**دانشگاه صنعتی شیراز**

**دانشکده مهندسی برق و الکترونیک گروه کنترل**

**پایان‌نامه کارشناسی ارشد**

**در رشته مهندسی برق گرایش کنترل**

# ردیابی حداکثر توان تولیدی در توربین‌های بادی توسط کنترل‌کننده‌های هوشمند مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی

**نگارش:**

**ایمان موسوی**

**استاد راهنما:**

**دکتر علیرضا روستا**

**استاد مشاور:**

**دکتر طاهر نیکنام**

**آبان ۱۳۹۲**

بسم الله الرحمن الرحيم

**بسمه تعالی**

# ردیابی حداکثر توان تولیدی در توربین‌های بادی توسط کنترل‌کننده‌های هوشمند مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی

**پایان‌نامه ارائه‌شده به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی**

**نگارش:**

**ایمان موسوی**

**برای اخذ درجه کارشناسی ارشد**

**گروه کنترل دانشکده مهندسی برق و الکترونیک**
**دانشگاه صنعتی شیراز**

**ارزیابی پایان‌نامه توسط هیات داوران با درجه : بسیار خوب**

دکتر علیرضا روستا استادیار گروه کنترل (استاد راهنما )

دکتر طاهر نیکنام دانشیار گروه قدرت (استاد مشاور)

دکتر جعفر زارعی استادیار گروه کنترل (داور)

دکتر محسن گیتی زاده استادیار گروه قدرت (داور)

---

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

**حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.**

# تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

اینجانب ایمان موسوی  دانشجوی رشته مقطع تحصیلی به شماره دانشجویی ۹۰۱۱۴۰۵۳ تأیید می‌نماید کلیه نتایج این پایان‌نامه/رساله، بدون هیچگونه دخل و تصرف ، حاصل مستقیم پژوهش صورت گرفته توسط اینجانب است. در مورد اقتباس مستقیم و غیر مستقیم از سایر آثار علمی، اعم از کتاب، مقاله، پایان‌نامه با رعایت امانت و اخلاق علمی، مشخصات کامل منبع مذکور درج شده است.

در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص مقامات ذی‌صلاح دانشگاه صنعتی شیراز، مطابق قوانین و مقررات مربوط و آئین نامه‌های آموزشی، پژوهشی و انضباطی عمل خواهد شد و اینجانب حق هرگونه اعتراض و تجدیدنظر را، نسبت به رأی صادره، از خود ساقط می‌کند. همچنین، هرگونه مسئولیت ناشی از تخلف نسبت به صحت و اصالت نتایج مندرج در پایان‌نامه/رساله در برابر اشخاص ذی‌نفع (اعم از حقیقی و حقوقی) و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) متوجه اینجانب خواهد بود و دانشگاه صنعتی شیراز هیچ‌گونه مسئولیتی در این زمینه نخواهند داشت.

**تبصره ۱- کلیه حقوق مادی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شیراز است.**

**تبصره ۲- اینجانب تعهد می‌نماید بدون اخذ مجوز از دانشگاه صنعتی شیراز دستاوردهای این پایان‌نامه/ رساله را منتشر نکند و یا در اختیار دیگران قرار ندهد.**

نام و نام خانوادگی دانشجو: ایمان موسوی

تاریخ و امضاء

# مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج پایان‌نامه متعلق به دانشگاه و انتشار نتایج نیز تـابع مقرارت دانشگاهی است و با موافقت استاد راهنما به شرح زیر، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد: جناب آقای دکتر روستا

تاریخ:

امضا:

**تقدیم به: (اختیاری)**

خانواده‌ام که همیشه پشتیبان من بوده و هستند...

## تشکر و قدردانی:

اکنون که این رساله به پایان رسیده است برخود فرض می‌دانم که از استاد ارجمند

جناب آقای دکتر روستا و نیز جناب آقای دکتر نیکنام به خاطر تمام زحمات و راهنمایی‌های

این حقیر تشکر نمایم...

