



دانشکده‌ی مهندسی برق و رباتیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد
مهندسی برق-گرایش کنترل

عنوان
کنترل پیش‌بین یک توربین بادی سرعت متغیر

نگارش
عباسعلی غلامی حصار

استاد راهنما:
دکتر حیدر طوسی‌ان شاندیز

استاد مشاور:
دکتر سید کمال حسینی ثانی

بهمن ۱۳۹۴

دانشکده: مهندسی برق و رباتیک

گروه: کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای عباسعلی غلامی حصار به شماره دانشجویی ۹۲۱۰۴۹۴ تحت عنوان

کنترل پیش بین یک توربین بادی سرعت متغیر

در تاریخ ۱۳۹۴/۱۱/ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد در مهندسی برق -

کنترل مورد ارزیابی و با درجهی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	استاد مشاور	امضاء	استاد راهنما
	دکتر سید کمال حسینی ثانی		دکتر حیدر طوسی‌ان شاندیز

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر محمد حداد ظریف		دکتر محمدعلی صدرنیا
			دکتر مهدی بانژاد

تقدیم نامہ

*Bermahiya zanistên xwe pêşkêşî wan kasan dikim ku qenciya esmaniya wan
bûye hêminiya êşên min yên erdî
Bi qahîmtirîn palgeha min destên dilovan ên bavî min
Bi şînahiya awirên jiyana min, çavên keseke dayîka min
Min her çi hêvosî li fêrgeha Evîna we hêvosî, her çi qas têbikoşim nikarim
dilopek ji deryaya bê xiraxe dilovaniyên we nikarim spas bêjim
Îro heyîna min bi hêviya we ye û kilîda baxa bihoşta min razîbûna we ye
Diyardeyek ji vê yekê herzantir di destên min de tune ne ku bikim qorbana
xweliyê pêyên we
Bibe ku berhema têkoşîna min wek baya nazike, tozika mandî bûna we, rake
Destên dilovanên we radimîsim*

ماحصل آموختہ ہایم را تقدیم می کنم بہ آنان کہ مہر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

بہ استوارترین تکیہ گاہم، دستان پر مہر پدرم

بہ سبزترین نگاہ زندگی ام، چشمان سبز مادرم

کہ ہرچہ آموختم در کتب عشق شما آموختم و ہرچہ بگو شتم قطرہ ای از دریای بی کران مہربانی تان را پاس نتوانم بگویم

امروز، متی ام بہ امید شماست و فردا کلید باغ بہشت رضای شما

رہ آوردی کران سنگ ترا ز این ارزان نہ داشتم تا بہ خاک پستان نہار کنم، باشد کہ حاصل تلا شتم نسیم کونہ غبار محنتی تان را بزوداید

بوسہ بر دستان پر مہر تان

استاد گرامی جناب آقای دکتر حیدر طوسی‌ان شاندیز و جناب آقای دکتر سید کمال حسینی ثانی:

دلسوزی، تلاش و کوشش حضرات عالی در تعلیم و تربیت و انتقال معلومات و تجربیات ارزشمند دکنار برقراری رابطه
صمیمی و دوستانه برای کسب علم و دانش حقیقتاً قابل ستایش است. این جانب بر خود وظیفه میدانم در کسوت ناگردی
از زحمات و خدمات ارزشمند شما استاد گرامی قدر تقدیر و تشکر نمایم.

تعهدنامه

دانشکده‌ی

دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته

این جانب

دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه

تحت راهنمایی

متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه 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 می‌باشد و مقالات مستخرج بانام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه‌های تکثیرشده پایان‌نامه وجود داشته باشد

چکیده

با پیشرفت فناوری در عصر حاضر تولید انرژی‌های پاک مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس به صورت پیوسته انرژی‌های تجدید پذیر در حال گسترش می‌باشند که از جمله این انرژی‌ها می‌توان به انرژی حاصل از باد اشاره نمود که به صورت گسترده و به طور پراکنده در تمام ساعات شبانه‌روز در دسترس قرار دارد. یکی از مسائل مهم در این زمینه طراحی کنترل‌کننده برای این سیستم‌های تبدیل انرژی می‌باشد. در این پایان‌نامه یک کنترل‌کننده جدید بر مبنای کنترل پیش‌بین و جدول‌بندی بهره برای کنترل زاویه گام توربین بادی همراه با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ساخته شده در پژوهشکده هوا خورشید دانشگاه فردوسی مشهد طراحی و شبیه‌سازی شده است. در این روش ابتدا با استفاده از داده‌های باد و مدل غیرخطی شبیه‌سازی شده توربین به کمک روش شناسایی حلقه بسته، سیستم را شناسایی می‌شود. در ادامه با استفاده از کنترل‌کننده طراحی شده، سرعت ژنراتور و به تبع آن توان توربین در سرعت فراتر از سرعت نامی را کنترل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها کارایی مناسب کنترل‌کننده طراحی شده را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: توربین بادی، کنترل پیش‌بین، شناسایی حلقه بسته، جدول‌بندی بهره، زاویه گام، کنترل فازی، ناحیه دو و نیم.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

- ۱- عباسعلی غلامی حصار، حیدرطوسی‌ان شاندیز، سید کمال حسینی ثانی. (۱۳۹۴). "طراحی کنترل کننده فازی جهت کنترل زاویه گام توربین بادی در ناحیه دو و نیم و سه". سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه مالک اشتر، تهران.
- ۲- عباسعلی غلامی حصار، حیدرطوسی‌ان شاندیز. (۱۳۹۴). "طراحی کنترل کننده فازی بهینه شده با الگوریتم اجتماع ذرات برای مبدل DC-DC افزاینده". سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه مالک اشتر، تهران.

فهرست عنوان‌ها

فهرست شکل‌ها.....ز

فهرست جدول‌ها.....ص

فصل ۱ مقدمه.....۱

۱-۱- پیشگفتار.....۲

۱-۲- نواحی کاری توربین بادی.....۳

۱-۳- محدودیت‌های سیستم.....۵

۱-۴- مروری بر کارهای گذشته.....۵

۱-۵- هدف پایان‌نامه.....۶

فصل ۲ مدل‌سازی و شناسایی سیستم تبدیل انرژی باد.....۷

۲-۱- مدل‌سازی.....۸

۲-۱-۱- مقدمه.....۸

۲-۱-۲- بخش آئرو دینامیکی.....۸

۲-۱-۳- بخش مکانیکی.....۱۰

۲-۱-۴- بخش الکتریکی.....۱۱

۲-۲- شناسایی.....۱۴

۲-۲-۱- مقدمه.....۱۴

۲-۲-۲- شناسایی تابع تبدیل محرک زاویه گام.....۱۵

۲-۲-۳- شناسایی ضریب گشتاور رتور.....۱۷

۲-۲-۴- تخمین سرعت باد.....۲۹

۲-۲-۵- شناسایی حلقه بسته.....۳۲

فصل ۳ طراحی کنترل‌کننده.....۳۹

۳-۱- مقدمه.....۴۰

۳-۲- کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی.....۴۰

۳-۳- طراحی کنترل‌کننده فازی.....۴۲

۳-۳-۱- کنترل‌کننده فازی برای مبدل افزایشدهنده.....۴۲

۳-۳-۲- کنترل‌کننده فازی برای زاویه گام.....۴۹

۳-۴- طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین.....۵۲

۵۲	 ۱-۴-۳ اصول کنترل پیش‌بین
۵۵	 ۲-۴-۳ طراحی کنترل‌کننده زاویه گام بر اساس مدل ماتریسی معادله تفاضلی
۵۷	 ۳-۴-۳ جدول‌بندی بهره

فصل ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۶۱

۶۲	 ۱-۴- نتیجه‌گیری
۶۲	 ۲-۴- پیشنهادها

منبع‌ها..... ۶۵

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: نواحی کاری توربین بادی ۴
- شکل ۲-۱: نواحی کاری توربین بادی اصلاح‌شده. ۴
- شکل ۱-۲: توربین بادی با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم. ۸
- شکل ۲-۲: ضریب گشتاور توربین بادی برای زاویه گام‌های مختلف. ۱۰
- شکل ۳-۲: صفحه ضریب گشتاور. ۱۰
- شکل ۴-۲: مدل تک جرم جعبه‌دنده. ۱۱
- شکل ۵-۲: یکسو کننده تمام پل سه فاز. ۱۳
- شکل ۶-۲: مدار پایه استفاده‌شده برای تبدیل dc به ac. ۱۴
- شکل ۷-۲: مدارات معادل برای ترکیب سوئیچ‌ها. ۱۴
- شکل ۸-۲: نحوه بکارگیری محرک زاویه گام در سیستم. ۱۵
- شکل ۹-۲: سرعت باد. ۱۵
- شکل ۱۰-۲: زاویه گام مرجع و واقعی. ۱۶
- شکل ۱۱-۲: زاویه گام مرجع و خروجی مدل مرتبه دوم. ۱۶
- شکل ۱۲-۲: منحنی شناسایی‌شده ضریب توان. ۱۹
- شکل ۱۳-۲: صفحه شناسایی‌شده ضریب توان. ۱۹
- شکل ۱۴-۲: ساختار تخمینگر. ۲۲
- شکل ۱۵-۲: ساختار ANFIS. ۲۲
- شکل ۱۶-۲: داده‌های آموزش. ۲۳
- شکل ۱۷-۲: توابع تعلق برای ورودی اول (زاویه گام). ۲۳
- شکل ۱۸-۲: توابع تعلق برای ورودی دوم (سرعت نسبی). ۲۴

- شکل ۲-۱۹: منحنی خطای آموزش. ۲۴
- شکل ۲-۲۰: داده‌های آزمون. ۲۴
- شکل ۲-۲۱: منحنی ضریب گشتاور تخمین زده شده. ۲۵
- شکل ۲-۲۲: صفحه ضریب گشتاور تخمین زده شده. ۲۵
- شکل ۲-۲۳: پیاده‌سازی سه روش در سیستم غیرخطی. ۲۶
- شکل ۲-۲۴: سرعت باد و رتور. ۲۶
- شکل ۲-۲۵: زاویه گام و سرعت نسبی. ۲۷
- شکل ۲-۲۶: ضریب گشتاور و تخمین آن با روش یک. ۲۷
- شکل ۲-۲۷: ضریب گشتاور و تخمین آن با روش دو. ۲۸
- شکل ۲-۲۸: ضریب گشتاور و تخمین آن با روش سه. ۲۸
- شکل ۲-۲۹: سرعت باد و تخمین آن. ۳۲
- شکل ۲-۳۰: بلوک دیاگرام سیستم برای شناسایی. ۳۳
- شکل ۲-۳۱: سیگنال تحریک برای سرعت‌های ۹, ۱۰, ۱۱, ۱۲ متر بر ثانیه. ۳۴
- شکل ۲-۳۲: سیگنال تحریک برای سرعت‌های ۱۳, ۱۴, ۱۵, ۱۶ متر بر ثانیه. ۳۴
- شکل ۲-۳۳: مراحل شناسایی در سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه. ۳۵
- شکل ۲-۳۴: سرعت ژنراتور و تخمین آن در سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه. ۳۶
- شکل ۲-۳۵: صفر و قطب‌های مدل‌ها. ۳۶
- شکل ۲-۳۶: پاسخ پله مدل‌ها. ۳۷
- شکل ۳-۱: ساختار کنترل کننده تناسبی-انتگرالی. ۴۰
- شکل ۳-۲: سرعت باد و توان خروجی توربین بادی. ۴۱
- شکل ۳-۳: سرعت زاویه‌ای روتور و زاویه گام اعمالی به توربین بادی. ۴۱
- شکل ۳-۴: مدار معادل مبدل DC/DC افزاینده. ۴۲

- شکل ۳-۵: نمودار بهترین هزینه و بهترین پارامترها. ۴۵.....
- شکل ۳-۶: توابع عضویت خطا و مشتق خطای ولتاژ مبدل. ۴۶.....
- شکل ۳-۷: توابع عضویت خطا و مشتق خطای جریان مبدل. ۴۶.....
- شکل ۳-۸: جریان و ولتاژ مبدل در مدل میانگین. ۴۸.....
- شکل ۳-۹: جریان و ولتاژ مبدل در مدل دقیق. ۴۸.....
- شکل ۳-۱۰: سیگنال کنترل (سیکل وظیفه) در مدل میانگین و دقیق. ۴۹.....
- شکل ۳-۱۱: تابع عضویت مربوط به خطای سرعت ژنراتور. ۵۰.....
- شکل ۳-۱۲: تابع عضویت مربوط به تغییرات خطای سرعت ژنراتور. ۵۰.....
- شکل ۳-۱۳: سطح کنترلی مربوط به سیستم فازی. ۵۱.....
- شکل ۳-۱۴: ساختار کنترل کننده فازی طراحی شده. ۵۱.....
- شکل ۳-۱۵: سرعت زاویه‌ای روتور و زاویه گام اعمالی به توربین بادی. ۵۲.....
- شکل ۳-۱۶: استراتژی کنترل پیش‌بین مدل. ۵۳.....
- شکل ۳-۱۷: ساختار پایه کنترل پیش‌بین مدل. ۵۴.....
- شکل ۳-۱۸: افق پیش‌بینی. ۵۸.....
- شکل ۳-۱۹: بلوک دیاگرام کنترل حلقه بسته. ۵۹.....
- شکل ۳-۲۰: سرعت باد و سیگنال مرجع. ۶۰.....
- شکل ۳-۲۱: سرعت ژنراتور و زاویه گام. ۶۰.....

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- ضریب گشتاور بر حسب سرعت نسبی و زاویه گام پره‌ها. ۹
- جدول ۲-۲- مقادیر تابع هزینه نرمالیزه شده برای چندجمله‌ای‌های مختلف با زاویه گام ۱۵ درجه. ۱۷
- جدول ۳-۲- مقادیر تابع هزینه نرمالیزه شده برای چندجمله‌ای‌های مختلف. ۱۸
- جدول ۴-۲- مقادیر تابع هزینه نرمالیزه شده برای روش‌های متفاوت. ۲۹
- جدول ۱-۳- پارامترهای مبدل DC-DC. ۴۷
- جدول ۲-۳- قواعد فازی. ۵۰

فصل ۱ مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

بحران انرژی از موضوعاتی می‌باشد که در جوامع امروزی مورد توجه قرار گرفته است. سوخت‌های فسیلی که تأمین‌کننده بخش عمده‌ای از انرژی مورد نیاز بشر تا به حال بوده‌اند، منابعی روبه‌زوال می‌باشند و علاوه بر این، سیستم‌های مصرف‌کننده این سوخت‌ها دارای بازده پایینی می‌باشند. این سیستم‌ها علاوه بر اتلاف منابع سوختی، از مهم‌ترین منابع آلوده‌کننده محیط زیست نیز محسوب می‌شوند. از این رو استفاده از انرژی‌های نو و سیستم‌های تبدیل انرژی باد بازده بالا و آلودگی کم همانند آرایه‌های خورشیدی، پیل‌های سوختی، توربین‌های بادی و غیره ضروری است [۱]. در مقایسه با دیگر فناوری‌های موجود، نظیر پیل سوختی و سیستم‌های خورشیدی، توربین‌های بادی دارای مزیت‌هایی می‌باشند که از آن‌ها می‌توان به توانایی نصب با محدودیت جغرافیایی کمتر و کاهش هزینه‌های مربوط به تولید شبکه توزیع جدید و افزایش قابلیت اطمینان و بازدهی اشاره نمود. در صورتی که یک توربین بادی به شبکه وصل شود باید قادر باشد تا مقدار تعیین شده‌ای از توان اکتیو و راکتیو را تحویل نماید [۲]. بنابراین باید راهبردهای کنترل مناسبی را برای سیستم تولید توان توربین بادی طراحی نمود.

به دلیل اشغال فضای کمتر، سطح نویز پایین، اتصال شبکه آسان‌تر، نرخ تغذیه^۱ بیشتر و قابلیت کار در حالت جزیره‌ای برای محیط‌های ایزوله در سال‌های اخیر توجه خاصی به تولید پراکنده توسط توربین‌های بادی کوچک (واحد توان کمتر از ۲۰۰ کیلووات) شده است. در گذشته استفاده از ژنراتورهای آسنکرون بسیار رایج بوده است اما اکنون با پیشرفت فناوری ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSG) قسمت عظیمی از سهم تولید انرژی را به خود اختصاص داده است [۵].

سیستم‌های تولید توان کوچک جایگزین مناسبی برای منابع تولید انرژی الکتریکی می‌باشند. این سیستم‌ها در مناطقی که ساخت سیستم‌های نیروگاهی مرسوم امکان‌پذیر نیست، کاربرد دارند. از جمله این سیستم‌ها می‌توان به توربین‌های بادی اشاره نمود که به سهولت در مناطق دورافتاده و دور از شبکه قدرت می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

پیشرفت‌های اخیر در فن‌آوری و کنترل توربین‌های بادی باعث کاهش تلفات و هزینه تولید انرژی شده است. کنترل نقشی کلیدی و مهم را در توربین‌های مدرن ایفا می‌کند، به عبارت دیگر کنترل توربین‌های بادی باعث استفاده مفید و راندمان بالاتر در سیستم‌های انرژی بادی می‌شود.

^۱ feed-in

برای دستیابی به کاهش بار و بهینه‌سازی، طراحی کنترل‌کننده‌های توربین بادی نیازمند وجود مدل‌های خطی کنترل گرا^۱ قابل اطمینان هستند. برای دستیابی به این امر باید کنترل‌کننده را بر اساس مدل طراحی نمود که در این حالت شناسایی مدل توربین بادی در حالت حلقه بسته یک‌راه حل مناسب می‌باشد [۶].

۱-۲- نواحی کاری توربین بادی

محدوده کاری توربین بادی به ۴ ناحیه تقسیم می‌شود که در این نواحی اهداف کنترلی متفاوتی تعریف می‌گردد. این نواحی به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند.

ناحیه ۱: سرعت باد کمتر از سرعت وصل

ناحیه ۲: سرعت باد بین سرعت وصل و سرعت نامی (بار جزئی)

ناحیه ۳: سرعت باد بین سرعت نامی و سرعت قطع (بار کامل)

ناحیه ۴: سرعت باد بیشتر از سرعت قطع (سرعت طوفان)

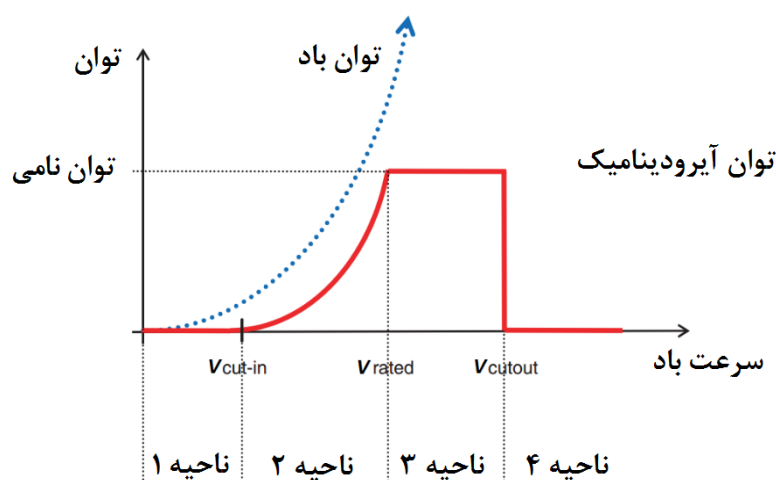
این چهار ناحیه در شکل ۱-۱ نشان داده شده‌اند. در ناحیه اول توان تولیدی توربین در مقایسه با تلفات آن بسیار ناچیز است به همین منظور در ناحیه اول و در ناحیه چهارم جهت حفاظت از توربین، توانی تولید نشده و توربین راه‌اندازی نمی‌گردد.

در ناحیه دوم سرعت باد بین دو سرعت V_{rate} و V_{cut-in} قرار دارد و هدف اصلی کنترلی در این ناحیه دستیابی به توان ماکزیمم است. طبق روابط حاکم بر سیستم، در هر سرعت مشخص باد یک مقدار بهینه برای سرعت رتور وجود دارد که توربین در آن با توان ماکزیمم عمل می‌کند، بنابراین باید سرعت رتور بهینه را جهت دستیابی به توان بهینه به دست آورد. با توجه به آنچه گفته شد، هدف کنترلی در ناحیه بار جزئی، دستیابی به توان ماکزیمم با تنظیم سرعت رتور است، درحالی‌که زاویه چرخشی پره‌ها در مقدار بهینه خود (خیلی نزدیک به صفر) ثابت شده است.

در ناحیه سوم سرعت باد از مقدار نامی فراتر می‌رود بنابراین به خاطر محدودیت‌های الکتریکی و کاهش استرس‌های مکانیکی و عدم صدمه زدن به توربین در این ناحیه بایستی توان خروجی را در مقدار نامی آن

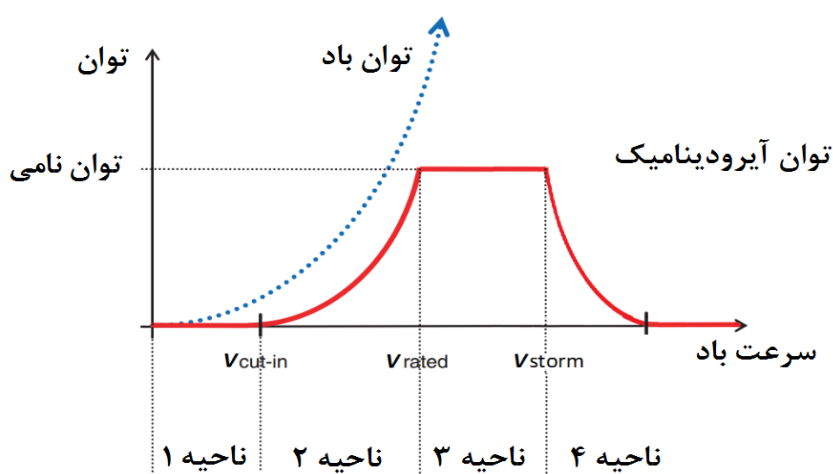
^۱ control-oriented

ثابت نگه‌داشته شود. در این ناحیه هدف کنترلی تنظیم سرعت رتور در محدوده سرعت نامی و ثابت نگه‌داشتن توان در مقدار نامی آن با کنترل زاویه پره‌ها است [۳].



شکل ۱-۱: نواحی کاری توربین بادی

در برخی کاربردهای عملی در ناحیه ۴ توان به‌صورت دفعی قطع نمی‌شود و این عمل به‌صورت تدریجی صورت می‌پذیرد؛ به‌عبارت‌دیگر در ناحیه چهارم زمانی که سرعت باد از V_{storm} فراتر می‌رود، توان خروجی به‌وسیله کند کردن سرعت زاویه‌ای کاهش می‌یابد. این مهم به‌وسیله‌ی تغییر زاویه گام پره‌های رتور برای خروج از مسیر باد انجام می‌شود. زمانی که سرعت باد افت پیدا می‌کند، پره‌ها به وضعیت سابق برمی‌گردند و توربین به عملکرد در ناحیه بار کامل بازمی‌گردد. این عمل باعث جلوگیری از خاموش شدن و فرآیند راه‌اندازی می‌شود [۷].



شکل ۱-۲: نواحی کاری توربین بادی اصلاح‌شده.

در این پایان‌نامه طراحی کنترل‌کننده‌های مختلف برای تنظیم زاویه گام توربین بادی سه کیلووات ساخته‌شده در پژوهشکده هوا خورشید در ناحیه دو و نیم (ناحیه‌ای که سرعت زاویه‌ای روتور ۸۰-۱۰۰ درصد سرعت نامی‌اش است) و ناحیه سه (سرعت زاویه‌ای روتور بالاتر از سرعت نامی‌اش است) ارائه می‌شود.

۳-۱- محدودیت‌های سیستم

نرخ تغییرات زاویه گام و حداکثر و حداقل ممکن زاویه گام ازجمله نکاتی می‌باشد که باید در طراحی کنترل‌کننده موردتوجه قرار گیرد. عموماً در روش‌های کلاسیک و عملی متداول از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی برای کنترل زاویه گام توربین استفاده می‌شود. ازجمله مهم‌ترین دلایل استفاده از این مدل کنترل‌کننده‌ها می‌توان به محدود کردن متغیرهای سیستم در حدود تعیین‌شده، بهینه‌سازی توان خروجی توربین بادی و کمینه‌سازی اثر بار بر قسمت‌های مکانیکی توربین بادی اشاره نمود. با توجه به مشخصات فیزیکی پره‌ها و توربین به کار گرفته‌شده در این پایان‌نامه، میزان اشباع (حداکثر میزان چرخش پره‌ها) ۲۵ درجه و حداکثر نرخ تغییرات زاویه گام ۱۰ درجه بر ثانیه اعمال می‌شود. سرعت روتور نباید از ۳۵۰ دور بر دقیقه بیشتر شود.

