ترانس ایده آل) و  $R_r$  و  $X_r$  نمایانگر مقادیر ارجاع داده شده‌اند. این امر باعث حذف ترانسفورماتور ایده آل می‌شود. مدار حاصله در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. در اینجا (S) نمایانگر لغزش است. سیم‌پیچی روتور اتصال کوتاه شده است، یعنی مقاومت خارجی وجود ندارد.



شکل ۳-۵: مدار معادل ماشین القایی



شکل ۳-۶: مدار معادل با تمامی مقادیر ارجاع یافته به استاتور

بر اساس مدار معادل می‌توانیم مدل معادل تونن را بدست آوریم که از آن معادلات زیر برای توان فاصله هوایی و گشتاور قابل دستیابی اند [۶۶].

$$P_{airgap} = 3V_{th}^2 = \frac{R_r}{S} \frac{1}{\left(R_{th} + \frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_{th} + X_r)^2} \quad (42-3)$$

$$\Gamma = \frac{P_{airgap}}{\omega_s} = 3V_{th}^2 = \frac{R_r}{\omega_s S} \frac{1}{\left(R_{th} + \frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_{th} + X_r)^2} \quad (43-3)$$

$$V_{th} = \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (44-3)$$

$$R_{th} = Re(Z_{th}) = Re\left(\frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)}\right) \quad (45-3)$$

$$X_{th} = Im(Z_{th}) = Im\left(\frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)}\right) \quad (46-3)$$

در اینجا  $V_{th}$  ولتاژ معادل تونن در ترمینال‌های مدار معادل  $R_{th}$  و  $X_{th}$  مقاومت و راکتانس معادل تونن هستند. لغزش (S) از ۱ در سرعت صفر تا صفر در سرعت سنکرون تغییر می‌کند.

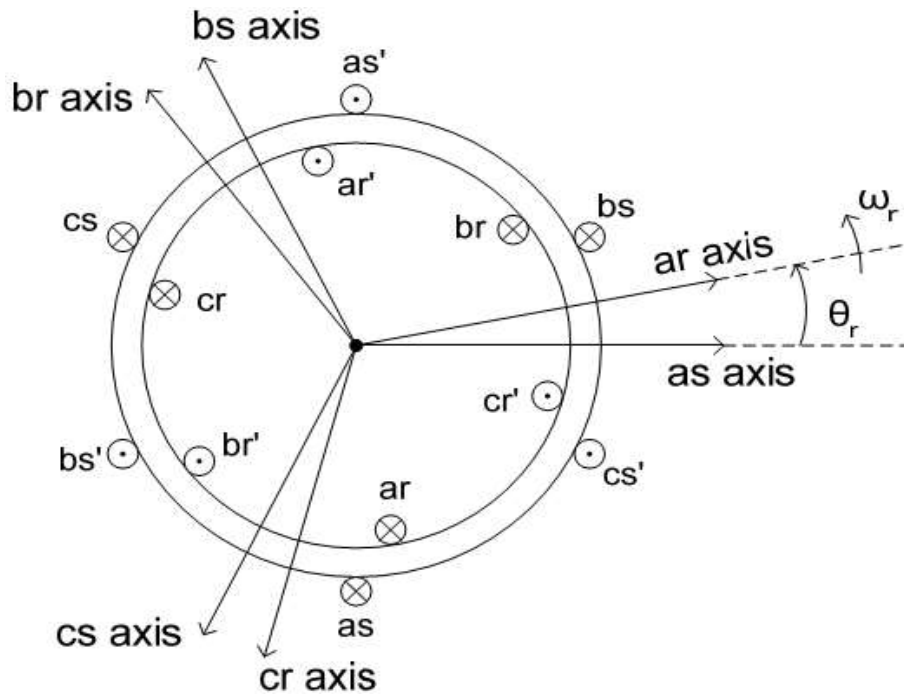
### ۱۱-۳ مدل سازی ژنراتور القایی تغذیه دوگانه (DFIG)

در این بخش، طراحی سیم پیچی، مدار معادل و مبانی عملکرد ماشین روتور سیم پیچی شده، شرح داده شده معادلات مربوطه مورد مطالعه قرار می گیرد [۶۷-۶۸]. معادلات نشان می دهند که در دستگاه مرجع ثابت abc، پارامترهای ماشین مثل اندوکتانس با زمان تغییر می کنند مدار معادل در دستگاه مرجع ثابت abc با استفاده از تبدیل پارک به مدار معادل دیگری در دستگاه مرجع گردان  $dq_0$  تبدیل می شود تا پارامترهای ماشین مستقل از زمان شوند. در دستگاه مرجع گردان  $dq_0$ ، محورهای q و d، ۹۰ درجه با هم اختلاف فاز دارند و بنابراین مجزا هستند (تصویر یکی بر دیگری صفر است). نشان داده می دهد که محور q برای کنترل توان اکتیو و محور d برای کنترل توان راکتیو به کار می رود.

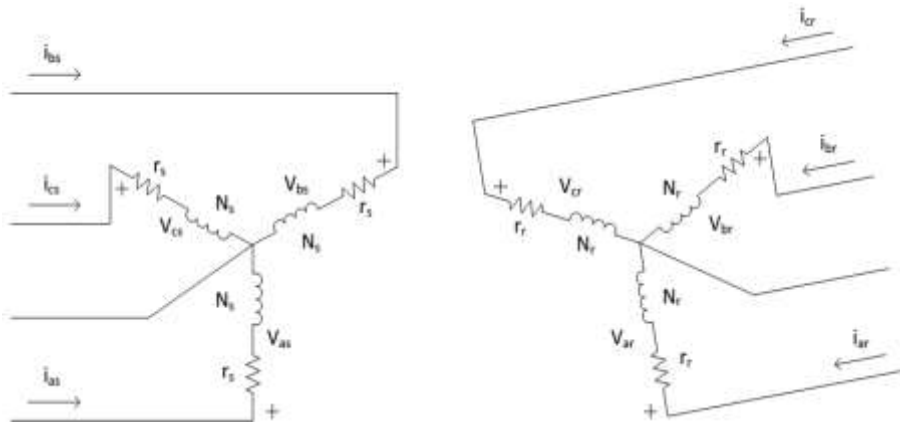
دیگرام سیم پیچی ماشین القایی متقارن با اتصال سه فاز در شکل ۷-۳ و شکل ۸-۳ نشان داده شده است. سیم پیچی استاتور با تعداد دور  $N_s$  و مقاومت  $r_s$  و سیم پیچی روتور نیز با تعداد دور  $N_r$  و مقاومت  $r_r$  نمایش داده می شود فاصله هوایی نیز یکنواخت بوده و سیم پیچی تقریباً دارای توزیع سینوسی می باشد.

در شکل ۷-۳ جهت سیم پیچی هر یک از فازها با نماد  $\otimes$  و  $\odot$  نمایش داده شده است. یک سمت سیم پیچ که با نماد  $\otimes$  نمایش داده می شود نمایانگر این است که جهت مثبت جریان در طول استاتور (به داخل صفحه) است. سمت دیگر آن سیم پیچ با علامت  $\odot$  نشان داده می شود و نمایانگر این است که جهت مثبت جریان به بیرون صفحه است. محورهای  $a_s$ ،  $b_s$  و  $c_s$  نمایانگر جهت مثبت میدان مغناطیسی تولید شده در اثر جاری شدن جریانها در سیم پیچهای فازهای a، b و c هستند. این مسیرهای میدان با استفاده از قانون دست راست روی سیم پیچی یک فاز بدست می آیند. مشابهاً محورهای  $a_r$ ،  $b_r$  و  $c_r$  در مورد سیم پیچهای روتور به کار می رود. این محورهای روتور به روتور چسبیده اند و با سرعت زاویه ای  $\omega_r$  می چرخند. موقعیت زاویه ای روتور با توجه به محور مثبت  $a_s$ ،  $\theta_r$  است.





شکل ۳-۷: نمایش شماتیک سیم‌پیچ



شکل ۳-۸: مدار معادل ماشین القایی سه فاز

در دستگاه مرجع ثابت  $abc$ ، روابط میان ولتاژها، جریان‌ها و شار پیوندی هر یک از فازها برای ای ماشین به صورت زیر می‌باشد.

معادلات ولتاژ استاتور:

$$V_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad (47-3)$$

$$V_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \quad (48-3)$$

$$V_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \quad (49-3)$$

معادلات ولتاژ روتور (ارجاع داده شده به استاتور):

$$V'_{ar} = r'_r i'_{ar} + \frac{d\lambda'_{ar}}{dt} \quad (50-3)$$

$$V'_{br} = r'_r i'_{br} + \frac{d\lambda'_{br}}{dt} \quad (51-3)$$

$$V'_{cr} = r'_r i'_{cr} + \frac{d\lambda'_{cr}}{dt} \quad (52-3)$$

که  $\lambda$  شار دور مغناطیسی را نشان می‌دهد، S و I نمایش دهنده‌ی متغیرها و پارامترهای مربوط به استاتور و روتور هستند و نماد پریم ( $'$ ) نمایانگر متغیرها و پارامترهای ارجاع داده شده به سمت استاتور می‌باشد.

پس از بازنویسی معادلات ولتاژ روتور و استاتور به فرم ماتریسی خواهیم داشت:

$$\overline{V_{abcs}} = \overline{r_s l_{abcs}} + p \overline{\lambda_{abcs}} \quad (53-3)$$

$$\overline{V'_{abcr}} = \overline{r'_r l'_{abcr}} + p \overline{\lambda'_{abcr}} \quad (54-3)$$

که  $p$  نمایانگر عملگر مشتق است. شار مغناطیسی از معادلات (53-3) و (54-3) به شکل زیر

است:

$$\overline{\lambda_{abcs}} = \overline{L_s l_{abcs}} + \overline{L'_{sr} l'_{abcr}} \quad (55-3)$$

$$\overline{\lambda'_{abcr}} = \overline{L'_{sr} l'_{abcs}} + \overline{L_r l'_{abcr}} \quad (56-3)$$

اندوکتانس‌های سیم‌پیچی‌ها به شکل زیر می‌باشند:

$$\bar{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{\sqrt{3}}L_{ms} & -\frac{1}{\sqrt{3}}L_{ms} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{\sqrt{3}}L_{ms} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}}L_{ms} & -\frac{1}{\sqrt{3}}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (57-3)$$

$$\bar{L}'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{\sqrt{3}}L_{ms} & -\frac{1}{\sqrt{3}}L_{ms} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{\sqrt{3}}L_{ms} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}}L_{ms} & -\frac{1}{\sqrt{3}}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (58-3)$$

$$\bar{L}'_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (59-3)$$

در معادلات فوق  $L_{ms}$  و  $L_{ls}$  اندوکتانس‌های ناشتی و مغناطیس‌کنندگی سیم‌پیچی استاتور

هستند.  $L'_{lr}$  اندوکتانس ناشتی سیم‌پیچ روتور ارجاع داده شده به سمت استاتور است. ترکیب (۳-۵۳)

الی (۳-۵۶) نتیجه می‌دهد:

$$\overline{V_{abcs}} = (\bar{r}_s + p\bar{L}_s)\overline{l_{abcs}} + p\overline{L'_{sr}l'_{abcr}} \quad (60-3)$$

$$\overline{V'_{abcr}} = p\overline{L'_{sr}l_{abcs}} + (\bar{r}'_r + p\bar{L}'_r)\overline{l'_{abcr}} \quad (61-3)$$

اندوکتانس‌ها، ولتاژها و مقادیر جریانی در معادلات (۳-۶۰) و (۳-۶۱) در دستگاه مرجع ثابت

abc به دست آمده‌اند با انتقال به دستگاه مرجع گردان مناسب از حالت متغیر زمانی خارج می‌شوند،

یعنی وارد دستگاه  $dq^0$  می‌شوند و در نتیجه بسیار راحت‌تر تحلیل و مدل‌سازی می‌شوند. با استفاده از

تبدیل پارک معادلات (۳-۶۰) و (۳-۶۱) به شکل زیر در می‌آیند:

$$\overline{V_{dq \cdot s}} = \bar{r}_s \overline{l_{dq \cdot s}} + \omega \lambda_{dqs} + p \overline{\lambda_{dq \cdot s}} \quad (62-3)$$

$$\overline{V'_{dq \cdot r}} = \bar{r}'_r \overline{l'_{dq \cdot r}} + (\omega - \omega_r) \overline{\lambda'_{dqr}} + p \overline{\lambda'_{dq \cdot r}} \quad (63-3)$$

که  $\omega_r$  و  $\omega$  سرعت‌های زاویه‌ای دستگاه مرجع  $dq^0$  و روتور می‌باشند و با واحد  $rad/s$

معرفی می‌شوند. معادلات (۳-۶۲) و (۳-۶۳) به صورت زیر قابل بسط هستند:

معادلات ولتاژ استاتور:

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (64-3)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (65-3)$$

$$V_{.s} = r_s i_{.s} + p \lambda_{.s} \quad (66-3)$$

معادلات ولتاژ روتور:

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \quad (67-3)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \quad (68-3)$$

$$V'_{.r} = r'_r i'_{.r} + p \lambda'_{.r} \quad (69-3)$$

به همین ترتیب شار دور مغناطیسی در دستگاه گردان  $dq^0$  به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

معادلات شار دور در استاتور:

$$\lambda_{qs} = (L_{ls} + L_M) i_{qs} + L_M i'_{qr} \quad (70-3)$$

$$\lambda_{ds} = (L_{ls} + L_M) i_{ds} + L_M i'_{dr} \quad (71-3)$$

$$\lambda_{.s} = L_{.s} i_{.s} \quad (72-3)$$

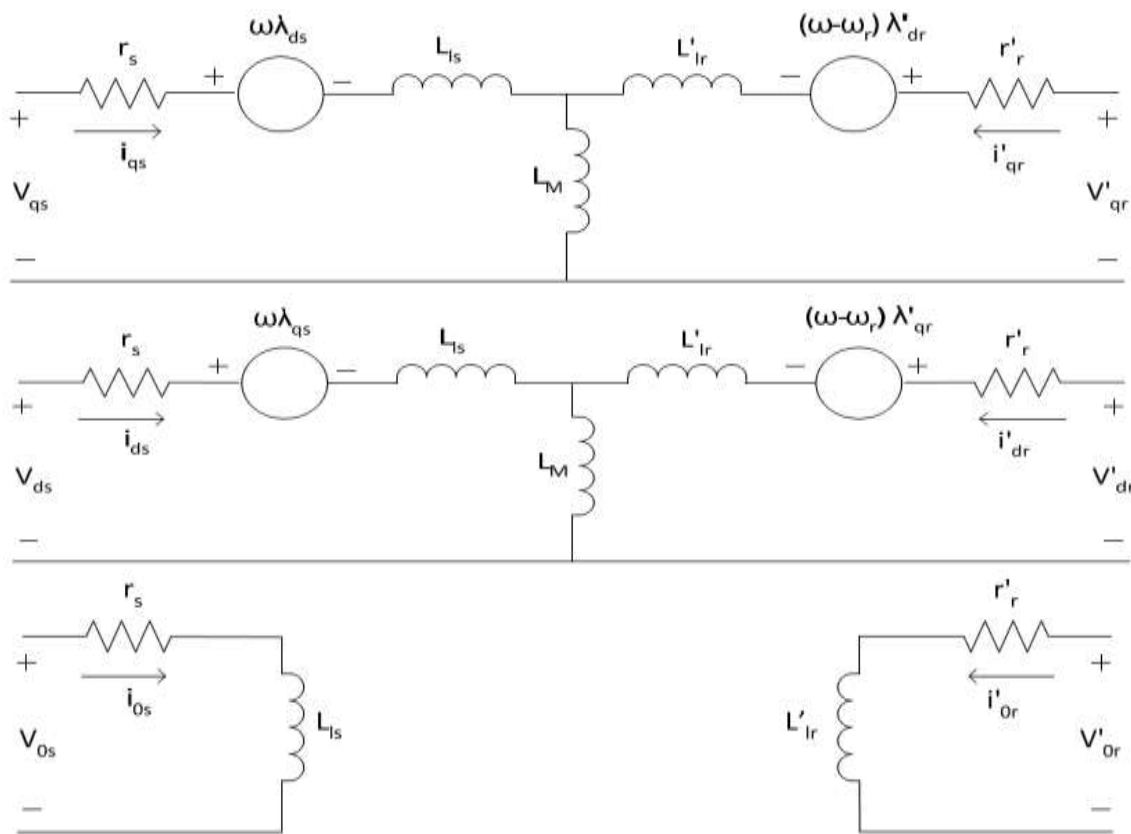
معادلات شار دور در روتور:

$$\lambda'_{qr} = L_M i_{qs} + (L'_{lr} + L_M) i'_{qr} \quad (73-3)$$

$$\lambda'_{dr} = L_M i_{ds} + (L'_{lr} + L_M) i'_{dr} \quad (74-3)$$

$$\lambda'_{.r} = L'_{lr} i'_{.r} \quad (75-3)$$

که  $L_M = \frac{3}{4} L_{ms}$  است. توجه کنید که دستگاه مرجع با سرعت  $\omega$  می‌چرخد. معادلات (64-3) الی (75-3) می‌توانند به صورت مدارهای معادل نشان داده شده در شکل شکل ۹-۳ نشان داده شوند.



شکل ۳-۹: مدارهای معادل برای یک چارچوب مرجع dq۰ برای ماشین القایی سه فاز

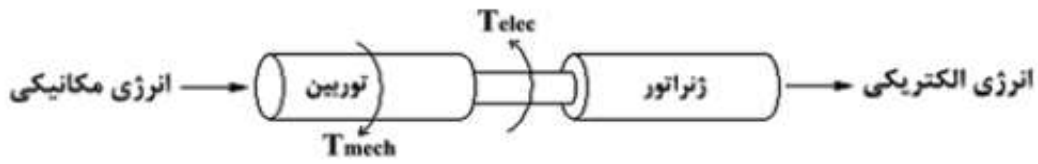
گشتاور الکترومغناطیسی تولید شده در سیم‌پیچی روتور در معادله (۳-۷۶) بدست آمده است. معادله‌ی (۳-۷۶) نشان می‌دهد که گشتاور الکترومغناطیسی، بوسیله جریان و شار مغناطیسی محورهای q و d قابل محاسبه است که نشان دهنده‌ی عملی شدن کنترل مجزای توان خروجی اکتیو و راکتیو یک DFIG هستند.

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{\omega_r} L_m (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) [Nm] \quad (۳-۷۶)$$

$$P_e = -\frac{3}{2} \frac{L_m \omega_r}{L_s} (\lambda_{ds} i_{qr} - \lambda_{qs} i_{dr}) [Nm] \quad (۳-۷۷)$$

### ۳-۱۲ اصول کلی پایداری در (DFIG)

توزیع بهینه برق بدون کنترل و برنامه‌ریزی صحیح نیروگاه‌های تولید بی‌فایده می‌باشد. یک مولد برق که محور آن چرخانده می‌شود را می‌توان به صورت جرم بزرگی که دو گشتاور با علامت‌های مختلف بر چرخش آن اثر می‌کنند در نظر گرفت. شکل ۳-۱۰ رفتار گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی را در یک واحد مولد برق نشان می‌دهد.



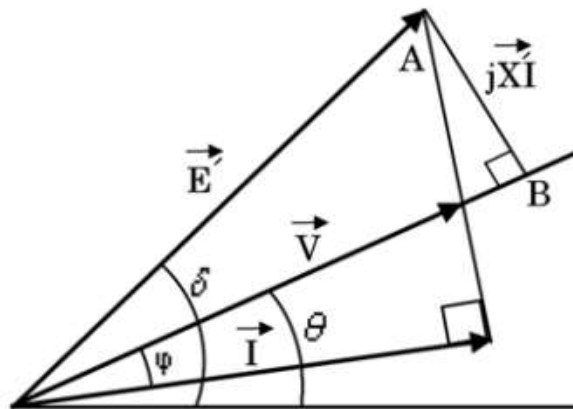
شکل ۳-۱۰: گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی در یک واحد مولد برق

با توجه به شکل ۳-۱۰ ارتباط بین گشتاورهای مکانیکی و الکتریکی و تغییرات سرعت به صورت زیر بیان می‌شود [۶۹]:

$$T_{mec} - T_{elec} = 2H \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{\omega}{\omega_s} \right) \quad (3-78)$$

که  $\omega_s$  سرعت سنکرون استاتور (سرعت مبنا) و  $H$  اینرسی کل می‌باشد. با توجه به رابطه فوق، اگر بتوان جمله سمت راست رابطه (۳-۷۸) تغییرات سرعت روتور را صفر نمود، مقدار  $T_{elec}$  با  $T_{mec}$  برابر می‌گردد. این تساوی به معنی رسیدن مجدد به نقطه تعادل و برقراری پایداری دینامیکی خواهد بود. بنابراین می‌توان قید مورد نظر را برای افزایش پایداری دینامیکی به حداقل رساندن مقدار  $\frac{d}{dt}(\omega)$  تلقی نمود. در ادامه، نحوه کنترل تغییرات سرعت در یک (DFIG) بیان می‌گردد.

شکل ۳-۱۱ نمودار فازوری ساده شده ژنراتور القایی دو تغذیه متصل به شین بی‌نهایت را نشان می‌دهد که در آن از مقاومت استاتور صرف‌نظر شده است. در این شکل،  $\vec{E}'$  نشان دهنده ولتاژ داخلی پشت سر راکتانس گذرا ( $\vec{E}' = E' \cdot e^{j\delta}$ )، ولتاژ استاتور ( $\vec{V} = V \cdot e^{j\theta}$ )، جریان استاتور و  $\varphi$  زاویه بین بردار ولتاژ و بردار جریان استاتور (DFIG) می‌باشد.



شکل ۳-۱۱: دیاگرام فازوری یک (DFIG) با ولتاژ استاتور  $\vec{V}$

با توجه به شکل ۱۱-۳، رابطه (۷۸-۳) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود [۶۹]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M} \left( P_m \cdot \frac{\omega_s}{\omega} - \frac{V \cdot E'}{X'} \cdot \sin(\delta - \theta) \right) \quad (79-3)$$

که  $\omega_s$  سرعت سنکرون،  $\omega$  سرعت روتور و  $M$  (نشان دهنده اینرسی ماشین) برابر با  $\frac{2H}{\omega_s}$  می‌باشد. با توجه به رابطه (۷۹-۳)، می‌توان با تغییر زاویه  $\delta$  (زاویه ولتاژ داخلی استاتور)، تغییرات سرعت را به منظور افزایش پایداری دینامیکی به حداقل رساند.