# چکیده

## ردیابی حداکثر توان تولیدی در توربین‌های بادی توسط کنترل‌کننده‌های هوشمند مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی

**نگارش:**
**ایمان موسوی**

به دلیل اهمیتی که انرژی‌های نو و به خصوص انرژی باد در آینده تـأمین انـرژی بشـریت دارد، به موضوع توربین بادی و راه به دست آوردن حداکثر تـوان از آن اختصـاص یافتـه اسـت. ابتدا با دو روش، شبکه عصبی که یک روش هوشمند و نیز بـا اسـتفاده از فیلتـر کـالمن کـه از دینامیک سیستم استفاده می‌کند، سرعت بـاد تخمـین و پـیش بینـی مـی‌شـود. سـپس یـک کنترل‌کننده فازی که پارامترهای داخلی آن با استفاده از الگـوریتم‌هـای تکـاملی بهینـه‌سـازی می‌شود، طراحی شده که وظیفه‌ی آن ردیابی حداکثر توان تولیدی اسـت. در حالـت کلـی اگـر بتوان حتی یک درصد توان تولیدی توربین را افزایش داد ، به دلیل هزینه‌های گـزاف تـوربین ، کاری سودمند انجام‌گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** توربین بادی، ردیـابی حـداکثر تـوان تولیـدی، فیلتـر کالمن،شـبکه عصـبی، کنترل‌کننده فازی

## فهرست مطالب


**۱. فصل اول : مقدمه** ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- انواع توربین‌های بادی ۳

۱-۳- نواحی کار ۴

۱-۳-۲- ناحیه اول ۴

۱-۳-۳- ناحیه دوم ۵

۱-۳-۴- ناحیه سوم ۶

۱-۴- شکل و چگونگی حرکت توربین بادی ۷

۱-۵- روش‌های دنبال کردن حداکثر توان تولیدی توربین بادی ۸

۱-۵-۱- کنترل نسبت سرعت تیغه ۸

۱-۵-۲- کنترل گشتاور بهینه ۹

۱-۵-۳- کنترل با فیدبک سیگنال قدرت ۱۰

۱-۵-۴- کنترل با اغتشاش و مشاهده ۱۱

**۲. فصل دوم: مروری بر تحقیقات انجام‌شده** ۱۴

۲-۱- مقدمه ۱۵

۲-۲- مروری بر ادبیات موضوع ۱۵

۲-۳- مقایسه‌ی روش‌های ردیابی حد اکثر توان ۱۶

**۳. فصل سوم: روش پیشنهادی برای حل مسئله** ۲۹

۳-۱- مقدمه ۳۰

۳-۲- بیان مسئله ۳۰

۳-۳- روش پیشنهادی برای حل مسئله ۳۲

۳-۳-۱- تخمین سرعت باد به کمک فیلتر کالمن ۳۲

۳-۳-۲- روش شبکه عصبی ۳۶

۳-۳-۳- ردیابی حداکثر توان تولیدی ۳۹

۳-۳-۴- کنترل‌کننده هوشمند بهینه‌شده با الگوریتم تکاملی ۴۱

**۴. فصل چهارم: نتایج شبیه‌سازی و تفسیر آن‌ها** ۴۸

۴-۱- مقدمه ۴۹

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی پیش بینی سرعت باد با شبکه‌ی عصبی..... ۴۹
۴-۳- نتایج تخمین سرعت باد با استفاده از فیلتر کالمن..... ۵۲
۴-۴- نتایج طراحی کنترل‌کننده‌ی فازی مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی برای ردیابی حداکثر توان تولیدی و مقایسه با دیگر روش‌ها..... ۵۷
۴-۴-۱- نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده فازی..... ۵۷
۴-۴-۲- نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده PI..... ۶۰
۴-۴-۳- نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده فازی بهینه‌شده با الگوریتم PSO..... ۶۱