سیگنال قابل‌اندازه‌گیری و در دسترس آسان که می‌توان با آن کنترل‌کننده را طراحی کرد، سرعت زاویه‌ای روتور ژنراتور می‌باشد زیرا اندازه‌گیری دقیق سرعت باد بسیار هزینه‌بر است و سیگنال توان هم از پارامترهای شبکه به دست می‌آید که به دلیل پیچیده شدن سیستم (توان از ولتاژ و جریان شبکه به دست می‌آید) استفاده از آن نسبت به سیگنال سرعت در اولویت دوم قرار دارد [۴].

۴-۱- مروری بر کارهای گذشته

در آثار علمی موجود کارهای بسیاری برای مسئله کنترل توربین بادی انجام‌شده است که می‌توان به‌طور خلاصه به آثار زیر اشاره کرد.

استفاده از روش‌های فازی برای کنترل توربین بادی در سال‌های اخیر در حال توسعه است، به‌عنوان مثال در [۸] یک کنترل‌کننده با ساختار متغیر تطبیقی- فازی برای افزایش راندمان ارائه‌شده است، همچنین در [۹] یک کنترل‌کننده فازی بر اساس دانش اصول عملکرد توربین بادی طراحی‌شده است، در [۱۰] یک

کنترل کننده فازی نوع ۲ برای کنترل سیستم زاویه گام غیرخطی پره های روتور توربین بادی سرعت متغیر پیشنهاد شده است.

توربین بادی یک سیستم چند متغیره است؛ بنابراین روش طراحی کنترل بر اساس مدل، یک ابزار مناسب است زیرا می تواند یک کنترل کننده برای مقابله با مسئله کنترل چند متغیره در یک تابع سامانمند بسازد. کنترل پیش بین بر اساس مدل (MPC) این خواص را دارد.

مزایای اصلی پیاده سازی MPC عبارتند از [۱۱]:

یک الگوریتم MPC می تواند محدودیت های محرک را در نظر بگیرد، چون محدودیت ها می توانند به آسانی به بهینه سازی تابع هزینه اضافه شوند.

MPC اجازه ی یک فرآیند طراحی سامانمند برای اداره کردن مسئله کنترل چند متغیره را می دهد.

یک روش طراحی MPC شامل قسمت های اصلی مدل، معیار عملکرد و محدودیت ها و الگوریتم می باشد.

یک کنترل کننده MPC خطی طراحی شده در یک نقطه کار واحد باید قادر باشد که تمام محدوده عملکرد توربین بادی را تحت پوشش قرار دهد [۱۲]. در [۱۳] نشان داده می شود یک کنترل کننده MPC برنامه ریزی شده می تواند به ردیابی توان در کل ناحیه عملکرد دست یابد. در [۱۴] نیز یک کنترل کننده پیش بین غیرخطی (NMPC) با زاویه گام و گشتاور ژنراتور به عنوان ورودی طراحی می شود و با کنترل کننده های LQR برنامه ریزی شده و PID برنامه ریزی شده مقایسه شده است. در [۱۵] یک کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالا برای کنترل توان در هر دو حالت کاری طراحی شده است.

۱-۵- هدف پایان نامه

هدف از این پایان نامه طراحی کنترل کننده پیش بین زاویه گام به منظور کنترل سرعت رتور و در نتیجه توان توربین بادی در ناحیه دو و نیم و سه است.

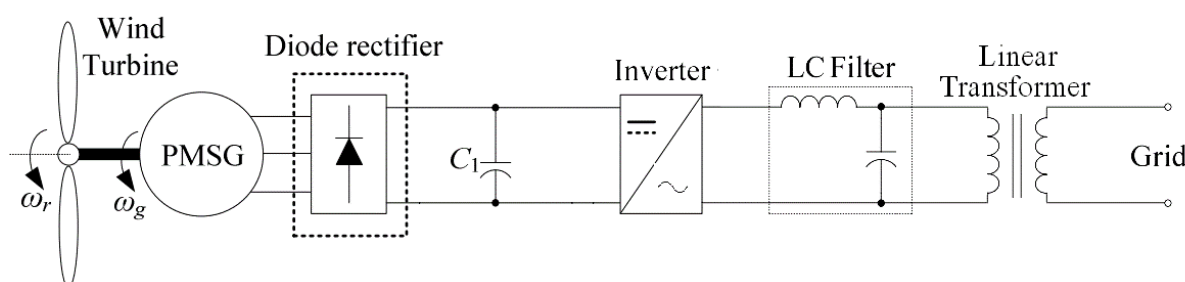
ابتدا به شرح مدل غیرخطی سیستم تبدیل انرژی باد پرداخته می شود بعد از آن شناسایی سیستم برای استفاده در طراحی کنترل کننده ها انجام می شود، در ادامه به طراحی کنترل کننده کلاسیک و فازی و بررسی مشکلات آن پرداخته و جهت رفع مشکلات موجود کنترل کننده پیش بین پیشنهاد می شود. در انتها نیز شبیه سازی ها و نتیجه گیری ارائه می گردد.

فصل ۲ مدل سازی و شناسایی سیستم تبدیل انرژی باد

۲-۱-۲ مدل سازی

۲-۱-۲-۱ مقدمه

در این بخش دینامیک های توربین بادی سه کیلووات محور افقی که بر اساس نمونه ساخته شده در پژوهشکده هوا خورشید دانشگاه فردوسی مشهد معرفی و بررسی می شود. در شکل ۱-۲ ساختار سیستم توربین بادی سرعت متغیر نشان داده شده است. اجزای اصلی این سیستم شامل توربین بادی با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG)، یک سوساز، مبدل توان DC/AC، صافی و ترانسفورمر می باشد [۱۶].



شکل ۱-۲ توربین بادی با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم.

برای مدل سازی توربین بادی می توان از روش مدل سازی زیرسیستم استفاده کرد. این روش ابتدا تمام سیستم را به چندین زیرسیستم متصل به هم تقسیم می نماید، سپس از مدل های هر زیرسیستم جهت به دست آوردن مدل کامل سیستم استفاده می شود. سیستم نشان داده شده در شکل ۱-۲ می تواند به سه بخش آئرو دینامیکی، مکانیکی، الکتریکی تقسیم بندی شود.

۲-۱-۲-۲ بخش آئرو دینامیکی

توان و گشتاور آئرو دینامیکی به دست آمده توسط پره های توربین بر اساس آئرو دینامیک، می تواند به صورت زیر بیان شود [۱۷]

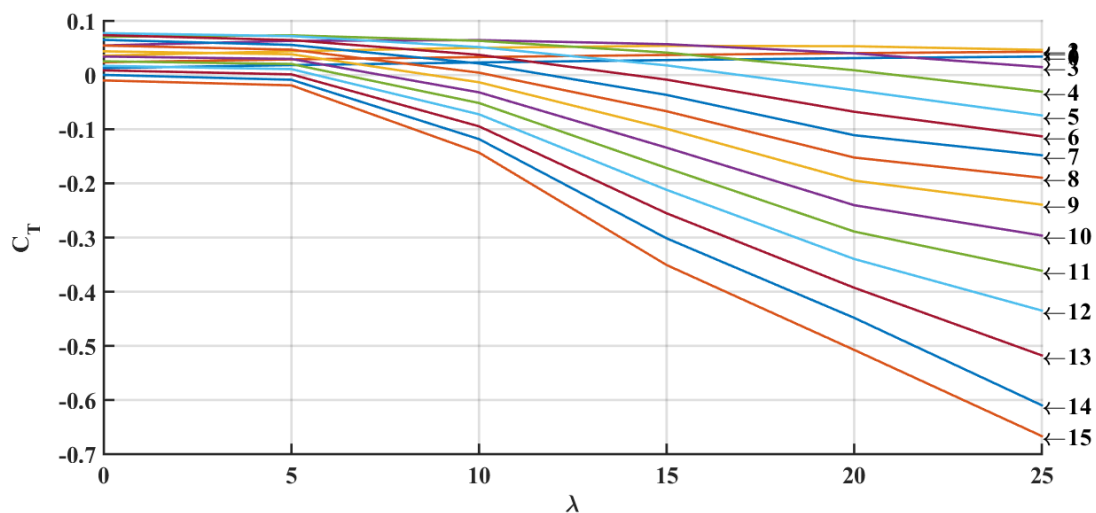
$$\begin{aligned}
 P_a &= \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 v^3 \\
 T_a &= \frac{1}{2} \rho C_T(\lambda, \beta) \pi R^3 v^2 \\
 \lambda &= \frac{\omega_r R}{v} \\
 C_p(\lambda, \beta) &= \lambda C_T(\lambda, \beta)
 \end{aligned}
 \tag{۱-۲}$$

که در آن P_a توان آئرو دینامیکی، T_a گشتاور الکتریکی، ρ غلظت هوا، R شعاع رتور، λ سرعت نسبی، β زاویه گام، v سرعت باد، ω_r سرعت زاویه ای رتور و C_P, C_T ضریب گشتاور و ضریب بهره‌وری می‌باشند. ضریب گشتاور توربین بادی از آزمایش‌ها مختلف در محل نصب توربین توسط پژوهشکده هوا خورشید دانشگاه فردوسی مشهد به دست آمده که در جدول ۱-۲ آورده شده است.

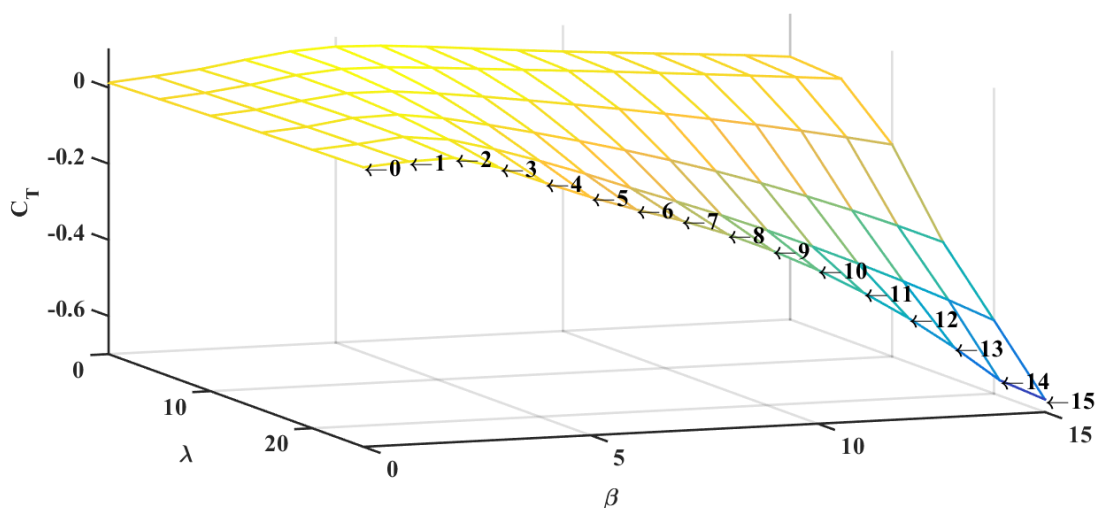
جدول ۱-۲- ضریب گشتاور بر حسب سرعت نسبی و زاویه گام پره‌ها.

$\beta \setminus \lambda$	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
۰	۰/۰۱۲	۰/۰۱۸	۰/۰۲۳	۰/۰۲۷	۰/۰۳۱	۰/۰۳۴
۱	۰/۰۲۳	۰/۰۲۸	۰/۰۳۳	۰/۰۳۷	۰/۰۴۰	۰/۰۴۳
۲	۰/۰۳۵	۰/۰۴۴	۰/۰۵۰	۰/۰۵۴	۰/۰۵۳	۰/۰۴۶
۳	۰/۰۵۴	۰/۰۶۳	۰/۰۶۴	۰/۰۵۷	۰/۰۴۰	۰/۰۱۴
۴	۰/۰۷۰	۰/۰۷۳	۰/۰۶۳	۰/۰۴۱	۰/۰۰۸	-۰/۰۳۰
۵	۰/۰۷۷	۰/۰۷۱	۰/۰۵۱	۰/۰۱۷	-۰/۰۲۷	-۰/۰۷۴
۶	۰/۰۷۳	۰/۰۶۴	۰/۰۳۷	-۰/۰۰۸	-۰/۰۶۷	-۰/۱۱۳
۷	۰/۰۶۴	۰/۰۵۵	۰/۰۲۱	-۰/۰۳۶	-۰/۱۱۱	-۰/۱۴۸
۸	۰/۰۵۴	۰/۰۴۶	۰/۰۰۴	-۰/۰۶۶	-۰/۱۵۲	-۰/۱۸۹
۹	۰/۰۴۳	۰/۰۳۸	-۰/۰۱۳	-۰/۰۹۹	-۰/۱۹۴	-۰/۲۳۹
۱۰	۰/۰۳۴	۰/۰۲۹	-۰/۰۳۱	-۰/۱۳۴	-۰/۲۴۰	-۰/۲۹۶
۱۱	۰/۰۲۵	۰/۰۲۰	-۰/۰۵۱	-۰/۱۷۱	-۰/۲۸۸	-۰/۳۶۱
۱۲	۰/۰۱۶	۰/۰۱۰	-۰/۰۷۲	-۰/۲۱۱	-۰/۳۳۹	-۰/۴۳۴
۱۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	-۰/۰۹۴	-۰/۲۵۵	-۰/۳۹۲	-۰/۵۱۷
۱۴	۰/۰۰۰۳	-۰/۰۰۸	-۰/۱۱۸	-۰/۳۰۱	-۰/۴۴۸	-۰/۶۰۹
۱۵	-۰/۰۰۹	-۰/۰۱۹	-۰/۱۴۳	-۰/۳۵۰	-۰/۵۰۷	-۰/۶۶۶

نمودارهای ضریب گشتاور بر حسب سرعت نسبی و زاویه گام پره‌ها بر اساس داده‌های جدول ۱-۲ در شکل-های ۲-۲ و ۳-۲ آورده شده است.



شکل ۲-۲: ضریب گشتاور توربین بادی برای زاویه گام های مختلف.

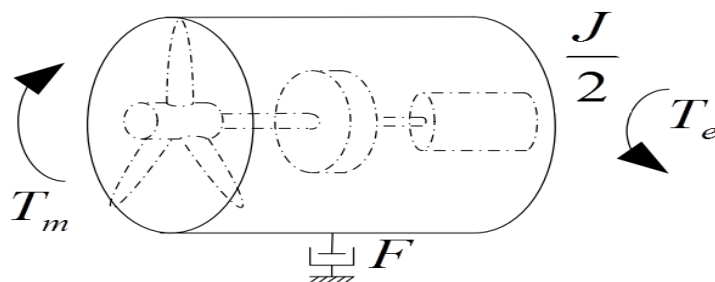


شکل ۲-۳: صفحه ضریب گشتاور.

۲-۱-۳ بخش مکانیکی

جعبه دنده همان طور که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است، می تواند به عنوان یک جسم سخت مدل می شود؛

که مدل مکانیکی سیستم می تواند به صورت زیر به دست آید [۱۸].



شکل ۲-۴: مدل تک جرم جعبه دنده.

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_m - T_f - F \omega_r - T_e) \quad (۲-۲)$$

T_m گشتاور مکانیکی (به وجود آمده توسط روتور توربین)، T_f اصطکاک استاتیک شفت، F ضریب اصطکاک چسبندگی ترکیب ماشین و بار و J ضریب اینرسی ترکیب ماشین و بار است. همچنین نسبت انتقال گیربکس را به صورت زیر در نظر می گیریم.

$$N = \frac{\omega_e}{\omega_r} \quad (۳-۲)$$

و برای توان و گشتاور مکانیکی داریم

$$N = \frac{P_m}{P_a} = \frac{T_m}{T_a} \quad (۴-۲)$$

۲-۱-۴ بخش الکتریکی

ژنراتور

بیشتر توان الکتریکی مورد استفاده در جهان توسط ماشین های سنکرون تولید می شود. درست همان طور که ماشین القایی بیشتر جهت تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی یعنی در حالت موتوری به کار می رود، ماشین سنکرون وسیله ای اصلی تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی است یعنی در حالت ژنراتوری استفاده می شود. معادلات ولتاژهای استاتور در قاب مرجع روتور برای ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم به صورت زیر خواهد بود [۱۹].

$$V_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}^r - \omega_{re} \lambda_{qs}^r \quad (۵-۲)$$

$$V_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + \frac{d}{dt} \lambda_{qs}^r + \omega_{re} \lambda_{ds}^r$$

که $R_s = R_d = R_q$ و i_{dq}^r و V_{dq}^r جریان و ولتاژ در محورهای d و q و همچنین شارهای پیوندی استاتور در محورهای d و q بدین صورت هستند.

$$\lambda_{qs}^r = L_q i_{qs}^r \quad \lambda_{ds}^r = L_d i_{ds}^r + L_m i_{dr}^r$$

L_m اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ استاتور و آهنربای روتور است. از آنجاکه روتور هیچ سیم پیچی ندارد و فقط آهنربا دارد و شار روتور هم در راستای محور d است این شار به صورت $L_m i_{dr}^r$ مدل می شود که با λ_{af} نشان می دهند. همچنین ω_{re} سرعت زاویه ای الکتریکی است که برابر با $p\omega_r$ است (p تعداد زوج قطب است).

و گشتاور الکتریکی از رابطه ی زیر به دست می آید.

$$T_e = 1.5p(\lambda_{ds}^r i_{qs}^r - \lambda_{qs}^r i_{ds}^r) \quad (۶-۲)$$

توان اکتیو و راکتیو ژنراتور نیز با روابط زیر به دست می آیند.

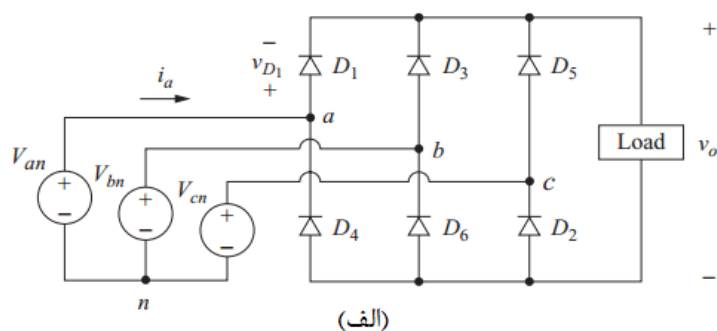
$$P_e = T_e \omega_e \quad (۷-۲)$$

$$P_e = \frac{3}{2}(V_{ds}^r i_{ds}^r + V_{qs}^r i_{qs}^r) \quad (۸-۲)$$

$$Q_e = \frac{3}{2}(V_{qs}^r i_{ds}^r - V_{ds}^r i_{qs}^r) \quad (۹-۲)$$

یکسو کننده های سه فاز

یکسو کننده های سه فاز معمولاً در صنعت برای تولید یک ولتاژ و جریان DC برای بارهای بزرگ استفاده می شوند. یکسو کننده تمام پل سه فاز در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. منبع ولتاژ سه فاز متعادل و دارای توالی فاز $a-b-c$ است. منبع و دیود در تجزیه و تحلیل اولیه مدار ایدئال فرض می شوند [۲۰].



شکل ۲-۵: یکسو کننده تمام پل سه فاز.

مقدار متوسط یا DC ولتاژ خروجی برابر است با:

$$V_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_{m,L-L} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} = 0.955V_{m,L-L} \quad (۲-۱۰)$$

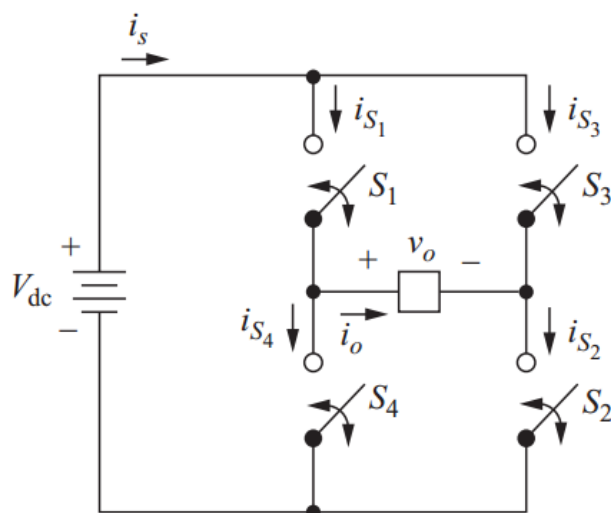
که در آن $V_{m,L-L}$ ، پیک ولتاژ خط به خط منبع سه فاز است و برابر $\sqrt{2}V_{L-L,rms}$ می‌باشد. دامنه مؤلفه‌های AC ولتاژ برابرند با:

$$V_n = \frac{6V_{m,L-L}}{\pi(n^2 - 1)} \quad n = 6, 12, 18, \dots \quad (۲-۱۱)$$

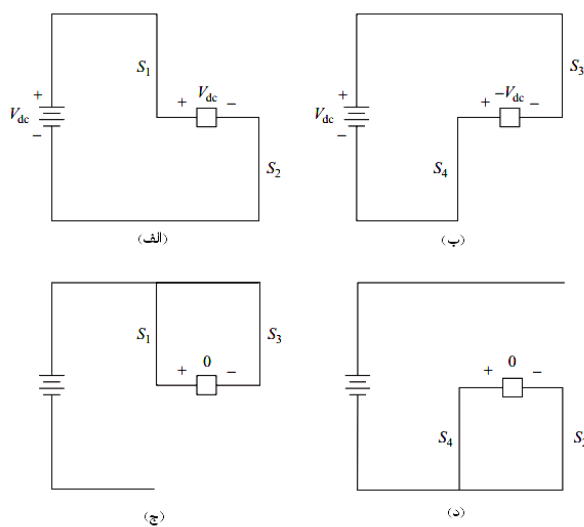
از آنجاکه ولتاژ خروجی پریودیک و با دوره تناوب یک‌ششم ولتاژ AC منبع تغذیه است، هارمونیک‌های خروجی دارای فرکانس‌های $6k\omega$ می‌باشد که $k = ۱, ۲, ۳, \dots$ است.

اینورتر

اینورترها مداراتی هستند که ولتاژ dc را به ac تبدیل می‌کنند. مبدل تمام موج نشان داده‌شده در شکل ۲-۶ مدار پایه استفاده‌شده برای تبدیل dc به ac می‌باشد. ولتاژ خروجی v_o بسته به اینکه کدام کلیدها بسته باشند، می‌تواند $+v_{dc}$ ، $-v_{dc}$ یا صفر باشد. شکل ۲-۷ مدارات معادل برای ترکیب کلیدها را نشان می‌دهد [۲۰].



شکل ۲-۶: مدار پایه استفاده شده برای تبدیل dc به ac.



شکل ۲-۷: مدارات معادل برای ترکیب سوئیچ ها.

نبایستی S_1 و S_4 و همچنین S_2 و S_3 در یک زمان بسته شوند. در غیر این صورت یک اتصال کوتاه در منبع dc به وجود می آید.

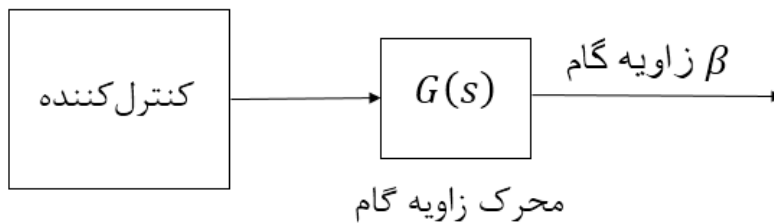
۲-۲- شناسایی

۲-۲-۱ مقدمه

در این بخش ابتدا به شناسایی محرک زاویه گام و ضریب گشتاور و در ادامه به شناسایی حلقه بسته سیستم به منظور استفاده در طراحی کنترل کننده پیش بین پرداخته می شود.