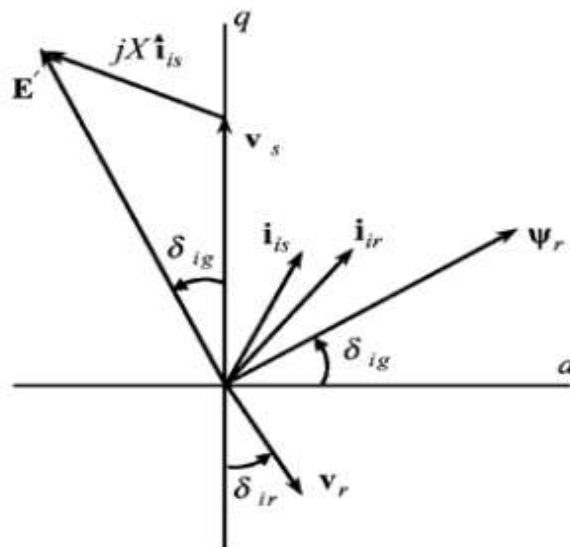
### ۳ ۱۲ ۱ چگونگی استفاده از بردار شار روتور در افزایش پایداری دینامیکی

شکل ۱۲-۳ دیگرام برداری عملکرد (DFIG) را با فازور جریان‌های روتور و استاتور، ولتاژ استاتور و روتور نشان می‌دهد. در ژنراتورهای (DFIG) شار روتور به جریان‌های روتور و استاتور بستگی دارد، اما می‌توان رابطه بردار شار روتور با بردار را به صورت رابطه (۸۰-۳) نوشت [۷۰]:

$$\vec{\Psi}_r = -j \frac{L_{rr}}{S\omega_s L_m} \vec{V}_r \quad (80-3)$$

که  $L_{rr}$  اندوکتانس پراکندگی روتور و  $L_m$  اندوکتانس مغناطیسی (DFIG) می‌باشد. از طرفی، در حالت ماندگار بین متغیر  $\vec{E}'$  و بردار ولتاژ روتور  $\vec{V}_r$  رابطه (۸۱-۳) برقرار می‌باشد [۷۱]:

$$\vec{V}_r \approx s\vec{E}' \quad (81-3)$$



شکل ۱۲-۳: دیگرام برداری حالت کاری (DFIG)

ملاحظه می‌شود که بردار ولتاژ روتور، رابطه مستقیمی با بردار ولتاژ داخلی استاتور دارد. این نتیجه از شکل ۳-۱۲ نیز قابل مشاهده می‌باشد. از آنجایی که اندازه ولتاژ داخلی  $|E'|$ ، تغییرات بسیار کمی دارد، لذا اندازه ولتاژ روتور تقریباً متناسب با مقدار لغزش می‌باشد. طبق رابطه (۳-۸۱) همیشه بردارهای این دو پارامتر (چه در حالت موتوری و چه در حالت ژنراتوری) در یک راستا قرار می‌گیرند به طوری که تغییر زاویه ولتاژ روتور باعث تغییر زاویه بردار ولتاژ داخلی استاتور می‌گردد. با توجه به این که در رابطه (۳-۷۹) افزایش زاویه بردار  $\vec{E}'$  سبب افزایش پایداری دینامیکی می‌گردد، طبق رابطه (۳-۸۱) این تغییر می‌تواند توسط تغییر زاویه بردار ولتاژ روتور که رابطه مستقیمی با  $\vec{E}'$  دارد انجام شود. حال می‌توان بردار  $\vec{V}_r$  را با بردار دیگری جمع نماییم تا حاصل، برداری جدید با اندازه قبلی ولی زاویه مورد نظر ما باشد.

### ۳-۱۳ بلوک الکتریکی

مهم‌ترین جزء بلوک الکتریکی مولد القائی می‌باشد. برای رسیدن به مدل یک توربین بادی سرعت ثابت، مدل‌سازی یک ماشین روتور سیم بندی شده کافی است. به هر حال برای مدل‌سازی یک توربین بادی سرعت متغیر، نیز مدل‌سازی ماشین القائی wound rotor احتیاج می‌باشد. بسیاری از بسته‌های نرم افزاری برای دو نوع ماشین به سهولت در دسترس قرار دارند.

### ۳-۱۴ بلوک کنترلی

تا زمانی که توربین یک سیستم سرعت ثابت اتصال مستقیم است، احتیاج به کنترل گام زاویه و کنترل قدرت نمی‌باشد. این بلوک برای مدل‌سازی‌های سیستم‌های توربین بادی سرعت متغیر با کنترل کننده یا یک دستگاه کنترل کننده جبران واکنشی برای مواجهه با تقاضای قدرت واکنشی توربین بادی با استفاده از تکنیک‌های متفاوت می‌باشد.



## فصل ۴ کنترل مقاوم $H_\infty$

## ۴-۱ مقدمه

در طبیعت سیستم‌های گوناگونی وجود دارد که دارای ورودی‌هایی برای تحول در سیستم و خروجی‌هایی می‌باشند:

تعریف ۱-۲: به هر سیستمی که دارای یک ورودی و یک خروجی باشد سیستم یک ورودی-یک خروجی (*SISO*)<sup>۱</sup> می‌گویند.

تعریف ۲-۲: به هر سیستمی که دارای چند ورودی و دارای چند خروجی باشد سیستم چند-متغیره (*MIMO*)<sup>۲</sup> گویند.

تعریف ۳-۲: به هر سیستمی که دارای یک ورودی و چند خروجی باشد سیستم چند متغیره (*SIMO*)<sup>۳</sup> گویند.

تعریف ۴-۲: به هر سیستمی که دارای چند ورودی و یک خروجی باشد سیستم چند متغیره (*MISO*)<sup>۴</sup> گویند

به عنوان یک تعریف جامع از کنترل مقاوم می‌توان گفت: کنترل مقاوم عبارت است از کنترل سیستم‌های غیرقطعی (یعنی سیستم‌هایی با دینامیک غیرقطعی و یا در معرض سیگنال‌های اغتشاشی نامعین) به طوری که در وهله اول سیستم حلقه بسته پایدار مانده و در مرتبه بعدی عملکرد آن را در محدوده مناسبی تضمین نماید. طبیعی است که با وجود یک معیار برای فرموله کردن این تعریف کیفی برای بررسی دقیق‌تر میزان مقاومت سیستم حلقه بسته الزامی است و این معیار در روش‌های مختلفی که عملاً وارد مبحث کنترل مقاوم می‌شوند بسته به نوع برخورد با مسئله فرموله می‌شود.

لفظ کنترل مقاوم به طور صحیح از اوایل دهه هشتاد وارد ادبیات کنترلی گردید و با توجه به نیازهای عملی به وجود یک کنترلر مقاوم برای سیستم‌های صنعتی آن‌چنان به سرعت پیشرفت کرد که هم اکنون طراحی یک کنترلر برای یک سیستم نامی، هر چند که دارای بازده بالایی برای سیستم نامی باشد، اگر متضمن مقاومت خوب در برابر نامعینی‌های سیستم و اغتشاشات خارجی و دیگر شرایط فیزیکی که به مرور زمان بر سیستم وارد می‌شوند نباشد، وارد حوزه صنعت شده و از لحاظ

---

<sup>۱</sup> Single Input-Single output

<sup>۲</sup> Multiply Input-Multiply Output

<sup>۳</sup> Single Input- Multiply Output

<sup>۴</sup> Multiply Input- Single Output

تئوری نیز دارای یک ضعف غیر قابل دفاع می‌باشد.

باید توجه داشت که با وجود اینکه گرایش کنترل مقاوم صریحاً از دهه هشتاد فعال شد اما بسیاری از روش‌های کنترلی که پیش از آن ابداع شده بود، به طور طبیعی و یا با توجه به دانش و تفکر مبدعین روش، کمابیش در برابر برخی شرایط غیر نامی سیستم مقاوم می‌باشند. از این رو می‌توان طیف بسیار فراوان و گسترده‌ای از فلسفه‌های کنترلی را به عنوان روش‌های مقاوم مورد بررسی قرار داد.

#### ۲-۴ تاریخچه کنترل مقاوم

بر اساس تعریف کنترل مقاوم باید گفت که اولین کار انجام شده در زمینه کنترل مقاوم، کاری است که در سال ۱۹۲۷ و به اسم آقای بلک (Black) ثبت گردیده است. بلک اولین کسی بود که برای کاهش حساسیت و افزایش دقت در مورد تقویت کننده‌های لامپی که دارای عدم قطعیت چشم‌گیری است استفاده از پس‌خور بهره بالا را پیشنهاد کرد. اما آن زمان هنوز تئوری نایکوئیست ارائه نشده بود تا بتوان به طریق تحلیلی به مصالحه‌ای بین پایداری دینامیکی و بهره حلقه بالا دست یافت و سیستم‌های بسیار دقیق طراحی شده بدین روش اغلب ناپایدار از آب در می‌آمدند. به دنبال ارائه تئوری نایکوئیست در سال ۱۹۳۲، بود (Bode) در سال ۱۹۴۵ از تلفیق معیار نایکوئیست و ایده حلقه بهره بالای بلک طراحی‌های مقاوم استفاده نمود.

در فاصله سال‌های ۱۹۲۷ تا ۱۹۶۰ کارهای ارزشمندی در زمینه‌ی کنترل صورت گرفت. در طول این دوره که می‌توان آن را دوره کنترل کلاسیک نامید پیشرفت‌های اساسی در زمینه‌ی طراحی سیستم‌های SISO به منظور پایداری، کاهش حساسیت و حذف نویز صورت گرفت. اکثر خواص و مزایای پس‌خور توسط محققین و بخصوص بود (Bode) و هوروویتز (Horowitz) بررسی و تشریح گردید. مفاهیم حوزه فرکانس این دوران هنوز هم بیشترین کاربرد را چه در دنیای صنعت و چه در دنیای آکادمیک به خود اختصاص داده‌اند. جبران ساز پیش فاز - پس فاز، (Phase Lead - Lag) از روش‌های طراحی این دوران می‌باشد.

در اوایل دهه ۱۹۶۰ با ظهور کنترل مدرن اکثر مراکز آکادمیک به توسعه تئوری و تکنیک‌های فضای حالت روی آوردند ولی بعد از سال‌ها انتقاد مداوم در اواخر دهه ۱۹۷۰ توجه به مسائل عدم قطعیت و طراحی کنترل مقاوم افزایش یافت و تکنیک‌های مختلفی برای طراحی سیستم‌های کنترل مقاوم چند متغیره معرفی گردید.

کنترل  $H^\infty$  خطی توسط اکثر محققین، کنترل  $\mu$  دوپل (Doyle) (که همزمان نیز توسط سافانوف (Safanov) با عنوان کنترل  $Km$  ارائه گردید)، QFT توسط هوروویتز (Horowitz)، روش‌های مبتنی بر قضیه خاریتانوف (Kharitanov) توسط بادمیش (Barmish) و  $L_1$  توسط داهله (Dahleh) و همکارانش.

مسئله کنترل  $H^\infty$  خطی اولین بار توسط زیمس (Zames) فرموله گردید که یک روش طراحی حوزه فرکانس برای سیستم‌های کنترل مقاوم بود. در سال ۱۹۸۱، زیمس این نظریه را مطرح کرد که سنجش کارایی بر حسب نرم بی‌نهایت به نیازهای کاربردی بسیار نزدیک‌تر است بدین معنی که: روش‌های نرم بی‌نهایت، مقدار متغیرهای rms تنظیم شده را برای بدترین شرایط اغتشاشات که طیف ناشناخته‌ای دارند کمینه می‌کند.

عدم قطعیت در مدل سیستم را در تئوری کلاسیک (حوزه فرکانس) می‌توان بر حسب نوار تلورانس در اطراف پاسخ فرکانسی (بود یا نایکوئیست) بیان نمود. اما در معنای حالت چنین کاری را نمی‌توان انجام داد. مسئله طراحی کنترل‌کننده  $H^\infty$  خطی موضوعی بود که در دهه ۱۹۸۰ توجه عمده محققین را به خود معطوف داشته بود. اکثر روش‌های اولیه برای حل مسئله بر اساس تابع تبدیل بین ورودی و خروجی (حوزه فرکانس) استوار بودند و شامل یک سری توابع تحلیلی بودند. متأسفانه روش‌های حوزه فرکانس در مواجهه با سیستم‌های چند متغیره با مشکل مواجه شدند و محققان به روش‌های فضای حالت برای حل مسئله کنترل  $H^\infty$  خطی روی آوردند و روش‌های فضای حالت زیادی ارائه گردید. ساده‌ترین فرمول فضای حالت برای طراحی کنترل‌کننده‌های  $H^\infty$  خطی در مقاله معروف به DFGK توسط دوپل، فرانسیس (Francis) و گلاور (Glover) و خارگنکار (Khargonekar) در سال ۱۹۸۰ ارائه گردید.

در تئوری کنترل  $H^\infty$  عدم قطعیت تنها از لحاظ اندازه محدودیت دارد و برای آن ساختار خاصی در نظر گرفته نمی‌شود (عدم قطعیت بدون ساختار) بدیهی است در این حالت مجموعه‌ای از عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته می‌شود که ممکن است غیرواقعی بوده و در عمل هرگز با آن مواجه نشویم. برای رفع این نقیصه دوپل، در سال ۱۹۸۹، مقدار تکین ساختار دار را معرفی کرد. در حدود یک دهه پس از این که برای اولین بار روش کنترل  $H^\infty$  معرفی شد، مفاهیم آن به حوزه غیرخطی راه پیدا کرده و روش کنترل  $H^\infty$  غیرخطی پی‌ریزی شد. در واقع اولین مقاله مدون که پایه تئوری روش کنترل  $H^\infty$  غیرخطی را پی‌ریزی کرده باعث آغاز تحقیقات فراوان در این شاخه با دید مهندسی‌تر، توسط ایزیدوری (Isidori) و آستولفی (Astolfi) نگارش یافت.

در واقع در این روش، سیستم غیرخطی مورد بحث قرار گرفته و سعی بر این است که یک کنترلر غیرخطی چنان طراحی گردد تا پایداری را تضمین نموده و در ضمن اثر اغتشاش را روی متغیرهای مورد نظر از یک مقدار از پیش تعیین شده، کمتر نماید.

هم اکنون گرچه مباحث تئوریک این مسئله پیشرفت بسیاری نموده اما کاربردهای عملی روش فوق پیشرفت درخشانی نداشته است، علت آن را می توان در پیچیدگی بسیار معادلات حاکم بر ورودی کنترلی (که از نوع معادلات دیفرانسیلی غیرخطی با مشتقات جزئی می باشد) و نتیجتاً عدم امکان بدست آوردن یک حل بسته برای ورودی کنترلی در سیستم های عملی جستجو کرد. در واقع گروهی که به کاربردهای عملی این تئوری بیشتر می اندیشند در صدد یافتن راه حل هایی کارآمدتر و احیاناً بهینه برای حل معادله اصلی این روش که معروف به معادله HGI (هامیلتون (Hamilton)، جاکوبی (Jacobi)، ایزاک (Issac) است)، می باشد.

#### ۳-۴ عوامل مؤثر بر کاهش پایداری و مقاومت سیستم

در مجموعه روش های کنترل مقاوم، هر یک از فلسفه های کنترلی برای مبارزه با یک یا چند عامل نامساعد که بر پایداری و یا عملکرد سیستم تأثیر منفی دارند طراحی شده است این عوامل را به طور کلی می توان به چهار دسته زیر تقسیم کرد:

(۱) اغتشاش: سیگنال های ناخواسته ای هستند که از خارج بر سیستم فیزیکی تحمیل می شوند و در بسیاری از موارد اندازه و چگونگی آنها مشخص نیست، به عنوان مثال جریان باد روی یک سیستم متحرک مانند توربین بادی از اغتشاشات نامعلوم است و بار مشخصی که با شفت یک موتور درگیر می شود نمونه ای از اغتشاش معلوم می باشند.

(۲) نامعینی های ساختار یافته یا پارامتریک: نامعینی هایی هستند که واقعاً در سیستم وجود دارند. به عنوان مثال هنگامی که یک مدل ریاضی برای سیستم داده می شود ممکن است مقادیر برخی پارامترها به طور دقیق مشخص نباشد.

(۳) نامعینی های ساختار نیافته یا دینامیک های مدل نشده: این نامعینی ها در واقع نامعینی های ناشی از ساده سازی های مدل سیستم می باشند. به این معنی که ممکن است برخی دینامیک های واقعی مدل سیستم در نظر گرفته نشده باشند. به عنوان مثال اصطکاک به صورت خطی مدل شده باشد و یا ارتعاشات و یا ارتعاشات مکانیکی یک سیستم در نظر گرفته نشده و یا دینامیک های مرتبه پایین آنها در نظر گرفته شده باشد واضح است که در این

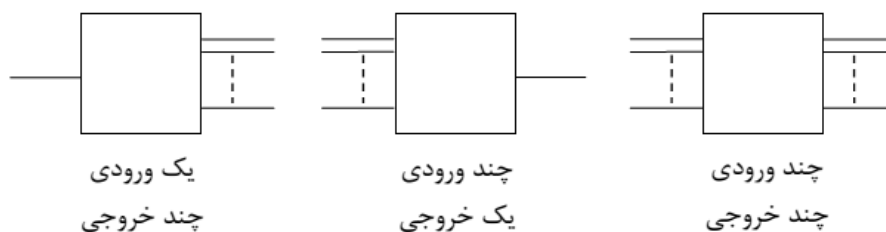
حالت مدل سیستم با معادلات دیفرانسیل مرتبه پایین تری نسبت به مدل واقعی سیستم توصیف می‌شود.

۴) تأخیر زمانی: هنگامی که یک ورودی به سیستم فیزیکی اعمال می‌شود، خروجی ناشی از آن پس از مدتی مشاهده می‌گردد، در واقع تأخیر زمانی از بارزترین مشخصات غیرخطی هر سیستم فیزیکی می‌باشد. طبیعی است که هرگاه یک سیستم فیزیکی را با یک مدل خطی بیان کنیم تأخیر زمانی آن سیستم را در نظر نگرفته و یا یک تقریب خطی از آن را لحاظ کرده‌ایم. با این دید می‌توان تأخیر زمانی را جزء نامعینی‌های ساختار نیافته قلمداد کرد.

آنچه جالب است این است که در واقع هر سیستم فیزیکی کمابیش با هر چهار نوع این عوامل منفی درگیر است [۷۲].

#### ۴-۴ سیستم چند متغیره

سیستم چند متغیره به سیستمی گفته می‌شود که تعداد ورودی یا خروجی آن یک نباشد مانند سیستم MIMO و MISO و SIMO.



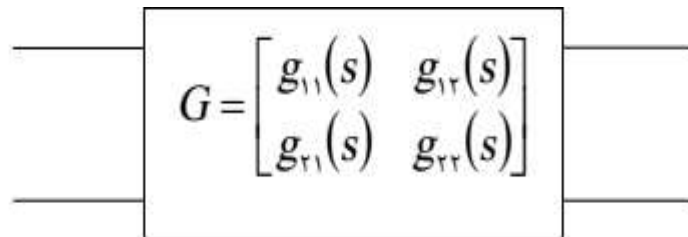
شکل ۴-۱: انواع سیستم‌های چند متغیره

یک سیستم چندمتغیره را در نظر بگیرید، هرگاه به ورودی اول یک سیگنال اعمال کنیم همه خروجی‌ها تغییر خواهد کرد. اگر بخواهیم مانند سیستم یک ورودی- یک خروجی کنترل نماییم برای هر ورودی جدای از ورودی‌های دیگر باید یک کنترل کننده قرار بدهیم. به همین ترتیب باید برای ورودی‌های دوم تا آخر نیز کنترل کننده قرار دهیم و این یعنی  $n$  خروجی برای یک ورودی، دارای  $n$  کنترل کننده باشند، که این روش امکان پذیر نیست، زیرا هر خروجی تنها نیاز به یک کنترل کننده دارد نه به چند کنترل کننده (به تعداد ورودی). این تداخل بین ورودی‌ها و خروجی‌ها در سیستم‌های چند متغیره وجود دارد و این تداخل را کوپلینگ<sup>۱</sup> می‌نامند.

<sup>۱</sup> Coupling

هنگامی که یکی از ورودی‌ها تغییر نماید تمام خروجی‌های سیستم تحت تأثیر قرار گیرند و تغییر کنند به این پدیده تزویج یا کوپلینگ گویند. اگر هر خروجی تحت تأثیر یک ورودی باشد سیستم را دکوپله<sup>۱</sup> گوئیم. سیستم دو ورودی- دو خروجی زیر را دکوپله گوئیم اگر و تنها اگر:

$$g_{12}(s) = g_{21}(s) \quad (1-4)$$



شکل ۲-۴: نمایش سیستم دو ورودی- دو خروجی

در روش کلاسیک ابتدا سیستم را مانند یک سیستم یک ورودی- یک خروجی در نظر می‌گیرند. یعنی ورودی اول با خروجی اول و ... و ورودی آخر با خروجی آخر در ارتباط باشد. در طراحی به روش کلاسیک ابتدا باید مشخص نمود ورودی‌ها کدام یک از خروجی‌ها را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد آنگاه با استفاده از روش‌هایی، ورودی- خروجی‌ها را متناظر با هم تفکیک نمود و بعد از تفکیک تعداد کنترل‌کننده‌ها، به تعداد ورودی بستگی دارد.

به منظور مشاهده رفتار یک سیستم فیزیکی و شبیه‌سازی آن یک مدل ریاضی به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی و غیرخطی برای آن سیستم استخراج می‌شود. مدل نامی از خطی‌سازی این معادلات حول نقطه کار سیستم بدست می‌آید. حال هرچه این مدل جزئیات و دینامیک‌های سیستم را بهتر و دقیق‌تر توصیف کند پاسخ مدل و شبیه‌سازی آن به رفتار سیستم واقعی نزدیک‌تر است.

#### ۴-۵ نمایش مدل نامی سیستم چند متغیره (MIMO)

به مدل ثابتی که برای یک فرآیند یا سیستم فیزیکی در نظر گرفته می‌شود مدل نامی گویند.