**۵. فصل پنجم : جمع‌بندی و پیشنهادها** ۶۷

۵-۱- مقدمه..... ۶۸
۵-۱-۱- جمع‌بندی..... ۶۸
۵-۱-۲- پیشنهادها..... ۶۹

**مراجع** ۷۰

**پیوست‌ها** ۷۳

# فهرست شکل‌ها


شکل ۱-۱ وضعیت توان،سرعت چرخش روتور و ضریب توان نسبت به هم در سرعت‌های مختلف باد ..... ۳
شکل ۱-۲ وضعیت توان، سرعت چرخش روتور و ضریب توان نسبت به هم در سرعت‌های مختلف باد ..... ۴
شکل ۱-۳ اجزاء توربین بادی ..... ۷
شکل ۱-۴ وضعیت فشار هوا در اطراف پره توربین بادی ..... ۸
شکل ۱-۵ بلوک دیاگرام کنترل به وسیله TSR ..... ۹
شکل ۱-۶ نمودار گشتاور-سرعت برای سرعت‌های سری باد ..... ۱۰
شکل ۱-۷ بلوک دیاگرام کنترل‌کننده با استفاده از فیدبک سیگنال قدرت ..... ۱۱
شکل ۱-۸ نمودار مشخصه گشتاور و توان خروجی در پروسه MPPT ..... ۱۲
شکل ۱-۹ تأثیر طول گام در روش HCS ..... ۱۳
شکل ۲-۱ مدل توربین بادی ..... ۱۷
شکل ۲-۲ مشاهده گر توان آئرودینامیکی ..... ۱۸
شکل ۲-۳ بلوک دیاگرام سیستم کنترلی توربین بادی ..... ۱۹
شکل ۲-۴ کنترل‌کننده فازی استفاده‌شده برای MPPT ..... ۲۰
شکل ۲-۵ ساختار WRBFN ..... ۲۱
شکل ۲-۶ تخمین سرعت باد بر اساس روش GRBFN ..... ۲۲
شکل ۲-۷ بلوک دیاگرام روش GRBFN برای به دست آوردن بدون سنسور MPPT ..... ۲۲
شکل ۲-۸ تخمین سرعت باد بر اساس روش ANN ..... ۲۳
شکل ۲-۹ قانون کنترلی برای زاویه پره ..... ۲۴
شکل ۲-۱۰ سیستم کنترلی توربین بادی ..... ۲۵
شکل ۲-۱۱ نمودار کنترل بر اساس گشتاور آئرودینامیکی و تخمین سرعت باد ..... ۲۶
شکل ۲-۱۲ مدل RBFNN گوسی ردیابی حداکثر توان ..... ۲۸
شکل ۳-۱ عملکرد توربین بادی در سرعت‌های مختلف باد ..... ۳۱
شکل ۳-۲ یکی از توابع عضویت ورودی dw ..... ۴۴
شکل ۳-۳ یکی از توابع عضویت dP ایجادشده به وسیله الگوریتم تکاملی ..... ۴۵