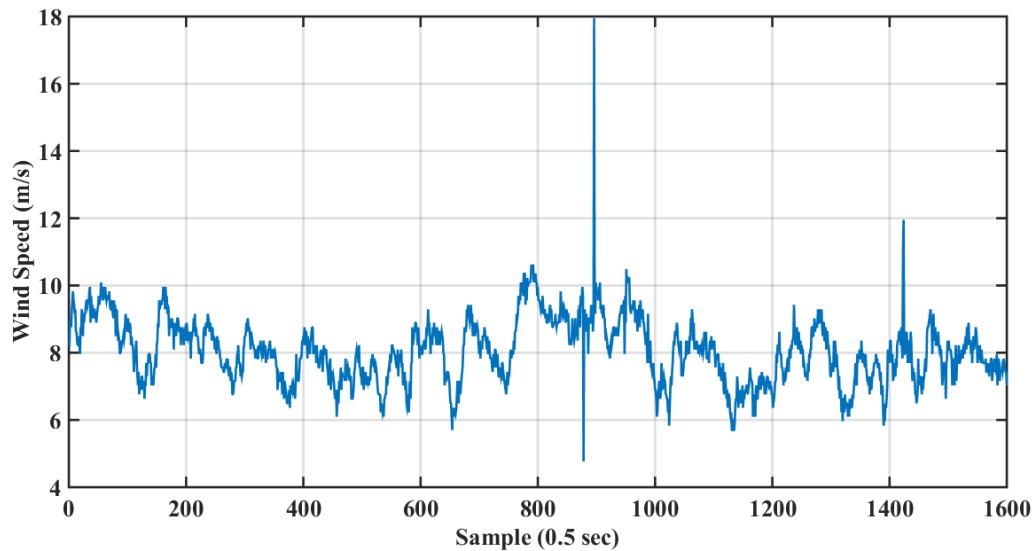
۲-۲-۲ شناسایی تابع تبدیل محرک زاویه گام

محرک زاویه گام جزو مکانیک سیستم چرخش پره است و باید به درستی شناسایی و در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گیرد که ورودی آن خروجی کنترل‌کننده زاویه گام و خروجی آن زاویه گام اعمالی به پره‌ها است.

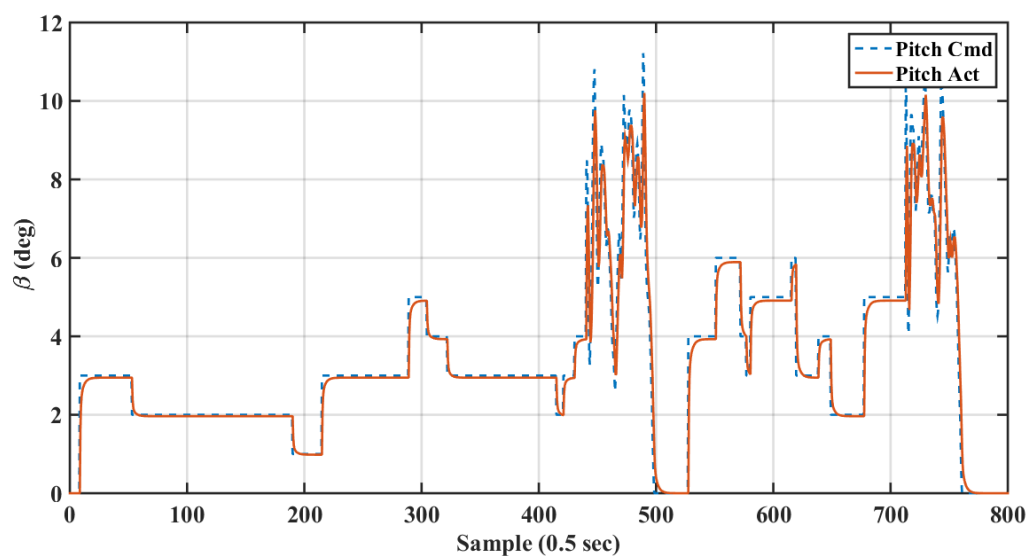


شکل ۲-۸ نحوه بکارگیری محرک زاویه گام در سیستم

داده‌های اندازه‌گیری شده از توربین در محل به صورت زیر می‌باشند که تابع تبدیل را بر اساس آن شناسایی می‌کنیم.



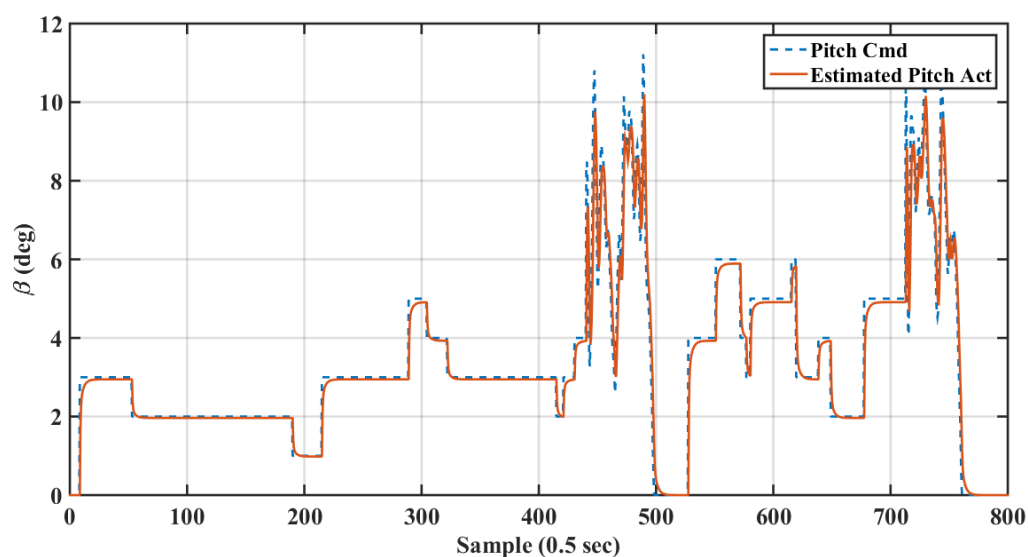
شکل ۲-۹: سرعت باد.



شکل ۲-۱۰: زاویه گام مرجع و واقعی.

با انجام شناسایی های مختلف مشخص شد که مدل مرتبه دو تقریب خوبی از محرک زاویه گام می باشد. نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل ۲-۱۱ آمده است.

$$G = \frac{0.5454z^{-1} - 0.4301z^{-2}}{1 - 1.146z^{-1} + 0.2632z^{-2}} \quad (2-12)$$



شکل ۲-۱۱: زاویه گام مرجع و خروجی مدل مرتبه دوم.

۲-۳-۳ شناسایی ضریب گشتاور رتور

دانستن ضریب گشتاور و توان و مقدار بیشینه آن برای کنترل زاویه گام و بیشینه سازی توان الکتریکی تولیدی ضروری است اما ضریب توان به غلظت هوا، رطوبت، دما، سرعت باد، سرعت نوک پره، ساختار توربین و روش های کنترلی وابسته است و این موضوع اهمیت شناسایی ضریب توان توربین بادی را مشخص می کند [۲۲، ۲۱].

روش یک: شناسایی به وسیله توابع چند جمله ای

جدول زیر چند جمله ای هایی را با درجه های ۲، ۴ و ۶ از که برای تخمین ضریب گشتاور در زاویه گام ثابت ($\beta = 15$) استفاده شده است نشان می دهد. تابع هزینه نرمالیزه شده را به صورت (۲-۱۲) تعریف می کنیم [۲۱].

$$J = \frac{1}{N} \sum_N e^2 \quad (۲-۱۳)$$

جدول ۲-۱- مقادیر تابع هزینه نرمالیزه شده برای چند جمله ای های مختلف با زاویه گام ۱۵ درجه.

تابع هزینه	تعداد پارامترها	درجه ی چند جمله ای
9.6274×10^{-4}	۳	۲
5.5509×10^{-5}	۵	۴
1.5436×10^{11}	۷	۶

زمانی که درجه ی چند جمله ای را ۶ در نظر گرفته شود پارامترها بسیار نزدیک مقدار استثنایی به دست می آیند، به همین دلیل خطا بسیار زیاد است.

بنابراین با توجه به جدول ۲-۳ درجه ۴ را برای انتخاب می شود. اثر زاویه گام با چند جمله ای هایی با درجه های ۱، ۲ و ۴ مدل می شوند و معادله نهایی که اثرات سرعت نسبی و زاویه گام را ترکیب می کند به صورت زیر نشان داده می شود.

$$\hat{C}_T = \sum_{i=0}^{m_\lambda} \sum_{j=0}^{m_\beta} a_{ij} \lambda^i \beta^j \quad (14-2)$$

که m_λ درجه سرعت نسبی و m_β درجه زاویه گام می باشد.

جدول ۲-۲- مقادیر تابع هزینه نرمالیزه شده برای چندجمله ای های مختلف.

تابع هزینه	تعداد پارامترها	درجه ی چندجمله ای برای (λ, β)
0.0012	۱۰	(۴,۱)
1.237×10^{-4}	۱۵	(۴,۲)
0.0276	۲۵	(۴,۴)

حال باید ضریب گشتاور با روش پیشنهادی زیر شناسایی شده و با یک چندجمله ای درجه ۴ تخمین زده شود.

$$C_T(\lambda, \beta) = a_0 + a_1\beta + a_2\beta^2 + a_3\beta^3 + a_4\beta^4 + a_5\lambda + a_6\lambda^2 + a_7\lambda^3 + a_8\lambda^4 + a_9\lambda\beta + a_{10}\lambda\beta^2 + a_{11}\lambda\beta^3 + a_{12}\lambda^2\beta + a_{13}\lambda^2\beta^2 + a_{14}\lambda^3\beta \quad (15-2)$$

این تابع را به صورت رگرسیون خطی بیان کرده و با استفاده از روش LSE پارامترها را شناسایی می شود.

$$y = \phi^T \theta \quad (16-2)$$

$$\phi = [1 \quad \beta \quad \beta^2 \quad \beta^3 \quad \beta^4 \quad \lambda \quad \lambda^2 \quad \lambda^3 \quad \lambda^4 \quad \lambda\beta \quad \lambda\beta^2 \quad \lambda\beta^3 \quad \lambda^2\beta \quad \lambda^2\beta^2 \quad \lambda^3\beta]^T$$

$$\theta = [a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5 \quad a_6 \quad a_7 \quad a_8 \quad a_9 \quad a_{10} \quad a_{11} \quad a_{12} \quad a_{13} \quad a_{14}]^T$$

که θ پارامترهای مجهول و ϕ پارامترهای معلوم هستند و به صورت زیر محاسبه می شود.

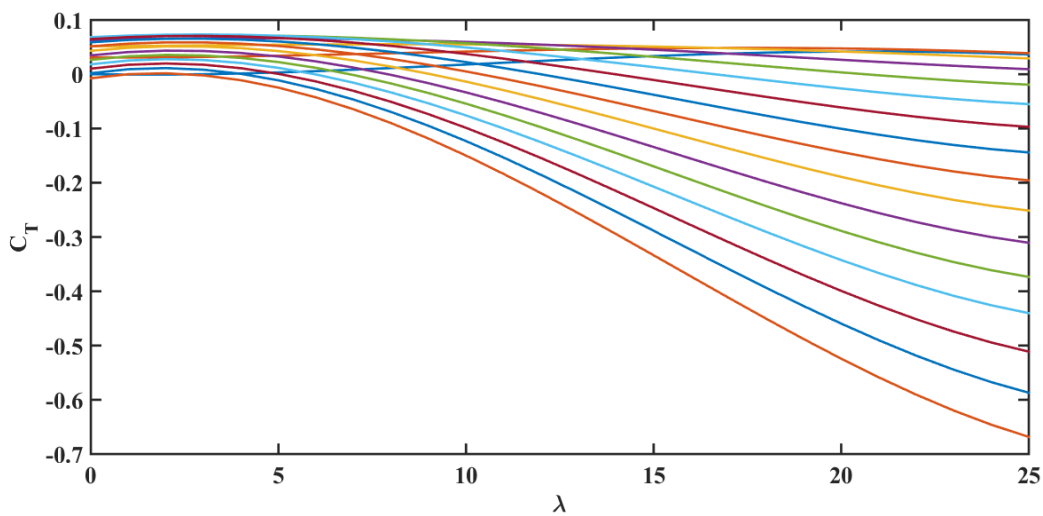
$$\theta = (\varphi \varphi^T)^{-1} \varphi y$$

↓

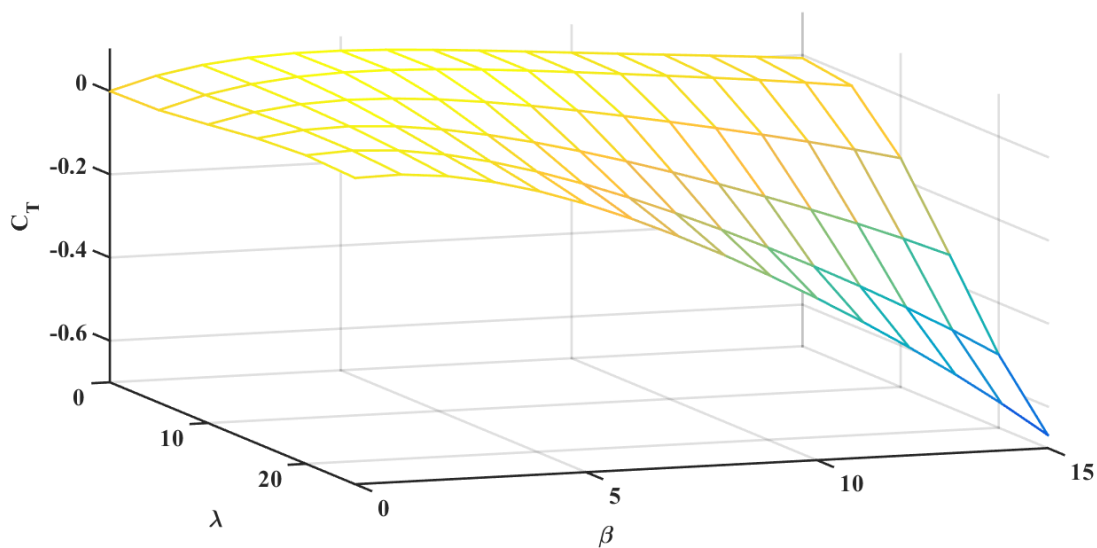
$$\begin{array}{lllll} a_0 = 0.00016975 & a_1 = 0.036878 & a_2 = -0.0064095 & a_3 = 0.00039824 & a_4 = -9.1393 \times 10^6 \\ a_5 = -0.0013019 & a_6 = 0.00047168 & a_7 = -1.7738 \times 10^5 & a_8 = 1.3069 \times 10^7 & a_9 = 0.00091601 \\ a_{10} = 1.6516 \times 10^5 & a_{11} = -1.6581 \times 10^6 & a_{12} = -0.00021419 & a_{13} = -1.6629 \times 10^6 & a_{14} = 5.3257 \times 10^6 \end{array}$$

تابع هزینه برای این تخمین برابر با $J = 6.2918 \times 10^{-5}$ است.

نمودارهای ضریب گشتاور بر حسب سرعت نسبی و زاویه گام پرها در شکل ۲-۱۷ و ۲-۱۸ آورده شده است.



شکل ۲-۱۲: منحنی شناسایی شده ضریب توان.



شکل ۲-۱۳: صفحه شناسایی شده ضریب توان.

روش دو: شناسایی به وسیله مدل

دینامیک های الکتریکی را می توان با معادلات دیفرانسیل زیر نمایش داد [۲۳].

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_{ds}^r &= \frac{1}{L_d} V_{ds}^r - \frac{R_s}{L_d} i_{ds}^r + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_{qs}^r \\ \frac{d}{dt} i_{qs}^r &= \frac{1}{L_q} V_{qs}^r - \frac{R_s}{L_q} i_{qs}^r - \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_{ds}^r - \frac{\lambda_{af} p \omega_r}{L_q} \end{aligned} \quad (۱۷-۲)$$

معادله دینامیک مکانیکی نیز به صورت زیر نوشته می شود.

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{T_e}{J} - \frac{T_m}{J} - \frac{F \omega_r}{J} \quad (۱۸-۲)$$

گشتاورهای الکتریکی به صورت زیر بیان می شود:

$$T_e = 1.5 p \lambda_{af} i_{qs}^r \quad (۱۹-۲)$$

مدل سیستم تبدیل انرژی بادی با ترکیب دینامیک های ژنراتور مغناطیس دائم با توربین به دست می آیند و به صورت زیر داده می شود:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{ds}^r = \frac{1}{L_d} V_{ds}^r - \frac{R_s}{L_d} i_{ds}^r + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_{qs}^r \\ \frac{d}{dt} i_{qs}^r = \frac{1}{L_q} V_{qs}^r - \frac{R_s}{L_q} i_{qs}^r - \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_{ds}^r - \frac{\lambda_{af} p \omega_r}{L_q} \\ \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1.5 p \lambda_{af} i_{qs}^r}{J} - \frac{0.5 \rho \pi R^3 C_T(\lambda, \beta) v^2}{J} - \frac{F \omega_r}{J} \end{cases} \quad (۲۰-۲)$$

ضریب گشتاور به عنوان متغیر حالت در نظر گرفته شده و با فرض اینکه ضریب گشتاور نامعلوم و به صورت تکه ای ثابت باشد:

$$\frac{dC_T}{dt} \approx 0$$

بنابراین سیستم با درجه ۴ به صورت زیر داده می شود.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{ds}^r = \frac{1}{L_d} V_{ds}^r - \frac{R_s}{L_d} i_{ds}^r + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_{qs}^r \\ \frac{d}{dt} i_{qs}^r = \frac{1}{L_q} V_{qs}^r - \frac{R}{L_q} i_{qs}^r - \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_{ds}^r - \frac{\lambda_{af} p \omega_r}{L_q} \\ \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1.5 p \lambda_{af} i_{qs}^r}{J} - \frac{0.5 \rho \pi R^3 C_T(\lambda, \beta) v^2}{J} - \frac{F \omega_r}{J} \\ \frac{dC_T}{dt} = 0 \end{cases} \quad (21-2)$$

تنها دینامیک‌های مکانیکی سیستم تبدیل انرژی بادی می‌توانند برای تخمین ضریب گشتاور در نظر گرفته شوند.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1.5 p \lambda_{af} i_{qs}^r}{J} - \frac{0.5 \rho \pi R^3 C_T(\lambda, \beta) v^2}{J} - \frac{F \omega_r}{J} \\ \frac{dC_T}{dt} = 0 \\ y = \omega \end{cases} \quad (22-2)$$

سیستم کاهش مرتبه داده شده بالا می‌تواند به فرم ماتریسی زیر نوشته شود:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + \phi(i_{qs}^r) \\ y = Cx \end{cases} \quad (23-2)$$

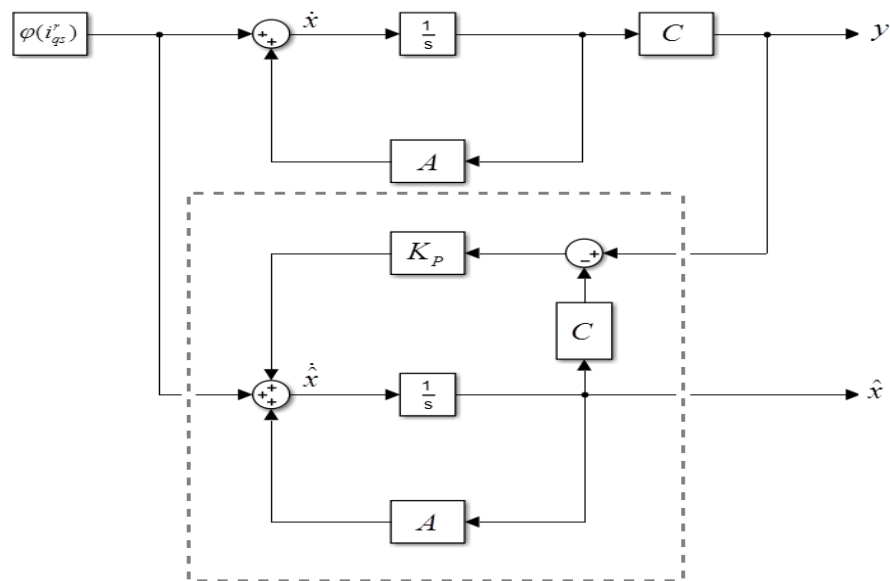
$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega \\ C_T \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} -\mu & -\sigma \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\phi(i_{qs}^r) = \begin{pmatrix} 1.5 p \lambda_{af} i_{qs}^r \\ 0 \end{pmatrix}, \text{ and } C = (1 \ 0)$$

$$\mu = \frac{F}{J} \text{ and } \sigma = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^3 v^2}{J}$$

تخمینگر فرم زیر را می‌گیرد:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \phi(i_{qs}^r) + K_p(y - \hat{y}) \quad (24-2)$$



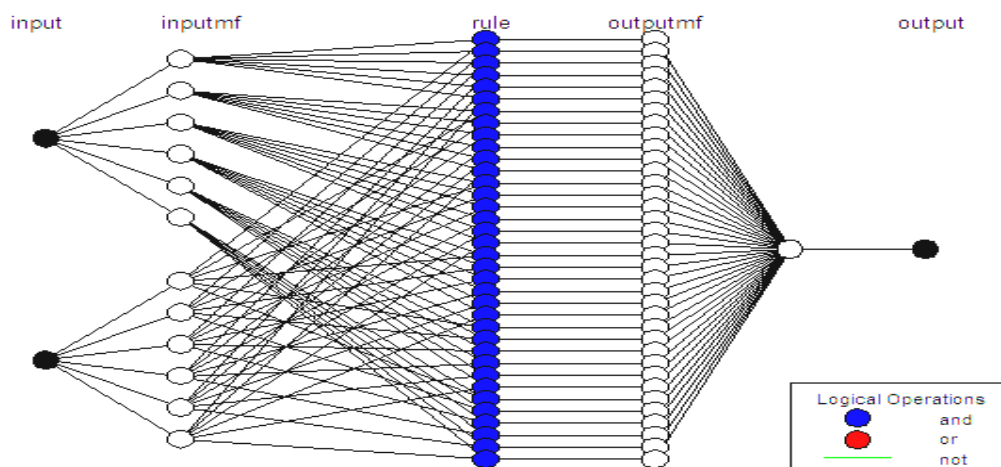
شکل ۲-۱۴: ساختار تخمینگر.

با انجام فرایند گفته شده به طور خلاصه مشاهده گر به صورت زیر درمی آید:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\omega}_r}{dt} = -\mu\hat{\omega}_r - \sigma\hat{C}_T + \frac{1.5p\lambda_{af}i_{qs}^r}{J} + (2\theta\sigma - \mu)(\omega_r - \hat{\omega}_r) \\ \frac{d\hat{C}_T}{dt} = -\theta^2\sigma(\omega_r - \hat{\omega}_r) \end{cases} \quad (2-25)$$

روش سه: شناسایی با استفاده از سیستم فازی-عصبی

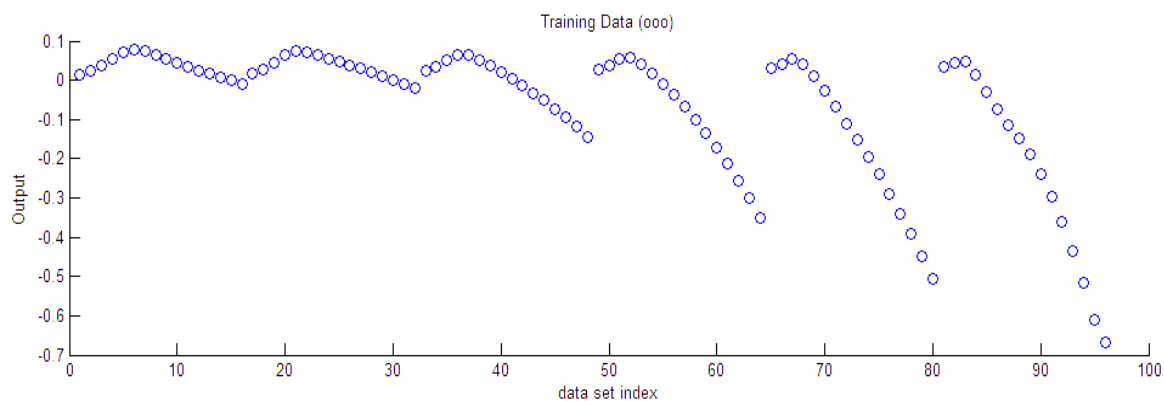
ساختار سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) را به صورت زیر با توابع تعلق بل شکل و سیستم فازی تاکاگی-سوگنو مرتبه ۱ در نظر گرفته می شود [۲۴].



شکل ۲-۱۵: ساختار ANFIS.