#### ۴ ۵ ۱ نمایش ماتریس تابع تبدیل

این ماتریس به تعداد ورودی‌ها ستون و به تعداد خروجی‌ها سطر دارد و اعضای آن توابع

<sup>۱</sup> Decouple

تبدیل تک ورودی- تک خروجی در حوزه لاپلاس است.

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (2-4)$$

### ۴ ۵ ۲ نمایش فضای حالت

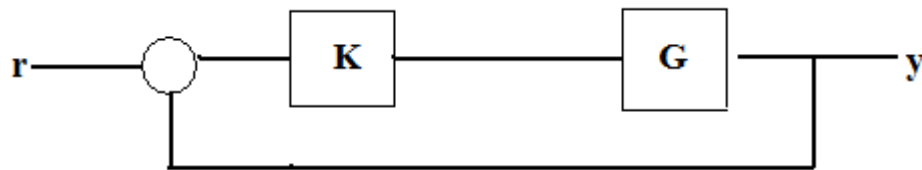
در معادلات حالت مشتق حالتها و نیز خروجیها با حالتها و ورودیها رابطه دارند.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (3-4)$$

### ۴-۶ ماتریس حساسیت و حساسیت مکمل

الگوی سیستم کنترل را که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است در نظر بگیرید.

$$e = u - y = (I + GK)^{-1}u \quad (4-4)$$



شکل ۳-۴: الگوی سیستم کنترل

ماتریس  $S = (I + GK)^{-1}$  را ماتریس حساسیت<sup>۱</sup> می‌نامند.

و برای خروجی خواهیم داشت:

$$y = (I + GK)^{-1}GKu \quad (5-4)$$

ماتریس  $T = (I + GK)^{-1}GK$  را ماتریس حساسیت مکمل گویند و رابطه فوق برای  $S$  و  $T$  در تمامی فرکانسها برقرار می‌باشد:

$$S + T = I \quad (6-4)$$

باید ماتریس حساسیت را آنقدر کوچک نماییم که خطای مورد قبول برای طراحی باشد. برای آن که خروجی بتواند به طور کامل ورودی را دنبال نماید باید ماتریس حساسیت مکمل را  $I$  در نظر بگیریم

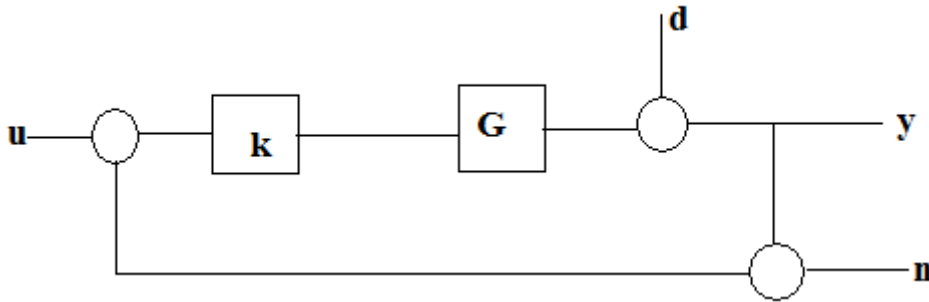
<sup>۱</sup> Sensivity Matrix



حال اگر الگوی سیستم کنترل شکل ۴-۴ را با اغتشاش و نویز داشته باشیم آنگاه روابط به صورت زیر خواهد بود:

$$y = Sd + T(u - n) \quad (۷-۴)$$

$$e = S(u - d) + Tn \quad (۸-۴)$$

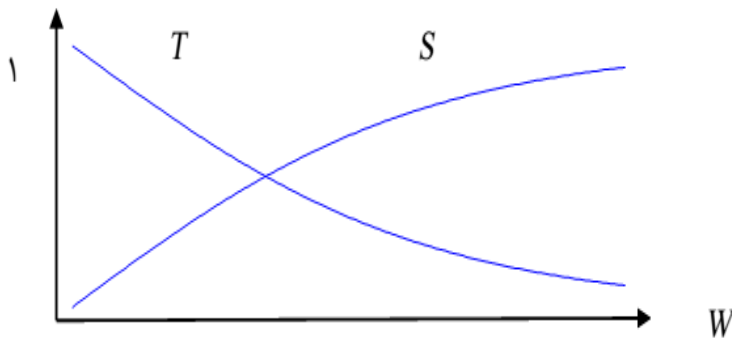


شکل ۴-۴: الگوی سیستم کنترل با اغتشاش و نویز

دیده می‌شود که اگر  $T$  را برابر  $I$  در نظر بگیریم نویز ( $n$ ) به طور کامل در خروجی و خطای سیستم ظاهر می‌شود که این در طراحی مطلوب نمی‌باشد.

از آنجا که نویز یک سیگنال فرکانس بالا می‌باشد پس طیف فرکانسی ماتریس حساسیت مکمل را طوری انتخاب می‌کنیم که اندازه ماتریس حساسیت مکمل در فرکانس‌های بالا برابر با صفر و در فرکانس‌های پایین برابر با  $I$  شود.

برای آن که روابط فوق در تمامی فرکانس‌ها برقرار باشد باید اندازه ماتریس حساسیت ( $s$ ) در فرکانس‌های پایین برابر با صفر و در فرکانس‌های بالا برابر با  $I$  باشد، که این مطلوب می‌باشد چون اغتشاش ( $d$ ) یک سیگنال فرکانس پایین می‌باشد و از آنجا که در فرکانس‌های پایین اندازه  $S$  برابر صفر است پس اغتشاش در خروجی ظاهر نمی‌شود.



شکل ۴-۵: طراحی طیف فرکانسی  $T$  و طراحی طیف فرکانسی  $S$

## ۷-۴ نامعینی‌ها

اصطلاح نامعینی<sup>۱</sup> به اختلاف بین مدل نامی و مدل واقعی اطلاق می‌گردد و به دو دسته نامعینی ساختار یافته<sup>۲</sup> و نامعینی بدون ساختار<sup>۳</sup> طبقه‌بندی می‌گردد [۷۳].

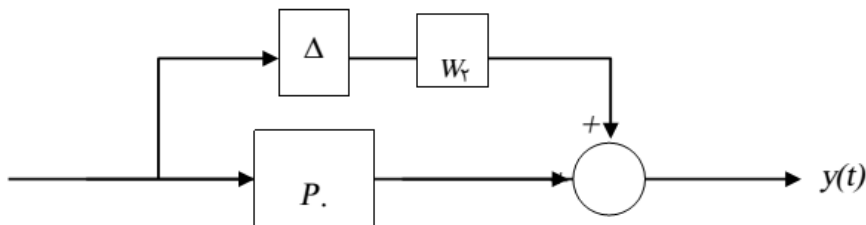
### ۴ ۷ ۱ منابع نامعینی

- اثر غیرخطی بودن پروسس (اغلب مدل خطی تقریبی به کار برده می‌شود)
- دینامیک مدل نشده (در نظر گرفتن مودهای کندتر و صرف نظر کردن از دینامیک‌های سریع و در نتیجه ساده‌تر شدن مدل)
- تغییر پارامترهای سیستم در اثر تغییر شرایط محیط و نقطه کار
- اغتشاشات ناشی از نویز اندازه‌گیری
- اغتشاشات مدل نشده

### ۴ ۷ ۲ انواع نحوه نمایش نامعینی

معیار پایداری داخلی مقاوم بر حسب توابع S و T، [۷۳-۷۴].

- جمع شونده:



$$y(s) = [(P_o(s) + \Delta(s))W_\Delta(s)]u(s)$$

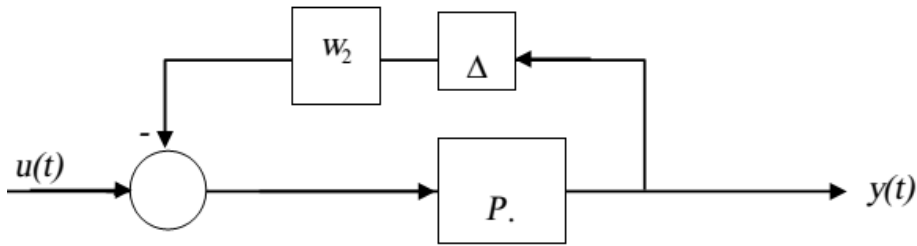
با انتخاب  $W_\Delta$  به عنوان یک فیلتر بالا گذر می‌توان عدم قطعیت جمعی را برای دینامیک‌های مدل نشده فرکانس بالا به کار برد.

<sup>۱</sup> Uncertainty

<sup>۲</sup> Structured

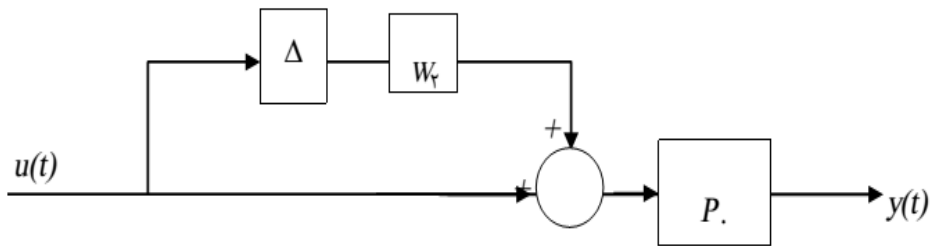
<sup>۳</sup> Unstructured

- جمع شونده معکوس



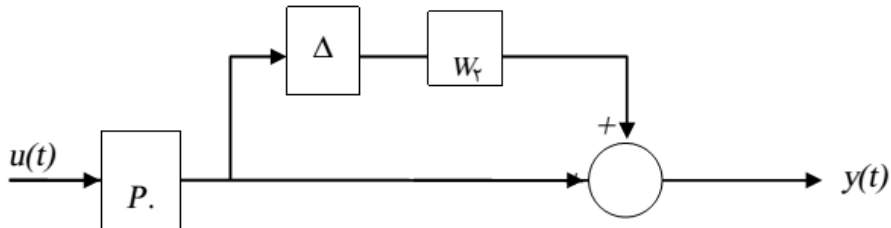
$$u = \left( (P_o(s))^{-1} + \Delta(s)W_r(s) \right) y(s)$$

- ضرب ورودی



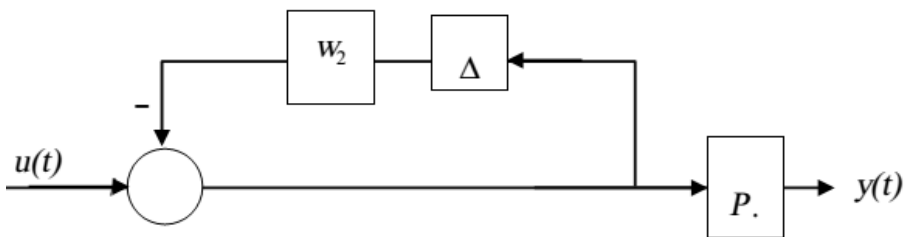
$$y(s) = P_o(I + \Delta(s)W_2(s))u(s)$$

- ضرب شونده خروجی



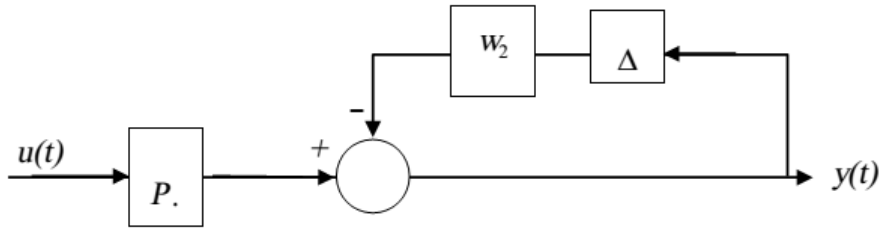
$$y(s) = \left[ (I + \Delta(s)W_r(s))P_o \right] u(s)$$

- ضرب شونده ورودی معکوس



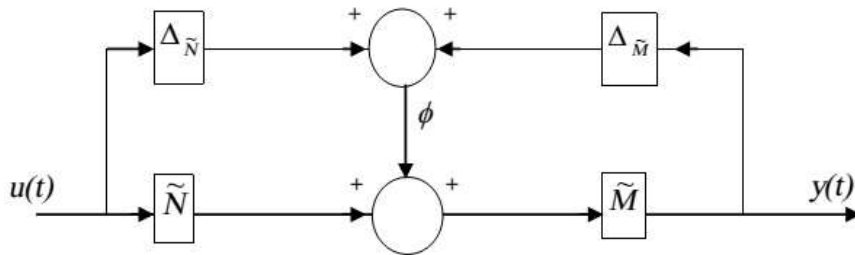
$$u(s) = \left[ (I + \Delta(s)W_r(s))P_o(s)^{-1} \right] y(s)$$

- ضرب شونده خروجی معکوس



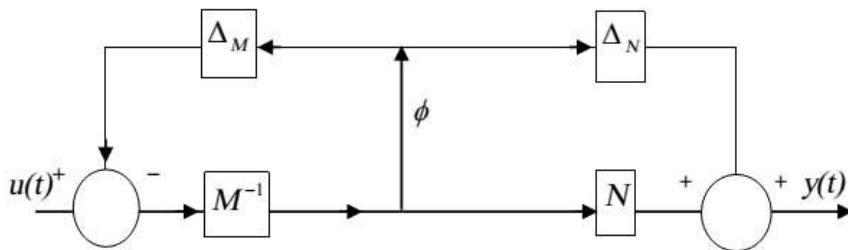
$$u(s) = \left[ (G(s)) (I + \Delta(s)W_2(s)) \right] y(s)$$

- عامل عدد اول چپ



$$y(s) = \left[ (\tilde{M} + \Delta\tilde{M})^{-1} (\tilde{N} + \Delta\tilde{N}) \right] u(s)$$

- عامل عدد اول راست



$$y(s) = \left[ (\tilde{N} + \Delta\tilde{N}) (\tilde{M} + \Delta\tilde{M})^{-1} \right] u(s)$$

### ۴ ۷ ۳ انواع نامعینی‌ها از لحاظ ساختار

- نامعینی ساختار یافته: نامعینی‌هایی که در درون سیستم وجود دارد مثل یک مدل ریاضی سیستم که برخی پارامترها نامعلوم هستند.
- نامعینی ساختار نیافته: این نامعینی در اثر ساده‌سازی مدل به وجود می‌آیند مثل در نظر گرفتن دینامیک‌های سریع در برابر دینامیک‌های کندتر.
- نامعینی پارامتری: که این نوع نامعینی در اثر تغییر پارامترهای سیستم به وجود می‌آید مانند ضریب ثابت فنر که در مدت کارکرد تغییر می‌کند. نامعینی پارامتری خود نوعی نامعینی ساختار یافته می‌باشد [۷۲].

به طراحی سیستم به صورتی که در مقابل نامعینی‌ها پایدار بماند طراحی کنترل مقاوم گویند. هدف طراحی کنترل مقاوم این است که حاشیه پایداری سیستم چند متغیره<sup>۱</sup> (MSM) را بدست آورد. و این یعنی که علاقه‌مند به پیدا کردن بزرگ‌ترین  $\Delta$  هستیم قبل از این که ناپایداری اتفاق بیفتد.

#### ۴-۸ پایداری مقاوم<sup>۲</sup>

کنترل کننده C پایداری مقاوم<sup>۳</sup> را برای سیستم حلقه بسته فراهم می‌کند اگر برای تمامی مدل‌های متعلق به مجموعه مدل، پایداری داخلی را تضمین نماید [۷۵].

بر اساس معیار پایداری داخلی مقاوم، سیستم دارای نامعینی ضربی پایداری مقاوم دارد اگر شرط زیر برقرار باشد:

$$\|GK(I + GK)^{-1}\|_{\infty} \leq \frac{1}{\|W\Delta\|_{\infty}} ; \|\Delta\|_{\infty} < 1 \quad (9-4)$$

پس بر مبنای متمم حساسیت T خواهیم داشت:

$$\|GK(I + GK)^{-1}\|_{\infty} \leq \frac{1}{|W|} \Rightarrow \|T\|_{\infty} \leq \frac{1}{|W|} \quad (10-4)$$

#### ۴ ۸ ۱ قضیه بهره کوچک<sup>۴</sup>

این قضیه به دو شکل زیر مطرح می‌شود [۷۵]:

۱. در حلقه فیدبک شکل زیر اگر L به صورت BIBO<sup>۵</sup> پایدار باشد، شرط کافی برای پایداری داخلی<sup>۶</sup> سیستم حلقه بسته به صورت زیر بیان می‌شود.

<sup>۱</sup> Multivariable Stability Margin

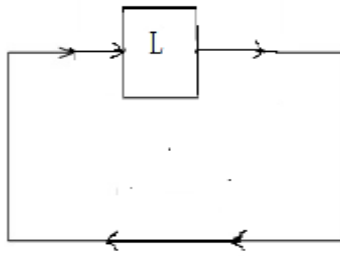
<sup>۲</sup> Robust Stability

<sup>۳</sup> Robust Stability

<sup>۴</sup> Small Gain Theorem

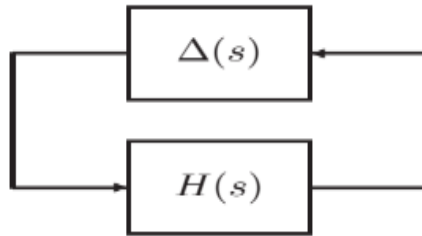
<sup>۵</sup> Banded Input, Banded Output

<sup>۶</sup> Internal Stability



$$\|L\|_{\infty} < 1$$

۲. در حلقه فیدبک شکل زیر اگر  $L$  به صورت  $BIBO$  پایدار باشد، شرط کافی برای پایداری داخلی سیستم حلقه بسته به صورت زیر بیان می‌شود.

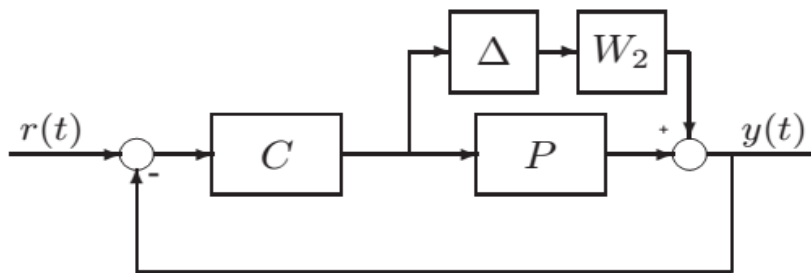


$$H\Delta_{\infty} < 1$$

در فرم ۲ قضیه بهره کوچک اگر  $\Delta$  کاملاً ناشناخته باشد شرط به صورت لازم و کافی درمی‌آید.

#### ۴ ۸ ۲ شرایط پایداری مقاوم

برای نامعینی جمعی



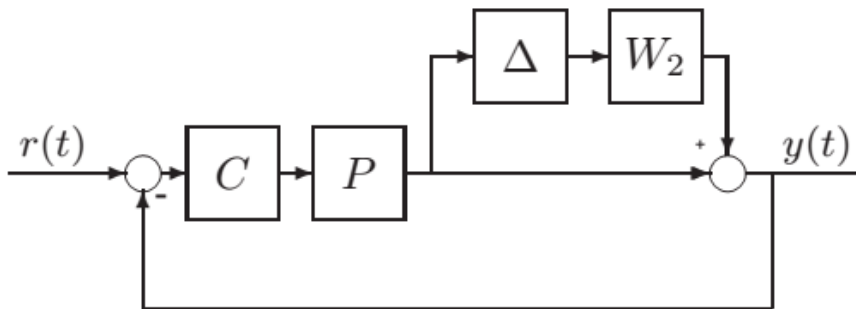
$$H = -w_r C \frac{1}{1 + PC} \quad (11-4)$$

شرط پایداری مقاوم  $\|H\|_{\infty} < 1 \rightarrow \|\Delta\|_{\infty} < 1$  اگر  $(12-4)$

$$\rightarrow \left\| w_r C \frac{1}{1 + PC} \right\|_{\infty} < 1 \rightarrow \|w_r CS\|_{\infty} < 1 \quad (13-4)$$

در تابع تبدیل  $C \frac{1}{1+PC}$  تابع حساسیت ورودی نیز گفته می‌شود.

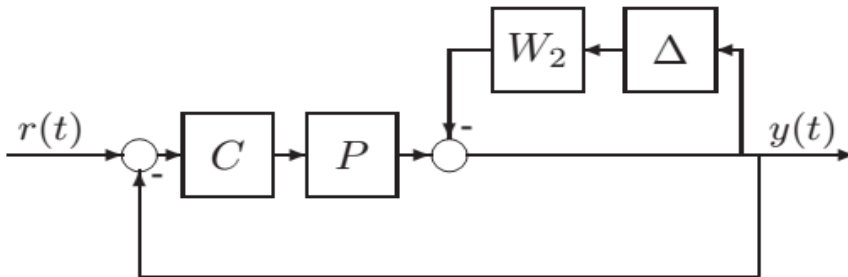
برای نامعینی ضربی



$$H = w_r \frac{-PC}{1 + PC} = -w_r T \quad (14-4)$$

$$\text{شرط پایداری مقاوم} \quad \|\Delta\|_\infty < 1 \rightarrow \|w_r T\|_\infty < 1 \quad (15-4)$$

برای نامعینی فیدبکی



$$H = -w_r \frac{1}{1 + PC} = -w_r S \quad (16-4)$$

$$\text{شرط پایداری مقاوم} \quad \|\Delta\|_\infty < 1 \rightarrow \|w_r S\|_\infty < 1 \quad (17-4)$$

$$\|S\|_\infty < \frac{1}{\|w_r\|_\infty} \quad \text{شرط کافی پایداری مقاوم}$$

$$\|w_r S\|_\infty < 1 \quad \text{شرط کارایی نامی} \quad (18-4)$$

نتیجه: می‌توان  $\|S\|_\infty$  را به گونه‌ای انتخاب کرد که همزمان هم به پایداری مقاوم و هم به کارایی نامی دست پیدا کرد [۷۶-۷۵].

## ۹-۴ کارایی مقاوم

کارایی نامی<sup>۱</sup> با وجود  $\Delta \equiv$  کارایی مقاوم<sup>۲</sup>

$$\begin{aligned} \tilde{P} &= (1 + \Delta W_r)P \rightarrow \tilde{P} = \frac{1}{1 + \tilde{P}C} = \frac{1}{(1 + \Delta W_r)PC} \\ &= \frac{1}{1 + L + \Delta W_r L} = \frac{\frac{1}{1+L}}{1 + \Delta W_r \frac{L}{1+L}} = \frac{S}{(1 + \Delta W_r T)} \end{aligned} \quad (19-4)$$

شرط کارایی مقاوم در برابر نامعینی ضربی

$$\|w_1 \tilde{S}\|_{\infty} < 1 \rightarrow \begin{cases} \frac{\|w_1 S\|}{1 + \Delta W_r T} \\ \|w_r T\|_{\infty} < 1 \end{cases} \quad (20-4)$$

کارایی بدون پایداری معنا ندارد.