شکل ۳-۴ یکی از توابع عضویت خروجی*dw..... ۴۵
شکل ۳-۵ دو ورودی و یک خروجی کنترل‌کننده فازی بهینه‌شده و عملکرد نسبت به یکدیگر. ۴۵
شکل ۴-۱ تخمین باد در ۱۰ ساعت آینده..... ۵۰
شکل ۴-۲ تخمین باد برای ۳۰ ساعت..... ۵۱
شکل ۴-۳ تخمین سرعت باد برای ۷۵ ساعت و اطلاعات آموزش ۱۰۰..... ۵۱
شکل ۴-۴ دینامیک توربین بادی و پارامترهای داخلی..... ۵۲
شکل ۴-۵ گشتاور آئرودینامیکی تخمینی با فیلتر کالمن..... ۵۳
شکل ۴-۶ نمای نزدیک شده از ردیابی گشتاور آئرودینامیکی..... ۵۳
شکل ۴-۷ تخمین سرعت چرخش روتور به وسیله‌ی فیلتر کالمن..... ۵۴
شکل ۴-۸ نمای نزدیک شده از ردیابی سرعت چرخش روتور به وسیله فیلتر کالمن..... ۵۴
شکل ۴-۹ تخمین سرعت باد به وسیله فیلتر کالمن..... ۵۶
شکل ۴-۱۰ توابع عضویت و قوانین استفاده‌شده در کنترل‌کننده فازی..... ۵۷
شکل ۴-۱۱ سرعت باد مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها..... ۵۸
شکل ۴-۱۲ مقدار $\lambda$ به دست آمده برای کنترل‌کننده فازی..... ۵۸
شکل ۴-۱۳ ضریب توان Cp به دست آمده برای کنترل‌کننده فازی..... ۵۹
شکل ۴-۱۴ توان تولیدی با استفاده از کنترل‌کننده فازی..... ۵۹
شکل ۴-۱۵ ضریب توان به دست آمده در شبیه‌سازی به روش استفاده از کنترل‌کننده PI..... ۶۰
شکل ۴-۱۶ مقدار $\lambda$ به دست آمده در روش کنترل‌کننده PI..... ۶۰
شکل ۴-۱۷ توان به دست آمده به روش کنترل‌کننده PI..... ۶۱
شکل ۴-۱۸ تابع عضویت بهینه مربوط به ورودی اول dw..... ۶۲
شکل ۴-۱۹ تابع عضویت بهینه مربوط به ورودی دوم dP..... ۶۲
شکل ۴-۲۰ تابع عضویت بهینه خروجی *dw..... ۶۲
شکل ۴-۲۱ مقدار $\lambda$ به دست آمده حاصل از شبیه‌سازی به روش کنترل‌کننده فازی بهینه‌سازی شده..... ۶۳
شکل ۴-۲۲ مقدار Cp دست آمده حاصل از شبیه‌سازی به روش کنترل‌کننده فازی بهینه‌سازی شده ..... ۶۴
شکل ۴-۲۳ توان به دست آمده حاصل از شبیه‌سازی به روش کنترل‌کننده فازی بهینه‌سازی شده۶۴
شکل ۴-۲۴ مقایسه توان‌های به دست آمده از روش‌های شبیه‌سازی شده..... ۶۵

شکل ۴-۲۵ مقایسه توان‌های به دست آمده در مقیاس دقیق تر.....۶۵

# فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱ روش اصلی در ردیابی حداکثر توان تولیدی..... ۱۶
جدول ۲-۲ مقایسه عملکرد روش‌های بررسی‌شده..... ۱۶
جدول ۴-۱ مقایسه عملکرد روش‌های بررسی‌شده با روش پیشنهادی..... ۶۶

# فهرست نشانه‌های اختصاری

| | |
|---|---|
| زمان | $t$ |
| زمان گسسته | $k$ |
| توان مکانیکی | $P_m$ |
| گشتاور آئرودینامیکی | $T_a$ |
| سرعت چرخش روتور | $\omega_r$ |
| سرعت چرخش روتور بهینه | $\omega_{opt}$ |
| نسبت سرعت تیغه | $\lambda$ |
| سرعت باد | $V$ |
| تخمین سرعت باد | $\hat{V}$ |
| شعاع چرخش | $R$ |
| دانسیته هوا | $\rho$ |
| عدد پی | $\pi$ |
| ضریب توان | $C_p(\lambda)$ |
| ضریب توان بهینه | $C_p^*(\lambda)$ |
| نسبت گیر بکس | $n_g$ |
| اینرسی روتور | $J_r$ |
| اینرسی ژنراتور | $J_g$ |
| سرعت چرخش ژنراتور | $\omega_g$ |
| توان آئرودینامیکی | $P_a$ |
| ضریب گشتاور | $C_q(\lambda)$ |

| | |
|---|---|
| گشتاور شفت سرعت بالا | $T_{hs}$ |
| گشتاور شفت سرعت پایین | $T_{ls}$ |
| زاویه‌ی انحراف روتور | $\theta_r$ |
| زاویه انحراف ژنراتور | $\theta_g$ |
| میرایی خروجی روتور | $B_r$ |
| میرایی خروجی ژنراتور | $B_g$ |
| زاویه پره | $\beta$ |
| گشتاور الکترومغناطیسی | $T_{em}$ |
| نویز سفید | $\zeta$ |
| نویز فرآیند | $w$ |
| تخمین سرعت چرخش روتور | $\hat{\omega}_r$ |
| تخمین گشتاور آئرودینامیکی | $\hat{T}_a$ |
| توان مکانیکی بهینه | $P^*_m$ |