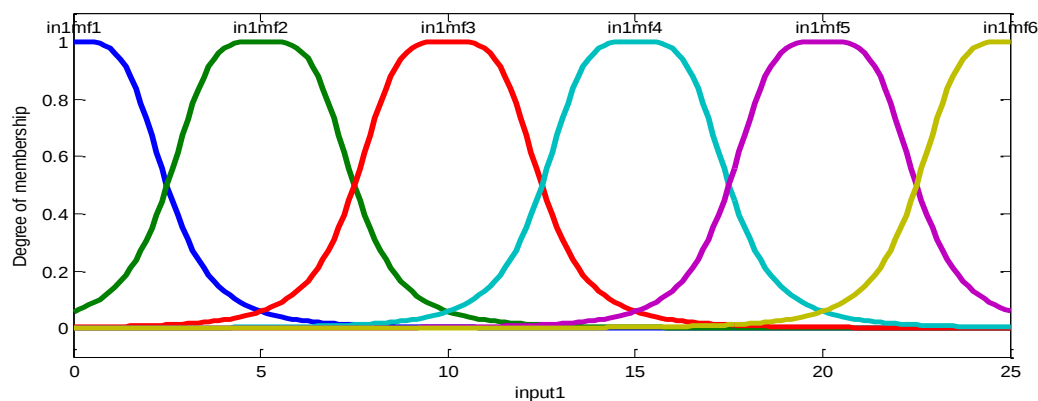
از الگوریتم‌های آموزش دوگانه^۱ برای شناسایی پارامترهای ساختار ANFIS استفاده شده است. کمترین خطای آموزش شبکه عصبی برای توابع عضویت استفاده شده برابر ۰.۰۰۰۱۱۳۹۴ است.

داده‌های آزمون و نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۲-۱۶ تا ۲-۲۲ نشان داده شده است.



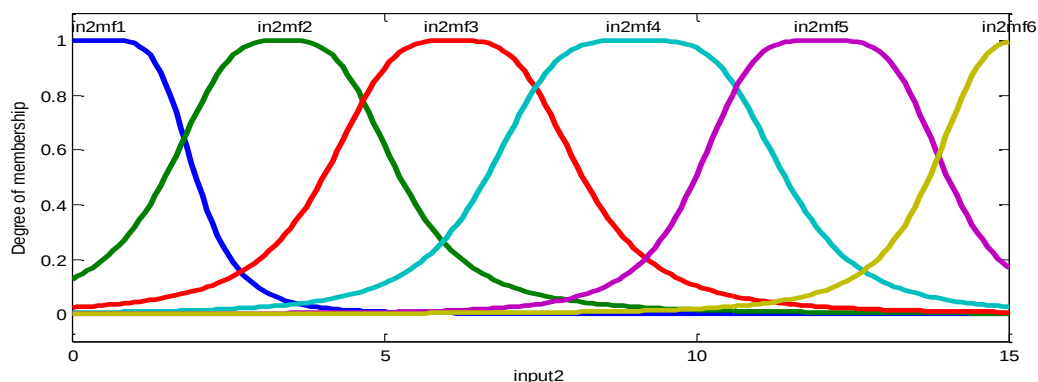
شکل ۲-۱۶: داده‌های آموزش.

توابع تعلق ورودی به صورت زیر است.



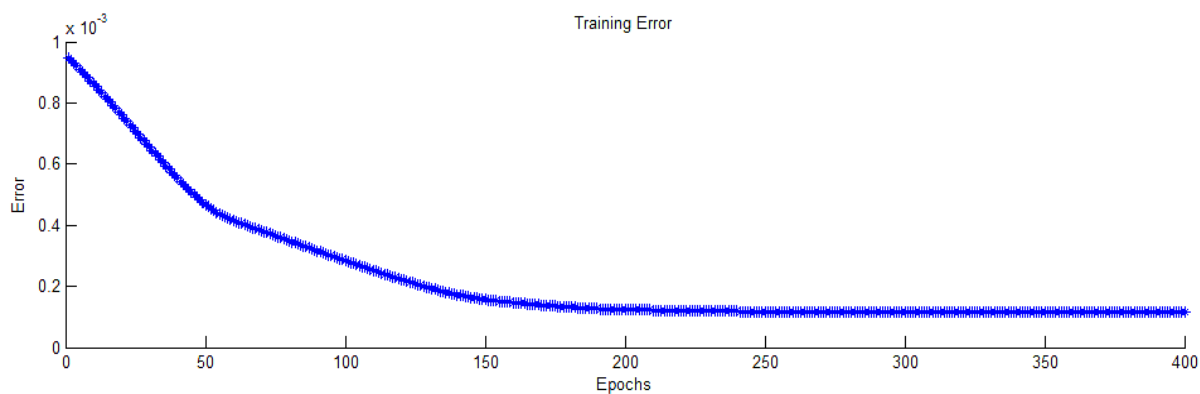
شکل ۲-۱۷: توابع تعلق برای ورودی اول (زاویه گام).

^۱ hybrid

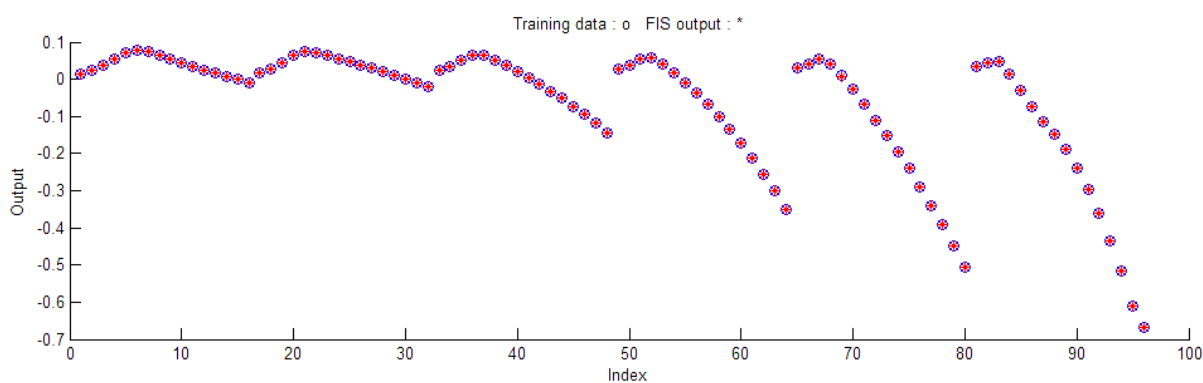


شکل ۲-۱۸: توابع تعلق برای ورودی دوم (سرعت نسبی).

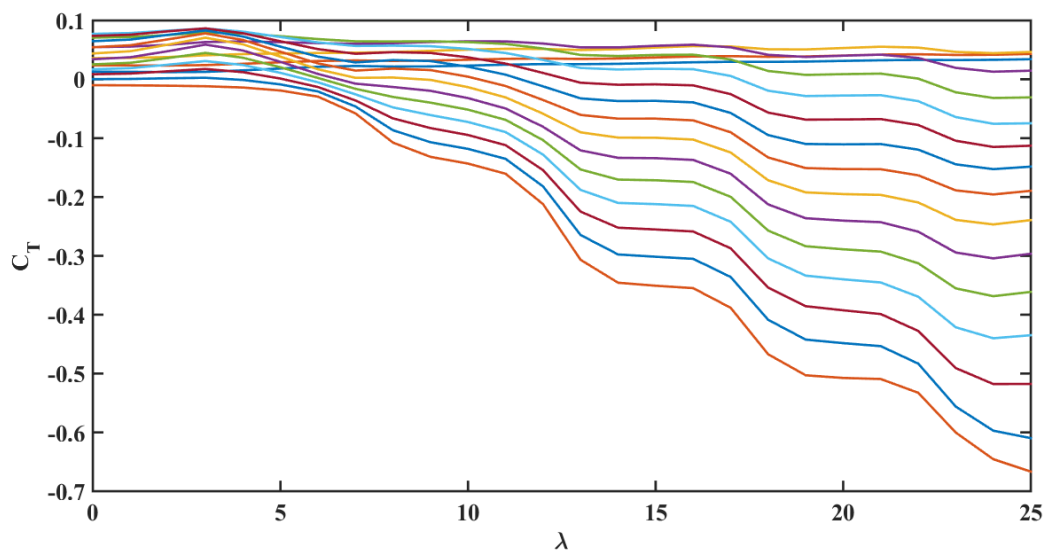
منحنی خطا و داده های آزمون به صورت زیر است.



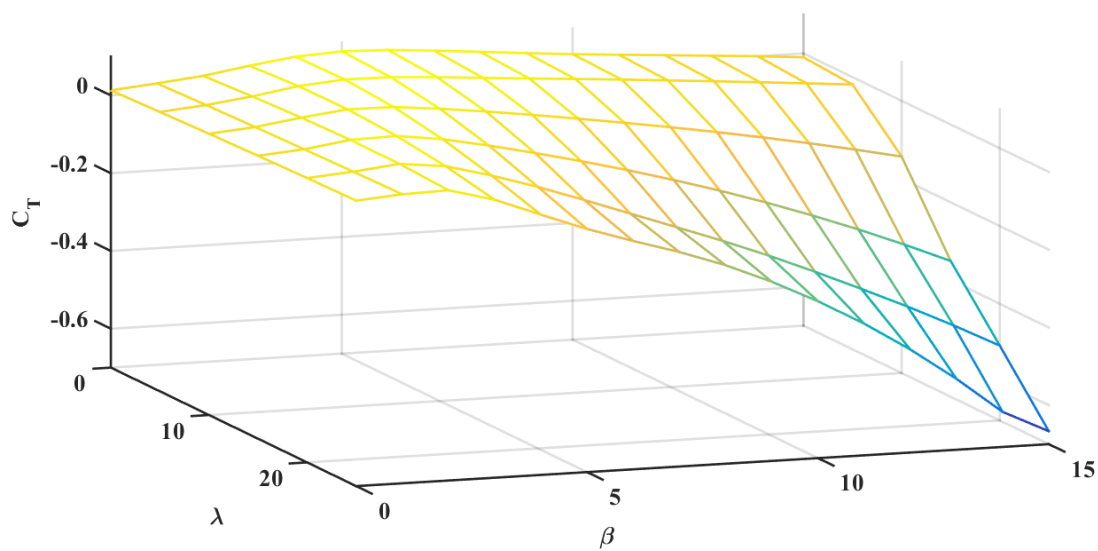
شکل ۲-۱۹: منحنی خطای آموزش.



شکل ۲-۲۰: داده های آزمون.

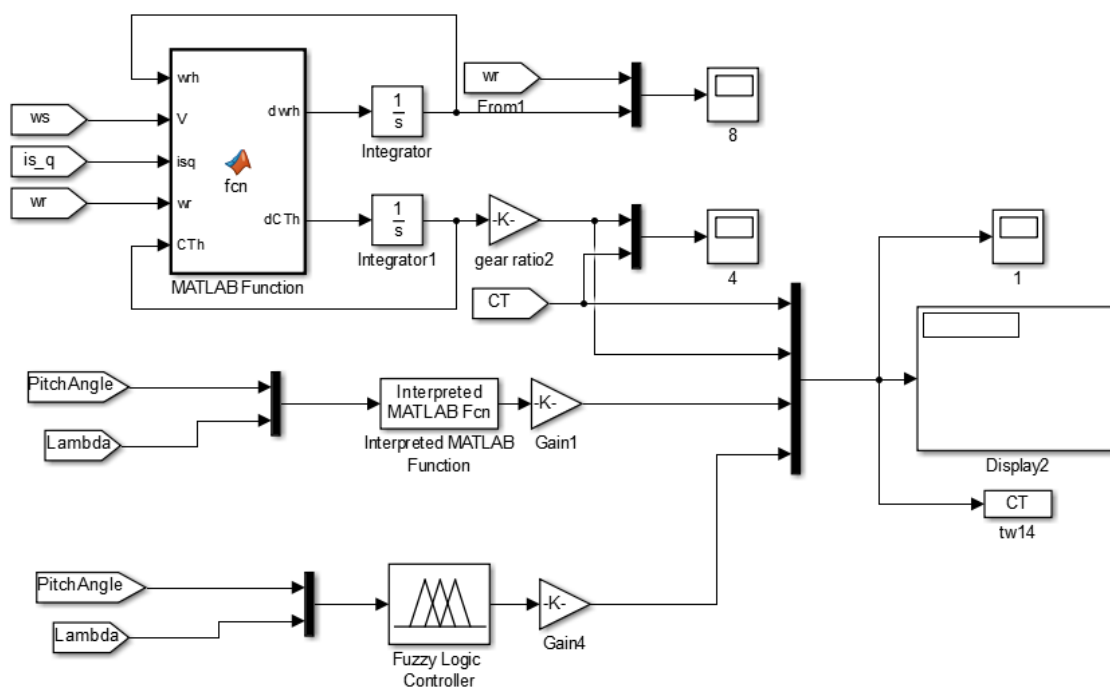


شکل ۲-۲۱: منحنی ضریب گشتاور تخمین زده شده.

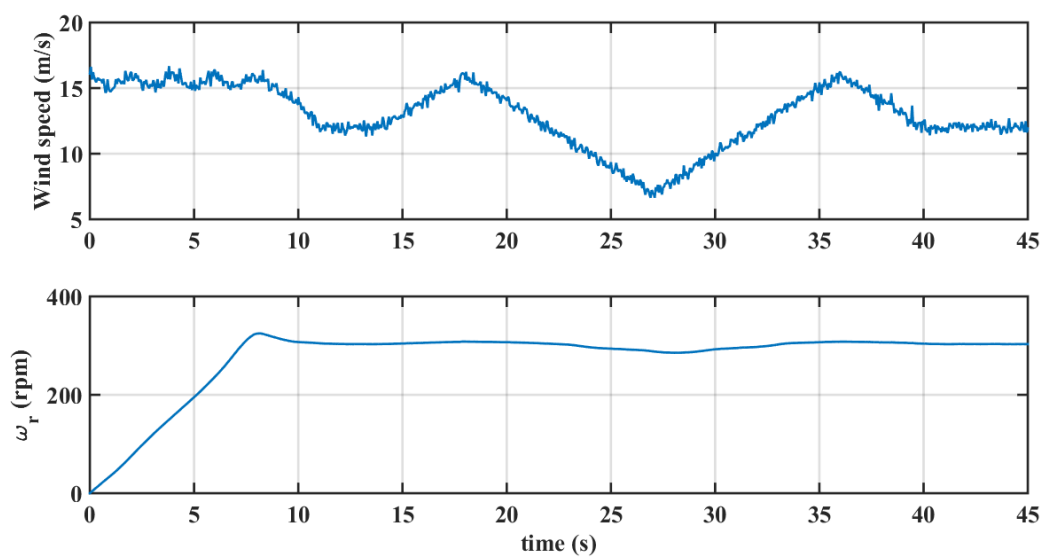


شکل ۲-۲۲: صفحه ضریب گشتاور تخمین زده شده.

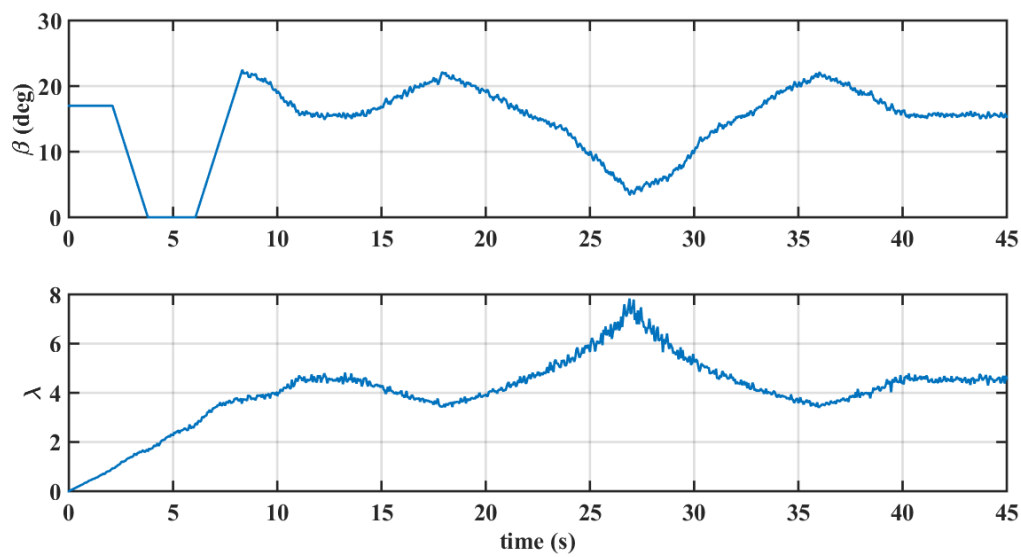
این سه روش در سیستم غیرخطی پیاده سازی و نتایج آن در زیر آورده شده است.



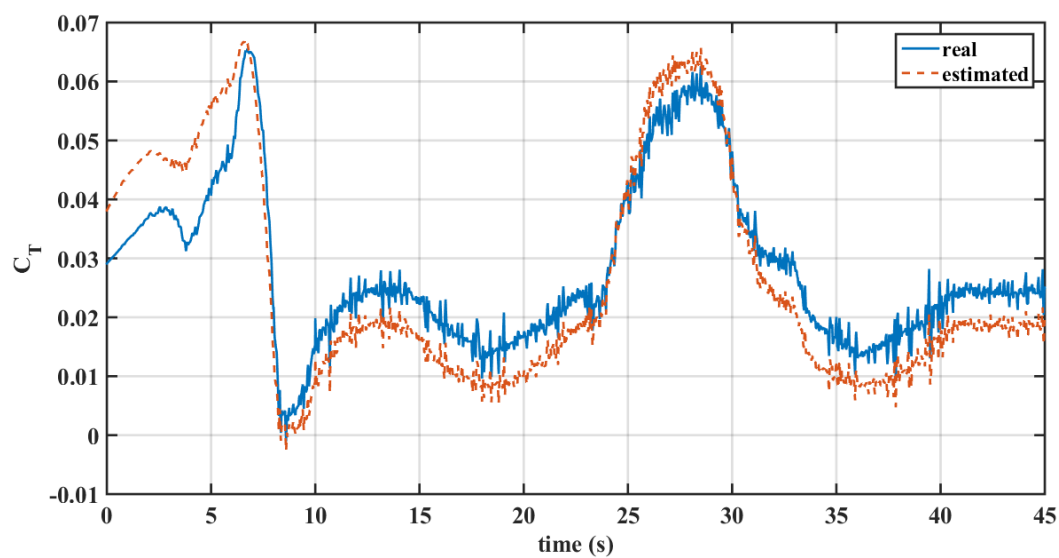
شکل ۲-۲۳: پیاده سازی سه روش در سیستم غیر خطی.



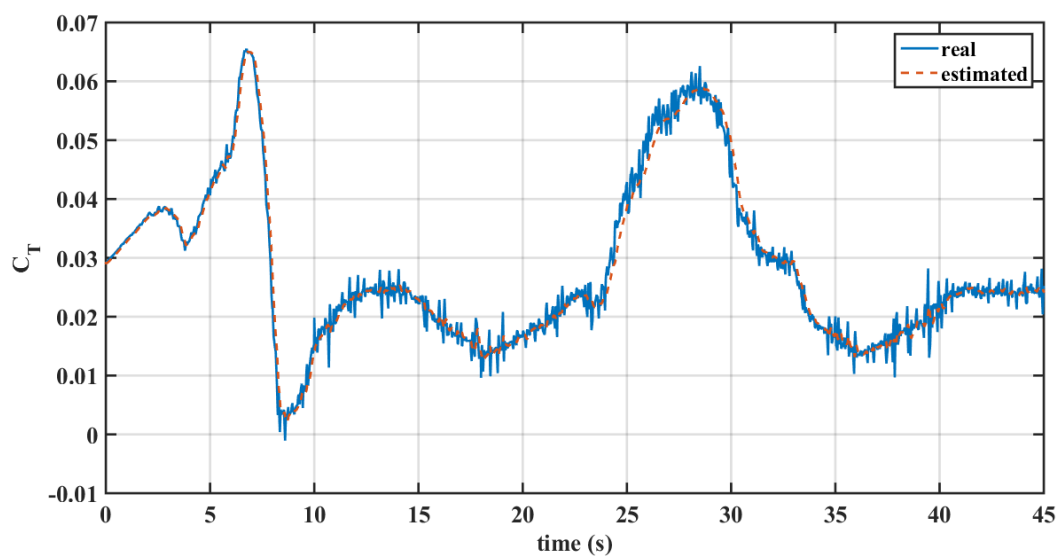
شکل ۲-۲۴: سرعت باد و رتور.



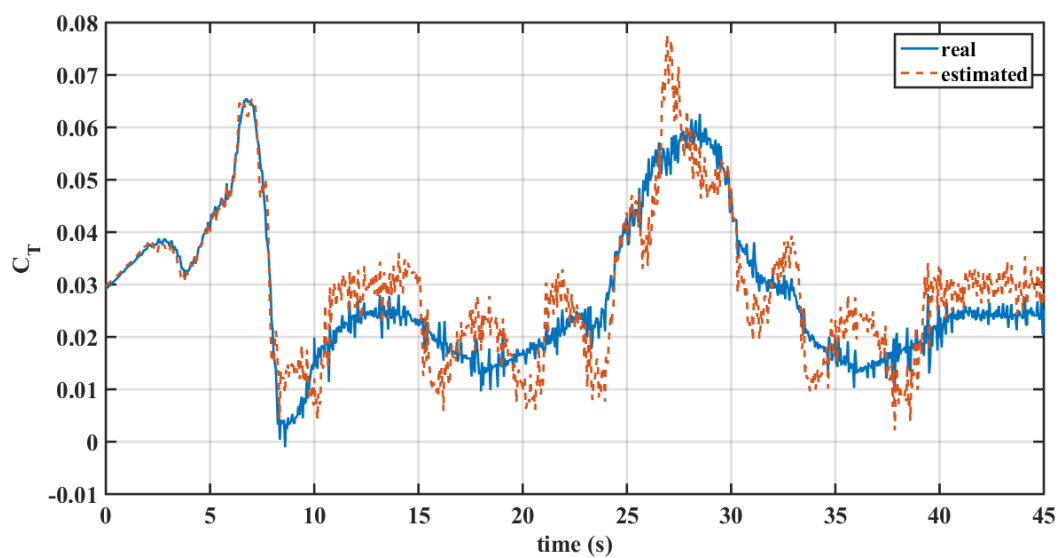
شکل ۲-۲۵: زاویه گام و سرعت نسبی.



شکل ۲-۲۶: ضریب گشتاور و تخمین آن با روش یک.



شکل ۲-۲۷: ضریب گشتاور و تخمین آن با روش دو.



شکل ۲-۲۸: ضریب گشتاور و تخمین آن با روش سه.

در جدول ۴-۲ نتایج حاصل از شبیه سازی برای روش های مختلف آورده شده است.

جدول ۴-۲- مقادیر تابع هزینه نرمالیزه شده برای روش های متفاوت.

روش	تابع هزینه
شناسایی به وسیله توابع چندجمله ای	4.5731×10^{-5}
شناسایی به وسیله مدل	3.3590×10^{-6}
شناسایی با استفاده از سیستم فازی-عصبی	4.1040×10^{-5}

پس از بررسی روش ها و شبیه سازی های انجام شده می توان به نتایج زیر رسید.

برای داشتن ضریب توان که مشتق پذیر باشد روش یک (شناسایی به وسیله توابع چندجمله ای) توصیه می شود.

اگر تغییرات فیزیکی پره و محیط اطراف در نظر گرفته شود طراحی تخمینگر به روش دو (شناسایی به وسیله مدل) پیشنهاد می شود.

اگر سیستم پیچیده باشد و یا تنها به مقدار ضریب توان نیاز باشد و همچنین توابع چندجمله ای دقت خوبی نداشته باشند (به دلیل سادگی اولویت با چندجمله ای ها است) با توجه به شبیه سازی و دقت سیستم فازی طراحی تخمینگر به روش سه (شناسایی با استفاده از سیستم عصبی-فازی) توصیه می شود.

۴-۲-۲ تخمین سرعت باد

در فرآیند طراحی یک کنترل کننده توربین بادی وجود یک متغیر نامعلوم (سرعت باد) مشکل ساز است. سرعت باد اندازه گیری شده در ناسل برای روش های بر اساس مدل مناسب نیست، در این موارد نیاز به تخمین سرعت باد مؤثر بر روتور است.