قضیه: شرط لازم و کافی برای کارایی مقاوم با وجود نامعینی ضربی عبارت است از:

$$\|w_1 S\|_{\infty} + \|w_r T\|_{\infty} < 1 \quad \text{شرط کارایی مقاوم} \quad (21-4)$$

$$\|w_r T\|_{\infty} < 1 \quad \text{شرط پایداری مقاوم}$$

$$\|w_1 S\|_{\infty} < 1 \quad \text{شرط کارایی نامی} \quad (22-4)$$

حال می‌خواهیم مسئله آنالیز را مطرح کنیم. اگر کنترل کننده  $C$  در اختیار باشد حداکثر

نامعینی  $\Delta$  که سیستم کارایی خود را حفظ کند چقدر است؟ (شرط کارایی مقاوم برقرار بماند)

به عبارتی فرض کنید  $\|\Delta\|_{\infty} < B$  باشد در پی یافتن ماکزیمم  $B$  هستیم

$$\|\Delta\|_{\infty} < B \rightarrow \|B^{-1} \Delta\|_{\infty} < 1 \quad (23-4)$$

<sup>۱</sup> Nominal Performance

<sup>۲</sup> Robust Performance



پس شرط کارآیی مقاوم به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{cases} \|Bw_{\gamma}T\|_{\infty} < 1 \\ \left\| \frac{w_1 S}{1 + \Delta w_{\gamma} T} \right\|_{\infty} < 1 \\ \left\| \frac{w_1 S}{1 + B^{-1} \Delta w_{\gamma} T B} \right\|_{\infty} < 1 \end{cases} \quad (24-4)$$

از موارد پیشین می‌توان نتیجه گرفت:

$$\left| \frac{w_1 S}{1 + B^{-1} \Delta w_{\gamma} T B} \right| < \frac{|w_1 S|}{1 - B \Delta w_{\gamma} T} \quad B^{-1} \Delta = \Delta' \quad (25-4)$$

حداکثر  $\left| \frac{w_1 S}{1 + B^{-1} \Delta w_{\gamma} T B} \right|$  طبق (۱) می‌تواند ۱ باشد که به ازای  $B_{max}$  اتفاق می‌افتد.

$$\frac{|w_1 S|}{1 - B \Delta w_{\gamma} T} = 1 \rightarrow B_{max} = \left| \frac{1 - |w_1 S|}{w_{\gamma} T} \right| \quad \forall W \quad (26-4)$$

$$B_{max} = \left\| \frac{1 - |w_1 S|}{w_{\gamma} T} \right\|_{\infty} = \left\| \frac{w_{\gamma} T}{1 - |w_1 S|} \right\|_{\infty}^{-1} \quad (27-4)$$

**تعریف:** یک سیستم به طور محکم پایدار شونده است اگر پایداری داخلی توسط یک کنترل کننده پایدار حاصل شود.

**قضیه:** یک سیستم به طور محکم پایدار شونده است اگر و تنها اگر بین هر دو صفر حقیقی ناپایدار (شامل صفر در بی‌نهایت) تعداد زوجی از قطب‌های حقیقی وجود داشته باشد [۷۶-۷۵].

## ۴-۱۰ محدودیت‌های طراحی

محدودیت‌ها اغلب از دو منبع ناشی می‌شوند [۷۷-۷۵]:

۱. از روابط جبری میان توابع تبدیل
  ۲. از این حقیقت که سیستم حلقه بسته باید پایدار باشد.
- برای داشتن تعقیب خوب ورودی و تضعیف اغتشاش فرکانس پایین، باید  $W_1$  در فرکانس‌های پایین بزرگ باشد.
  - برای در نظر گرفتن نامعینی‌های فرکانس بالا ناشی از دینامیک‌های مدل نشده باید  $W_{\gamma}$  در فرکانس‌های بالا بزرگ باشد.

#### ۴-۱۰-۱ محدودیت‌های ریاضی (جبری)

رابطه  $S + T = 1$  باید همیشه برقرار باشد بنابراین  $|S(j\omega)|$  ,  $|T(j\omega)|$  را نمی‌توان به طور همزمان در فرکانس  $W$  کوچک‌تر از  $1/p$  انتخاب کرد.

یک شرط لازم برای کارایی مقاوم این است که توابع وزنی، نامساوی زیر را برآورده سازند:

$$\text{Min}\{|W_1(j\omega)|, |W_2(j\omega)|\} < 1 \quad \forall W \quad (28-4)$$

حداقل یکی از  $|W_1(j\omega)|$  و  $|W_2(j\omega)|$  باید از 1 کوچک‌تر باشد.

توجه: فرکانس قطع 0 dB مربوط به  $|W_1(j\omega)|$  باید پایین‌تر از فرکانس قطع 0 dB ،  $|W_2(j\omega)|$  باشد.

اگر  $P$  و  $Z$  یک قطب و صفر ناپایدار بهره حلقه باشند داریم:

$$S(P) = \frac{1}{1 + L(P)} = 0 \quad ; \quad T(P) = 1 \quad (29-4)$$

قطب  $L$  ، صفر  $S$  باشد.

$$S(Z) = \frac{1}{1 + L(Z)} = 1 \quad ; \quad T(Z) = 0 \quad (30-4)$$

حال به  $|W_1(Z)|$  توجه کنید:

$$|W_1(Z)| = |W_1(Z)S(Z)| \leq \text{Sup } |W_1(s)S(s)| = \|W_1S\|_{\infty} \quad (31-4)$$

صفر ناپایدار بهره حلقه، باعث قرار گرفتن یک حد پایین برای کارایی نامی باشد، برای کارایی نامی باید  $\|W_1S\|_{\infty} < 1$  باشد و بنا به رابطه (1) باید تا حد امکان  $|W_1(Z)|$  از یک کوچک‌تر باشد.

صفر ناپایدار از کوچک شدن  $\|W_1S\|_{\infty}$  جلوگیری می‌کند پس باید کوچک شود.

## فصل ۵ نتایج و شبیه‌سازی

## ۵-۱ مقدمه

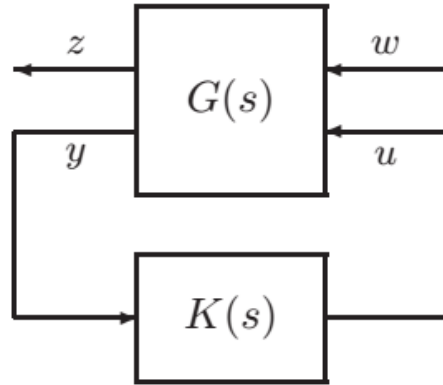
مهندسان کنترل غالباً به دنبال طراحی سیستمی هستند که رفتار خروجی سیستم به صورت خودکار از رفتار مطلوبی پیروی کند. با اینکه عمومی‌ترین و مهم‌ترین هدفی که در سیستم‌های کنترل خودکار دنبال می‌شود تنظیم یا ردیابی است، اما این هدف بایستی در کنار اهداف مهم دیگری تعقیب گردد. پایداری سیستم کنترلی یکی دیگر از اهداف مهم به شمار می‌رود. در صورتی که پایداری یک سیستم کنترل تضعیف شود اندازه خروجی‌های سیستم یا متغیرهای تأثیرگذار دیگر در سیستم به شدت رشد خواهد نمود و طبیعی است که در این حالت رسیدن به ردیابی مناسب امکان پذیر نخواهد بود. پایداری در سیستم‌های کنترلی از ردیابی نیز مهم‌تر است و به عنوان شرایط لازم در طراحی مد نظر قرار می‌گیرد. چرا که ناپایداری تهدیدی برای سلامت سیستم و کاربرانی که با آن تعامل دارند محسوب می‌شود. در کنار پایداری و ردیابی در سیستم‌ها، اهداف دیگری نیز مانند کارایی مد نظر قرار می‌گیرد.

در فضای کنترل خطی و روش‌های مدل‌سازی آن نیز نامعینی را به صورت‌های مختلف می‌توان تعبیر نمود و متناسب با گونه‌های این تعبیر، ابزارهای متفاوتی برای تحلیل و طراحی مقاوم آن توسعه یافته است. در سیستم‌های عملی مسئله عدم قطعیت در مدل سیستم، به دلایلی که در پایین آورده شده است اجتناب‌ناپذیر است. به‌علاوه سیگنال‌های اغتشاش نامعین نیز در اغلب محیط‌ها اظهار وجود می‌کنند. در روش طراحی عملی و واقع بینانه سیستم‌های کنترل، ناگزیر باید این عدم قطعیت‌ها را در نظر گرفت. طراحی‌های مبتنی بر مدل دقیق سیستم ممکن است تنها بر روی کاغذ عملکرد خوبی داشته باشند و نتوانند در دنیای عملی وارد گردند چرا که به عنوان مثال اغلب کافی است تنها یکی از پارامترهای سیستم تغییر کند تا نتایج استنتاج شده اعتبار خود را از دست بدهند.

توجه به این عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات اجتناب‌ناپذیر در عمل، انگیزه ظهور روش‌های متعدد کنترل مقاوم است.

## ۲-۵ کنترل بهینه $H_\infty$

با توجه به شکل زیر، مسئله کنترل بهینه  $H_\infty$  استاندارد، پیدا کردن تمام کنترل کننده‌های پایدار ساز  $K$  است که مینیمم سازد:



$$\|F_L(G, K)\|_\infty = \max \bar{\sigma}(F_L(G, K)(j\omega)) \quad (1-5)$$

نرم  $H_\infty$  بر حسب کارکرد به صورت‌های مختلفی بیان می‌شود، یکی از آن‌ها مینیمم کردن ماکزیمم مقدار تکین  $F_L(G(j\omega), K(j\omega))$  در حوزه زمان است اگر قرار دهیم:

$$Z = F_L(G, K)W \quad (2-5)$$

آنگاه:

$$\|F_L(G, K)\|_\infty = \max \frac{\|Z(t)\|_2}{\|W(t)\|_2} \quad (3-5)$$

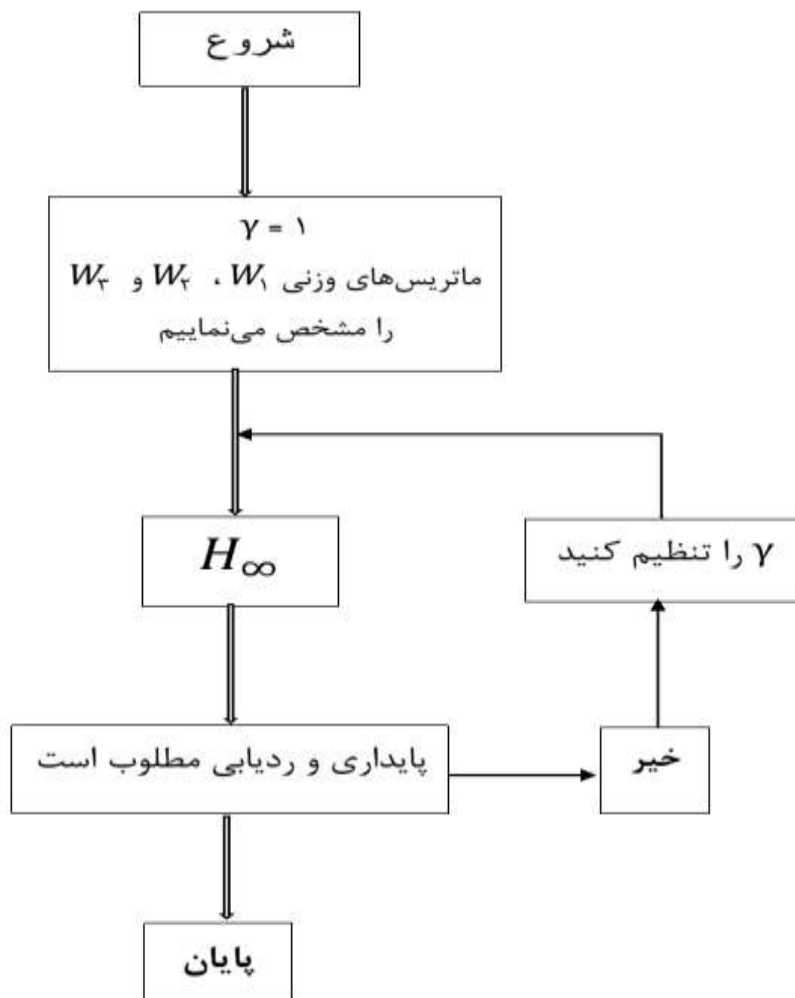
در جایی که  $\|Z(t)\|_2 = \sqrt{\int_0^\infty \sum_i |Z_i(t)|^2 dt}$ ، نرم ۲ بردار سیگنال باشد.

در عمل معمولاً لازم نیست برای مسائل  $H_\infty$ ، کنترل کننده بهینه به دست آوریم و اغلب طراحی یک کنترل کننده زیر بهینه<sup>۱</sup> از لحاظ محاسباتی (و تئوری) ساده‌تر است. (یعنی یکی از نزدیک‌ترین راه به دست آوردن بهینه، به دست آوردن نرم  $H_\infty$  است).  $\gamma_{min}$  را به عنوان مینیمم مقدار  $\|F_L(G, K)\|_\infty$  برای همه کنترل کننده‌های پایدار ساز در نظر می‌گیریم. مسئله کنترل زیر بهینه به صورت زیر است. برای یک  $\gamma > \gamma_{min}$  تمام کنترل کننده‌های پایدار ساز  $K$  را پیدا کنیم به طوری که  $\|F_L(G, K)\| < \gamma$

<sup>۱</sup> Sub-Optimal

که این می‌تواند به وسیله الگوریتم *Doyle* و کاهش مکرر  $\gamma$  تا رسیدن به حل بهینه حل شود که الگوریتم می‌تواند به وسیله فرض‌های ساده کننده، ساده شود.

### ۳-۵ الگوریتم کلی $H_\infty$



### ۴-۵ سه اصل مهم در طراحی

در فرکانس صفر مقدار ماتریس وزنی  $W_1$  بیشتر از ۱ (یا صفر dB) باشد و در فرکانس بی‌نهایت مقدار ماتریس وزنی  $W_1$  کمتر از ۱ (یا صفر dB) باشد.

در فرکانس صفر مقدار ماتریس وزن  $W_2$  کمتر از ۱ (یا صفر dB) باشد و در فرکانس بی‌نهایت مقدار ماتریس وزنی  $W_2$  بیشتر از ۱ (یا صفر dB) باشد.

باید فرکانس محل قطع ماتریس وزنی  $W_1$  با محور صفر dB از فرکانس محل قطع ماتریس وزنی  $W_2$  با محور صفر dB به اندازه کافی کوچک باشد.

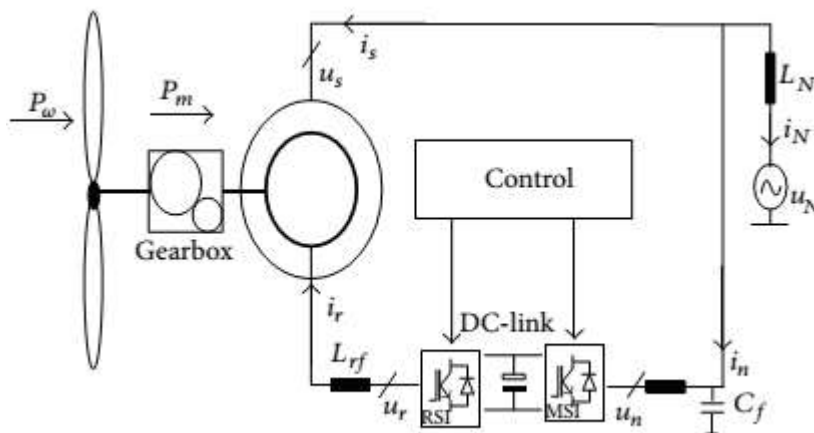
## ۵-۵ تکرار پذیری

اگر ما یک کنترل کننده با  $\gamma_{min}$  در مورد یک محدوده<sup>۱</sup> خاص بخواهیم، ما باید تا وقتی که  $\gamma$  به اندازه کافی دقیق شود یک دو بخشی بر روی  $\gamma$  انجام دهیم. باید برای هر مقدار از  $\gamma$  انتخاب کنیم که آیا بزرگتر از  $\gamma_{min}$  است یا کوچکتر از  $\gamma_{min}$ .

در قدیم از بهینه سازی  $H_{\infty}$  برای تشکیل مقادیر تکین تابع انتقال در همه فرکانسها استفاده می شد. گاهی اوقات ممکن است با کنترل کننده  $H_{\infty}$  به مشکل برسیم، که باید وزنهایی را انتخاب کنیم به طوری که کنترل کننده بهینه  $H_{\infty}$  یک Trade Off ما بین اهداف متضاد رنجهای مختلف فرکانس برقرار سازد.

## ۵-۶ معرفی سیستم نامی

همان طور که در شکل ۵-۱ مشاهده می شود سیستم مورد بررسی در این پایان نامه یک واحد ژنراتور القایی تغذیه دو سوپه توربین بادی می باشد. در انتخاب سیستم نامی موارد مختلفی را بایستی مد نظر قرار داد مهم ترین عامل در انتخاب سیستم نامی آن است که در محدوده میانی مدلهای نامعین قرار گرفته و اختلاف آن نسبت به سیستمهای نامعین به گونه ای باشد که پروفیل نامعینی را کمینه سازد. از طرف دیگر مدل نامعینی بایستی ساده بوده و حتی المقدور دارای مرتبه پائینی باشد، تا کنترل کننده های بهینه طراحی شده بر اساس آن نیز دارای مرتبه ی پائینی باشند.



شکل ۵-۱: ژنراتور القایی تغذیه دو سوپه با توربین بادی

<sup>۱</sup> Tolerance

## ۵ ۶ ۱ مدل سازی ریاضی DFIG

یک مدل تقریبی از چنین سیستمی، با فرض عملکرد حالت ماندگار برای ژنراتور القایی فرض و اینکه حالات گذرای شارهای پیوندی روتور و استاتور ژنراتور نسبت به حالت گذرای شبکه متصل به آن سریع تر باشد، به صورت زیر است. مدل استفاده شده ماشین القایی از نوع روتور سیم پیچی می باشد و معادلات ولتاژ حاکم بر بخش ژنراتوری سیستم، با به کارگیری مقاومت ها و اندوکتانس های معادل آن در دستگاه مرجع دوماحوری، به کمک مؤلفه های مستقیم و معکوس (d,q) عبارت اند از:

معادله ولتاژ استاتور

$$V_{ds} = -R_s i_{ds} + [(X_s + X_m) i_{qs} + X_m i_{qr}] \quad (۴-۵)$$

$$V_{qs} = -R_s i_{qs} + [(X_s + X_m) i_{ds} + X_m i_{dr}] \quad (۵-۵)$$

معادله ولتاژ روتور

$$V_{dr} = -R_r i_{dr} + (1 - \omega_m) [(X_r + X_m) i_{qr} + X_m i_{qs}] \quad (۶-۵)$$

$$V_{qr} = -R_r i_{qr} + (1 - \omega_m) [(X_r + X_m) i_{dr} + X_m i_{ds}] \quad (۷-۵)$$

که در آن، چون استاتور مستقیماً به شبکه متصل است، ولتاژهای استاتور ( $V_{qs}, V_{ds}$ )، از روی اندازه گیری ولتاژ شبکه مصرفی به صورت زیر معلوم اند:

$$V_{ds} = V \sin \theta \quad (۸-۵)$$

$$V_{qs} = V \cos \theta \quad (۹-۵)$$

البته لازم است که تبدیل مقادیر ولتاژ از مؤلفه های (a,b,c) به مؤلفه های (d,q) صورت پذیرد. در این معادلات (V) اندازه ولتاژ و ( $\theta$ ) فاز شبکه متصل به سیستم است. و معادلات ارتباط دهنده شار استاتور و جریان های ژنراتور نیز به صورت زیر قابل بیان اند:

معادله شار استاتور

$$\lambda_{ds} = -[(X_s + X_m) i_{ds} + X_m i_{dr}] \quad (۱۰-۵)$$

$$\lambda_{qs} = -[(X_s + X_m) i_{qs} + X_m i_{qr}] \quad (۱۱-۵)$$

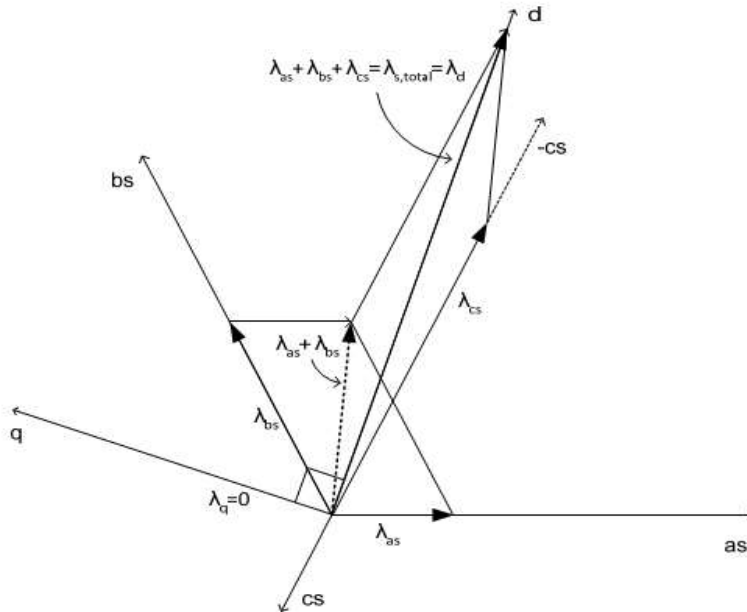


معادله شار روتور

$$\lambda_{dr} = -(X_r + X_m)i_{dr} + X_m i_{ds} \quad (12-5)$$

$$\lambda_{qr} = -(X_r + X_m)i_{qr} + X_m i_{qs} \quad (13-5)$$

اگر ماشین القایی روتور سیم‌پیچی شده به صورت یک دستگاه مرجع گردان سنکرون  $dq_0$  با مشروحات فوق در نظر گرفته شود و جریان جاری شده در استاتور متعادل فرض شود، این جریان باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی در استاتور می‌شود که دارای اندازه‌ی ثابت بوده و در سرعت سنکرون می‌چرخد. از آنجایی که سرعت زاویه‌ای میدان مغناطیسی استاتور و دستگاه مرجع گردان  $dq_0$  مشابه هستند، بردار میدان مغناطیسی استاتور به محورهای  $d$  و  $q$  دستگاه مرجع گردان  $dq_0$  چسبیده است. اگر محور  $d$  دستگاه مرجع گردان را به صورت مایل در نظر بگیریم، با بردار میدان مغناطیسی استاتور هم سو خواهد بود. شکل ۲-۵ جهت و هم راستایی دستگاه مرجع  $dq_0$  و میدان مغناطیسی استاتور را به عنوان دستگاه مرجع نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵: محور  $d$  دستگاه مرجع گردان سنکرون  $dq_0$

به خاطر تطابق، نتایج زیر حاصل می‌شوند.

$$\lambda_{qs} = 0 \quad (14-5)$$

$$\lambda_{ds} = \lambda_{s,total} \quad (15-5)$$

با جایگذاری معادلات (۱۶-۵) و (۱۷-۵) در (۶۴-۳) و (۶۵-۳) و فرض اینکه المان مقاومتی سیم‌پیچی ۳ قابل صرف‌نظر است، روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$V_{qs} = \omega \lambda_{ds} = \omega \lambda_{s,total} = constant \quad (۱۶-۵)$$

$$V_{ds} = 0 \quad (۱۷-۵)$$

معادلات (۱۶-۵) و (۱۷-۵) نشان می‌دهند که ولتاژ سرعت  $v_{qs}$  مستقل از زمان است و ولتاژ محور استاتور قابل صرف‌نظر است. محور  $d$  و  $q$  با استفاده از محورهای  $d$  و  $q$  روتور قابل کنترل هستند. با استفاده از معادلات شار استاتور و روتور آورده شده در معادلات (۷۰-۳) و (۷۱-۳) و با در نظر گرفتن  $i_{qs} = 0$ ، جریان‌های محورهای  $d$  و  $q$  استاتور به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$i_{qs} = \left( -\frac{L_m}{L_{is} + L_m} \right) i'_{qr} \quad (۱۸-۵)$$

$$i_{ds} = \left( -\frac{\lambda_{ds} - L_m i'_{dr}}{L_{is} + L_m} \right) \quad (۱۹-۵)$$

کمیت‌های اندوکتانس و شار در معادلات (۱۸-۵) و (۱۹-۵) مستقل از زمان هستند، بنابراین جریان محورهای  $d$  و  $q$  استاتور می‌توانند با تنظیم جریان محورهای  $d$  و  $q$  روتور به طور مناسب کنترل شوند.