# فهرست کلمات اختصاری

| | |
|---|---|
| ANN | Artificial Neural Network |
| ANFIS | Adaptative Neuro Fuzzy Inference System |
| DFIG | Doubly-Fed Induction Generator |
| FLC | Fuzzy Logic Control |
| GRBFN | Gaussian radial basis function network |
| HAWT | Horizontal-Axis Wind Turbines |
| KF | Kalman Filter |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking |
| OTC | Optimal Torque Characteristics |
| PMSG | Permanent Magnet Synchronous Generator |
| PSF | Power Signal Feedback |
| P&O | Perturbation and Observation |
| PI | Proportional Integrator |
| PSF | Power Signal Feedback |
| PSO | Particle Swarm Optimization |
| TSR | Tip-Speed-Ratio |
| VSFP | Variable-Speed Fixed-Pitch |
| WT | Wind turbine |
| WRBFN | Wilcoxon Radial Basis Function Network |
| WRBFN | Wilcoxon Radial Basis Function Network |

# فصل اول: مقدمه

## ۱-۱-مقدمه

سیستم های تبدیل انرژی باد، انرژی جنبشی باد را به وسیله پره‌های چرخان به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. این انرژی سپس به وسیله ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. سیستمی که این فرآیند تبدیل انرژی را انجام می‌دهد از قسمت‌های مختلفی تشکیل‌شده است.

هدف این است که توان خروجی توربین بادی را با کنترل توان و یا کنترل سرعت ژنراتور تنظیم شود. روش‌های کنترلی برای به دست آوردن حداکثر توان خروجی در سرعت‌های مختلف باد ضروری است. هم چنین باید این نکته را در نظر گرفت که نقاط کاری را انتخاب شود که ادوات مکانیکی در مقابل وزش شدید باد و اینرسی حاصل از آن محافظت شوند.

به علت تغییرات سریع و آنی در ذات و طبیعت باد، یک نقطه بهینه را که در آن حداکثر توان تولید می‌شود ، در نظر می‌گیریم، بنابراین استفاده از کنترل‌کننده ای که در آن نقطه، سرعت باد حداکثر توان تولیدی را دنبال کند ، ضروری است. الگوریتم‌های موجود در ردیابی حداکثر توان تولیدی شامل روش‌هایی است که عمدتاً در آن‌ها سرعت باد اندازه‌گیری نمی‌شود و در این حالت روش هایی استفاده می‌شود که در آن نقطه ماکزیمم تعیین گردد.

برای مقایسه الگوریتم‌هایی که در به دست آوردن حداکثر توان تولیدی استفاده می‌شود به این صورت عمل می‌شود که عملکرد این الگوریتم‌ها را در پاسخ به سرعت‌های مختلف باد و توانایی آن‌ها در رسیدن به حداکثر توان حاصله از باد را مد نظر باید قرار داد. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به روش‌های کنترل بهینه گشتاور[1] (OTC) و روش آشفتگی و مشاهده[2] (P&O) نام برد که روش کنترل گشتاور به سبب سادگی از بقیه روش‌ها بهترین جواب برای روش[3](MPPT) است. از طرف دیگر روش آشفتگی و مشاهده یک روش انعطاف‌پذیر است که در پیاده‌سازی نیز ساده است اما نسبت به روش کنترل گشتاور کارایی کمتری دارد و چون یک روش کور محسوب می‌شود در تعریف طول گام بهینه با مشکلاتی روبرو ست.

[1] Optimal Torque Control

[2] Distrubation & Observation

[3] Maximum Power Point Tracking