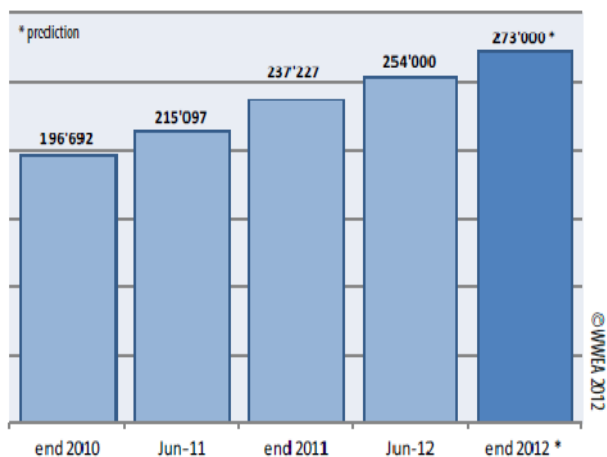


کنترل تطبیقی زاویه گام توربین بادی با استفاده از مکانیسم یادگیری عاطفی مغز انسان

مهدی حیات داودی، محسن فرشاد، حمیدرضا نجفی، رضا صداقتی و محمود جورابیان



شکل ۱: روند تولید برق بادی در جهان [۴].

عوامل غیر خطی و نامعینی هستند، قاعداً استفاده از کنترل کننده ساده PI پاسخ مطلوبی را به دنبال نخواهد داشت. این موضوع از این واقعیت ناشی می‌شود که پارامترهای سیستم کنترل با تغییر سرعت باد (و لذا تغییر نقطه کار سیستم) و یا پارامترهای سیستم، نیاز به تنظیم دوباره دارند.

رفع نقیصه فوق به دو طریق ممکن است: استفاده از روش‌های کنترلی غیر خطی کلاسیک (تطبیقی/مقاوم) و یا کاربرد روش‌های کنترلی هوشمند. در [۵] تا [۷] از روش کنترلی کلاسیک مد لغزشی (که از جمله قدیمی‌ترین و در عین حال معروف‌ترین روش‌های کنترل غیر خطی مقاوم است) جهت کنترل سیستم توربین بادی استفاده شده است. ذکر این نکته ضروری است که طراحی کنترل کننده‌های کلاسیک مقاوم و تطبیقی، پیچیده بوده و نیاز به صرف زمان و ملزومات بسیار دارند. همچنین در [۸] تا [۱۰] از روش‌های هوشمند عصبی- فازی (استفاده از داده‌های آموزشی بر اساس اطلاعات ورودی و خروجی تعریف شده) برای رسیدن به جواب‌های مطلوب در طراحی سیستم‌های کنترل توربین‌های بادی استفاده شده و نتایج نسبتاً مطلوبی حاصل شده است. ولی قوام این روش‌ها در شرایط جدید (تغییرات ورودی، پارامترها و دینامیک‌های سیستم) مورد بررسی قرار نگرفته و تحقق این کنترل کننده‌ها به صورت روی-خط صورت نگرفته است.

در یک تقسیم‌بندی کلی توربین‌های بادی را می‌توان به دو دسته توربین‌های سرعت ثابت و سرعت متغیر تقسیم نمود. در توربین‌ها و در سرعت باد نامی، رتور توربین نیز با سرعت نامی می‌چرخد و این بدان معنا است که توان خروجی توربین نیز نامی می‌باشد. لازم به ذکر است که اگر سرعت رتور توربین بالاتر از سرعت نامی آن شود، مشکلات الکتریکی و مکانیکی برای توربین به وجود می‌آید. بنابراین در هر دو نوع توربین بایستی برای این که در سرعت‌های بالاتر از سرعت باد نامی نیز رتور با سرعت نامی بچرخد و در نتیجه توان خروجی نامی شود، از کنترل کننده