توان اکتیو و راکتیو سیم‌پیچی استاتور به صورت زیر داده می‌شود:

$$P_s = \frac{3}{\gamma} (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \quad (۲۰-۵)$$

$$Q_s = -\frac{3}{\gamma} (V_{ds} i_{qs} + V_{qs} i_{ds}) \quad (۲۱-۵)$$

از آنجایی که ولتاژ محور  $d$  استاتور همان طور که در معادله (۱۷-۵) به دست آمده صفر است، معادلات (۲۰-۵) و (۲۱-۵) به صورت زیر قابل ساده‌سازی‌اند.

$$P_s = \frac{3}{\gamma} (V_{qs} i_{qs}) \quad (۲۲-۵)$$

$$Q_s = -\frac{3}{\gamma} (V_{qs} i_{ds}) \quad (۲۳-۵)$$

معادلات حاکم بر بخش مکانیکی ژنراتور، نیز به صورت مدل زیر در نظر گرفته شده است.

$$W_m = (T_m - T_e) / 2H \quad (۲۴-۵)$$

که در آن  $H$  ثابت اینرسی روتور و  $T_m$ ، گشتاور مکانیکی است که نتیجه چرخش توربین بادی حاصل آمده و اگر  $T_e$  گشتاور خروجی ژنراتور باشد، خواهیم داشت:

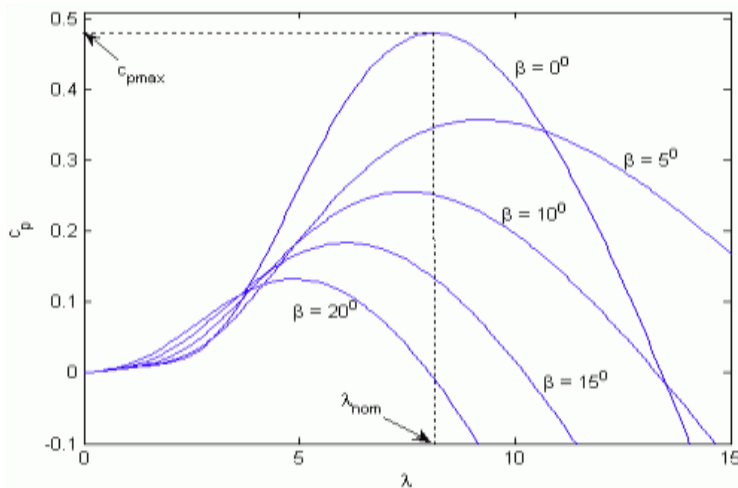
$$T_e = \lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} \quad (25-5)$$

$$T_m = \frac{P_w}{\omega_m} \quad (26-5)$$

که  $\omega_m$  سرعت زاویه‌ای روتور ژنراتور است و  $P_w$  توان خروجی توربین بادی است، که به صورت زیر با توجه به سرعت باد محاسبه می‌گردد:

$$P_w = \frac{\rho}{\gamma} \cdot C_p(\lambda, \theta_p) \cdot A_r V_w^3 \quad (27-5)$$

که در آن  $A_r$ ، مساحتی است که پره‌های توربین در هر بار چرخش جاروب می‌کنند، که آن نیز با توجه به شعاع پره‌ها با رابطه  $(\pi R^2)$  قابل محاسبه است.  $\rho$ ، چگالی هوا و تابع  $C_p$  بر حسب  $\lambda$  و  $\theta_p$  که به ترتیب نسبت زاویه اوج، و زاویه گام (pitch) یا زاویه بین پره‌های توربین بادی می‌باشد، بدست می‌آید. منحنی  $C_p$  بر حسب  $\lambda$  و  $\theta_p$  در شکل ۳-۵، نشان داده شده است، که مقادیر مختلفی از آن برای مدل توربین بادی لازم است.



شکل ۳-۵: شکل موج  $C_p$  بر حسب  $\lambda$  و  $\theta_p$

تخمین ریاضی این منحنی به صورت‌های مختلفی ممکن است، مانند آنچه در معادله (۲۷-۵) آمده است.

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_r}{\lambda_i} - C_r \beta - C_f \right) e^{-\frac{C_\delta}{\lambda_i}} + C_f \lambda \quad (28-5)$$

که  $\lambda_i$  مقادیر مختلف این متغیر است که بر حسب  $\lambda$  و  $\theta_p$  صورت زیر قابل حصول است:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.35}{\beta^3 + 1} \quad (29-5)$$

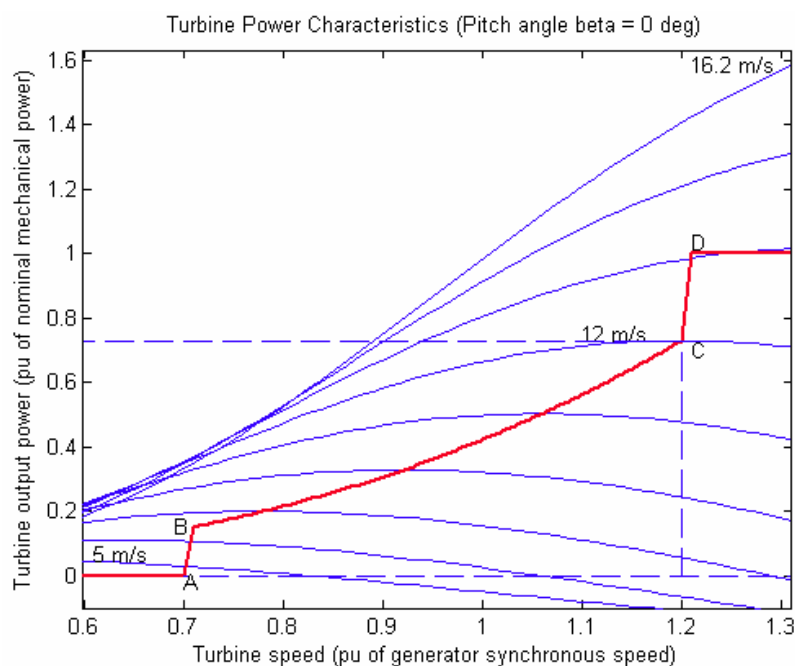
ماکزیم مقدار  $C_p$  در این مدل،  $0.48$  است که متناظر زاویه گام صفر و  $\lambda = 8/1$  است، که این مقدار  $\lambda$  را مقدار نامی می‌نامیم و که مقدار پایه‌ای برای پریونیت  $\lambda$  خواهد بود و برابر نسبت سرعت اوج پره به سرعت ماکزیم باد است:

$$\lambda_{nom} = \frac{V_t}{V_w} = \eta_{GB} \frac{2R\omega_m}{P \cdot V_w} \quad (30-5)$$

$\eta_{GB}$  نسبت جعبه دنده و  $P$  تعداد قطب‌ها و  $V_w$  سرعت باد است که مدل باد نیز در ادامه بحث خواهد شد.

پس با داشتن تابع  $C_p$  و سرعت باد، توان خروجی توربین بر حسب سرعت آن، بدست آمده و از معادله (30-5) مطابق شکل 4-5 خواهد بود.

بخش‌های باقیمانده از مدل سیستم، کنترل زاویه گام، کنترل ولتاژ است که  $i_{qr}$  و  $i_{dr}$  معلوم می‌شوند و با قرار دادن در معادلات فوق و معلوم بودن  $V_{qs}$  و  $V_{ds}$ ، پارامترهای مجهول به دست آیند.



شکل 4-5: شکل موج توان توربین بادی بر حسب سرعت آن

## ۵ ۶ ۲ مدل فضای حالت سیستم

مدل سیستم که به صورت غیرخطی می‌باشد را با استفاده از تبدیل (dq۰) پارکر به صورت

زیر خطی سازی می‌کنیم. مدل خطی سازی شده ژنراتور القایی به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{X} = A \cdot x + B \cdot u \quad (۳۱-۵)$$

$$y = C \cdot x + Du$$

$$x = [\lambda_{dr} \quad \lambda_{qr}]^T \quad (۳۲-۵)$$

$$u = [I_{ds} \quad I_{qs} \quad V_{dr} \quad V_{qr}]^T \quad (۳۳-۵)$$

$$y = [V_{ds} \quad V_{qs}]^T \quad (۳۴-۵)$$

و

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \quad (۳۵-۵)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{R_r \cdot M}{L_r} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \frac{R_r \cdot M}{L_r} & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad (۳۶-۵)$$

$$C = -\frac{M}{L_r} \begin{bmatrix} \frac{R_r}{L_r} & \omega \\ \omega & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \quad (۳۷-۵)$$

$$D = \begin{bmatrix} R_s + \frac{M^2}{L_r} \cdot R_r & -\sigma \cdot L_s \cdot \omega & \frac{M}{L_r} & \cdot \\ \sigma \cdot L_s \cdot \omega & R_s + \frac{M^2}{L_r} \cdot R_r & \cdot & \frac{M}{L_r} \end{bmatrix} \quad (۳۸-۵)$$

با توجه به این که کلیه پارامترهای سیستم دارای نامعینی ساختار یافته می‌باشند، برای درک

اثر هر یک از نامعینی‌ها بر سیستم خطی، می‌توان این پارامترها را یک به یک تغییر داده و اثر آن را بر

سیستم خطی مطالعه کرد.

## ۷-۵ انتخاب تابع‌های وزنی

مجموعه‌ای از تابع‌های وزنی برای یک مسئله طراحی خاص اغلب شامل تکرار پذیری زیاد و تنظیم خوب است. دادن یک فرمول کلی برای تابع‌های وزنی که در هر شرایطی که کار کند بسیار دشوار است. با این وجود ما باید سعی کنیم با نگاه به یک مسئله *SISO* معمولی یکی از دستورات عمل‌های مناسب را به دست آوریم.

برای تحریک تابع زمانی عملکرد،  $L = PK$  قرار می‌دهیم و سیستم استاندارد درجه دوم:

$$L = \frac{W_n^2}{S(S + 2\xi W_n)} \quad (39-5)$$

از تئوری کنترل کلاسیک، خیلی معروف است که کیفیت پاسخ زمانی به وسیله  $Tr$ ،  $TS$  و در صد فراجهدش تعیین می‌شود. علاوه بر این عملکرد این شاخص‌ها می‌تواند تقریباً محاسبه شود توسط:

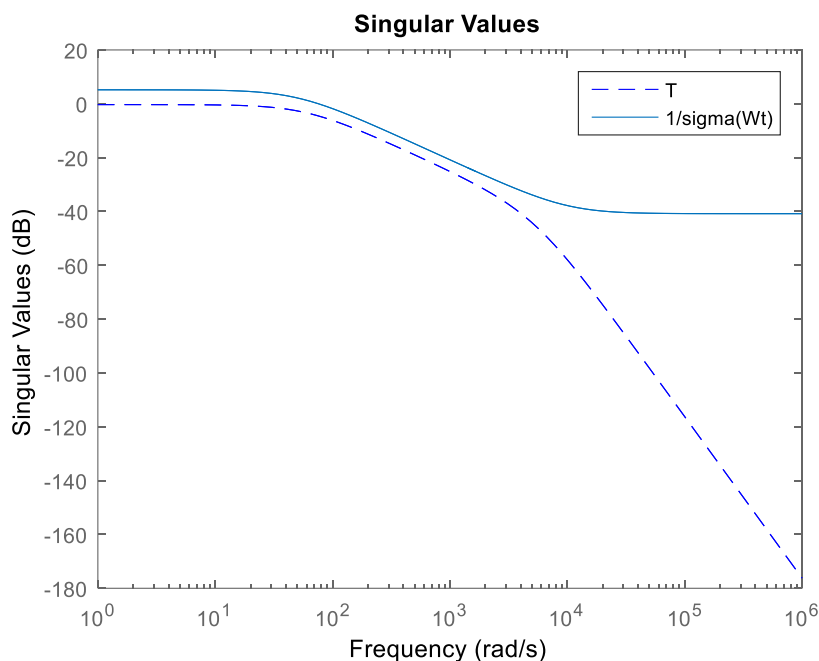
$$Tr = \frac{0.6 + 2/16\xi}{W_n} ; \frac{1}{3} \leq \xi \leq \frac{1}{8} ; TS = \frac{4}{\xi W_n} ; M_{pz} e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (40-5)$$

به نکات زیر باید توجه داشت:

۱. سرعت پاسخ سیستم با  $W_n$  متناسب است.
  ۲. اضافه جهش پاسخ سیستم تنها به وسیله ضریب میرایی  $\xi$  مشخص می‌شود.
- فرکانس  $W_n$  فرض میرایی  $\xi$  در تعیین فرکانس قطع حلقه باز و پهنای باند و پیک پاسخ تابع حساسیت مکمل حلقه بسته ( $T$ ) نقش دارند.

<sup>۱</sup> Rise Time

<sup>۲</sup> Settling Time



شکل ۵-۵: مقادیر ویژه تابع وزنی پایداری بدون نامعینی

از آنجا که اهداف ما با تابع حساسیت رابطه نزدیک دارند، باید بعضی جزئیات چگونگی این شاخص حوزه یا به طور معادله رابطه  $W_n$ ،  $\xi$  با پاسخ فرکانسی تابع حساسیت را به دست آوریم:

$$S = \frac{1}{1+L} = \frac{S(S + 2\xi W_n)}{S^2 + 2\xi W_n S + W_n^2} \quad (41-5)$$

ما باید به پهنای باند حلقه بسته  $W_b \approx \frac{W_n}{\sqrt{2}}$  توجه کنیم، در فرکانس‌های بالاتر از  $W_b$ ، سیستم حلقه بسته توانایی ردیابی سیگنال مرجع را ندارد و در این فرکانس اغتشاش تقویت خواهد شد.

$$M_s = \|S\|_\infty = |S(j\omega)| = \frac{\alpha \sqrt{\alpha^2 + 4\xi^2}}{\sqrt{(1 - \alpha^2)^2 + 4\xi^2 d^2}} \quad (42-5)$$

به طوری که

$$\alpha = \sqrt{0.5 + 0.5\sqrt{1 + 18\xi^2}} \quad (43-5)$$

روشن است که اگر  $M_s$  بزرگ باشد اضافه جهش<sup>۱</sup> بیش از حد است. در یک طراحی کنترل خوب  $M_s$  نباید خیلی بزرگ باشد. حال فرض می‌کنیم ما مشخصات کارکرد حوزه زمان را داریم ما

<sup>۱</sup> Over Shoot

می‌توانیم الزامات متناظر در حوزه فرکانس در ترم‌هایی از پهنای باند و پیک حساسیت  $M_s$  تعیین کنیم. از آن جا که یک طراحی خوب باید در تابع حساسیت ( $S$ ) مطلوب به همراه پهنای باند  $W_b$  نتیجه دهد. که در شکل زیر وزن کارکرد  $W_e$  و  $S$  مطلوب نمایش داده شده است.

این الزامات می‌توانند تقریباً نمایش داده شود توسط:

$$|S(s)| \leq \frac{S}{S/M_s + W_b} \quad (44-5)$$

یا معادلاً

$$|W_e S| \leq 1 \quad (45-5)$$

$$W_e = \frac{S/M_s + W_b}{S} \quad (46-5)$$

از آنجا که خطای حالت ماندگار با توجه به ورودی پله توسط  $|S(\cdot)|$  داده می‌شود واضح است که اگر سیستم حلقه بسته پایدار باشد و  $\|W_e S\|_\infty < \infty$  آن گاه  $|S(\cdot)| = 0$ .

در حال حاضر برای ردیابی ورودی پله، هدف ما تنها، خطای حالت ماندگار با توجه به ورودی پله نباید بزرگ‌تر از  $\varepsilon$  باشد (یعنی  $|S(\cdot)| \leq \varepsilon$ ).

سپس کافی است که تابع وزنی  $W_e$  چنان انتخاب شود که:  $|W_e(\cdot)| > \frac{1}{\varepsilon}$  و همچنین  $\|W_e S\|_\infty < 1$  یک انتخاب  $W_e$  به دست می‌آید توسط:

$$W_e = \frac{S/M_s + W_b}{S + W_b \varepsilon} \quad (47-5)$$

اگر شیب انتقال ما بین فرکانس‌های پایین و فرکانس‌های بالا مد نظر است آنگاه مطابق زیر به دست می‌آید:

$$W_e = \left( \frac{S/\sqrt[k]{M_s} + W_b}{S + W_b \sqrt[k]{\xi}} \right)^k ; \quad k \geq 1 ; k \in \mathbb{N} \quad (48-5)$$

انتخاب تابع وزنی  $W_u$  مشابه به بحث قبلی می‌باشد. با در نظر گرفتن معادله سیگنال کنترل با میزان مجاز تلاش کنترلی و اشباع محدود محرک‌ها دامنه  $|KS|$  در رنج فرکانس‌های پایین اساساً محدود شده است، از این رو، در مجموع، ماکزیمم بهره  $M_u$  از  $KS$  می‌تواند نسبتاً بزرگ باشد، در



حالی که بهره فرکانس‌های بالا توسط پهنای باند کنترل کننده  $W_{bc}$  و فرکانس‌های نویز (حسگر) اساساً محدود شده است به طور ایده آل می‌خواهیم تا جایی که ممکن است نویزهای فرکانس بالا ضعیف شوند به همین جهت وزن  $W_u$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$W_u = \frac{S + W_{bc}/M_u}{\varepsilon_1 S} + W_b \quad (49-5)$$

به هر حال، تکنیک‌های طراحی کنترل بهینه نمی‌تواند مستقیماً به مسائل با تابع وزنی کنترل نامناسب اعمال شود. از این جهت برای این که  $W_u$  سره شود یک قطب دور معرفی می‌کنیم.