در [۲۵] با انجام شبیه سازی ها و پیاده سازی عملی تخمینگر های سرعت باد و مقایسه آن ها باهم به نتایج زیر می رسد:

تخمینگر بر اساس فیلتر کالمن گسترش یافته در آشفتگی کم باد و تخمینگر I&I^۱ در تمام آشفتگی ها و تخمینگر توازن توان در آشفتگی های زیاد بهترین نتایج حاصل شدند. علاوه بر این تخمینگر I&I برای پیاده سازی به دلیل اینکه دیگر خطی سازی جدول ضریب توان و همچنین جواب معادله گشتاور نیاز نیست، برعکس تخمینگر بر اساس کالمن فیلتر گسترش یافته و تخمینگر توازن توان، ساده تر است.

تخمینگر I&I در زیر معرفی می شود.

مدل سیستم را به صورت زیر می نویسیم [۲۶]:

$$J\dot{\omega}_e = \frac{T_m}{N} - T_e - T_l \quad T_m = \frac{\rho \pi R^2 v_r^3 C_p(\beta, \lambda)}{2\omega_r}$$

تخمینگر I&I

برای سیستم غیر خطی

$$\dot{x} = f(x, u, t) + \phi(x, \alpha) \quad (۲۶-۲)$$

که در آن α, u, x به ترتیب حالت ها، ورودی ها و پارامترهای نامعلوم ثابت هستند، تخمینگر I&I به شکل زیر به دست می آید.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\xi}} &= -\frac{\partial \ell(x)}{\partial x} [f(x, u, t) + \phi(x, \hat{\xi} + \ell(x))] \\ \hat{\alpha} &= \hat{\xi} + \ell(x) \end{aligned} \quad (۲۷-۲)$$

تحت شرایطی که $\ell: R^n \rightarrow R^q$ یک نگاشت نرم است.

$$\begin{aligned} \psi_x: R^q &\rightarrow R^q \\ \psi_x(\alpha) &:= \frac{\partial \ell(x)}{\partial x} \phi(x, \alpha) \end{aligned} \quad (۲۸-۲)$$

^۱ Immersion and Invariance Estimator

همچنین نگاشت (۲۷-۲) به صورت یکنواخت افزایشی است.

در [۲۷] و [۲۸] شرایطی برای اطمینان که تخمینگر I&I مجانبی وجود دارد، یعنی

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\alpha}(t) = \alpha, \forall (x(0), \hat{\xi}(0)) \in R^n \times R^q \wedge \forall u(t) \quad (29-2)$$

تخمینگر I&I برای تخمین EWS با استفاده از دینامیک روتور با تعریف $\phi = \frac{T_m}{J}$ و $f = \frac{-N T_e - N_e T_l}{J}$

پارامتر نامعلوم α به عنوان سرعت باد مؤثر $\hat{v}_r$ و حالت x به عنوان سرعت ژنراتور در نظر گرفته می شود، طراحی و پیاده سازی می شود. حال نگاشت نرم ℓ را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$\ell := \gamma \omega_e \quad (30-2)$$

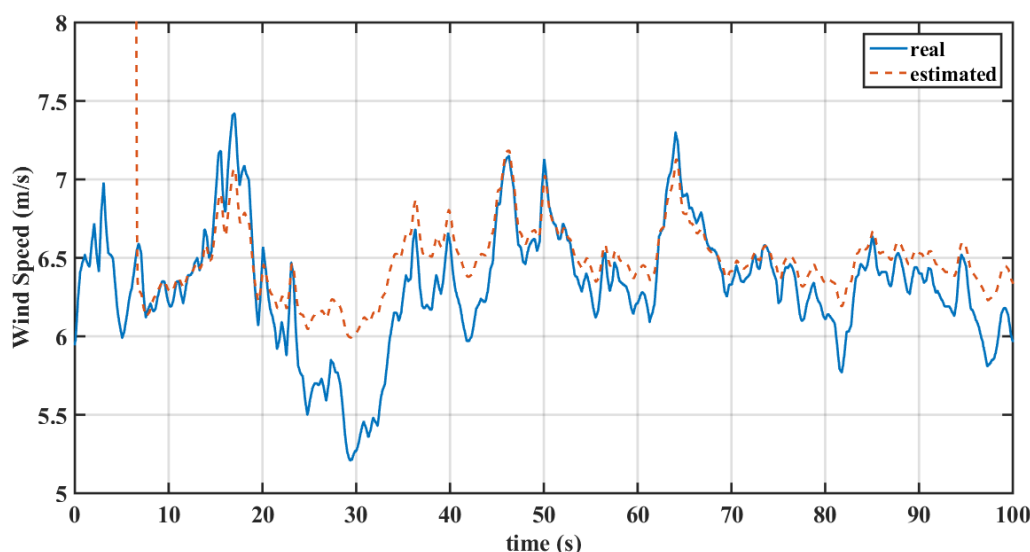
بطوریکه γ یک ثابت مثبت است. این باعث می شود که نامعادله زیر برقرار باشد:

$$3 \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} > \frac{\partial C_p(\lambda)}{\partial \lambda} \quad (31-2)$$

برای بعضی از توربین های بادی، این شرایط برای تمام مقادیر λ در تمام زوایای گام نگه داشته نمی شود. در این مورد تخمینگر پایداری مجانبی سراسری را تضمین نمی کند. هرچند پایداری مجانبی محلی همیشه نگه داشته می شود. می توان با نوشتن معادلات گشتاور درترم λ به صورت زیر، نشان داد نقاط عملیاتی توربین بادی زاویه گام-تنظیم شده در ناحیه پایداری قرار دارند.

$$T_m(\lambda) = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_r^2}{\lambda^3} C_p(\beta, \lambda) \quad (32-2)$$

تابع C_p/λ^3 فقط برای زاویه گام های خیلی کوچک غیریکنواخت است. یک بیشینه کوچک تر از سرعت نسبی بهینه دارد، یعنی ناحیه با پاسخ نادرست در مد استال و دور از نقاط عملیاتی توربین قرار دارد. هیچ تضمینی وجود ندارد که توربین وارد ناحیه استال نشود و کنترل کننده اش برای برگرداندن به ناحیه به وسیله افزایش سرعت رتور یا زاویه گام، طراحی می شود؛ بنابراین پاسخ های نادرست در موقعیت های خاص و برای زمان های گذرا کوتاه برای یک زاویه گام اتفاق می افتند.



شکل ۲-۲۹: سرعت باد و تخمین آن.

۲-۲-۵ شناسایی حلقه بسته

برای شناسایی مدل سیستم ابتدا زاویه گام را یک مقدار ثابت قرار داده تا سیستم به حالت پایدار خود برسد سپس به مقدار زاویه گام سیگنال تحریک اضافه می شود و با استفاده از پاسخ به دست آمده سیستم شناسایی می گردد. برای پایداری سیستم از یک کنترل کننده غیرخطی استفاده می گردد، بنابراین برای تمام نقاط کاری این عمل را انجام می گیرد. هدف به دست آوردن تابع تبدیل از زاویه گام اعمالی و سرعت باد به سرعت ژنراتور بر اساس داده های تجربی در حالت حلقه بسته است. فرض می شود سرعت واقعی ژنراتور ω و سرعت تخمین زده شده $\hat{\omega}$ ، با معادلات زیر داده شده باشد که در این حالت β زاویه گام اعمالی و v سرعت باد باشد [۲۹]. این الگوریتم برای شناسایی مدل در نقاط مختلف کار اعمال می شود و صحت مدل های به دست آمده هم بر اساس داده های شبیه سازی بررسی می شود.

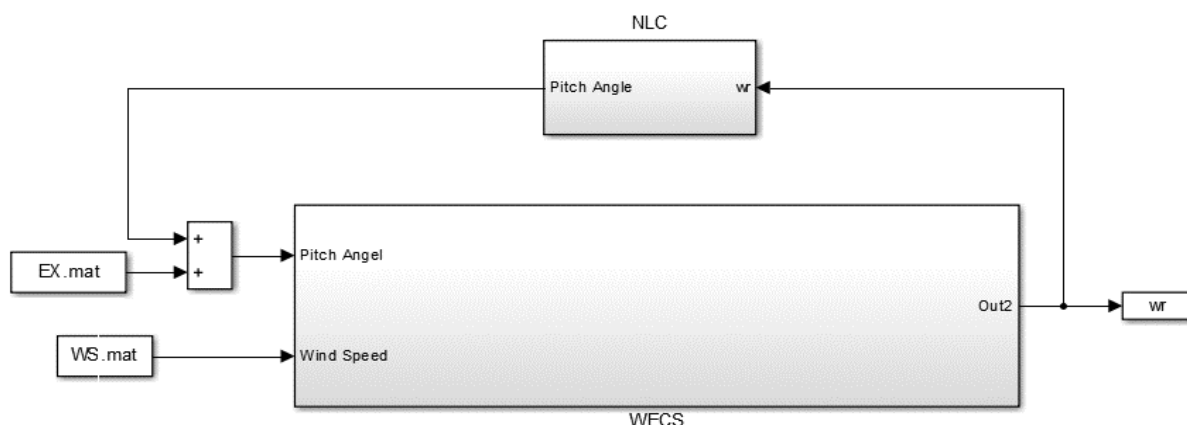
$$\begin{aligned}\omega_r(t) &= \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})}\beta(t) + \frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})}v(t) \\ \hat{\omega}_r(t) &= \frac{\hat{B}(q^{-1})}{\hat{A}(q^{-1})}\beta(t) + \frac{\hat{C}(q^{-1})}{\hat{A}(q^{-1})}v(t)\end{aligned}\tag{۲-۳۳}$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}$$

$$B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + \dots + b_n q^{-n}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_n q^{-n}$$

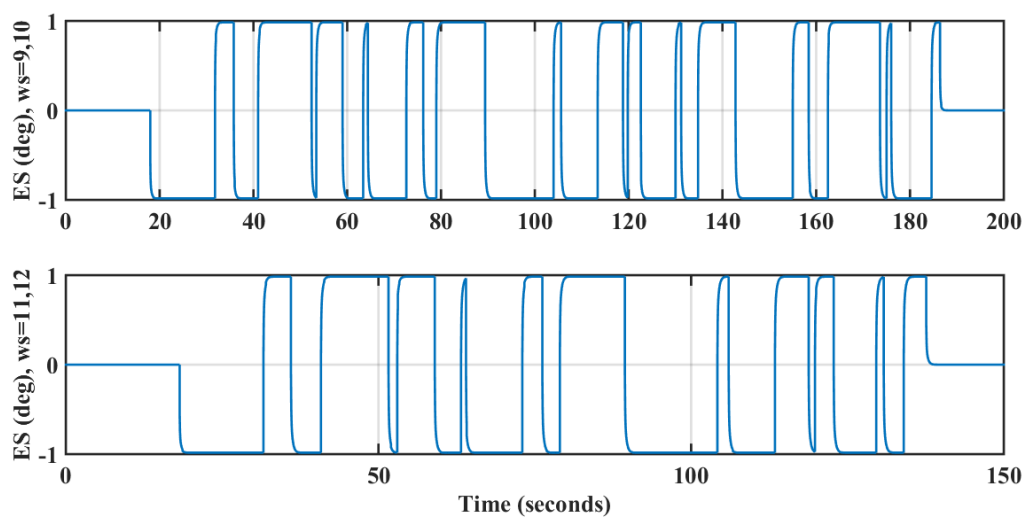
(۳۴-۲)



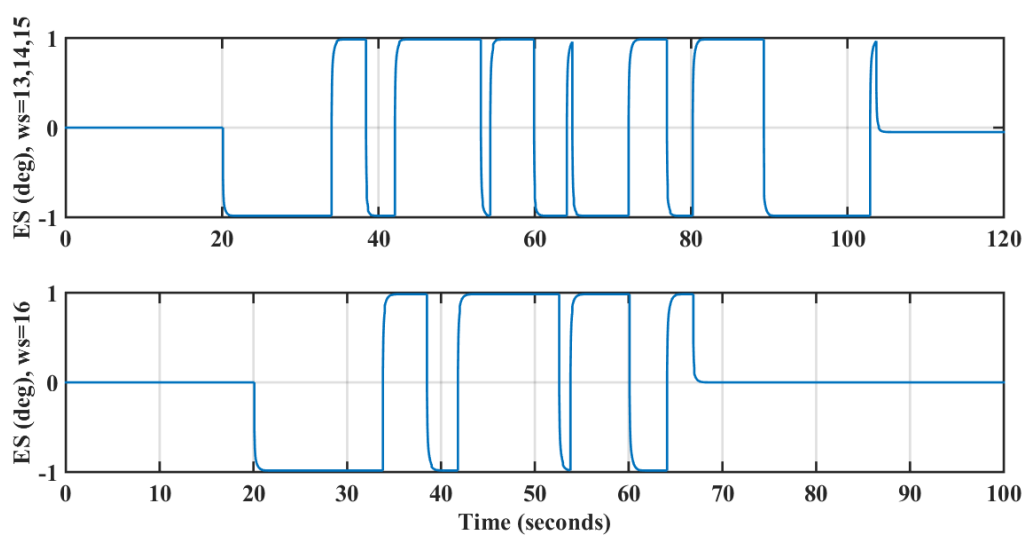
شکل ۲-۳۰: بلوک دیاگرام سیستم برای شناسایی.

برای حلقه کنترل زاویه گام، سیگنال تحریک ورودی به خروجی کنترل کننده همان طور که در شکل ۲-۳۰ نشان داده شده است، اضافه می شود. پایداری و همبستگی توربین نباید توسط سیگنال تحریک تهدید و سیگنال بایستی به صورت صحیح طراحی شود، بنابراین چندین شبیه سازی برای سرعت های مختلف باد باید در نظر گرفته شود.

طراحی سیگنال تحریک برای شناسایی صحیح سیستم بسیار مهم است به عبارت دیگر دینامیک های سیستم بایستی تحریک شوند. در نتیجه برای پرهیز از صدمه توربین نباید مدهای نامیرای مهم که نیازی نیست شناسایی شوند، تقویت نشود. برای طراحی صحیح این سیگنال مدل کامل توربین بادی مورد توجه است. بر اساس شبیه سازی های انجام شده سیگنال تحریک مناسب برای توربین بادی در نظر گرفته شده را می توان در شکل های ۲-۳۱ و ۲-۳۲ دید.

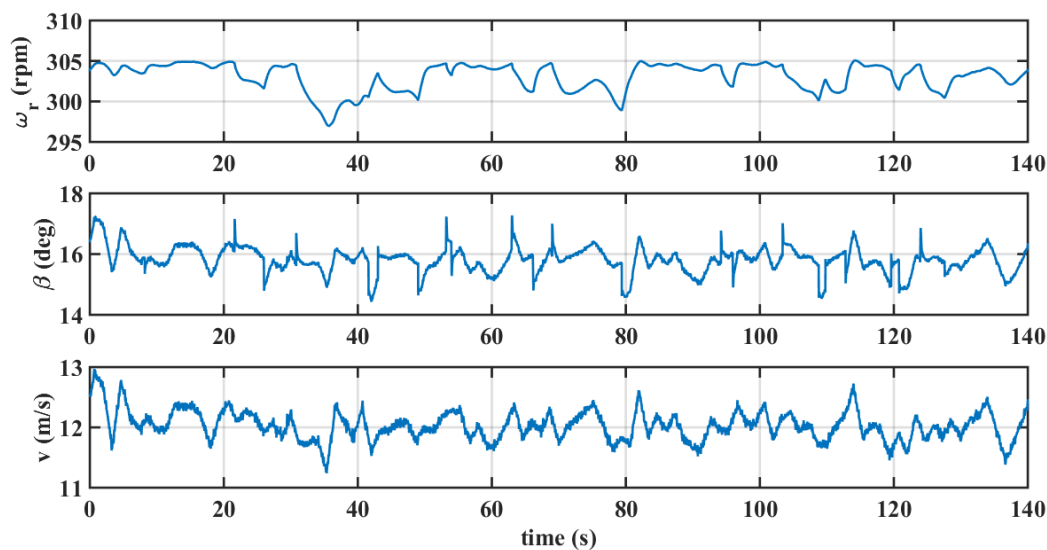


شکل ۲-۳۱: سیگنال تحریک برای سرعت‌های ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ متر بر ثانیه.



شکل ۲-۳۲: سیگنال تحریک برای سرعت‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶ متر بر ثانیه.

به عنوان نمونه مراحل شناسایی در سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه در زیر آورده شده است.



شکل ۲-۳۳: مراحل شناسایی در سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه.

تابع تبدیل به دست آمده:

$$P = \begin{Bmatrix} 0.9995 + 0.0000i \\ -0.4629 + 0.8369i \\ -0.4629 - 0.8369i \\ -0.3348 + 0.0000i \end{Bmatrix}$$

$$z = \{ \}$$

$G =$

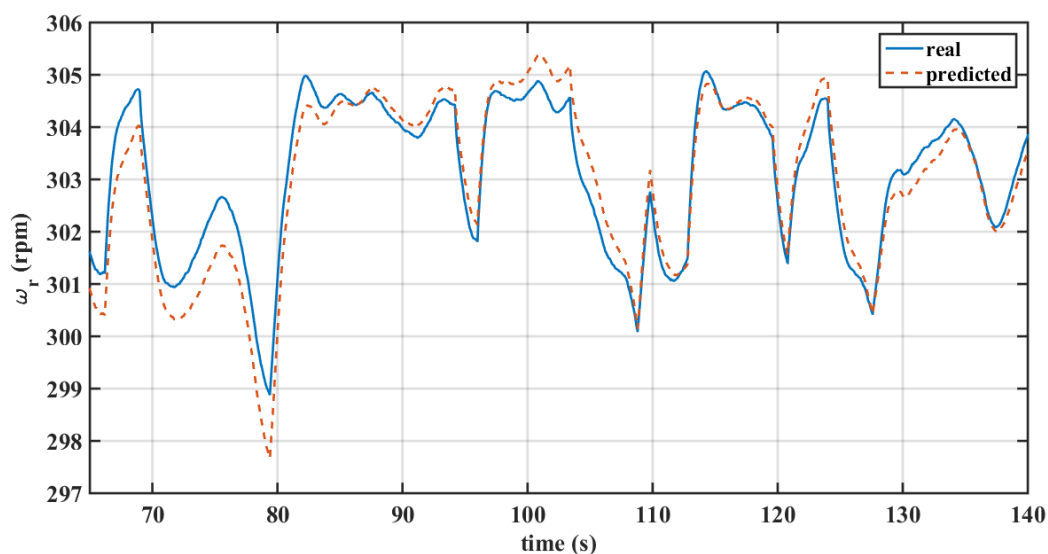
From input "u1" to output "y1":

$$\frac{-0.004207 z^{-1} - 0.005066 z^{-2} - 0.001821 z^{-3} + 0.001463 z^{-4}}{1 + 0.261 z^{-1} - 0.03539 z^{-2} - 0.9178 z^{-3} - 0.3061 z^{-4}}$$

From input "u2" to output "y1":

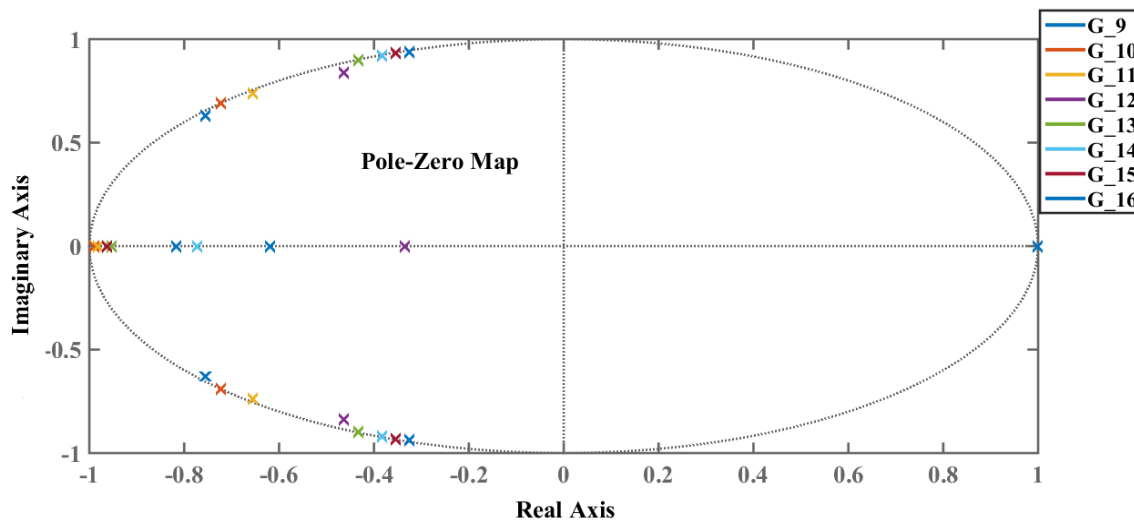
$$\frac{0.009311 z^{-1} + 0.007498 z^{-2} + 0.004283 z^{-3} - 0.003901 z^{-4}}{1 + 0.261 z^{-1} - 0.03539 z^{-2} - 0.9178 z^{-3} - 0.3061 z^{-4}}$$

بررسی صحت تابع شناسایی شده با داده های شبیه سازی انجام می شود که نتایج آن در شکل ۲-۳۴ نشان داده شده است.

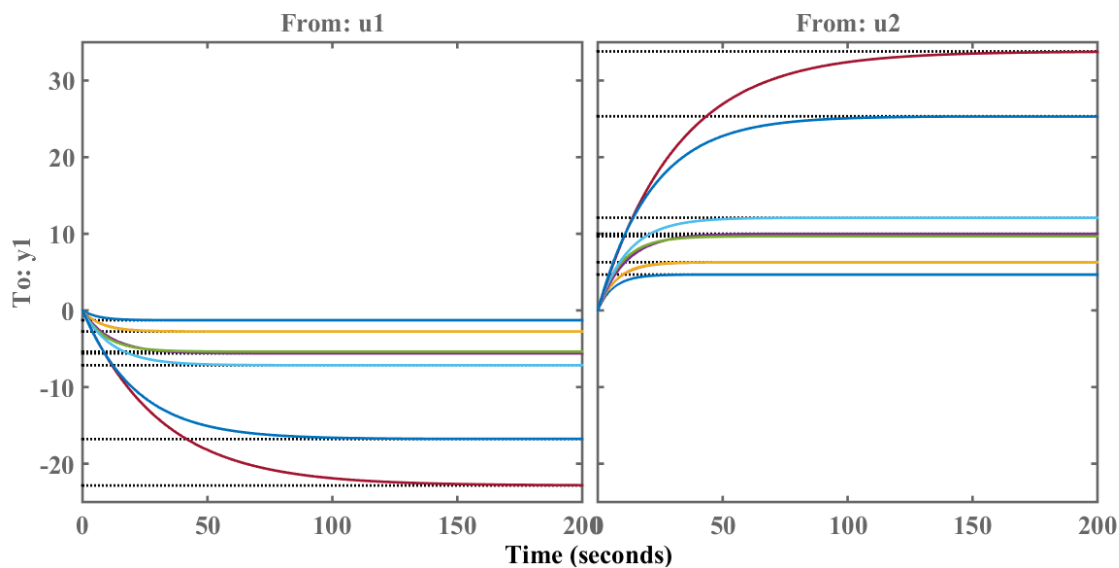


شکل ۲-۳۴: سرعت ژنراتور و تخمین آن در سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه.

همان طور که در شکل ۲-۳۴ نیز مشخص است تابع تبدیل شناسایی شده از دقت خوبی برخوردار است و می توان از مدل به دست آمده برای طراحی کنترل کننده در این نقطه کار استفاده کرد. البته رسیدن خروجی مدل به خروجی واقعی زمان بر است که باعث می شود در لحظات اولیه دقت پایین باشد.



شکل ۲-۳۵: صفر و قطب های مدل ها.



شکل ۲-۳۶: پاسخ پله مدل ها.

این مراحل شناسایی را برای تمامی نقاط کار (تمامی سرعت های باد بیشتر از سرعت نامی) انجام گرفته که نتایج آن از جمله صفر و قطب ها و پاسخ پله مدل ها در شکل های ۲-۳۵ و ۲-۳۶ آمده است که کاملاً مشخص است مدل های به دست آمده پایدار می باشند.