چکیده: یکی از روش‌های کنترلی مرسوم در توربین‌های بادی، کنترل زاویه گام پره‌های توربین می‌باشد که این کار به منظور داشتن توان نامی در خروجی توربین، برای سرعت‌های باد بالاتر از سرعت باد نامی انجام می‌گیرد. با توجه به اهمیت زیاد کیفیت توان تولیدی توسط توربین و از آنجا که عملکرد بهتر کنترل کننده زاویه گام، کیفیت بهتر خروجی سیستم زاویه گام و متعاقباً کیفیت بهتر توان تولیدی توربین را به دنبال دارد، بهینه‌سازی عملکرد این کنترل کننده امری حیاتی است. در این مقاله ابتدا برای کنترل زاویه گام از یک کنترل کننده PI استفاده شده و سپس یک کنترل کننده هوشمند عاطفی جدید (برگرفته از مکانیسم یادگیری عاطفی مغز انسان) جایگزین آن گردیده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی با این جایگزینی، عملکرد سیستم کنترل زاویه گام در حد بسیار خوبی بهبود یافته است. این کنترل کننده هوشمند عملکرد خوبی از لحاظ سرعت پاسخ‌دهی، ریبیل پاسخ و بالاخره خطای ماندگار ردیابی داشته و در ضمن از قوام قابل ملاحظه‌ای در قبال تغییرات سرعت باد (نقطه کار) و پارامترهای سیستم زاویه گام برخوردار است.

کلید واژه: توربین بادی، زاویه گام، کنترل کننده تطبیقی، یادگیری عاطفی.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی باد رشد چشم‌گیری داشته است. در شکل ۱ روند رو به رشد تولید برق در جهان با استفاده از انرژی باد از اواخر سال ۲۰۱۰ تا اواخر سال ۲۰۱۲ نشان داده شده است.

به دلیل گسترش روزافزون تولید برق بادی، بهبود روند کنترل توربین‌های بادی با روش‌های کلاسیک یا هوشمند ضروری می‌باشد. یکی از کنترل کننده‌های متداول در سیستم‌های صنعتی، کنترل کننده کلاسیک PI است که علی‌رغم سادگی ساختار از عملکرد قابل قبولی (به ویژه در حوزه سیستم‌های خطی) برخوردار است [۱]. در [۲] و [۳] دو نمونه از کاربردهای این کنترل کننده برای کنترل توربین‌های بادی آورده شده است.

در هر حال، در سیستم‌هایی همچون توربین بادی که برخوردار از

این مقاله در تاریخ ۲۵ اردیبهشت ماه ۱۳۹۱ دریافت و در تاریخ ۱ اسفند ماه ۱۳۹۱ بازنگری شد.

مهدی حیات داودی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد برازجان (دشتستان)، گروه برق، برازجان، (email: mahdidavudi@yahoo.com).

محسن فرشاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، (email: mfarshad@birjand.ac.ir).

حمیدرضا نجفی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، (email: h.r.najafi@birjand.ac.ir).

رضا صداقتی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیضا، بیضا، (email: reza_sedaghati@yahoo.com).

محمود جورابیان، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، (email: Mjoorabian@yahoo.com).

- سرعت تند باد (v_g)

- اغتشاش (v_i)

بنابراین می‌توان سرعت باد را به صورت زیر نوشت

$$v = v_{av} + v_g + v_r + v_i \quad (۱)$$

مؤلفه متوسط سرعت باد، بیانگر مقدار میانگین سرعت باد در فواصل زمانی مشخص است. مؤلفه سرعت شیب نیز در واقع معرف افزایش ثابت سرعت باد در حالت ماندگار است که به صورت تابع چندضابطه‌ای زیر تعیین می‌شود

$$v_r = \begin{cases} 0, & t < T_{sr} \\ A_r \frac{t - T_{sr}}{T_{er} - T_{sr}}, & T_{sr} < t < T_{er} \\ A_r, & T_{er} < t \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن A_r دامنه سرعت شیب و T_{sr} و T_{er} نیز به ترتیب زمان شروع و اتمام وزش باد در نظر گرفته شده‌اند. در [۱۸] مؤلفه سرعت تند باد به صورت زیر مدل شده است

$$v_g = \begin{cases} 0, & t < T_{sg} \\ A_g (1 - \cos(\alpha \pi \frac{t - T_{sg}}{T_{eg} - T_{sg}})), & T_{sg} < t < T_{eg} \\ A_g, & T_{eg} < t \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن A_g دامنه تند باد و T_{sg} و T_{eg} نیز به ترتیب زمان شروع و اتمام تند باد در نظر گرفته شده‌اند.