وزن‌ها برای مسائل MIMO می‌تواند به عنوان ماتریس‌های قطری انتخاب شود.

$$W_u = \left( \frac{S + W_{bc} + \sqrt[k]{M_u}}{\sqrt{\varepsilon_1 S} + W_{bc}} \right)^k ; \quad k \geq 1 ; k \in \mathbb{N} \quad (50-5)$$

## ۵ ۷ ۱ انتخاب تابع وزنی کارایی

برای رسیدن به عملکرد مطلوب توابع وزنی  $W_s(s)$  به صورت رابطه زیر انتخاب می‌شود:

$$W_s(s) = \left[ \frac{0.055 * (0.02s + 1) / (1 + 0.0001s)}{0.055 * (0.02s + 1) / (1 + 0.0001s)} \right] \quad (51-5)$$

لازم به ذکر است این ماتریس وزنی پس از چند مرحله سعی و خطا به گونه‌ای انتخاب شده است که پاسخ سیستم ضمن داشتن کمترین خطای حالت ماندگار دارای سرعت مناسب و فراجهدش کمی باشد. این موضوع را با بررسی  $W_{1s}(s)$  می‌توان بهتر توضیح داد:

$$W_{1s}(s) = (0.055 * (0.02s + 1) / (1 + 0.0001s)) \quad (52-5)$$

قطب تابع وزنی بسیار نزدیک صفر است، لذا در حالت حلقه بسته و در شرایط مطلوب خطای ماندگار نیز نزدیک صفر خواهد شد:

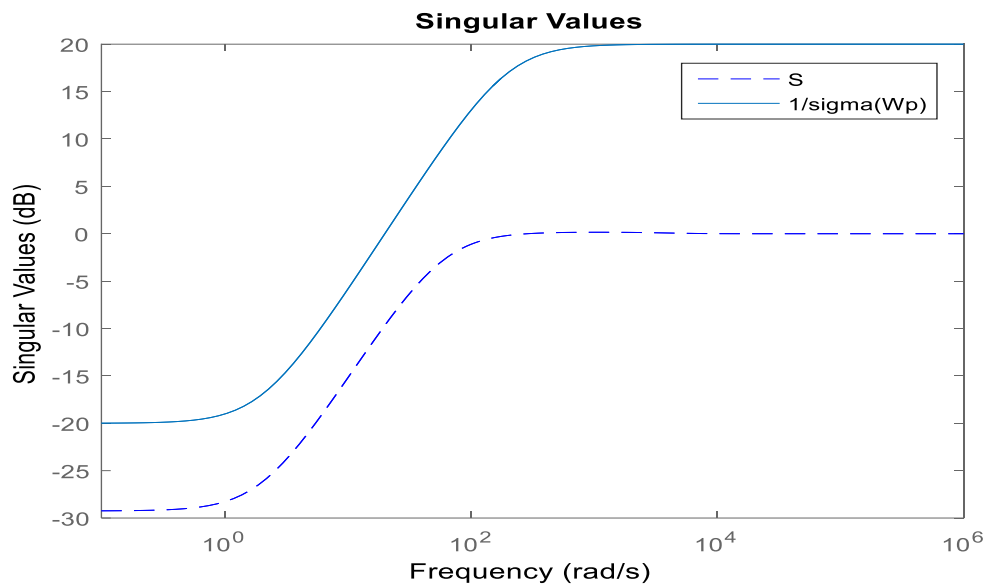
$$|S(\cdot)| < W_{1s}^{-1}(\cdot) = \varepsilon = 4 * 10^{-5} \quad (53-5)$$

$$1 = 0.055 \frac{0.02j\omega + 1}{0.0001j\omega + 1} \Rightarrow 18/18 \approx \frac{0.02j\omega + 1}{0.0001j\omega + 1} \Rightarrow \omega = 0.0024 \quad (54-5)$$

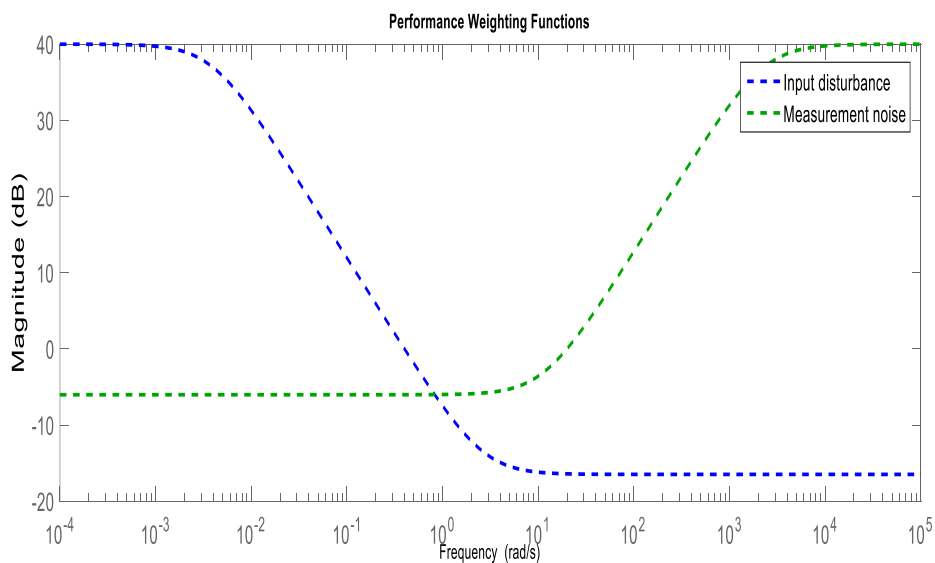
لذا زمان صعود سیستم مطلوب برابر است با:

$$t_r = \frac{2/3}{\omega} = 9450 \text{ sec} \quad (55-5)$$

این زمان اگر چه طولانی انتخاب شده اما با فیزیک مسئله همخوانی دارد و برای شروع کار قابل پذیرش است. لذا در ادامه اگر فراجهبش طراحی زیاد نگردید می توان با افزایش پهنای باند (کاهش زمان صعود)، سرعت سیستم حلقه بسته را به منظور حذف خطا و رسیدن به حالت پایدار مطلوب تنظیم نمود. همین استدلال را می توان برای  $W_{\zeta S}(s)$  بیان نمود توجه نمایید که در این رویکرد با توجه به وجود نامعینی نسبتاً زیاد در سیستم به خصوص در فرکانس های پایین، در عمل دسترسی به توابع وزنی با کارایی بهتر امکان پذیر نیست.



شکل ۵-۶: مقادیر ویژه تابع وزنی ورودی بدون نامعینی



شکل ۵-۷: کارایی توابع وزنی در حضور اغتشاش ورودی و نویز اندازه گیری شده

## ۵ ۷ ۲ انتخاب تابع وزنی تلاش کنترلی

یکی از راه‌های محدود کردن سیگنال تلاش کنترلی، انتخاب یک تابع وزنی مناسب است.

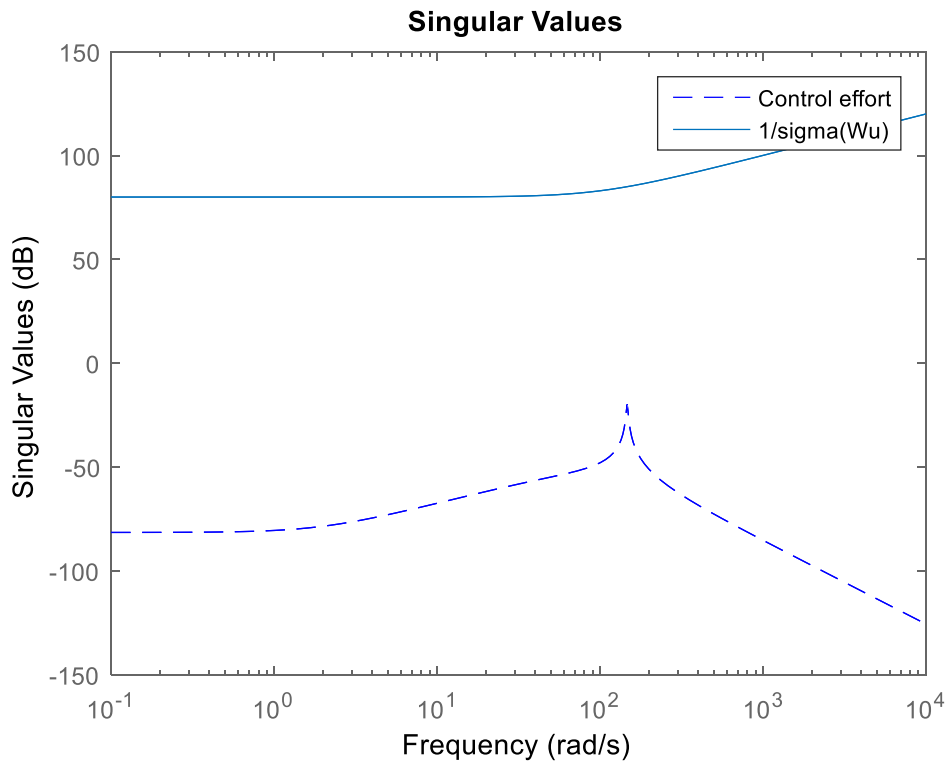
بدین منظور تابع وزنی  $W_u(s)$  به شکل زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$W_u(s) = 0.01 * \begin{bmatrix} (1/(s + 100)) & 0 \\ 0 & (1/(s + 100)) \end{bmatrix} \quad (5-56)$$

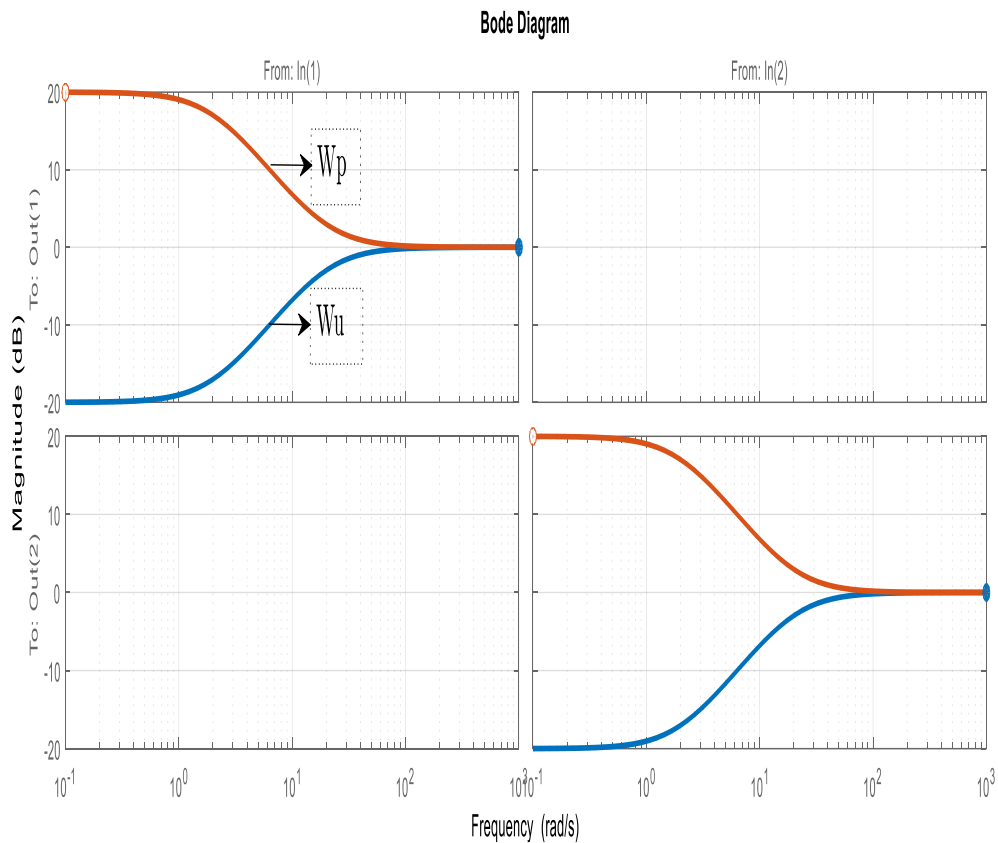
در این انتخاب حد اشباع هر دو عملگر در کلیه فرکانس‌ها برابر با مقدار  $W_u^{-1}(s) =$

$(s + 100)$  انتخاب شده است. اگر در شبیه‌سازی حلقه بسته عملگرها نتوانند این مقدار را تأمین

نمایند، در مورد شکل‌دهی فرکانسی این تابع وزنی اقدام می‌شود.



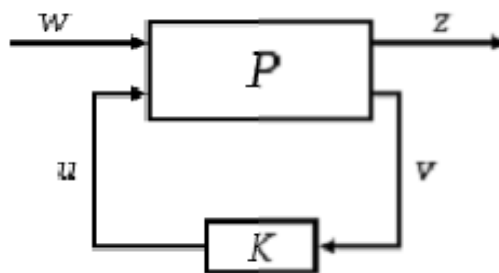
شکل ۵-۸: مقادیر ویژه تابع وزنی ورودی بدون نامعینی



شکل ۵-۹: دیاگرام بود  $W_u$  و  $W_p$

### ۵-۸ تبدیل به فرم مسئله عمومی تنظیم

برای طراحی کنترل کننده مقاوم ابتدا می‌بایست سیستم به فرم مسئله عمومی تنظیم که در شکل (۵-۹) نشان داده شده است، تبدیل شود.



شکل ۵-۱۰: تابع تبدیل تعمیم یافته و کنترلر در مسئله عمومی تنظیم

هدف این بخش یافتن تابع تبدیلی است  $(T_{ZW})$  که ارتباط بین سیگنال ورودی وارد بر سیستم نامی  $W(S)$  و سیگنال خروجی‌های تنظیم شونده سیستم را بر حسب مولفه‌های ماتریس تابع تبدیل  $P$  تعیین نماید.

حال رابطه حاکم بر شکل را در نظر بگیرید:

$$\begin{bmatrix} z \\ v \end{bmatrix} = P(s) \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (57-5)$$

$$u = K(s)v \quad (58-5)$$

پس می‌توان عبارات زیر را تعریف نمود:

$$T_{zw} = F_l(P, K) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \quad (59-5)$$

$$u = K(s)v \quad (60-5)$$

اصطلاحاً به تابع تبدیل  $F$  تبدیل کسری خطی<sup>۱</sup> یا  $LFT$  از  $P$  و  $K$  گفته می‌شود. به دلیل آن که حلقه پائینی  $M$  با بلوک  $K$  احاطه شده است، این نوع از تبدیل کسری خطی پائینی<sup>۲</sup> یا  $LLFT$  نیز می‌گویند و با  $F_l(P, K)$  نشان می‌دهند. همچنین  $P(s)$  سیستم تعمیم یافته<sup>۳</sup> یا سیستم متصل شده<sup>۴</sup> نامیده می‌شود [۷۸].

## ۵ ۸ ۱ طراحی کنترل کننده $H_\infty$

هدف از این بخش پس از انتخاب ماتریس‌های وزنی مناسب دستیابی به کنترل کننده‌ای است که ضمن تضمین پایداری مقاوم در سیستم، کارایی مناسبی در حضور محدودیت در کارایی داشته باشد. این بدان معناست که  $\gamma_{opt} = 0.972 < 1$  و بدین ترتیب امکان دستیابی به پایداری مقاوم با شاخص کارایی تعیین شده در این حالت وجود دارد.

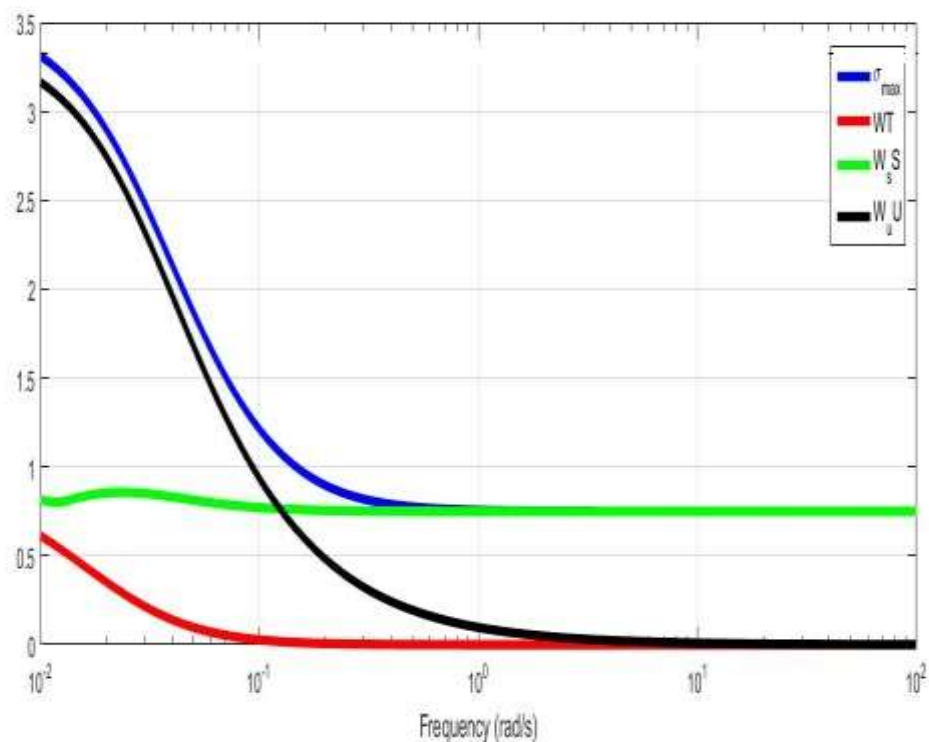
البته باید توجه داشته باشیم که بر خلاف سیستم‌های  $SISO$  که منحنی بودی اجزای سیستم حلقه بسته رسم می‌گردد، در سیستم‌های  $MIMO$  لازم است مقدار تکین هر یک از اجزای سیستم حلقه بسته بدست آورده شود.

<sup>۱</sup> Linear Fractional Transformation

<sup>۲</sup> Lower Linear Fractional Transformation

<sup>۳</sup> Generalized Plant

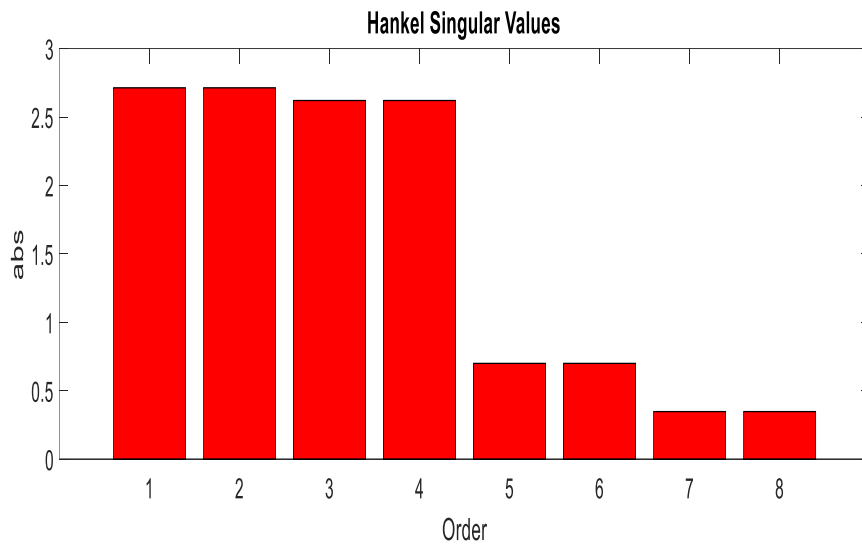
<sup>۴</sup> Interconnected System



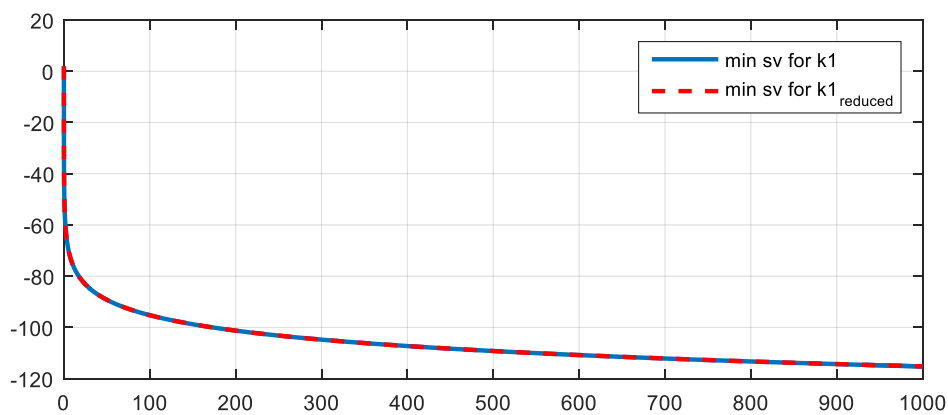
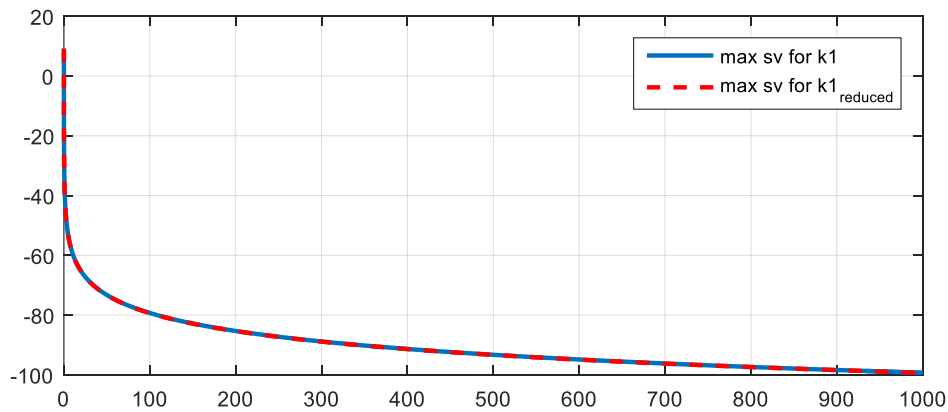
شکل ۵-۱۱: مقادیر تکین اجزای سیستم حلقه بسته

## ۵ ۸ ۲ کاهش مرتبه کنترل کننده

از آنجا که کنترل کننده بدست آمده از مرتبه ۱۳ می باشد لذا بررسی می کنیم آیا می توان مرتبه کنترل کننده را کاهش داد برای این منظور ابتدا مقادیر تکین هنکل این تابع تبدیل را به صورت زیر داریم:



شکل ۵-۱۲: مقادیر تکین هنکل برای کنترل کننده طراحی شده



شکل ۵-۱۳: بزرگترین و کوچکترین مقادیر تکین هنکل کنترل کننده اصلی و کاهش مرتبه یافته

در این سیستم از جعبه ابزار مقاوم نرم افزار متلب با استفاده از پلنت کاهش مرتبه مورد نظر کنترلر  $K$  را به صورت زیر طراحی می‌کنیم:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (۶۱-۵)$$

که در (۶۱-۵) داریم:

$$K_{11} = \frac{-1346s^7 - 1.382e \cdot 7s^6 - 3.747e \cdot 9s^5 - 9.026e11s^4 - 1.544e14s^3 - 1.672e16s^2 - 1.593e18s - 8.003e19}{s^8 + 2.034e \cdot 4s^7 + 1.068e \cdot 8s^6 + 3.535e10s^5 + 8.47e12s^4 + 1.486e15s^3 + 1.675e17s^2 + 1.493e19s + 7.657e20}$$

$$K_{12} = \frac{-1.388e \cdot 4s^7 - 1.426e \cdot 8s^6 - 3.866e10s^5 - 9.312e12s^4 - 1.593e15s^3 - 1.725e17s^2 - 1.643e19s - 8.257e20}{s^8 + 2.034e \cdot 4s^7 + 1.068e \cdot 8s^6 + 3.535e10s^5 + 8.47e12s^4 + 1.486e15s^3 + 1.675e17s^2 + 1.493e19s + 7.657e20}$$

$$K_{21} = \frac{1.388e \cdot 4s^7 + 1.426e \cdot 8s^6 + 3.866e10s^5 + 9.312e12s^4 + 1.593e15s^3 + 1.725e17s^2 + 1.643e19s + 8.257e20}{s^8 + 2.034e \cdot 4s^7 + 1.068e \cdot 8s^6 + 3.535e10s^5 + 8.47e12s^4 + 1.486e15s^3 + 1.675e17s^2 + 1.493e19s + 7.657e20}$$

$$K_{22} = \frac{-1346s^7 - 1.382e \cdot 7s^6 - 3.747e \cdot 9s^5 - 9.026e11s^4 - 1.544e14s^3 - 1.672e16s^2 - 1.593e18s - 8.003e19}{s^8 + 2.034e \cdot 4s^7 + 1.068e \cdot 8s^6 + 3.535e10s^5 + 8.47e12s^4 + 1.486e15s^3 + 1.675e17s^2 + 1.493e19s + 7.657e20}$$

## ۹-۵ اهداف طراحی:

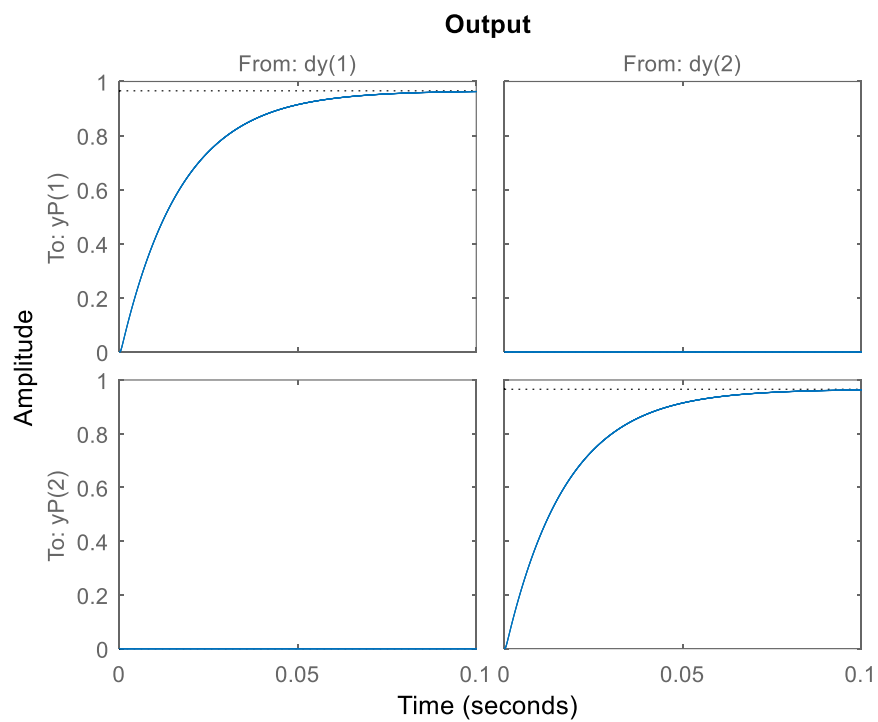
همان‌گونه که قبلاً اشاره کردیم در این سیستم هدف کنترل توان اکتیو و راکتیو یک واحد ژنراتور القایی توربین بادی می‌باشد.