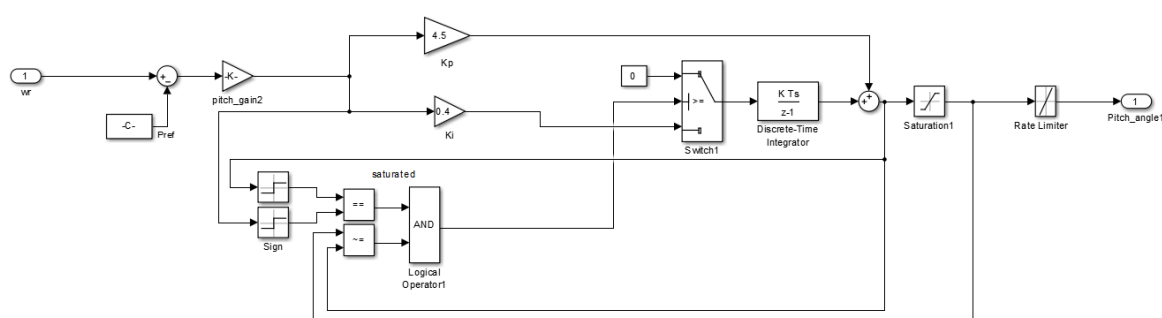
فصل ۳ طراحی کنترل کننده

۳-۱- مقدمه

در این فصل به طراحی کنترل کننده های کلاسیک و فازی و پیش بین برای قسمت های مختلف سیستم پرداخته می شود. کنترل کننده کلاسیک برای تنظیم زاویه گام دارای مشکلاتی از جمله رعایت نکردن قیود سیستم است که برای رفع این مشکلات کنترل کننده های دیگر معرفی می گردد.

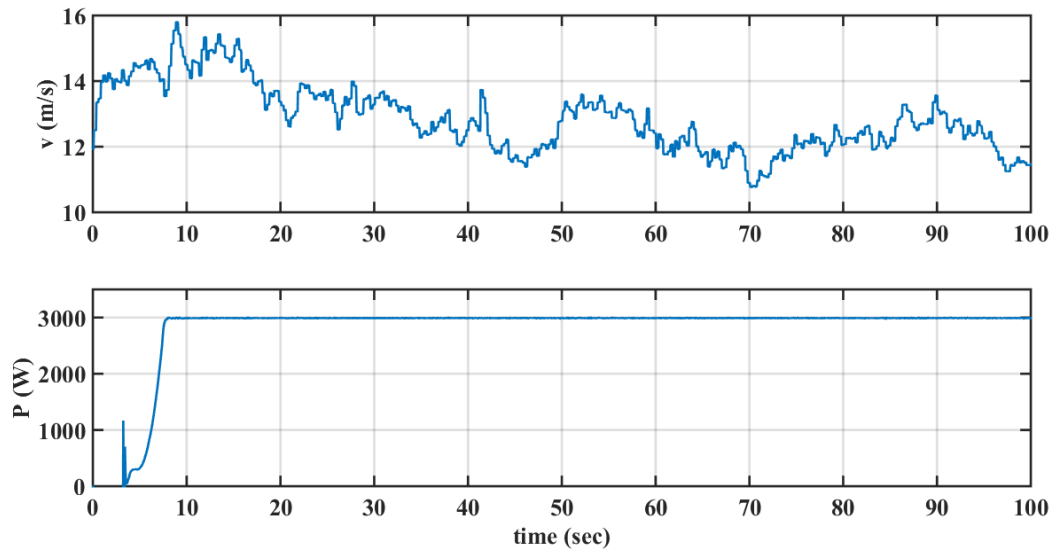
۳-۲- کنترل کننده تناسبی-انتگرالی

به دلیل اینکه زاویه گام تنها مقادیر مثبت دارد، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی برای سرعت روتور بالاتر از سرعت نامی پیاده سازی می شود. با توجه به مشخصات فیزیکی پره ها و توربین، میزان اشباع (حداکثر میزان چرخش پره ها) ۲۵ درجه و حداکثر نرخ تغییرات زاویه گام ۱۰ درجه بر ثانیه اعمال می شود. روند طراحی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی به شرح زیر است.

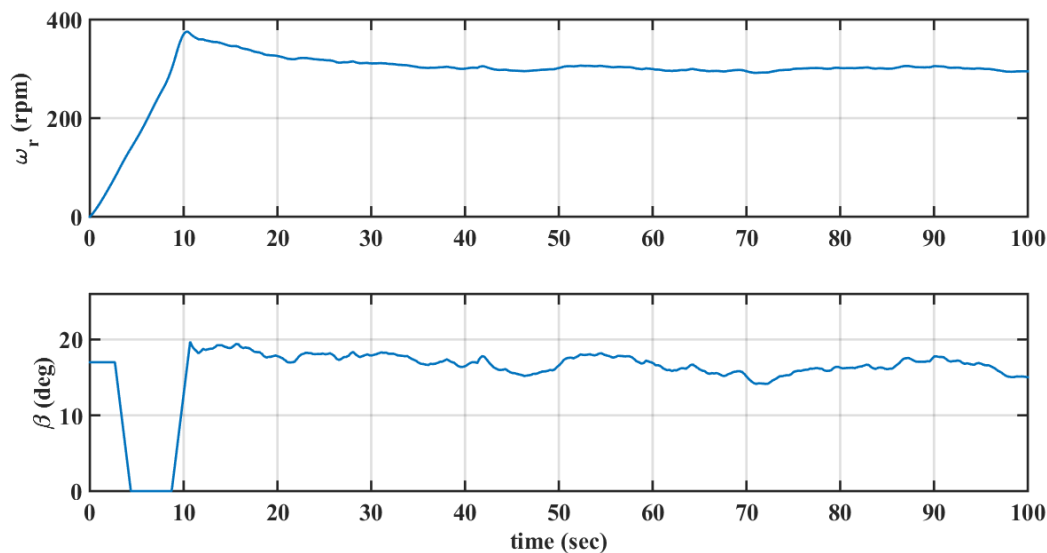


شکل ۳-۱: ساختار کنترل کننده تناسبی-انتگرالی.

ابتدا بهره انتگرال گیر را صفر قرار داده سپس بهره تناسبی افزایش داده می شود تا سیگنال زاویه گام نوسانی گردد در نهایت نصف این مقدار را برای K_p در نظر گرفته می شود. در ادامه مقدار بهره انتگرال گیر را افزایش داده تا زاویه گام نوسانی شود سپس یک سوم این مقدار را برای K_i در نظر گرفته می شود. برای انتگرال گیر نیز یک بلوک ضد اشباع طراحی می شود.



شکل ۳-۲: سرعت باد و توان خروجی توربین بادی.



شکل ۳-۳: سرعت زاویه‌ای روتور و زاویه گام اعمالی به توربین بادی.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی نشان داده‌شده در شکل ۳-۲ و ۳-۳ این کنترل‌کننده می‌تواند سرعت روتور را در مقدار نامی تنظیم کند ولی بلازدگی شدید در پاسخ گذرا وجود دارد که برای سیستم مضر است و موجب اختلال و خاموش شدن توربین می‌شود. در این روش زمانی که سرعت روتور به سرعت مرجع (نامی) می‌رسد، زاویه گام با حداکثر نرخ افزایش پیدا می‌کند ولی بازهم قیدهای سیستم (سرعت روتور نباید از ۳۵۰ متر بر ثانیه بیشتر شود) رعایت نمی‌شود.

برای رفع این مشکل باید زاویه گام سریع‌تر در ناحیه $\frac{2}{5}$ (ناحیه‌ای که سرعت رتور ۸۰-۱۰۰ درصد سرعت نامی‌اش است) اعمال شود تا قیود و پایداری سیستم حفظ شوند. تسریع در اعمال زاویه گام باعث اتلاف توان

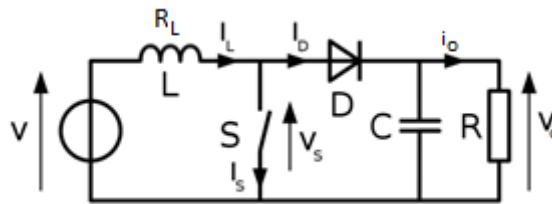
می‌شود زیرا با چرخش پره‌ها قبل از سرعت نامی حداکثر انرژی جذب نمی‌شود. در نتیجه باید تا حد امکان توان از دست نداد و بدین منظور کنترل کننده فازی و پیش‌بین پیشنهاد داده می‌شود.

۳-۳- طراحی کنترل کننده فازی

۳-۳-۱ کنترل کننده فازی برای مبدل افزایشنده

مبدل‌های DC-DC یک ارتباط پایدار بین سیستم با پیل‌های سوختی و بار مصرفی بدون در نظر گرفتن نقطه تعیین‌شده توسط بار ایجاد می‌کنند. برای این منظور ساختارهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در شکل‌های باک، بوست، باک-بوست در نسبت‌های تبدیل ولتاژ مختلف عمل می‌کنند. مبدل‌های بوست برای تولید ولتاژ خروجی بالاتر در مقایسه با ولتاژ DC ورودی و همچنین به عنوان مبدل در منابع باطری، سیستم‌های انرژی خورشیدی فتوولتائیک و پیل‌های سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۰]. تمامی مبدل‌های مذکور هنگامی که تحت شرایط حلقه باز عمل می‌کنند، دارای عملکرد تنظیم ولتاژ ضعیفی هستند و پاسخ دینامیکی رضایت‌بخشی از خود نشان نمی‌دهند. از این رو این نوع مبدل‌ها به طور معمول به صورت کنترل حلقه بسته برای رسیدن به ولتاژ خروجی مطلوب طراحی می‌شوند. بسیاری از استراتژی‌های کنترلی برای رسیدن به سیگنال خروجی مطلوب بر اساس زمان خاموش و روشن سوئیچ (سیکل وظیفه) عمل می‌کنند [۳۱].

شکل ۳-۴ مدل مداری مبدل DC/DC افزایشنده را نشان می‌دهد [۳۲].



شکل ۳-۴: مدار معادل مبدل DC/DC افزایشنده.

معادلات دینامیکی سیستم به شکل زیر است [۱۲]:

$$\dot{i}_L = -\frac{R_L}{L}i_L - \left(\frac{1-u}{L}\right)v_c + \frac{v}{L} \quad (۱-۳)$$

$$\dot{v}_c = \left(\frac{1-u}{C} \right) i_L - \frac{i_o}{C} \quad (۲-۳)$$

$$y = v_c \quad (۳-۳)$$

که در آن i_L جریان سلف v_c ولتاژ بار خروجی، i_o جریان بار خروجی، v ولتاژ ورودی، R_L مقاومت سلف، L اندوکتانس سلف و u سیکل وظیفه سوئیچ قدرت می باشد. نقاط کار مبدل DC-DC به صورت V_{CO} مقدار ولتاژ خروجی، I_{LO} جریان متوسط سلف و U مقدار متوسط سیکل وظیفه می باشد.

$$\tilde{i}_L = i_L - I_{LO} \quad (۴-۳)$$

$$\tilde{v}_c = v_c - V_{CO} \quad (۵-۳)$$

$$\tilde{u} = u - U \quad (۶-۳)$$

با جایگذاری معادلات (۱-۳) تا (۳-۳) در معادلات (۴-۳) تا (۶-۳)، معادلات زیر حاصل می شود.

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}}_L \\ \dot{\tilde{v}}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{U-1}{L} \\ -\frac{U-1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_L \\ \tilde{v}_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{CO}}{L} \\ -\frac{I_{LO}}{C} \end{bmatrix} \tilde{u} + \begin{bmatrix} \frac{\tilde{u} \tilde{V}_c}{L} \\ -\frac{\tilde{u} \tilde{i}_L}{C} \end{bmatrix} \quad (۷-۳)$$

$$\tilde{y} = \tilde{v}_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_L \\ \tilde{v}_c \end{bmatrix} \quad (۸-۳)$$

نقطه تعادل سیستم دینامیکی برابر است با:

$$\tilde{i}_L = 0, \tilde{v}_o = 0 \quad (۹-۳)$$

هدف از طراحی کنترل کننده برای سیستم آن است که با تنظیم $\tilde{u}$ بخش تغییرات جریان سلف، ولتاژ خازن با سرعت مطلوب به صفر میل کند. به عبارت دیگر، ولتاژ خروجی به مقدار مطلوب با بارهای مختلف برسد. با خطی سازی سیستم حول نقطه تعادل روابط زیر به دست می آید:

$$\dot{x} = Ax + B\tilde{u}$$

$$y = Ex$$

$$x = \begin{bmatrix} \tilde{i}_L \\ \tilde{v}_O \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{U-1}{L} \\ -\frac{U-1}{C} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{V_{CO}}{L} \\ -\frac{I_{LO}}{C} \end{bmatrix}$$

$$E = [0 \quad 1]$$

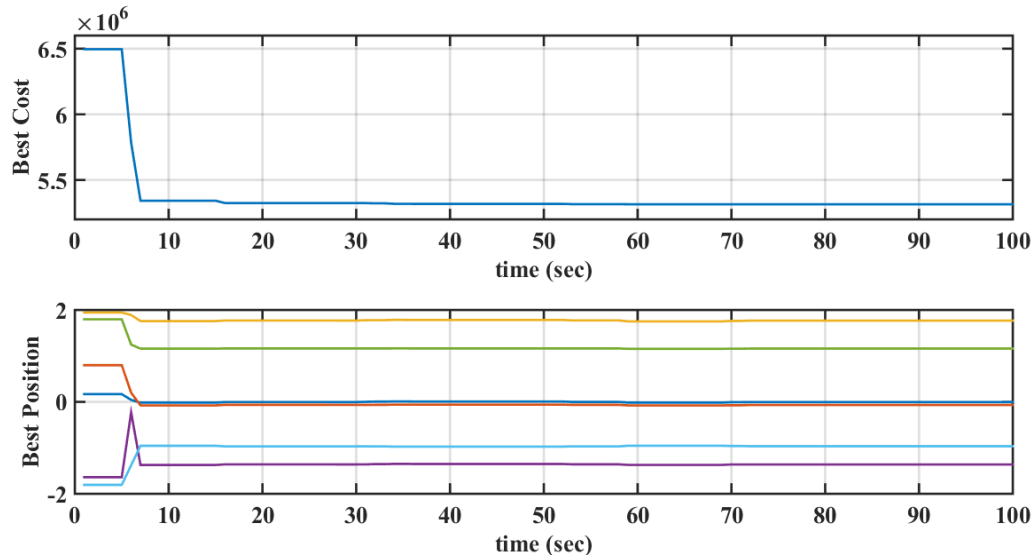
برای کنترل مبدل از سیستم های فازی با موتور استنتاج ضرب ممدانی، فازی ساز منفرد و غیر فازی ساز میانگین مراکز که رابطه غیر خطی ریاضی آن به صورت زیر می باشد، استفاده می شود [۳۳].

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right)} \quad (۱۰-۳)$$

که $x \in U \subset R^n$ ورودی سیستم فازی و $f(x) \in V \subset R$ خروجی سیستم فازی می باشد و M تعداد قوانین و n تعداد ورودی ها است.

به منظور پیدا کردن پارامترهای توابع تعلق و همچنین مراکز خروجی بهینه از الگوریتم اجتماع ذرات که از جمله الگوریتم های بهینه سازی می باشد استفاده می شود. به طوری که کنترل کننده فازی به وسیله این الگوریتم و با شبیه سازی های متعدد تابع هزینه الگوریتم انجام می دهد، طراحی می شود. ورودی های کنترل کننده فازی ولتاژ و جریان مبدل و همچنین مشتقات آن ها است. هر ورودی چهار تابع عضویت که به

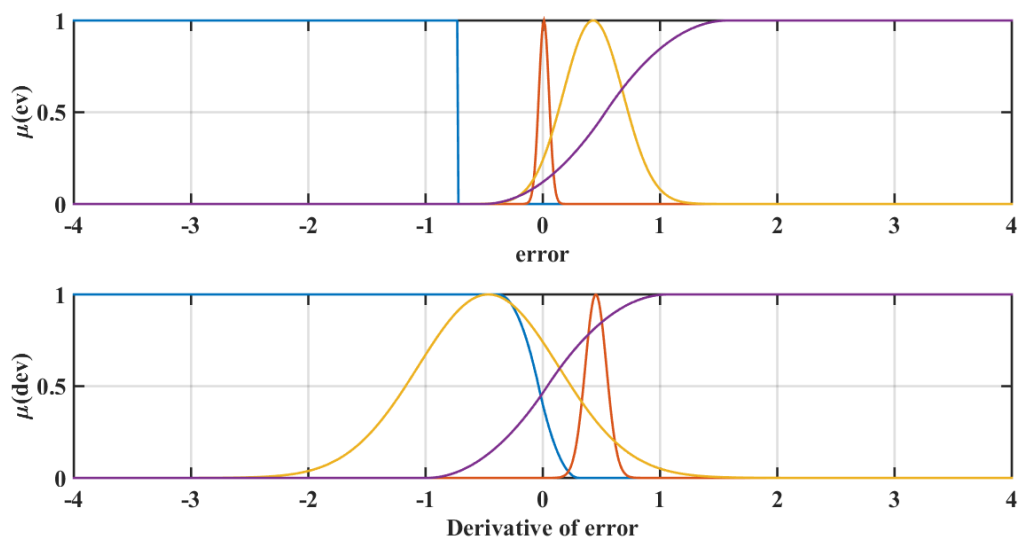
ترتیب zmf، دو تابع گوسین و در آخر هم smf می‌باشند، دارد و درکل کنترل کننده ۲۵۶ قانون را دارا می‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی پارامترهای توابع تعلق که درمجموع ۳۲ پارامتر و همچنین مراکز خروجی را که ۲۵۶ پارامتر می‌باشند را بهینه و تعیین می‌کند. نتایج حاصل از اجرای برنامه و کنترل کننده شبیه‌سازی شده در زیر آورده شده است.



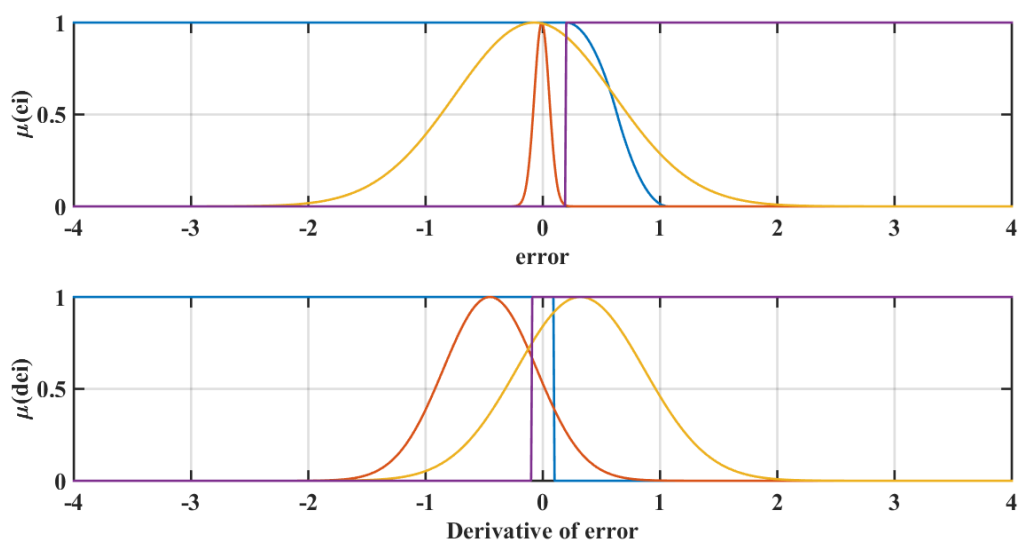
شکل ۳-۵: نمودار بهترین هزینه و بهترین پارامترها.

همان‌طور که در شکل ۳-۵ نشان داده شده است بعد از چندین بار تکرار پارامترها (به دلیل زیاد بودن پارامترها تنها تغییرات چند پارامتر در شکل آمده است) به مقدار ثابتی میل می‌کنند و تابع هزینه نیز نزولی است.

توابع عضویت کنترل کننده فازی بهینه شده در شکل‌های ۳-۶ و ۳-۷ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۶: توابع عضویت خطا و مشتق خطای ولتاژ مبدل.



شکل ۳-۷: توابع عضویت خطا و مشتق خطای جریان مبدل.

در این بخش نتایج به دست آمده از مرحله قبل را بر روی مدل میانگین شبیه سازی می کنیم، پارامترهای مبدل DC-DC را به صورت زیر در نظر می گیریم:

جدول ۱-۳- پارامترهای مبدل DC-DC.

V	VCO	U	IO	ILO	L	C	R
200v	400v	0.5	[40 80]A	[80 160]A	12mH	2500 μF	0.001 Ω

برای اجرای شبیه سازی بر اساس قضیه نایکوئیست فرکانس نمونه برداری باید حداقل دو برابر بزرگترین مؤلفه فرکانسی سیستم باشد [۳۴]، تابع تبدیل سیستم خطی شده حول نقطه تعادل به صورت رابطه زیر است:

$$G(s) = \frac{-32000s + 6.664 \times 10^6}{s^2 + 0.0833s + 8333}$$

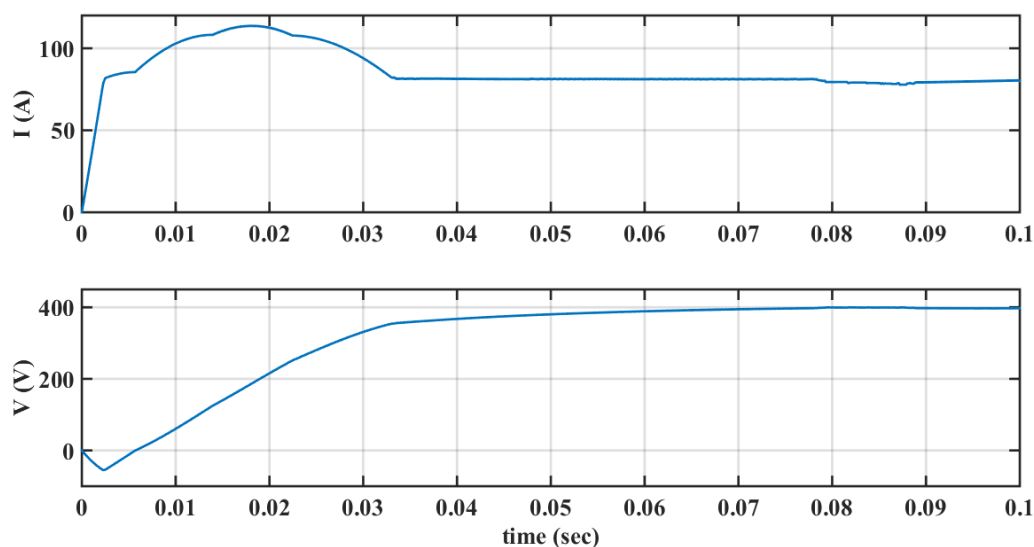
پهنای باند سیستم برابر با $\omega_{BW} = 151.2684 \frac{rad}{s}$ می باشد، در اینجا زمان نمونه برداری را برابر $T_{sample} = 0.0001sec$ در نظر گرفته می شود، بنابراین:

$$\frac{T_{BW}}{T_{sample}} = \frac{f_{sample}}{f_{BW}} = 415.3666$$

در نتیجه با انتخاب زمان نمونه برداری ۰.۰۰۰۱ ثانیه، قضیه نایکوئیست برقرار باقی می ماند. باید نشان داد که به ازای بارهای مختلف، ولتاژ بار ثابت می ماند. با توجه به داده های فوق ماتریس کنترل پذیری را تشکیل داده می شود.

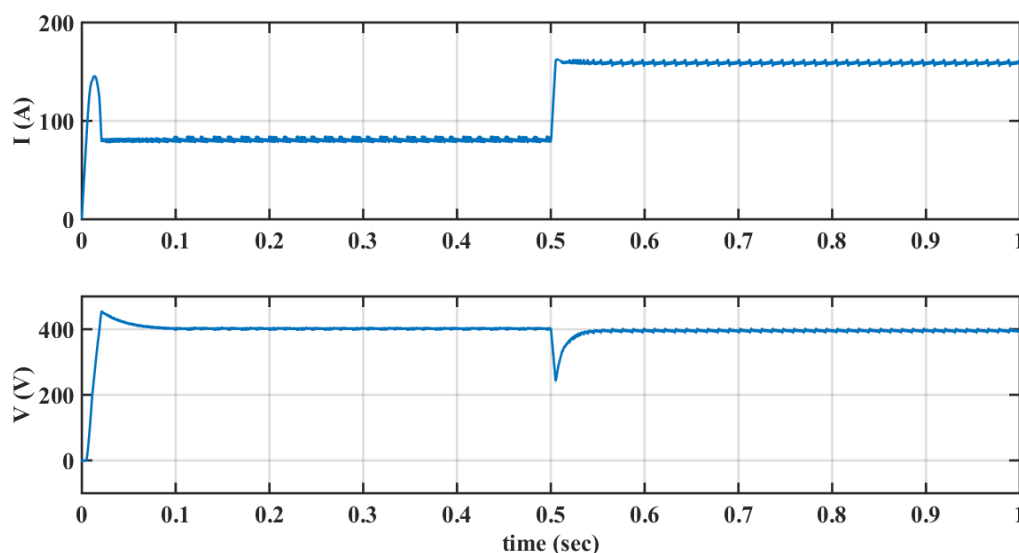
$$\Phi_c = [B \quad AB] = \begin{bmatrix} 33333.3 & 130555.5 \\ -32000 & 6666666.6 \end{bmatrix} \Rightarrow \det(\Phi_c) = 2.26 \times 10^{11}$$

دترمینان ماتریس کنترل پذیری نشان می دهد مدل میانگین کنترل پذیر کامل حالت است. ولتاژ خروجی مطلوب برابر 400v و جریان بار را 80A فرض می شود. شکل ۳-۸ عملکرد کنترل کننده مطلوب را روی مدل میانگین نشان می دهد.