مؤلفه اغتشاش نیز که توصیف حالت تصادفی سرعت باد را بر عهده دارد به صورت زیر خواهد بود

$$v_i = \sum_{i=1}^N (S_v(\omega_i) \Delta\omega)^{\frac{1}{2}} \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (۴)$$

که در آن $\omega_i = (i-1/2)\Delta\omega$ و φ_i نیز یک متغیر تصادفی با چگالی احتمال یکنواخت در محدوده ۰ تا 2π است. همچنین $S_v(\omega_i)$ تابع چگالی طیف است که توسط ویکییتس در [۱۹] به صورت زیر ارائه شده است

$$S_v(\omega) = \frac{2K_N F^2 |\omega|}{\pi^2 [1 + (F\omega/\mu\pi)^2]^{\frac{5}{2}}} \quad (۵)$$

که در آن $K_N = 0.04$ ، $F = 2000$ و μ متوسط سرعت در ارتفاع بالا است. در [۲۰] نتیجه گرفته شده است که مقادیر پارامتر $N = 50$ و $\Delta\omega = 0.5 - 20$ مناسب برای شبیه‌سازی خواهند بود.

۳- مشخصات توربین‌های بادی

توان مکانیکی توربین بادی که در واقع درصدی از توان کل انرژی باد است به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۱]

$$P_r = \frac{\rho}{2} AC_p(\lambda, \beta) V^3 \quad (۶)$$

که در آن ρ چگالی هوا، C_p بازده توان، λ نسبت سرعت لبه، β زاویه گام، A سطح جاروب‌شده توسط رتور و بالاخره V سرعت باد است. پارامتر λ نیز به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V} \quad (۷)$$

در [۱۱] برای کنترل زاویه گام، یک بار از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) و بار دیگر از شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (RBF) استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی مؤید عملکرد بهتر کنترل‌کننده RBF در تأمین توان نامی خروجی مطلوب است. در هر حال لازم به توضیح است که هیچ کدام از دو کنترل‌کننده فوق‌الذکر، علی‌رغم ساختار نسبتاً بزرگ و تنوع ورودی‌ها، توانایی حذف کامل بالازدگی^۱ را ندارند. در ضمن در این مقاله از مدل نوسانی باد (مدل واقعی باد) استفاده نشده و از یک تابع پله‌ای به عنوان مدل سرعت باد استفاده شده است (با این که مدل سرعت باد بر دینامیک‌های سیستم تأثیرگذار است). همچنین در [۱۲] از یک کنترل‌کننده غیر خطی پیش‌خور (طراحی‌شده بر مبنای مشخصه آیرودینامیکی رتور توربین) جهت جبران ضعف کنترل‌کننده کلاسیک PID استفاده شده است. خروجی کنترل‌کننده غیر خطی پیش‌خور با خروجی کنترل‌کننده PID جمع و ورودی مطلوب سیستم زاویه گام را تولید می‌نماید. در [۱۳] بر پایه روش کنترل تطبیقی مدل مرجع، یک کنترل‌کننده خود-تنظیم زاویه گام پیشنهاد شده است. این کنترل‌کننده مرکب از دو شبکه عصبی، یکی با هدف درک رفتار پلانت (سیستم زاویه گام) و دیگری برای درک رفتار معکوس آن (در راستای تحقق استراتژی کنترلی معکوس پلانت) است. در [۱۴] کنترل زاویه گام با استفاده از یک کنترل‌کننده فازی انجام گرفته است. همچنین در [۱۵] از جهت همراهی با نامعینی‌های سیستمی (تغییر دینامیک‌های توربین بادی متأثر از تغییر سرعت باد)، کنترل زاویه گام به کمک یک کنترل‌کننده مقاوم صورت پذیرفته است. در [۱۶] با استفاده از یک کنترل‌کننده غیر خطی زاویه گام کنترل شده است. در [۱۷] برای کنترل زاویه گام به ازای یک پروفایل سرعت باد مشخص، ضرایب کنترل‌کننده PID تعیین شده و نتایج حاصل شده‌اند و عملکرد کنترلر مبتنی بر ریتگر اغتشاش^۲ نیز فقط به ازای همین پروفایل سرعت باد نشان داده شده است. از یک منظر، بزرگ‌ترین ضعف مشترک عمده کارهای مرور شده، عدم تحقق روی-خط آنها از جهت همراهی با تغییرات نقطه کار (تغییر سرعت باد) و پارامترهای سیستم زاویه گام است. در این مقاله یک مدل برای مکانیسم یادگیری عاطفی مغز انسان ارائه شده و بر اساس این مدل، یک کنترل‌کننده جدید عاطفی به منظور کنترل مطلوب زاویه گام توربین بادی طراحی شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی علاوه بر کیفیت مطلوب، از قوام بسیار خوب در شرایط جدید نیز برخوردار است.