باید توجه داشته باشیم که کنترل کننده باید بتواند علاوه بر پایداری حلقه بسته، کارایی مقاوم نسبت به نامعینی‌های سیستم را نیز تأمین نماید، همچنین باید بتواند اثر انواع اغتشاش را به خوبی تضعیف نماید. بنابراین توجه به سیگنال کنترلی و جلوگیری از اشباع آن نیز اهمیت زیادی برخوردار است.

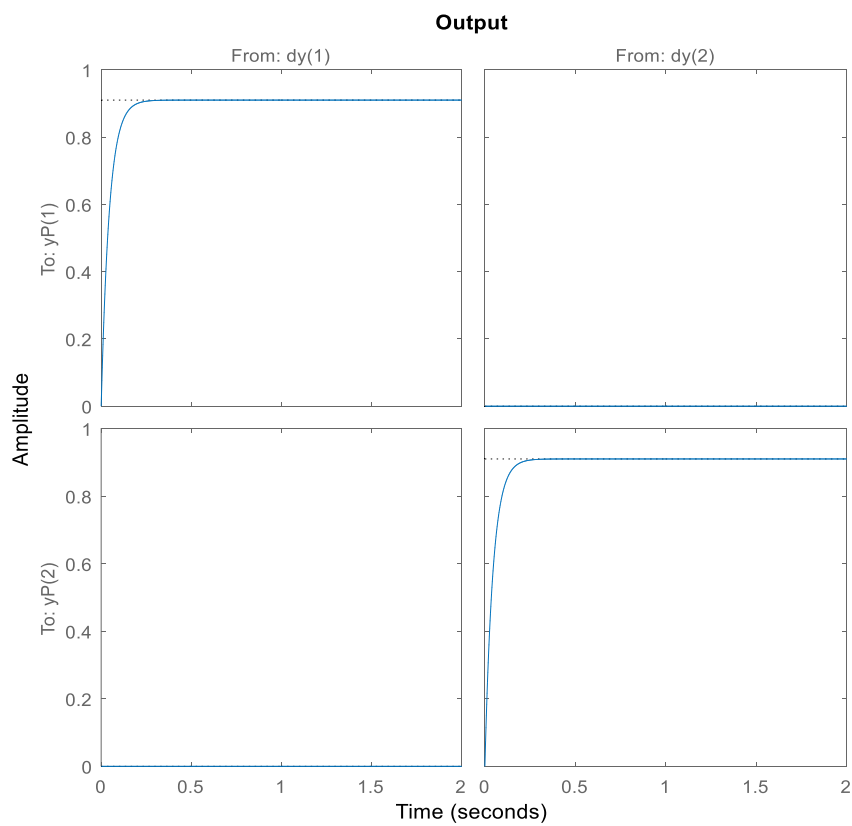
شکل ۵-۱۴ و شکل ۵-۱۵ پاسخ پله نتایج حاصل از طراحی کنترل کننده و پیاده سازی آن روی سیستم را نشان می‌دهد:

همان طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود پاسخ سیستم با وجود کنترل کننده طراحی شده در دو حالت بدون نامعینی و همراه با نامعینی مطابق با خواسته‌های کنترلی بوده و مناسب می‌باشد.





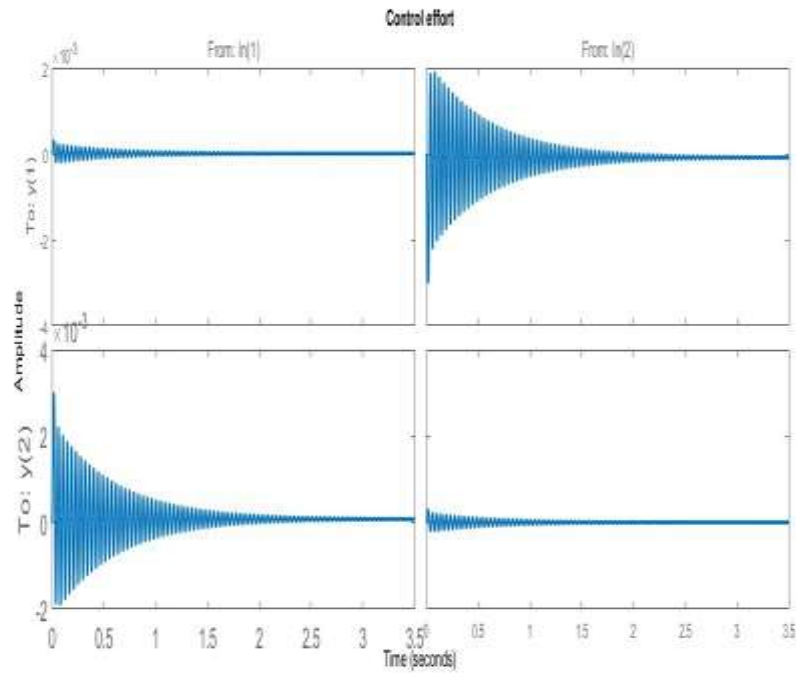
شکل ۵-۱۴: پاسخ پله سیستم بدون حضور نامعینی



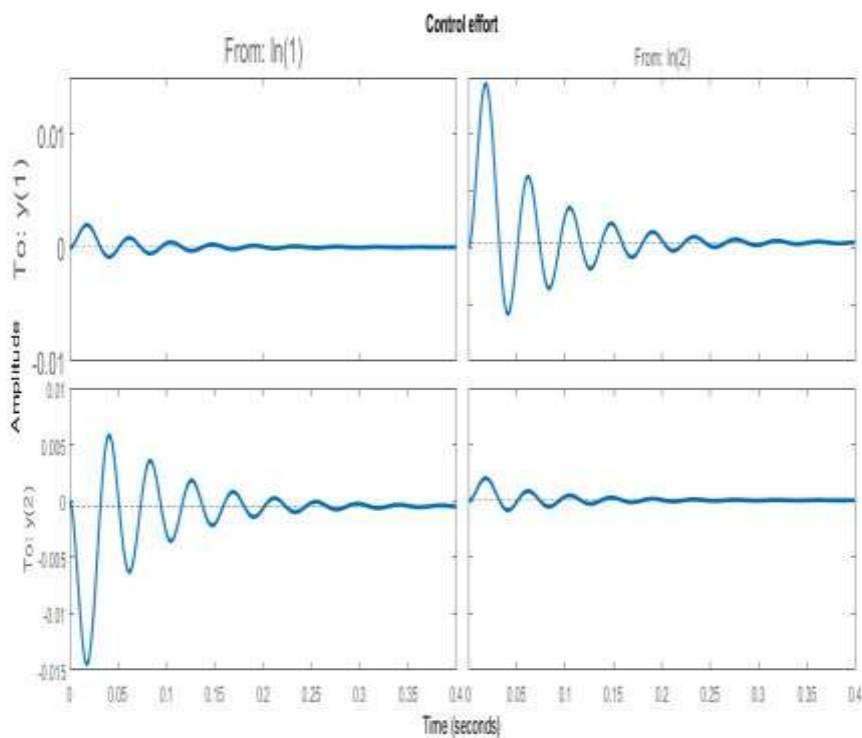
شکل ۵-۱۵: پاسخ پله سیستم در حضور نامعینی

شکل ۱۶-۵ و شکل ۱۷-۵ نیز تلاش کنترلی در دو حالت بدون نامعینی و همراه با نامعینی را

نشان می‌دهد:



شکل ۱۶-۵: تلاش کنترلی در حضور نامعینی



شکل ۱۷-۵: تلاش کنترلی بدون حضور نامعینی

## ۵ ۹ ۱ نتایج شبیه‌سازی روی توربین بادی:

همان‌گونه که دیدیم پاسخ پله حاصل از اعمال کنترل کننده طراحی شده به سیستم به‌خوبی اهداف کنترلی ما را برآورده ساخت.

در این بخش نتایج اعمال کنترل کننده مقاوم طرحی شده را روی سیستم توربین بادی با ژنراتور دو سو تغذیه بیان می‌کنیم. همان‌گونه که قبلاً بیان شد هدف ما در این پایان‌نامه کنترل توان اکتیو و راکتیو تولید شده توسط توربین بادی است [۷۹-۸۰].

جدول ۵-۱: پارامترهای مربوط به توربین بادی و ژنراتور القایی

پارامتر	مقدار
$V_s$	۲۲۰ V
F	۵۰ Hz
P	۱,۵ MW
$R_s$	۵ $\Omega$
$R_r$	۱,۰۱ $\Omega$
$L_s$	۰,۳۴۱ H
$L_r$	۰,۰۶۰ H
M	۰,۱۳۵ $Kg/m^2$
J	۰,۰۵۴ $\mu f$
$C_f$	۱۲ $\mu f$
$L_f$	۱۲,۶ mH

پس از مشخص شدن هدف کنترلی در این توربین بادی، نوبت به طراحی یک کنترل کننده کارآمد می‌باشد که در این پایان‌نامه مقایسه بین دو کنترلر<sup>۱</sup> PID به عنوان تنظیم کننده ولتاژ<sup>۲</sup> و مقاوم<sup>۳</sup>  $H_\infty$  برای کنترل توان اکتیو و راکتیو کل سیستم استفاده شده است.

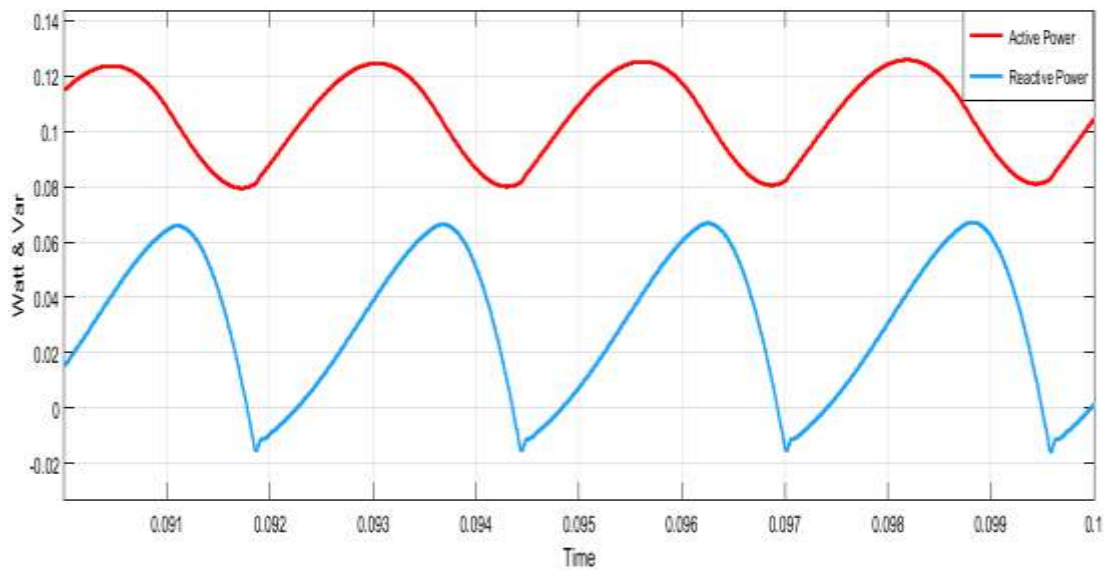
شکل ۵-۱۸ توان اکتیو و راکتیو توربین بادی همراه با ژنراتور القایی تغذیه دو سویه (DFIG)

<sup>۱</sup> Proportional Integral Derivation Controller

<sup>۲</sup> Voltage Regulator

<sup>۳</sup> Robust  $H_\infty$  Control

قبل از اعمال کنترل کننده‌ها را نشان می‌دهد.

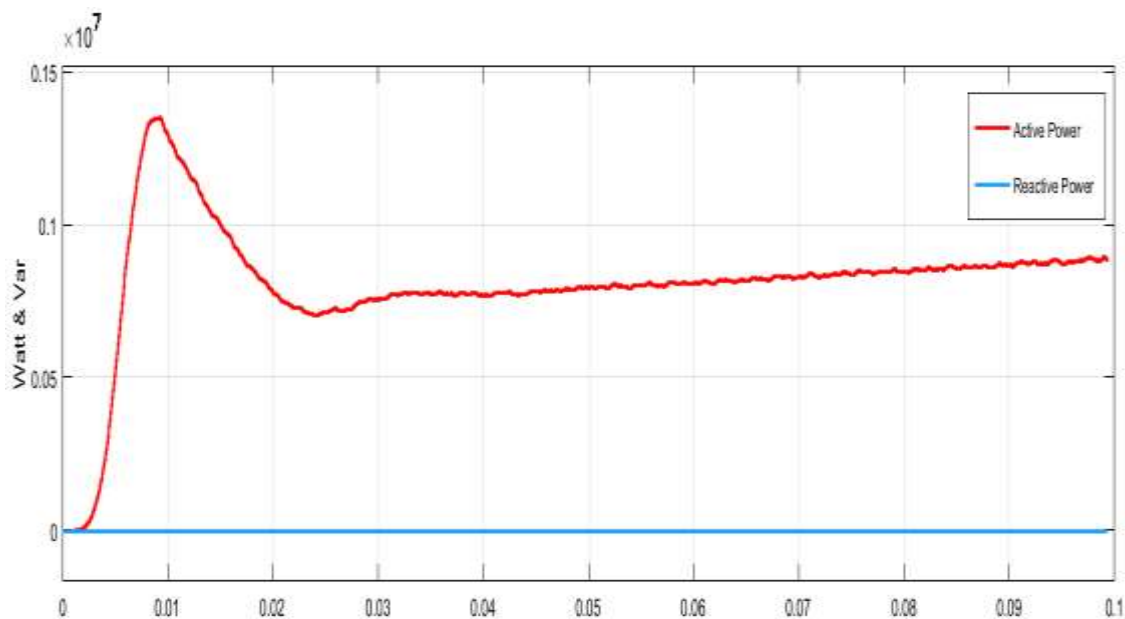


شکل ۵-۱۸: توان اکتیو و راکتیو قبل از اعمال کنترل کننده

حال با طراحی یک کنترل کننده کلاسیک PID با ضرایب  $KD=0.9$  ,  $KI=500$  ,  $KP=0.4$

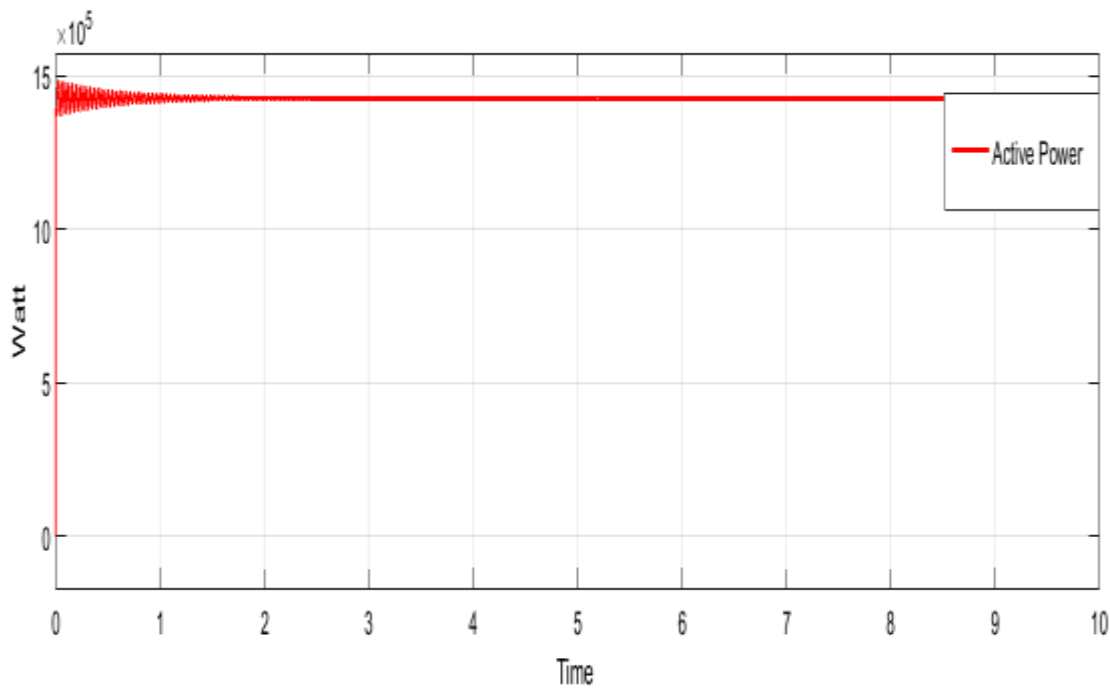
به عنوان تنظیم کننده ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو با فرکانس و دامنه ثابت البته پس از گذراندن حالت

گذرای سیستم به صورت زیر بدست می‌آید.

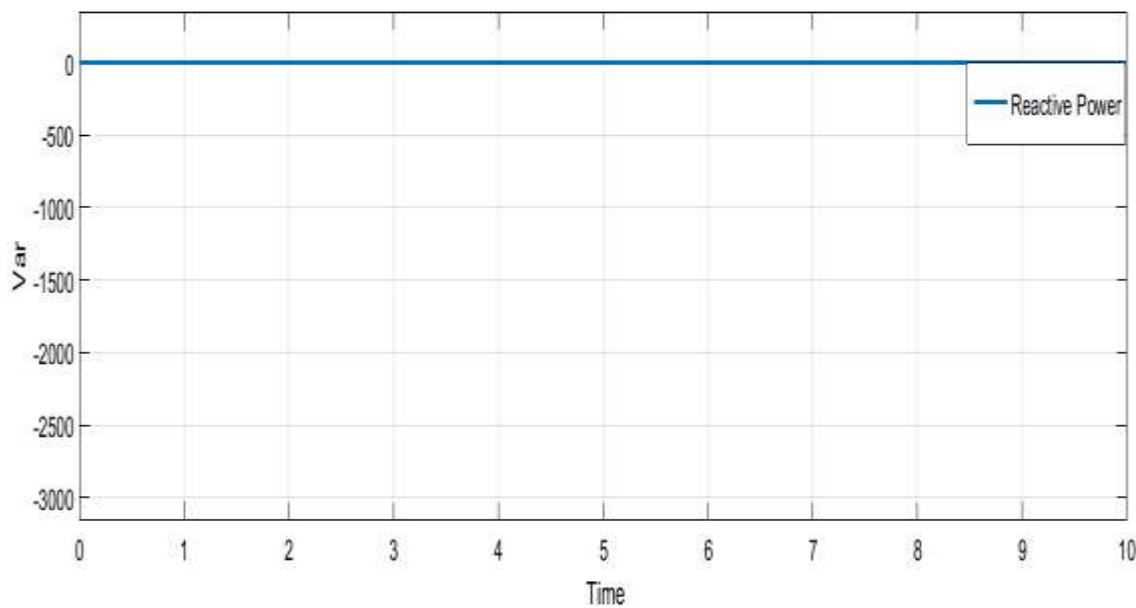


شکل ۵-۱۹: توان اکتیو و راکتیو بعد از اعمال کنترل کننده PID

در ادامه شکل ۵-۲۰ و شکل ۵-۲۱ توان اکتیو و راکتیو تولید شده توسط توربین بادی که توسط کنترلر مقاوم  $H_{\infty}$  کنترل شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل‌ها پیداست کنترل کننده به خوبی توان خروجی را به مقدار مطلوب می‌رساند.