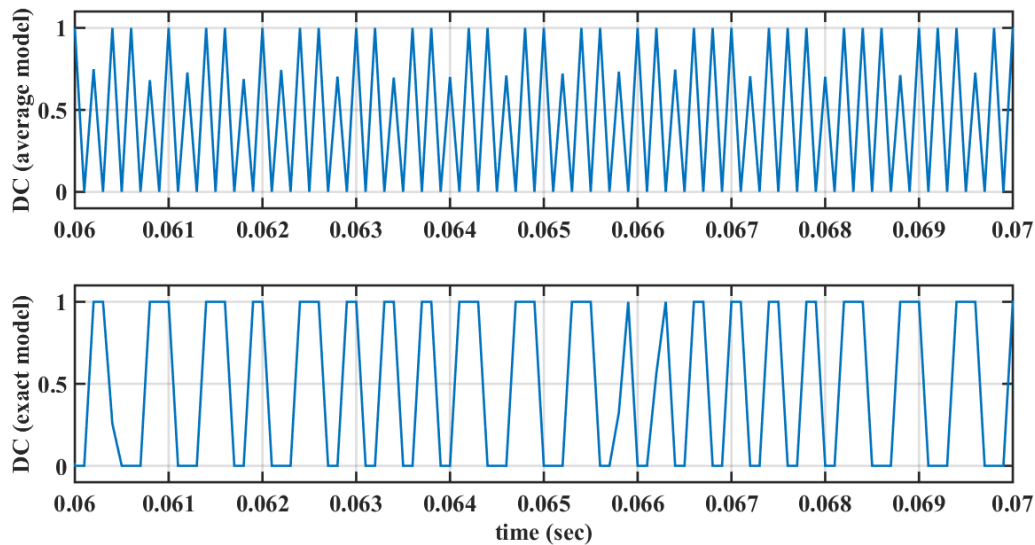
شکل ۳-۸: جریان و ولتاژ مبدل در مدل میانگین.

مشاهده می‌شود ولتاژ و جریان به مقدار مطلوب رسیده‌اند. اکنون کنترل کننده پیشنهادی را روی مدل دقیق با استفاده از سیمولینک اعمال می‌گردد. در شبیه‌سازی مدل دقیق، منبع تغذیه ورودی ایده آل فرض می‌شود. برای این منظور ولتاژ مطلوب خروجی را برابر 400V و جریان بار را ابتدا 80A در نظر گرفته سپس جهت بررسی اثر افزایش بار، جریان را به 160A افزایش داده می‌شود. شکل ۳-۹ عملکرد کنترل کننده مطلوب را روی مدل دقیق با منبع تغذیه ورودی ایده آل نشان می‌دهد.



شکل ۳-۹: جریان و ولتاژ مبدل در مدل دقیق.

با توجه به شکل ۳-۱۰ سیگنال کنترل همواره بین صفر و یک قرار دارد و فرکانس سوئیچ همواره کوچک‌تر از 10KHz است.

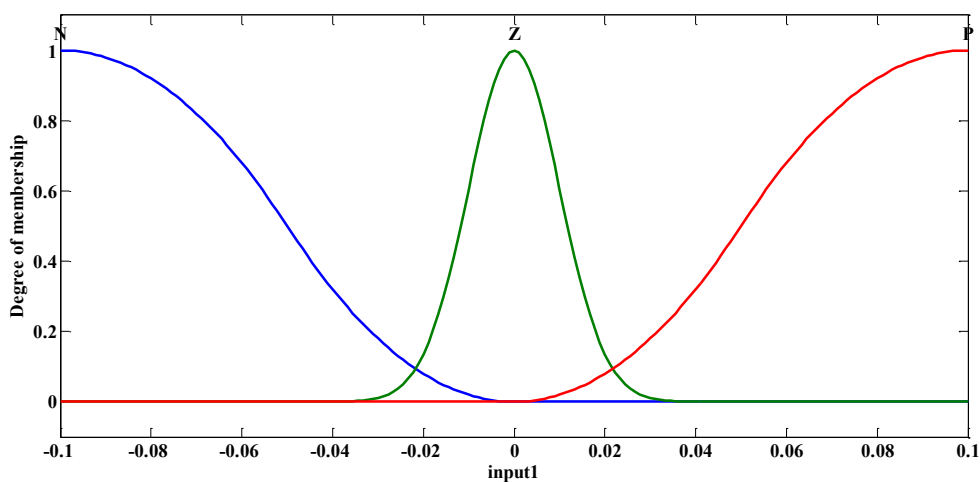


شکل ۳-۱۰: سیگنال کنترل (سیکل وظیفه) در مدل میانگین و دقیق.

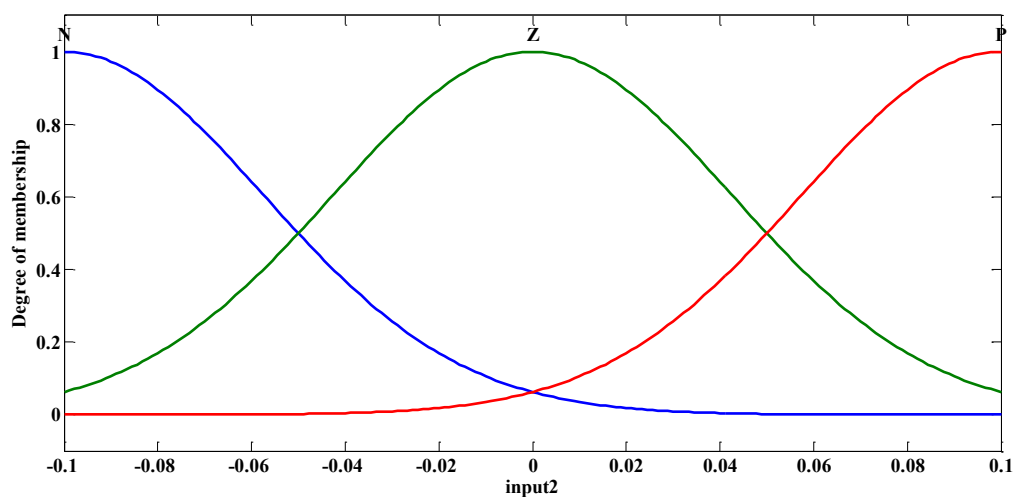
در این بخش کنترل کننده فازی بهینه شده با الگوریتم اجتماع ذرات، همراه با حداقل فرا جهش و فروجهش ولتاژ و جریان بار برای مبدل DC-DC افزایشده طراحی و پیاده سازی گردید. نتایج شبیه سازی بر روی مدل میانگین و مدل واقعی بررسی شد و با توجه به نتایج شبیه سازی کنترل کننده به خوبی ولتاژ و جریان بار را به مقدار مطلوب می رساند و در برابر اغتشاش مقاوم است.

۳-۳-۲ کنترل کننده فازی برای زاویه گام

کنترل کننده فازی پیشنهاد شده با توجه به عملکرد سیستم در ناحیه دو و نیم و همچنین ناحیه سه و به منظور بهینه کردن جواب از شبیه سازی های متعدد و بررسی و مقایسه نتایج به دست آمده، طراحی شده است. در زیر ساختار کنترل کننده و قوانین فازی بیان می شود. این کنترل کننده با استفاده از سیگنال سرعت زاویه ای روتور و تغییرات آن، زاویه گام را تنظیم می نماید.



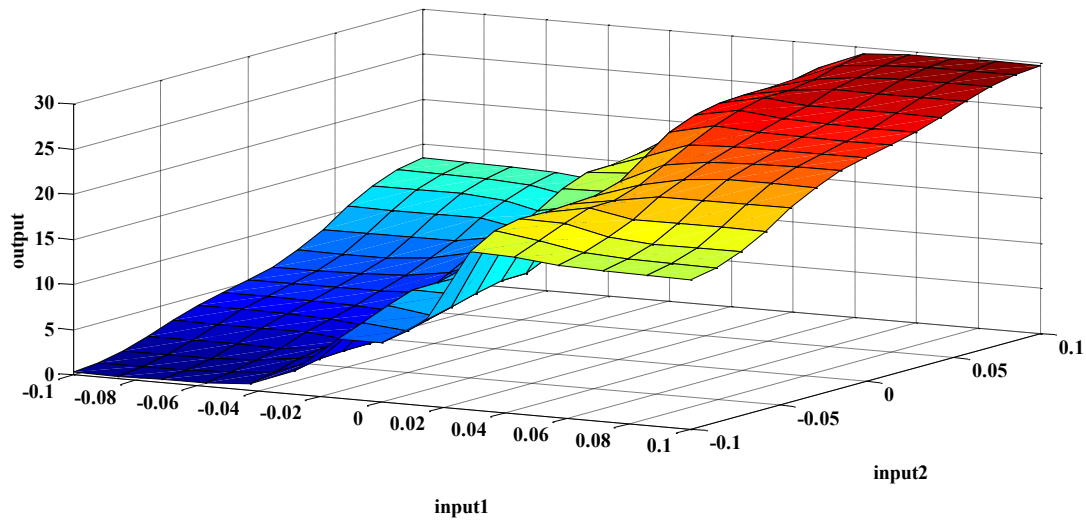
شکل ۳-۱۱: تابع عضویت مربوط به خطای سرعت ژنراتور.



شکل ۳-۱۲: تابع عضویت مربوط به تغییرات خطای سرعت ژنراتور.

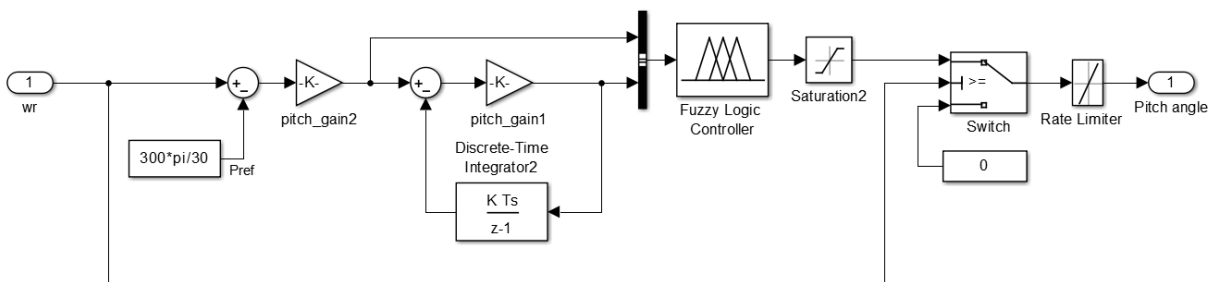
جدول ۳-۱- قواعد فازی.

e/De	N	Z	P
N	۰	۵	۱۴
Z	۶	۱۵	۲۲
P	۱۶	۲۵	۳۰



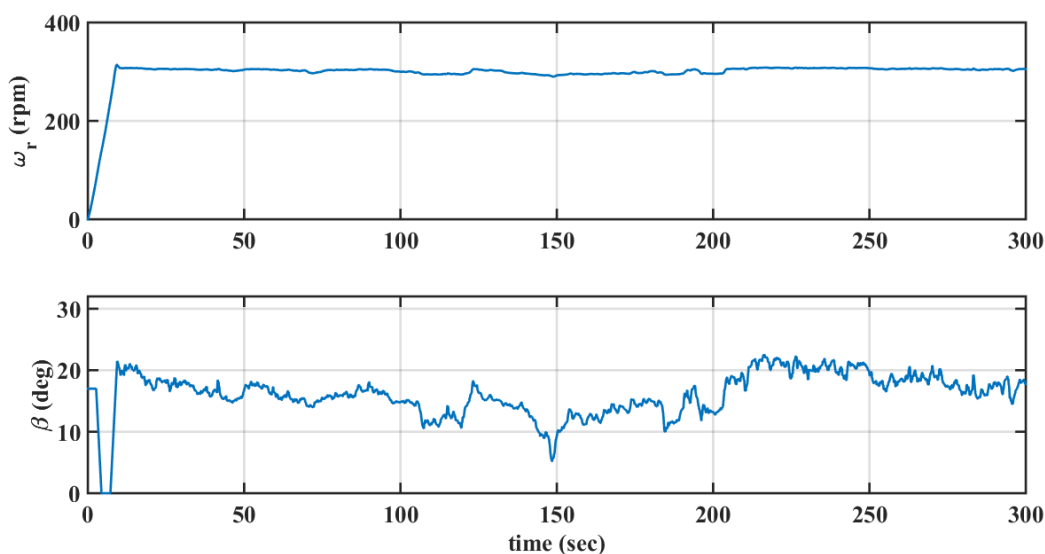
شکل ۳-۱۳: سطح کنترلی مربوط به سیستم فازی.

تمامی مقادیر تنظیم این کنترل کننده با استفاده از شبیه سازی های زیاد برای سرعت بادهای مختلف به دست آمده است. بلوک دیاگرام کنترل کننده در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۴: ساختار کنترل کننده فازی طراحی شده.

در این بخش سیستم با استفاده از کنترل کننده پیشنهاد شده و داده های واقعی سرعت باد، شبیه سازی انجام و نتایج آن ارائه می شود.



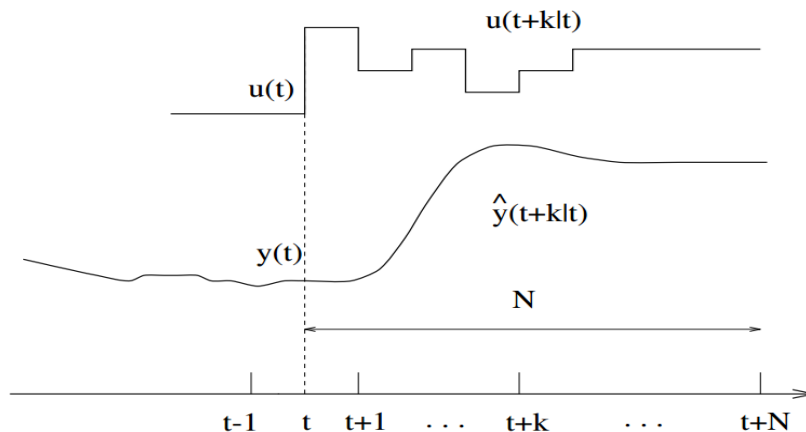
شکل ۳-۱۵: سرعت زاویه‌ای روتور و زاویه گام اعمالی به توربین بادی.

در این فصل ابتدا به شرح استراتژی کنترل و ارائه یک کنترل کننده کلاسیک به منظور تنظیم زاویه گام بیان شده و به دلیل ناکارآمدی این کنترل کننده برای رعایت قیود سیستم، برای رفع نواقص آن با توجه به عملکرد سیستم در نواحی مختلف کار و شبیه‌سازی‌های متعدد کنترل کننده فازی در نواحی دو و نیم و سه طراحی می‌گردد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی کاملاً مشخص است که کنترل کننده فازی توانسته سرعت زاویه‌ای را حول سرعت نامی نگه دارد و همچنین باعث حفظ پایداری و قیود سیستم گردد.

۳-۴- طراحی کنترل کننده پیش‌بین

۳-۴-۱ اصول کنترل پیش‌بین

روش کاری تمام کنترل کننده‌های متعلق به خانواده کنترل کننده‌های پیش‌بین مدل توسط استراتژی زیر بیان می‌شوند.



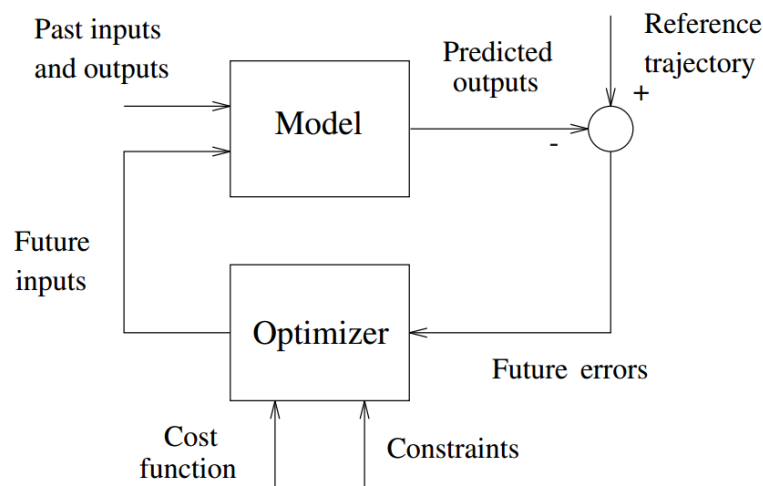
شکل ۳-۱۶: استراتژی کنترل پیش‌بین مدل.

خروجی‌ها برای یک افق مشخص N که افق پیش‌بین نامیده می‌شود، در هر لحظه t با استفاده از مدل پروسه پیش‌بینی می‌شود. این خروجی‌های پیش‌بینی شده $y(t+k|t)$ برای $k=1 \dots N$ بسته به مقادیر معلوم تا لحظه t (ورودی‌ها و خروجی‌های گذشته) و سیگنال‌های کنترل آینده $u(t+k|t), k=0 \dots N-1$ که باید به سیستم فرستاده و محاسبه شوند، بستگی دارد.

مجموعه سیگنال‌های کنترل آینده توسط بهینه‌سازی یک معیار مشخص برای نگه‌داشتن پروسه تا حد ممکن نزدیک مسیر مرجع $w(t+k)$ (که می‌تواند نقطه تنظیم یا نزدیک آن باشد)، محاسبه می‌شوند. این معیار معمولاً شکل یک تابع کوادراتیک خطا بین سیگنال خروجی پیش‌بینی شده و مسیر مرجع پیش‌بینی شده است.

سیگنال کنترل $u(t|t)$ به پروسه فرستاده می‌شود در حالی که سیگنال‌های کنترل بعدی محاسبه شده رد می‌شوند، زیرا در لحظه نمونه‌برداری بعدی $y(t+1)$ از قبل معلوم است و گام یک با این مقادیر جدید و همه دنباله‌های به‌روز شده، تکرار می‌شود؛ بنابراین $u(t+1|t+1)$ با استفاده از مفاهیم افق کاهشی محاسبه می‌شود [۳۵].

ساختار پایه برای پیاده‌سازی کنترل کننده MPC در شکل ۳-۱۷ داده شده است.



شکل ۳-۱۷: ساختار پایه کنترل پیش‌بین مدل.

در نتیجه به‌طور خلاصه می‌توان به مفاهیم زیر اشاره کرد.

پنجره افق متحرک: پنجره وابسته به زمان از یک زمان اولیه t_i تا $t_i + T_p$. طول پنجره T_p ثابت باقی می‌ماند. افق پیش‌بینی: تعیین می‌کند چقدر می‌خواهیم آینده پیش‌بینی شود. این پارامتر برابر طول پنجره افق متحرک T_p است.

کنترل افق کاهشی: اگرچه مسیر بهینه سیگنال کنترل آینده به‌طور کامل با پنجره افق متحرک توصیف می‌شود، ورودی کنترل حقیقی به سیستم تنها اولین نمونه از سیگنال کنترل است، درحالی‌که از بقیه مسیر صرف‌نظر می‌شود.

در روند طراحی نیاز به اطلاعات در زمان t_i برای پیش‌بینی آینده است. این اطلاعات با $x(k_i)$ نشان داده می‌شود که یک بردار شامل فاکتورهای مرتبط زیادی است و به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری یا تخمین زده می‌شود.

یک مدل داده‌شده که دینامیک‌های سیستم را توصیف می‌کند مهم‌ترین مسئله در کنترل پیش‌بین است. یک مدل دینامیکی خوب یک تخمین محکم و دقیق درباره‌ی آینده خواهد داد.

برای انتخاب بهترین تصمیم، یک معیار که بیانگر هدف باشد نیاز است. هدف به یک تابع خطا بر اساس اختلاف بین پاسخ مطلوب و حقیقی مرتبط است. تابع هدف معمولاً تابع هزینه J نامیده می‌شود و عمل کنترل بهینه با کمینه‌سازی این تابع هزینه در پنجره بهینه‌سازی به دست می‌آید [۳۶].

۳-۴-۲ طراحی کنترل کننده زاویه گام بر اساس مدل ماتریسی معادله تفاضلی^۱

پس از شناسایی سیستم (زاویه گام و سرعت باد به سرعت ژنراتور) می توانیم به طراحی کنترل کننده پیش بین بر اساس روش مدل ماتریسی معادله تفاضلی بپردازیم. ابتدا طراحی کنترل کننده پیش بین توضیح داده می شود سپس با استفاده از جدول بهره، کنترل کننده ای برای تمام ناحیه های کار طراحی می شود.

معادلات دیفرانسیل مدل سیستم حاصل از شناسایی به صورت معادله (۱۱-۳) هست، به طوری که y_k خروجی سرعت زاویه ای توربین در نمونه k ، u_k سیگنال کنترل ورودی (مرجع زاویه گام) و v_k را اغتشاش ورودی (سرعت باد) در نظر می گیریم [۳۷].

$$y_k + a_1 y_{k-1} + \dots + a_n y_{k-n} = b_0 + b_1 u_{k-1} + \dots + b_n u_{k-n} + c_1 v_{k-1} + \dots + c_n v_{k-n} \quad (11-3)$$

طوری که y_k مقدار خروجی در نمونه k ام و u_k سیگنال کنترل ورودی هستند. ورودی های افزایشی $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ در مدل گسسته داده شده در معادله بالا با تفریق از همان معادله برای $k-1$ معرفی خواهند شد.

$$A_1 y_f + A_2 y_p = B_1 \Delta u_p + B_2 \Delta u_f + C_1 v_p + C_2 v_f \quad (12-3)$$

به طوری که f برای خروجی-ورودی های آینده و p برای خروجی-ورودی های گذشته به کار می رود. چون A_1 معکوس پذیر است، به دست آوردن y_f امکان پذیر است و مدل پیش بین سیستم به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} y_f &= -A_1^{-1} A_2 y_p + A_1^{-1} B_1 \Delta u_p + A_1^{-1} B_2 \Delta u_f + A_1^{-1} C_1 v_p + A_1^{-1} C_2 v_f \\ &= A_p y_p + B_p \Delta u_p + B_f \Delta u_f + C_p v_p + C_f v_f \end{aligned} \quad (13-3)$$

با در نظر گرفتن مسئله ردیابی مسیر با مرجع $r(t+k)$ تابع بهینه سازی به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} J &= (r - y_f)^T Q (r - y_f) + \Delta u_f^T R \Delta u_f \\ &= (r - A_p y_p - B_p \Delta u_p - B_f \Delta u_f - C_p v_p - C_f v_f)^T Q \\ &\quad (r - A_p y_p - B_p \Delta u_p - B_f \Delta u_f - C_p v_p - C_f v_f) + \Delta u_f^T R \Delta u_f \end{aligned} \quad (14-3)$$

^۱ Difference equation matrix model (DEMM)

ماتریس Q نشان دهنده خطا در مسیر دنبال شده و R وزن تلاش سیگنال کنترل است و باید مثبت معین باشند. وقتی هیچ محدودیتی در نظر نگیریم یک جواب تحلیلی برای بهینه سازی داریم.

$$\Delta u_f = (B_f^T Q B_f + R)^{-1} B_f^T Q (r - A_p y_p - B_p \Delta u_p - C_p v_p - C_f v_f) \quad (۱۵-۳)$$

می توان عمل کنترل را به صورت زیر بیان نمود.

$$\Delta u_f = (B_f^T Q B_f + R)^{-1} B_f^T Q \varepsilon \quad (۱۶-۳)$$

به طوری که $\varepsilon = r - y_l$ و y_l پاسخ آزاد سیستم است، زمانی که $\Delta u_f = 0$

$$y_l = A_p y_p + B_p \Delta u_p + C_p v_p + C_f v_f \quad (۱۷-۳)$$

این پیش بینی می تواند با تغییرهای ممکن مدل به وسیله اضافه کردن یک بردار با افق پیش بین h ترم یکسان تصحیح شود.

$$y_{k \text{ measured}} - y_{k \text{ calculated}} \quad (۱۸-۳)$$

$$\tilde{y}_l = y_l + [y_{k \text{ measured}} - y_{k \text{ calculated}}]$$

و سپس

$$\varepsilon = r - \tilde{y}_l \quad (۱۹-۳)$$

در نتیجه الگوریتم کلی به صورت زیر به دست می آید.