ساختار ادامه مقاله بدین شرح است: در بخش ۲ مدل سرعت باد مورد استفاده در بخش شبیه‌سازی تشریح شده است. در بخش ۳ روابط مربوط به توان مکانیکی و نیز بازده توان توربین بادی معرفی شده‌اند. در بخش ۴ پس از معرفی مختصر مکانیسم یادگیری عاطفی مغز انسان و نیز نحوه تعیین زاویه گام مرجع، چگونگی طراحی کنترل‌کننده هوشمند زاویه گام با استفاده از مکانیسم یادگیری عاطفی مغز انسان تشریح گردیده است. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی آورده شده‌اند و بالاخره مقاله با ارائه نتیجه‌گیری در بخش ۶ خاتمه می‌یابد.

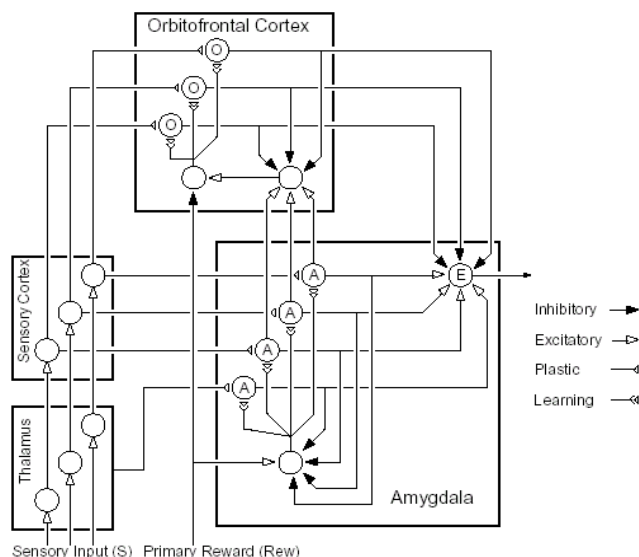
۲- مدل سرعت باد

سرعت باد را می‌توان مجموع چهار مؤلفه زیر در نظر گرفت [۱۸]:

- متوسط سرعت باد (v_{av})

- سرعت شیب (v_r)

1. Overshoot
2. Disturbance Observer

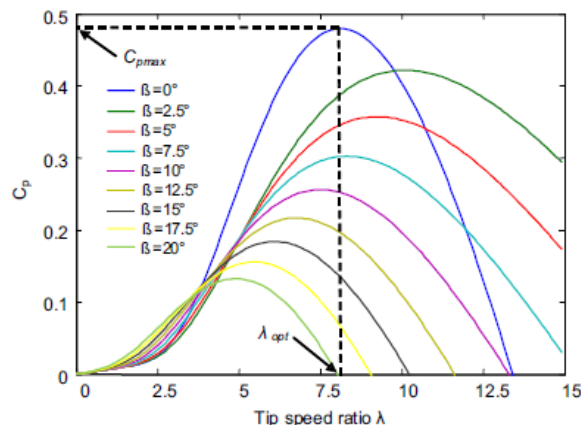


شکل ۳: تشریح گرافیکی جزئیات مدل محاسباتی از سیستم یادگیری عاطفی مغز [۲۲].

شکل ۳: تشریح گرافیکی جزئیات مدل محاسباتی از سیستم یادگیری عاطفی مغز [۲۲].