شکل ۵-۲۰: توان اکتیو تولیدی توربین



شکل ۵-۲۱: توان راکتیو تولیدی توربین

چون در حالت ماندگار مؤلفه‌های مولد از جریان روتور در دستگاه مرجع سنکرون، DC و فاقد فاز و فرکانس هستند، نتایج شبیه‌سازی بدست آمده از اعمال این کنترل‌کننده‌ها قابل قبول است. البته چون سیستم بسیار غیرخطی است و تغییرات نقطه کار تأثیرات جزئی بر پارامترهای کنترلر دارد، استفاده از کنترلر مقاوم  $H_{\infty}$  نسبت به کنترل‌کننده PID قابلیت اطمینان بیشتری دارد.

## فصل ۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق، ابتدا یک مدل دینامیکی جامع برای سیستم تبدیل انرژی باد ارائه گردید که این مدل قسمت‌های مکانیکی و الکتریکی را در بر می‌گیرد. با توجه به بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، توربین بادی دارای قسمت‌های غیرخطی مختلف است که برای طراحی یک کنترلر نیاز به دانستن تک تک این اجزا و مدل‌های موجود برای آن‌ها می‌باشد. همچنین برای مدل‌سازی دقیق و مناسب برای طراحی کنترلر، نیاز به شناخت دقیق و عملی از تمامی اجزای بکار رفته در توربین بادی می‌باشد. با بررسی روش‌های مدل‌سازی ریاضی زیر سیستم‌های مختلف، نیاز به روشی جامع و مشترک برای مدل‌سازی نیاز می‌باشد. با تحقیق در این زمینه برای خطی‌سازی ژنراتور القایی تغذیه دو سویه از مدل  $dq$  پارکر استفاده شده است.

با بررسی‌های صورت گرفته در انواع ژنراتورهای بکار رفته در توربین‌های بادی، ژنراتورهای القایی تغذیه دو سویه به عنوان ژنراتور غالب و برتر در نیروگاه‌های بادی تعیین شد. با توجه به نفوذ قابل توجه این ژنراتورها در سیستم قدرت، بررسی عملکرد کنترلر توان این ژنراتورها اهمیت خاصی یافته است. با توجه به نحوه کاربرد ژنراتورهای القایی تغذیه دو سویه در نیروگاه‌های بادی و اتصال مستقیم سیم‌پیچی استاتور آن‌ها به سیستم قدرت این ژنراتورها به اغتشاشات شبکه حساسند. اغتشاش شبکه را می‌توان با دو عامل تغییرات فرکانسی و افت ولتاژ در نظر گرفت. قبل از بررسی عملکرد ژنراتورها داشتن مدل مناسب از سیستم مورد مطالعه ضروری است.

مدل‌سازی توربین بادی از الزامات کنترل آن است. مدل‌سازی مناسب برای بررسی توربین بادی آن است که تمام شرایط و اجزای توربین بادی و باد محیط اطراف آن در این مدل‌سازی لحاظ شود. در این پایان‌نامه ما به صورت خلاصه به بررسی انرژی حاصل از باد پرداختیم و اهمیت انرژی باد و وضعیت آن را در دنیا و ایران مورد بررسی قرار دادیم.

همچنین ضمن تحلیل عملکرد ژنراتورهای القایی تغذیه دو سویه، مدل کاملی از یک واحد نیروگاه بادی شامل مدل‌هایی که قصد امتحان نتایج آن‌ها بر روی سیستم بادی را داریم معرفی کردیم و مدل‌سازی‌های توربین بادی را مورد بررسی قرار دادیم. مدل‌سازی توربین بادی در حوزه زمان شامل



بلوک آیرودینامیکی می‌باشد که خود آن هم شامل بررسی سرعت باد، محاسبه نرخ سرعت پیک، گام درجه، ضریب قدرت و واحد گشتاور آیرودینامیکی می‌باشد. بلوک مکانیکی جزء دیگر توربین بادی می‌باشد که با مدل‌های یک جرم، دو جرم و سه جرم قابل بیان می‌باشد. و مدل فضای حالت آن نیز به نمایش درآمد. و بخش‌های دیگر بلوک سیستم متحرکه توربین بادی بلوک الکتریکی و بلوک مکانیکی می‌باشد، که هرکدام برای بررسی نیاز به مدل‌سازی کامل دارند.

سپس در فصلی جداگانه به معرفی کنترل مقاوم  $H_{\infty}$  و ویژگی‌های آن از جمله پایداری و کارایی و ... مورد بررسی قرار داده و در نهایت صحت عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت.

و در نهایت مقایسه‌ای بین کنترلر PID و کنترلر مقاوم  $H_{\infty}$  انجام گرفت همان طور که مشاهده شد توان اکتیو و راکتیو پس از گذراندن حالت گذرای خود، در هر سرعتی از باد با یک دامنه و فرکانس مشخص و ثابت می‌ماند. همچنین با یک مقایسه ساده نیز می‌توان اثر کنترل‌کننده‌ها را بر روی توان‌های اکتیو و راکتیو مشاهده کرد پس از تأثیراتی که کنترل‌کننده‌ها بر روی سیستم می‌گذارند مشاهده شد که کنترل‌کننده مقاوم  $H_{\infty}$  عملکرد بسیار بهتری نسبت به کنترل‌کننده PID دارد. در مورد زمینه‌های مختلفی که در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار گرفته می‌توان پیشنهادهایی جهت تحقیق ارائه داد. برخی از این پیشنهادها در این بخش بیان شده است.

- ما در این پایان‌نامه بررسی رفتار ژنراتور القایی روتور سیم‌پیچی شده را مورد بررسی قرار دادیم. می‌توان از انواع دیگر ژنراتورهای القایی از جمله ژنراتور قفس سنجابی و غیره نیز استفاده کرد.
- استفاده از مدل غیرخطی توربین بادی به جای مدل خطی و استفاده از کنترل مقاوم غیرخطی
- به کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی مناسب برای طراحی کنترل‌کننده
- استفاده از سایر روش‌های کنترل مقاوم مانند سنتز  $\mu$  و  $LMI$  غیره



## مراجع

- [١] Harini. C, Kumari. NK, Raju. GS, "Analysis of wind turbine driven doubly fed induction generator", in International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), pp. ٢٥١-٢٤٤ (٢٠١١).
- [٢] J. Hu, H. Nian, and H. Xu. Y. He., "Dynamic Modeling and Improved Control of DFIG under Distorted Grid Voltage Conditions", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol-٢٤, no-١., March. (٢٠١١).
- [٣] <http://www.suna.org.ir>
- [٤] Miao, Zh., and Fan, L., The art of modeling and simulation of induction generator in wind generation application using high-order model, Simulation Modelling practice and Theory, pp. ١٢٣٩-١٢٥٣ (٢٠٠٨).
- [٥] Ko, H., Yoonb, G., Kyung, N., and Hong, W., Modeling and control of DFIG-based variable-speed wind-turbine, Electric power System Research, pp. ١٨٤١-١٨٤٩ (٢٠٠٨).
- [٦] Luna, A., Lima, F.K.A, Santos, D., Rodriguez P., Watanable, E.H., and Arnaltes, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. ٥٨, no. ١, pp. ٩-٢٠, (٢٠١١).
- [٧] Nunes, M.V.A., Lopes, J.A.P., Zurn, H.H., Bezerra, U.H., and Almeida, R.G., Influence of the variable-Speed Wind Generator in Transinet Stability Margine of the Conventional Generators Integrated in Electrical Grids, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol-١٩, Issue ٤, pp. ٤٩٢-٧٠١, (٢٠٠٤).
- [٨] Xu, L., and Wang, Y., Dynamic Modeling and Control of DFIG-Based wind Turbines Under unbalance Network Condition, IEEE Transaction on Power System, vol. ٢٢, Issue١, pp. ٣١٤-٣٢٣, (٢٠٠٧).
- [٩] Petersson, A., Harnefors, L., and Thiringer, T., Evaluation of current control methods for wind turbines using doubly-fed induction machines, IEEE Transactions Power Electronics, vol. ٢٠, no. ١, pp. ٢٢٧-٢٣٥, (٢٠٠٥).
- [١٠] Akagi, H., and Sato, H., Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywell energy storage system, IEEE Transactions Power Electronics, vol. ١٧, no. ١, pp. ١٠٩-١١٤, (٢٠٠٢).
- [١١] Chen, H., Timo, P., and Yao, X., Probabilistic Classification Vector Machines, IEEE Transactions on Neural Networks, vol. ٢٠, no. ٤, pp. ٩٠١-٩١٤ (٢٠٠٩).
- [١٢] Gokhale, K.P., Karraker, D.W., and Heikkila, S.J., Controller for a wound rotor slip ring induction machine, U.S.Patent ٤ ٤٤٨ ٧٣٥ B١ (٢٠٠٢).
- [١٣] Zhi, D., and Xu, L., Direct Power Control of DFIG with Constant Switching

- Frequency and Improved Transient performance, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 1, pp. 110-118 (2007).
- [14] Zhi, D., Xu, L., and Williams, B.W., Model-Based Predictive Direct Power Control of Doubly fed Induction Generators, IEEE Transactions Power Electronics, vol. 25, no. 2, pp. 341-351, (2010).
- [15] Naouar, M.W., Naassani, A.A., Monmasson, E., and Belkhdja, T.S., FPGA-Based predictive current controller for synchronous machine speed drive, IEEE Transactions Power Electronics, vol. 23, no. 4, pp. 2115-2126, (2008).
- [16] Cheng, L., "Coordinated Control of Dual PWM Converters for VSCF Wind Energy Generation," Master Thesis. Chinese Electric Institute, Apr. 2004.
- [17] Cardenas, R, Pena, R, Clare, J, Asher, G, and Proboste, J, "MRAS Observers for Sensorless Control of Doubly-Fed Induction Generators," IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol. 23, No. 3, pp. 1075-1084, (2006).
- [18] B. Beltran, T. Ahmad-Ali, and M. E. H. Benbozid "High order sliding mode control of DFIG-based wind turbine for power maximization and grid fault tolerance," in Proc. IEEE IEMDC, Miami, FL, May, pp. 183-189 (2009).
- [19] H. Karimi-Davijani, A. Sheikholeslami, H. Livani and M. Karimi Davijani, "Fuzzy Logic Control of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine" World Applied Sciences Journal 6 (4): 499-508,(2009).
- [20] E. Adzic, Z.Ivanovic, M.Adzic, V. Katic," Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control",Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 6, No. 1, (2009).
- [21] L. M. de Alegria, J. L. Villate, J. Andreu, I. Gabiola, P. Ibanez, "Grid Connection of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines ASurvey", European Wind Energy Conference (EWEC), (2004).
- [22] A. Mullane, G. Lightbody, R. Yacamini, "Wind Turbine Fault Ride through Enhancement", IEEE Trans. On power sys, Vol.27, no.4, November (2005).
- [23] W. Qiao, G. K. Venayagamoorthy, R. G. Harley, "Real Time Implementation of a STATCOM on a Wind Farm Equipped With Doubly Fed Induction Generators", IEEE Trans. On Industry appl, Vol.45, no.1, Feb (2009).
- [24] J. Morren, S. W. H. de Haan, "Ridethrough of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator during a Voltage Dip", IEEE Trans. On Energy Convers, Vol.27, no.2, June (2005).

- [25] W. Qiao, R. G. Harley, G. K. Venayagamoorthy, "Coordinated Reactive Power Control of a Large Wind Farm and a STATCOM Using Heuristic Dynamic Programming", IEEE Trans. On Energy Convers. Accepted for future application (2007).
- [26] A. D. Hansen, G. Michalke, P. Sorensen, T. Lund, F. Iov, "Coordinated Voltage Control of DFIG Wind Turbines IN Uninterrupted Operation During Grid Faults", Wiley Inter science. Wind-Energy, Aug (2006).
- [27] L. Xu and P. Cartwright, "Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 21, no. 3, pp. 750-758, Sep. (2006).
- [28] F. Mei and B. C. Pal, "Modelling and Small Signal Analysis of a Grid Connected Doubly-Fed Induction Generator," IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol. 3, pp. 2101-2108, Jun. (2005).
- [29] F. M. Hughes, O. Anaya-Lara, N. Jenkins and G. Strbac, "A Power System Stabilizer for DFIG-Based Wind Generation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 2, pp. 763-772, May (2006).
- [30] Cheng, J.; Zhu, H.; Zhong, S.; Zhong, Q.; Zeng, Y. Finite-time  $H_\infty$  estimation for discrete-time Markov jump systems with time-varying transition probabilities subject to average dwell time switching. Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul., 20, 571-582, (2015).
- [31] A. Djoud, H. Chekireb, E. M. Berkouk. "Robust Sliding Mode Observer/Controller of Wind Energy Conversion System Based on DFIG". Proceedings of the 3rd International Conference on Systems and Control, Algiers, Algeria, October 29-31, (2013).
- [32] N. A. Liu, Ji-Qing Qiu, Li-Jun zhang. "Robust Controller for Uncertain Switched Nonlinear Singular System Using LMI Approach". Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, 12-15 July (2015).
- [33] Jean Patric da Costa, Humberto Pinheiro, Member, IEEE, Thomas Degner, and Gunter Arnold. "Robust Controller for DFIGs of Grid-Connected Wind Turbines" IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 9, September (2011).
- [34] David Richardson, "Wind Energy Systems", IEEE Vol 51, No. 3 (2005).
- [35] V. Akhmatov, Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power, Ph.D. thesis, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark, Apr. (2003).
- [36] Eduard Muljadi, C. P. Butterfield, Brian Parsons, Abraham Ellis. Effect of Variable Speed Wind Turbine Generator on Stability of a Weak Grid. IEEE Trans. Energy Convers., vol. 22, no. 1, pp 29-36, Mar. (2007).

- [37] F. Michael Hughes, Olimpo Anaya-Lara, Nicholas Jenkins, Goran Strbac. A Power System Stabilizer for DFIG-Based Wind Generation. IEEE Trans. Power Syst, vol. 21, no. 2, pp. 763-772, May. (2006).
- [38] F. Blaabjerg, Z. Chen, power electronics for modern wind turbines. Morgan & claypool publisher, (2006).
- [39] M. Patel, wind and Solar Power System, U.S. Marchant Marine Academi Kings Point, New York, (1999).
- [40] J.M., Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST\_AD, National Renewable Energy Laboratory, (2003).
- [41] D. N. E. n. T. Burton, "Wind Energy Handbook", John Wiley & Sons, (2001).
- [42] H. Polinder, "Basic Operation Principles And Electrical Conversion System Of Wind Turbines", (2005).
- [43] Sloopweg JG, Polinder H, Kling WL. Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations. IEEE Trans Energy Convers (2003).
- [44] G. D. X. a. Y. Feng, "Pitch Control Of Large Scale Wind Turbine Based On Fuzzy-PI Method," World Congress on IEEE Intelligent Control and Automation, pp. 2277-2282, (2008).
- [45] Z. Chen and M. Mc. Cormick, "A fuzzy logic controlled power electronic system for variable speed wind energy conversion systems" IEEE Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, 18-19 September (2000).
- [46] A. D. Hansen, "Market penetration of wind turbine concepts over the years" Report of Riso National Laboratory, Wind Energy Department, DK-4000 Roskilde, Denmark.
- [47] <http://www.knowclub.net/?p=215>
- [48] American Wind Energy Association (AWEA), [www.awea.org/](http://www.awea.org/)
- [49] International Energy Agency (IEA), [www.iea.org/](http://www.iea.org/)
- [50] James, F, Manwell., Jon, G, McGowan., Anthony, L, Rogers, "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application", John Wiley & Sons., (2002).
- [51] B. M. Jatzek and A.M. Robinson, "Estimation of the optimum rated wind velocity for wind turbine generators" (2000), IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Edmonton, Alberta, Canada May 9-12, (1999).
- [52] M. U. Kund & R. Patel, "Wind and Solar Power Systems." CRC Press, New York. (1999).

- [Δ٣] Ezzeldin S. Abdin and Wilson Xu. “Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine- Induction Generator Unit” IEEE Transe on energy conversion, Vol. ١٥, No .١, March (٢٠٠٠).
- [Δ٤] A. Betz, “Wind Energy and its Exploitation by Windmills,” Gottingen: Vandenhoeck und Ruprecht, p. ٩٤, (١٩٢٩).
- [Δ٥] H. Glauert, “Windmills and fans,” Aerodynamic theory, vol. ٣, (١٩٣٥).
- [Δ٦] J. Manwell and J. McGowan, Wind energy explained: theory, design and application. Wiley Chichester, (٢٠٠٣).
- [Δ٧] R. Delmerico, N. Miller, W. Price, and J. Sanchez-Gasca, “Dynamic Modeling of GE ١,٥ and ٣,٩ MW Wind Turbine-Generators for Stability Simulations,” in IEEE Power Engineering Society General Meeting, (Toronto ,ON), pp. ١٣–١٧, (٢٠٠٣).
- [Δ٨] L.M.Fernandez, C.A.Garcia, F.Jurado, Comparative study on the performance of control systems for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines operating with power regulation, Energy ٣٣ -١٤٣٨ ١٤٥٢. (٢٠٠٨)
- [Δ٩] B. Kuo, Automatic control systems. Prentice Hall, (١٩٩٥).
- [٩٠] W. R. Powell, “An analytical expression for the average output power of a wind machine,” Solar Energy, vol. ٢٩, no. ١, pp. ٧٧–٨٠, (١٩٨١).
- [٩١] J. M. Maciejowski, “Multivariable Feedback Design, ”Reading, MA: AddisonWesley, (١٩٨٩).
- [٩٢] E. B. Muhando, “Modeling-based design of intelligent control paradigms for modern wind generating systems,” Doctoral dissertation, Univ. Ryukyus, Nishihara, Japan, Mar (٢٠٠٨).
- [٩٣] BC. Kuo, F. Golnaraghi, “Automatic control systems,” ٨th ed. Hoboken, New Jersey: Wiley; (٢٠٠٣).
- [٩٤] NS. Nise, “Control systems engineering,” ٣rd ed. New York: Wiley; (٢٠٠٠).
- [٩٥] S. Santoso, H. T. Le, “Fundamental time–domain wind turbine models for wind power studies,” Renewable Energy Vol.٣٢, pp.٢٤٣٩–٢٤٥٢, (٢٠٠٧).
- [٩٦] S. Chapman and Y. Man, Electric machinery fundamentals. McGraw- Hill, (١٩٨٥).
- [٩٧] Pena R., Clear J.C., Asher G. M. “Doubly-Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converter and its Application to Variable Speed Wind Energy Generation” IEEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. ١٤٣, pp. ٢٣١–٢٤١, (١٩٩٦)
- [٩٨] Krause P. C., Wasynczuk O. and Sudhoff S. D. “Analysis of Electric Machinery” IEEE Press, (٢٠٠٢).

- [٤٩] K. Elkington, V. Knazkins and M. Ghandhari, "On The Rotor Angle Stability of Power Systems With Doubly Fed Induction Generators," IEEE Power Tech., Lausanne, pp. ٢١٨-٢١٣, ٥-١ Jul. (٢٠٠٧).
- [٧٠] O. Anaya-Lara, F. M. Hughes, N. Jenkins and G. Strbac, "Rotor Flux Magnitude and Angle Control Strategy for Doubly Fed Induction Generators," Wind Energy, vol. ٩, pp. ٤٧٩-٤٩٥, Jun. (٢٠٠٤).
- [٧١] F. M. Hughes, O. Anaya-Lara, N. Jenkins and G. Strbac, "A Power System Stabilizer for DFIG-Based Wind Generation," IEEE Trans. Power Syst., vol. ٢١, no. ٢, pp. ٧٤٣-٧٧٢, May (٢٠٠٤).
- [٧٢] M. Green, D. J. N. Limebeer, Linear Robust Control, Dover Publishings, (٢٠١٢).
- [٧٣] D. W. Gu, P. H. Petkov and M. M. Konstantinov; Robust Control Design With Matlab, ٣<sup>rd</sup> edition. Springer, (٢٠١٣).
- [٧٤] B. A. Francis, A Course in  $H_\infty$  Control Theory, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. ٨٨, (١٩٨٧).
- [٧٥] S. Skogestad, I. Postlethwaite; *Multivaribel Feedback Control Analysis and Design*, ٣<sup>rd</sup> edition, John Wiley, (٢٠٠٥).
- [٧٦] B. M. Chen, *Robust and  $H_\infty$  Control*, Springer, (٢٠٠٠).
- [٧٧] J. C. Doyle, B. Francis, A. Tannebaum; *Feedback Control Theory*, Macmillan Publishing Co, (١٩٩٠).
- [٧٨] A. Alfi, M. Khosravi and M. Kheiri Fard. "Design A Robust Controller for Doubly-Fed Wind Generator" Technical and Physical Problems of Power Engineering, No.١٠٨, pp ٥٠٣-٥٠٧, Septamber (٢٠١٠).
- [٧٩] Matlab Help; Version R٢٠١٥b
- [٨٠] <http://www.Mathworks.com>



## **Abstract**

The increasing need for energy and limitation of fossil energy sources in the world reveals the necessity of using renewable energies more than ever. Due to the increasing growth of energy consumption in the world and the limitation of fossil fuels sources, and the environmental pollutions resulted from the consumption of fossil energy sources and production of greenhouse gases, it would be necessary to use the other clean energy sources. Meanwhile, the use of wind energy due to a high power-plant capacity of such renewable energies has been more focused. Essentially, a robust controller design strategy is based on this principle that robust controller should be designed in a way that makes the best possible performance for the closed-loop control system in an uncertainty set of the model. With this description, it has been cleared that the best possible performance or negligibly a minimum required performance in the uncertainty set of the model ( $H_\infty$  controller design) not only is related to the controller but also to the form of model's uncertainty set.  $H_\infty$  controller is one of the robust control methods that can guarantees the system's stability and performance considering the noise measurement, input and output disturbances and also the system with uncertainty against the changes in operating conditions and the parameters and structure of system. In this thesis, we have studied a comprehensive dynamic model for wind energy conversion system (WECS) with proper detailed electrical and mechanical parts, and then the system modeling with uncertainty was investigated by considering the dynamical equation for the system and determining the system with uncertainty for a robust controller design with  $H_\infty$  technique- aiming for active and reactive power control of doubly fed induction generator (DFIG) and wind turbine in the presence of parametric changes.

**Keywords:** Wind Energy, Wind Turbines, Doubly Fed Induction Generator (DFIG),  $H_\infty$  Robust Control, Active and Reactive Power Control





**Shahrood University of Technology**

Faculty of Electrical and Robotic Engineering  
Control Department

# **Robust $H_\infty$ Control for Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator**

Reza Ghorbani Dafrazi

**Supervisor:**

Dr. M. A. Sadrnia

*February 2016*