۱- محاسبه ماتریس ها

$$A_p = -A_1^{-1} A_2$$

$$B_p = A_1^{-1} B_1$$

$$B_f = A_1^{-1} B_2$$

$$C_p = A_1^{-1} C_1$$

$$C_f = A_1^{-1} C_2$$

۲- انتخاب ماتریس های وزنی Q و R

۳- محاسبه M

$$M = (B_f^T Q B_f + R)^{-1} B_f^T Q$$

و انتخاب اولین سطر آن $m_1 = M(1,:)$ ۴- اندازه گیری $y_{k \text{ measured}}$ ۵- محاسبه $y_{k \text{ calculated}}$

۶- محاسبه

$$y_l = A_P y_P + B_P \Delta u_P + C_P v_P + C_f v_f$$

$$\tilde{y}_l = y_l + [y_{k \text{ measured}} - y_{k \text{ calculated}}]$$

۷- تعریف r

۸- محاسبه

$$\varepsilon = r - \tilde{y}_l$$

۹- محاسبه

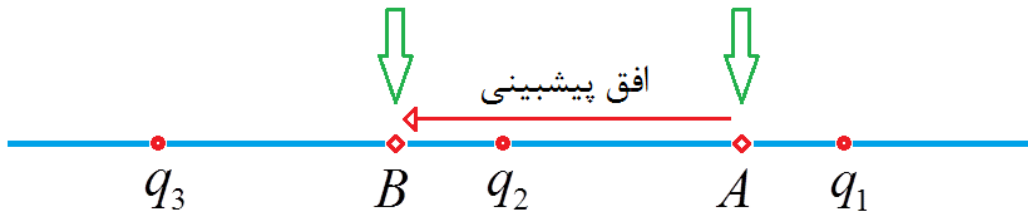
$$\Delta u_k = m_1 \varepsilon$$

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k$$

موارد ۱-۳ می توانند به صورت آفلاین اجرا شوند، درحالی که موارد ۴-۹ باید در هر بازه نمونه برداری اجرا شوند.

۳-۴-۳ جدول بندی بهره

مدل سیستم توربین بادی متناسب با سرعت باد (متغیر کمکی برای جدول بندی بهره) در نظر گرفته شده است. همان طور که در شکل ۳-۱۸ دیده می شود، اگر در نقطه A سرعت باد v_1 باشد از مدل سیستم q_1 برای پارامترهای کنترل پیش بین استفاده می شود و با توجه به اینکه افق پیش بینی می تواند در نقطه کاری دیگر (در اینجا نقطه B با سرعت باد v_2 و مدل سیستم q_2) باشد مدل سیستم استفاده شده برای پارامترهای کنترل پیش بین نیز تغییر می کند. برای اینکه گسستگی ایجاد نشود می توان نقاط کار را نزدیک به هم در نظر گرفت [۳۸].



شکل ۳-۱۸: افق پیش‌بینی.

معادله سیستم به صورت زیر فرض می‌شود:

$$y_k + \hat{a}_1 y_{k-1} + \hat{a}_2 y_{k-2} + \hat{a}_3 y_{k-3} + \hat{a}_4 y_{k-4} + \hat{a}_5 y_{k-5} = \quad (۲۰-۳)$$

$$b_1 \Delta u_{k-1} + b_2 \Delta u_{k-2} + b_3 \Delta u_{k-3} + b_4 \Delta u_{k-4} + c_1 v_{k-1} + c_2 v_{k-2} + c_3 v_{k-3} + c_4 v_{k-4}$$

همچنین فرض می‌شود افق پیش‌بینی ۴ باشد فرم ماتریسی معادله بالا به صورت زیر است:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hat{a}_1 & 1 & 0 & 0 \\ \hat{a}_2 & \hat{a}_1 & 1 & 0 \\ \hat{a}_3 & \hat{a}_2 & \hat{a}_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{k+1} \\ y_{k+2} \\ y_{k+3} \\ y_{k+4} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{a}_5 & \hat{a}_4 & \hat{a}_3 & \hat{a}_2 & \hat{a}_1 \\ 0 & \hat{a}_5 & \hat{a}_4 & \hat{a}_3 & \hat{a}_2 \\ 0 & 0 & \hat{a}_5 & \hat{a}_4 & \hat{a}_3 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{a}_5 & \hat{a}_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{k-4} \\ y_{k-3} \\ y_{k-2} \\ y_{k-1} \\ y_k \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} b_4 & b_3 & b_2 \\ 0 & b_4 & b_3 \\ 0 & 0 & b_4 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_{k-3} \\ \Delta u_{k-2} \\ \Delta u_{k-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 \\ b_2 & b_1 & 0 & 0 \\ b_3 & b_2 & b_1 & 0 \\ b_4 & b_3 & b_2 & b_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \Delta u_{k+3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_4 & c_3 & c_2 \\ 0 & c_4 & c_3 \\ 0 & 0 & c_4 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{k-3} \\ v_{k-2} \\ v_{k-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 & 0 & 0 & 0 \\ c_2 & c_1 & 0 & 0 \\ c_3 & c_2 & c_1 & 0 \\ c_4 & c_3 & c_2 & c_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_k \\ v_{k+1} \\ v_{k+2} \\ v_{k+3} \end{pmatrix}$$

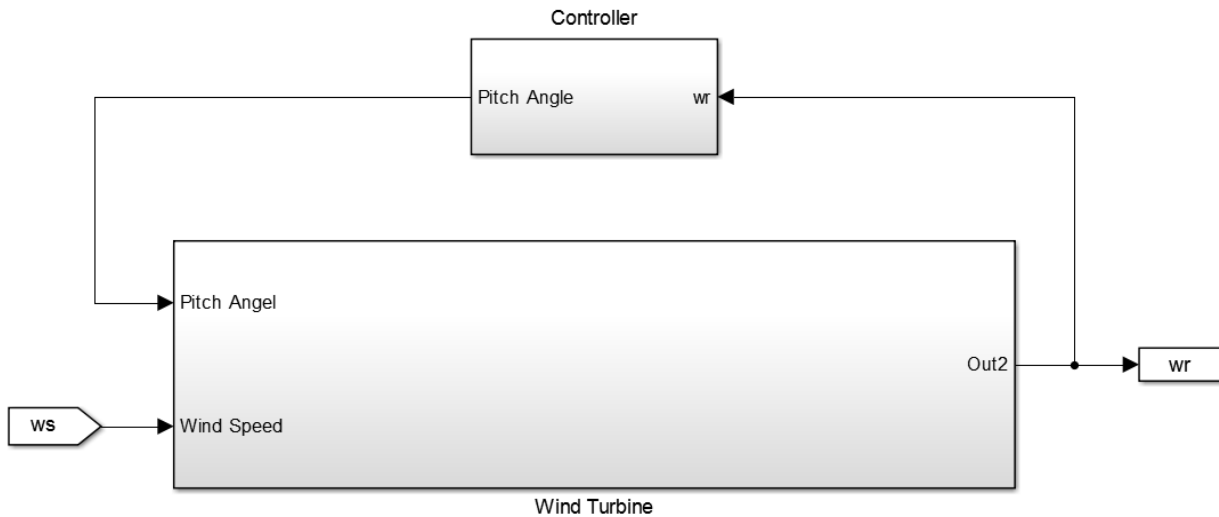
یا به طور خلاصه

$$\begin{pmatrix} a'_{11} & a'_{12} & a'_{13} & a'_{14} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{k+1} \\ y_{k+2} \\ y_{k+3} \\ y_{k+4} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a'_{21} & a'_{22} & a'_{23} & a'_{24} & a'_{25} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{k-4} \\ y_{k-3} \\ y_{k-2} \\ y_{k-1} \\ y_k \end{pmatrix} = \\
 \begin{pmatrix} b'_{11} & b'_{12} & b'_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_{k-3} \\ \Delta u_{k-2} \\ \Delta u_{k-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b'_{21} & b'_{22} & b'_{23} & b'_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \Delta u_{k+3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c'_{11} & c'_{12} & c'_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{k-3} \\ v_{k-2} \\ v_{k-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c'_{21} & c'_{22} & c'_{23} & c'_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_k \\ v_{k+1} \\ v_{k+2} \\ v_{k+3} \end{pmatrix}$$

هرکدام از $a'_{ij}, b'_{ij}, c'_{ij}$ مربوط به یک نمونه است و از پارامترهای مدل متناسب با آن نمونه استفاده می‌کند.

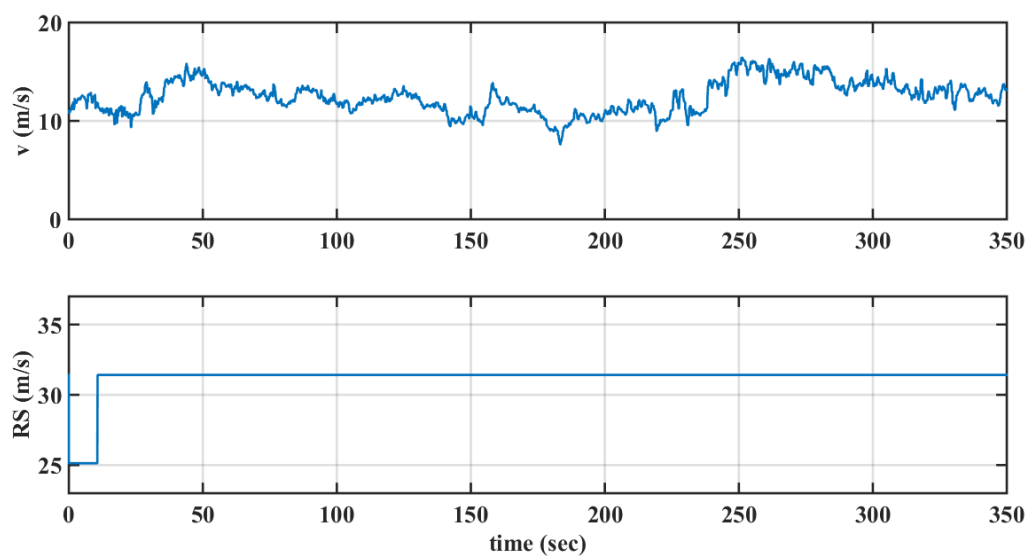
به‌طور مثال $a'_{12} = (0 \ 1 \ \hat{a}_1 \ \hat{a}_2)^T$ از پارامترهای نمونه $k+2$ استفاده می‌کند.

در زیر به پیاده‌سازی و شبیه‌سازی کنترل پیش‌بین جدول‌بندی بهره می‌پردازیم. بلوک دیاگرام کنترل حلقه بسته سیستم در شکل ۱۹-۳ نشان داده شده است.

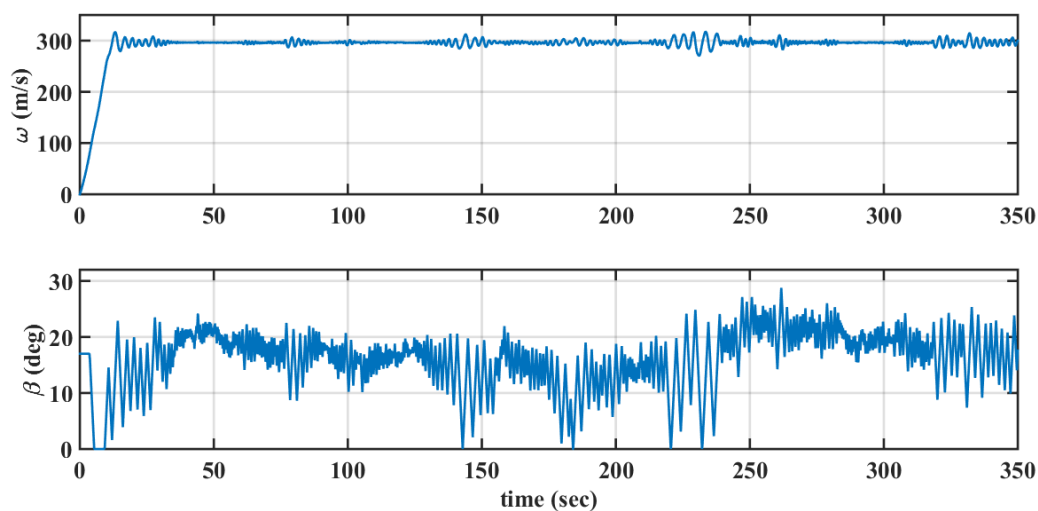


شکل ۱۹-۳: بلوک دیاگرام کنترل حلقه بسته.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم غیرخطی توربین بادی که در حلقه کنترل زاویه گام آن از کنترل پیش‌بین طراحی شده در مراحل بالا استفاده شده است در شکل‌های ۲۰-۳ و ۲۱-۳ آورده شده‌اند.



شکل ۳-۲۰: سرعت باد و سیگنال مرجع.



شکل ۳-۲۱: سرعت ژنراتور و زاویه گام.

با توجه به نتایج کنترل کننده توانسته در شرایط مختلف باد (مدل های سیستم متفاوت) عمل کنترل سرعت رتور را به خوبی انجام دهد و کارایی مناسبی را از خود نشان دهد. برخی از نوسانات ایجاد شده در خروجی و همچنین تلاش کنترلی به خاطر تفاوت مدل واقعی و مدل شناسایی شده در آن سرعت باد است.

فصل ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۴-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه ابتدا به معرفی و بررسی دینامیک‌های توربین بادی بر اساس مدل ساخته‌شده در پژوهشکده هوا خورشید دانشگاه فردوسی مشهد پرداخته شد. سپس محرک زاویه گام بر اساس داده‌های واقعی شناسایی و در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. در ادامه، شناسایی ضریب گشتاور رتور به سه روش مختلف انجام شد و مقایسه بین آنها صورت گرفت که شناسایی بر اساس مدل دقت بالاتری نسبت به دو روش دیگری داشت و کاربرد آن‌ها در طراحی کنترل‌کننده که با استفاده از فضای حالت است و پس‌از آن تخمین سرعت باد به‌وسیله روش I&I ارائه گردید. سپس با استفاده از روش شناسایی حلقه بسته مدل‌های مختلف سیستم در سرعت‌های باد بالاتر از سرعت نامی (ناحیه سه) را بر اساس داده‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های متعدد به دست آورده شد که به دلیل کند بودن رسیدن خروجی این مدل‌ها به خروجی واقعی دقت آن‌ها پایین می‌باشد.

در فصل سه طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی ارائه شد که قادر به حفظ قیود سیستم نبود بنابراین یک کنترل‌کننده فازی برای زاویه گام طراحی گردید که این مشکل را برطرف کرد. همچنین به ارائه مدل و طراحی کنترل‌کننده فازی برای مبدل افزایشنده پرداخته شد که این مبدل در اکثر سیستم‌های تبدیل انرژی باد به کار می‌رود. سپس مفاهیم کنترل پیش‌بین مطرح و یک الگوریتم برای پیاده‌سازی آن ارائه شد و برای تکمیل کنترل‌کننده و طراحی آن برای تمامی نقاط کاری (ناحیه سه) یک روش پیشنهادی از ادغام کنترل طراحی‌شده و جدول‌بندی بهره ارائه گردید و در آخر نیز با انجام شبیه‌سازی صحت کنترل‌کننده طراحی‌شده بررسی و نشان داده شد که کنترل‌کننده از کارایی خوبی برخوردار است.

۴-۲- پیشنهادها

با توجه به رشد روزافزون توربین‌های بادی و اهمیت سیستم‌های کنترلی در آن‌ها، هنوز می‌توان مسائلی را برای به چالش کشیدن این مبحث یافت. در این بخش مباحثی مطرح می‌گردد که به کارگیری آن‌ها منجر به دست‌یابی به نتایج مطلوب تری خواهد گردید.

۱- شناسایی دقیق‌تر مدل سرعت ژنراتور به زاویه گام و سرعت باد

۲- در نظر گرفتن محدودیت در ورودی و خروجی

۳- استفاده از نقاط کار بیشتر برای جدول‌بندی بهره

۴- شناسایی با استفاده از زاویه گام و سرعت ژنراتور و خطای آن

۵- بهبود تخمینگر سرعت باد

منبع‌ها

۱. محمدرضا اشرف خراسانی، مهدی زمانی، سعید اصغری، باقر فقیه ایمانی. (۱۳۸۸). "طراحی و ساخت سیستم پیل سوختی ۵ کیلووات". نشریه انرژی ایران.
۲. الفی علیرضا، حاجی زاده امین، قلی زاده حسین. (۱۳۹۱). "تحلیل پایداری و طراحی کنترل‌کننده فیدبک حالت در مبدل‌های DC-DC افزاینده بر پایه مدل میانگین و دقیق در سیستم‌های تولید توان پیل سوختی". نوزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی برق ایران.
۳. صالحه افشاریان، علی کریم پور. (۱۳۹۱). "مدل‌سازی و کنترل توان توربین‌های بادی سرعت متغیر با کنترلر پیش‌بین"، دهمین کنفرانس سالانه انرژی پاک.
۴. مصطفی سید موسوی، سید کمال حسینی ثانی. (۱۳۹۲). "طراحی سیستم زاویه گام در یک توربین بادی، پنجمین کنفرانس انرژی‌های تجدید پذیر"، پاک و کارآمد.
5. Natalia A. Orlando, Marco Liserre, Rosa Anna Mastromauro, Antonio Dell'Aquila. (2013) "A survey of control issues in PMSG-based small wind-turbine systems". IEEE.
6. M. Iribas-Latour, I-D. Landau. (2013). "Identification in closed-loop operation of models for collective pitch robust controller design". Wind Energy .
7. ENERCON GmbH. (2010). ENERCON Wind energy converters. www.enercon.de.
8. Yang Xiyun and Liu Xinran. (2010) "Integral variable structure fuzzy adaptive control for variable speed wind power system". International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM) , IEEE.
9. A. V. A. Macêdo, W. S. Mota. (2012). "Wind Turbine Pitch Angle Control Using Fuzzy Logic". IEEE.
10. O. M. Salim, M. A. Zohdy, H. Abdel-Aty-Zohdy, H. T. Dorrah and A.M. Kamel. (2011). "Type-2 Fuzzy Logic Pitch Controller for Wind Turbine Rotor Blades". IEEE.
11. J. A. Rossiter. (2003). "Model-Based Predictive Control: A Practical Approach". CRC Press.
12. L.C. Henriksen, M.H. Hansen and N.K. Poulsen. (2012). "Wind turbine control with constraint handling: a model predictive control approach". IET Control Theory and Applications.
13. M. Soliman, O.P. Malik and D.T. Westwick. (2010). "Multiple model MIMO predictive control for variable speed variable pitch wind turbines". In Proceedings of American Control Conference.
14. C.L. Bottasso, A. Croce and B. Savini. (2007). "Performance comparison of control schemes for variable-speed wind turbines". IOP Publishing, Journal of Physics.
15. L. C. Henriksen, M.H. Hansen and N. K. Poulsen. (2008). "High-Order Sliding Control for a Wind Energy Conversion System Based on a Permanent Magnet Synchronous Generator". IEEE Transactions on Energy Conversion.
16. J. Chen, J. Chen and C. Gong. (2014). "On Optimizing the Aerodynamic Load Acting On the Turbine Shaft of PMSG-Based Direct-Drive Wind Energy Conversion System". IEEE Transactions on Industrial Electronics.

17. Akie Uehara, Alok Pratap, Tomonori Goya, Tomonobu Senjyu, Atsushi Yona, Naomitsu Urasaki and Toshihisa Funabashi. (2011). " *A Coordinated Control Method to Smooth Wind Power Fluctuations of a PMSG-Based WECS*". IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION.
18. Zhan Xu, Zaiping Pan. (2011). " *Influence of Different Flexible Drive Train Models on the Transient Responses of DFIG Wind Turbine*". IEEE.
19. Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff. (2002). " *Analysis of Electric Machinery And Drive Systems*". John Wiley and Sons.
20. Daniel W. Hart. (2011). " *Power Electronics*. vol.1, McGraw-hill". New York.
21. A. Monroy, L. Alvarez-Icaza. (2006). " *Real-time identification of wind turbine rotor power coefficient*". Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control.
22. GumTae Son Hee-Jin Lee and Jung-Wook Park. (2009). " *Real-time Estimation of Wind Turbine Rotor Power Coefficient Using RMP Model*". IEEE.
23. L. Dodson, K. Busawon and M. Jovanovic. (2005). " *Estimation of the power coefficient in a wind conversion system*". 44th IEEE Conference on Decision and Control.
24. Dalibor Petković, Žarko Čojbašić, Vlastimir Nikolić. (2013). " *Adaptive neuro-fuzzy approach for wind turbine power coefficient estimation*". Renewable and Sustainable Energy Reviews 28, 191–195.
25. Mohsen Nourbakhsh Soltani, Torben Knudsen, Mikael Svenstrup, Rafael Wisniewski, Per Brath, Romeo Ortega, and Kathryn Johnson. (2013). " *Estimation of Rotor Effective Wind Speed: A Comparison*". IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 21, NO. 4.
26. Romeo Ortega, Fernando Mancilla-David and Fernando Jaramillo. (2013). " *A globally convergent wind speed estimator for wind turbine systems*". INTERNATIONAL JOURNAL OF ADAPTIVE CONTROL AND SIGNAL PROCESSING.
27. X. Liu, R. Ortega, H. Su, and J. Chu. (2009). " *Identification of nonlinearly parameterized nonlinear models: Application to mass balance systems*". in Proc. 48th IEEE Conf. Decision Control Held Jointly 28th Chin. Control Conf. pp. 4682–4685.
28. X. Liu, R. Ortega, H. Su, and J. Chu. (2010). " *Immersion and invariance adaptive control of nonlinearly parameterized nonlinear systems*". IEEE Trans. Autom. Control, vol. 55, no. 9, pp. 2209–2214.
29. M. Iribas-Latour, I-D. Landau. (2013). " *Identification in closed-loop operation of models for collective pitch robust controller design*". Wind Energy.
30. Toni, B. Zeljko, B. and Nedjeljko, P. (2013). " *Adaptive Control of Peak Current Mode Controlled Boost Converter Supplied by Fuel Cell*". Journal of Power Electronics, PP 122–138.
31. Seshagiri Rao, G. Raghu, S. and Rajasekaran, N. (2013). " *Design of Feedback Controller for Boost Converter Using Optimization Technique*". International Journal of Power Electronics and Drive Systems, PP 117–128.
32. Hajizadeh, A. Aliakbar Golkar, M. (2007). " *Intelligent Power Management Strategy of hybrid Distributed Generation System*". International Journal of Electrical Power and Energy Systems, PP 783–795.
33. Li-Xin Wang. (1996). " *A Course In Fuzzy Systems and Control*". 1st Edition.
34. Oppenheim, A. Willsky, A. S. and Hamid, S. (2008). " *Signals and Systems*". 1st Edition, Prentice-Hall signal processing series.
35. E.F. Camacho and C. Bordons. (2007). " *Model Predictive Control*". Springer.

36. Liuping Wang. (2009). "*Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*". Springer.
37. Agustín Jiménez Avello, Basil Mohammed Al-Hadithi , Marta Ines Gonzalez Garcia, Jose Maria Lopez Rubio. (2014). "*Difference equation matrix model (DEMM) for the control of wind turbines*". Wind Energy.

Abstract

Nowadays due to technology development, production of green energies has become vital. Therefore, the renewable energies are developing continuously. Wind energy is also a kind of such sources which is widespread and reachable at all times. One of the most important matters in this field is designing controllers for energy transformation systems. A new controller based on predictive controlling and gain scheduling is designed and simulated in this thesis. It is used to control the pitch angle of a wind turbine which works with the permanent magnet synchronous generator built in Sun Air Research Institute. In the present method the system is identified using wind data and nonlinear simulated model of the turbine designed by closed-loop identification method. Afterwards the generator's speed and consequently its overrated power is controlled using the designed controller. Simulation results show the good performance and resistance of the designed controller.

Keywords: wind turbine, predictive control, closed-loop identification, gain scheduling, pitch angle, fuzzy control, 2.5 region.



Shahrood University of Technology
Department of Electrical and Robotic Engineering

Title

Model Predictive Control of a Variable Speed Wind Turbine

Presented for Master of Science in Electrical Engineering

Written by

Abasali Gholami Hesar

Supervisor

Dr. H. Toossian Shandiz

Advisor

Dr.S.K. Hosseini Sani

February 2016