قشر فوقانی (مغز) نبوده بلکه عواطف (که منشأ آن در مخچه و مغز میانی است) نیز در تصمیم‌گیری‌های انسانی دخیل هستند. در سال‌های اخیر، توسعه مدل‌های محاسباتی از عملکرد بخش‌هایی از مغز که وظیفه پردازش عاطفی را بر عهده دارند، مورد توجه محققین قرار گرفته است. در [۲۲] مدل محاسباتی جدیدی از عملکرد بخش پردازش عاطفه‌های مغز، شامل واحدهای آمیگدالا^۱، قشر اریتوفرانیتال^۲، تالاموس^۳ و بالاخره پوسته حسی^۴ ارائه شده است (شکل ۳). با توجه به مدل فوق و بر طبق نظریه‌های جدید، سیستم آمیگدالا-اریتوفرانیتال در دو مرحله فرایند یادگیری را انجام می‌دهد. ابتدا سیگنال‌های تحریک ورودی ارزیابی شده و در مرحله بعد از ارزیابی انجام‌گرفته به عنوان ضرایب تقویت‌کننده در پاسخ متأثر از تحریک استفاده می‌شود. آمیگدالا به عنوان یکی از ساختارهای اولیه مغز می‌باشد که به صورت نسبتاً یکنواخت در ساختارهای مقیاس بزرگ، میان گونه‌های مختلف جانداران وجود دارد. آمیگدالا یک شبکه کوچک در قسمت بادمی‌شکل گیج‌گامی^۵ است که وظیفه ارزیابی عاطفی محرک‌ها را بر عهده داشته که این ارزیابی‌ها در خصوص حالات و واکنش‌های عاطفی، سیگنال‌های توجه و همچنین حافظه بلندمدت مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعدادی از محرک‌های ذاتی از جمله گرسنگی، درد، بعضی از بوها و غیره می‌توانند آمیگدالا را تحریک کرده و پاسخ آمیگدالا به این تحریک‌ها در بخش یادگیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحقیقات انجام‌گرفته توسط دانشمندان نشان می‌دهد که حیواناتی که از ناحیه آمیگدالا دچار صدمه شده‌اند در یادگیری مشکل دارند و این گواه این ادعا است که یادگیری در بخش آمیگدالا انجام می‌پذیرد. از طرف دیگر، قشر اریتوفرانیتال به عنوان اصلاح‌کننده پاسخ‌ها و عکس‌العمل‌های نامناسب آمیگدالا ایفای نقش می‌کند. آزمایشات متعدد انجام‌گرفته بر روی بیماران دارای اریتوفرانیتال صدمه‌دیده نشان داده که این بیماران قادر به تطابق خود با شرایط جدید نیستند. به عبارت دیگر یادگیری‌های قبلی مانع از درک و متعاقباً پاسخ مناسب به شرایط جدید می‌شود.

1. Amygdala
2. Orbitofrontal Cortex
3. Thalamus
4. Sensory Cortex
5. Temporal Lobe



شکل ۲: مشخصه بازده توان بر حسب نسبت سرعت لبه و به ازای مقادیر مختلف زاویه گام [۲۱].

که در آن R شعاع رتور و ω_r سرعت زاویه‌ای رتور است. با توجه به ثابت بودن پارامترهای ρ و A و نیز از آنجا که سرعت باد در اختیار ما نیست، از (۶) پیداست که با تنظیم C_p (که خود تابعی از دو پارامتر λ و β است) می‌توان P_r را به نحو مطلوب کنترل کرد. لازم به توضیح است که در سرعت‌های باد بالاتر از سرعت نامی، تنظیم C_p از طریق پارامتر β و در سرعت‌های باد کمتر از سرعت نامی، تنظیم C_p از طریق پارامتر λ (البته در توربین‌های بادی سرعت متغیر انجام می‌پذیرد. در [۲۱] با استفاده از روش‌های تقریب عددی، ارتباط C_p و پارامترهای λ و β به فرم بسته زیر به دست آمده است

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{C_r}{\lambda_i} - c_2 \beta - c_3 \right) e^{-\frac{c_4}{\lambda_i}} + c_5 \lambda \quad (8)$$

که در آن

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.35}{\beta^2 + 1} \right)^{-1} \quad (9)$$

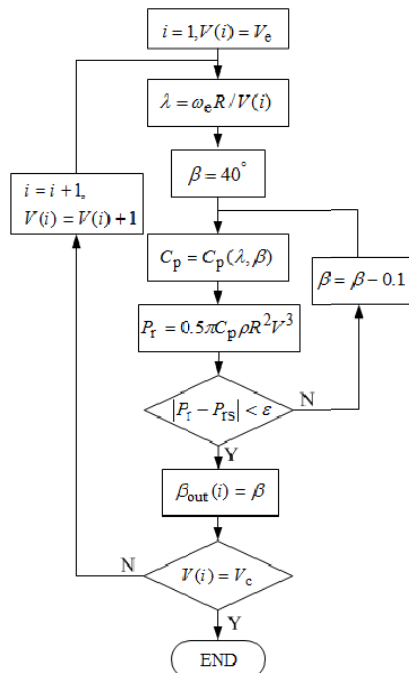
در شکل ۲ مشخصه C_p بر حسب λ و به ازای مقادیر مختلف β رسم شده است.

همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، به ازای $\beta = 0$ و در $\lambda = \lambda_1$ (که به ازای سرعت باد نامی و چرخش رتور با سرعت نامی حاصل می‌شود) توربین بادی با بازده توان ماکزیمم کار می‌کند. در این شرایط توان مکانیکی نامی توسط توربین حاصل شده است. در توربین‌های بادی سرعت متغیر در سرعت‌های باد کمتر از سرعت باد نامی می‌توان با فرمان کنترلی برای تطبیق سرعت رتور و تحویل $\lambda = \lambda_1$ توسط کنترل‌کننده سرعت و به ازای $\beta = 0$ ، حداکثر توان ممکن را از باد دریافت نمود.

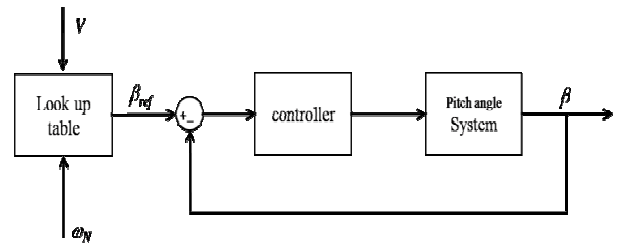
۴- کنترل‌کننده هوشمند زاویه گام

۴-۱ مکانیسم یادگیری عاطفی مغز انسان

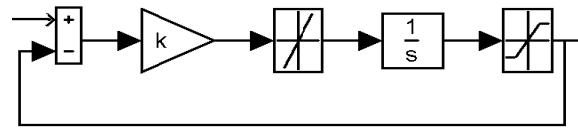
طبیعت جاندار و در رأس آن انسان (به عنوان تکامل یافته‌ترین و هوشمندترین مخلوق خداوند) سرشار از شگفتی و هوشمندی است که همواره مورد توجه و منشأ الهام محققین حوزه‌های فیزیولوژی و روان‌شناختی، جهت توسعه ایده‌ها/ابزارها و ساختارهای هوشمند بوده است. در این راستا آرزوی کماکان دست‌نیافتنی محققین، امکان خلق موجودی مصنوعی با توانایی‌های مشابه انسان بوده و هست. فرایند تصمیم‌گیری در مغز انسان منحصر به محاسبه و منطق (انجام‌شده توسط



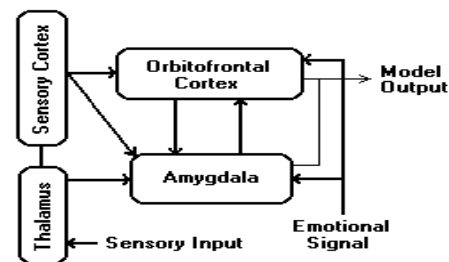
شکل ۵: روندنمای نحوه محاسبه زاویه گام مرجع.



شکل ۴: نمایش بلوکی سیستم کنترل زاویه گام.



شکل ۶: نمایش بلوکی سیستم زاویه گام.



شکل ۷: نمایش بلوکی مدل محاسباتی از مکانیسم یادگیری عاطفی مغز [۲۳].

خروجی مدل محاسباتی MO (پاسخ سیستم یادگیری عاطفی آمیگدالا-اریتوفرانیتال به تحریک ورودی SI و سیگنال عاطفی پاداش/جزا EC) برابر است با

$$MO = AO - OCO \quad (10)$$

که در آن AO و OCO به ترتیب خروجی واحدهای آمیگدالا و اریتوفرانیتال بوده و برابرند با

$$AO = G_a \cdot SI \quad (11)$$

$$OCO = G_{oc} \cdot SI$$

که در آن G_a و G_{oc} به ترتیب گین معادل واحدهای آمیگدالا و اریتوفرانیتال هستند. قانون یادگیری در واحدهای آمیگدالا و اریتوفرانیتال به ترتیب عبارتند از

$$\Delta G_a = k_1 \cdot \max(\cdot, EC - AO) \geq \cdot \quad (12)$$

$$\Delta G_{oc} = k_1 \cdot (MO - EC)$$

که در آن k_1 و k_2 به ترتیب نرخ یادگیری در واحدهای آمیگدالا و اریتوفرانیتال هستند. به دلیل استفاده از عملگر \max ، گین واحد آمیگدالا محکوم به تغییرات یکنوای افزایشی است. به عبارت دیگر شرایط مطلوب کاری (که در مقادیر بزرگ سیگنال عاطفی EC انعکاس می‌یابد) به تدریج منجر به افزایش گین واحد آمیگدالا به سقف فیزیکی آن خواهد شد. حال چنانچه به دلایلی شرایط مطلوب فوق در آینده نامطلوب شوند (با مقدار کوچک سیگنال عاطفی EC)، واحد آمیگدالا قادر به تشخیص این مسأله و اصلاح پاسخ خود نبوده و عملاً مشابه شرایط مطلوب پاسخ خواهد داد. در هر حال گین واحد اریتوفرانیتال مجاز به تغییرات مثبت/منفی بوده تا بتواند در قبال پاسخ‌های نامناسب واحد آمیگدالا اصلاح مناسب را انجام دهد.

از ترکیب (۱۰) و (۱۱) داریم

$$MO = (G_a - G_{oc}) \cdot SI \equiv G(SI, EC, \dots) \cdot SI \quad (13)$$

به عبارت دیگر خروجی سیستم یادگیری عاطفی آمیگدالا-اریتوفرانیتال برابر است با حاصل ضرب یک گین متغیر G (وابسته به عوامل متعدد از

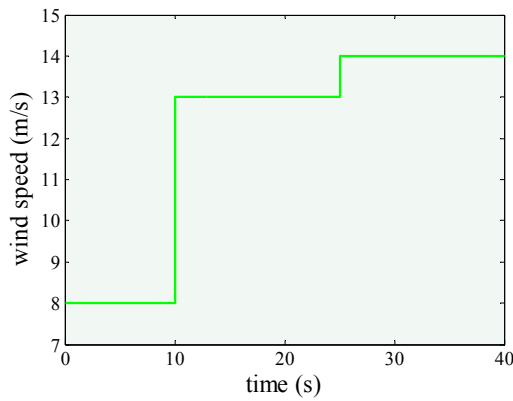
۴-۲ سیستم کنترل زاویه گام

چنانچه سرعت باد بیشتر از مقدار نامی خود باشد، می‌توان از طریق کنترل زاویه گام، توان تولیدی توربین را کماکان در سطح نامی نگاه داشت. در شکل ۴ بلوک دیگرام سیستم کنترل زاویه گام توربین نشان داده شده است که در آن کنترل‌کننده بر اساس میزان خطای ردیابی زاویه گام، فرمان لازم به سیستم زاویه گام ارسال می‌کند. در این شکل بلوک Look up table حاوی اطلاعات زاویه گام مرجع، متناسب با هر سرعت باد و سرعت نامی رتور است. نحوه تهیه این جدول در روندنمای شکل ۵ آورده شده است و V_e و P_{ts} به ترتیب سرعت باد نامی و توان مکانیکی نامی توربین بادی هستند. در شکل ۶ نمایش بلوکی سیستم زاویه گام نشان داده شده است.

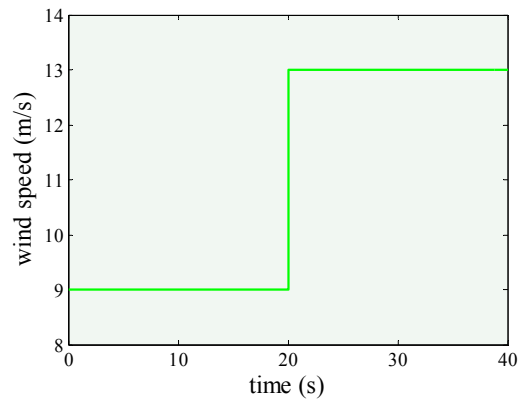
۴-۳ طراحی کنترل‌کننده هوشمند زاویه گام با استفاده

از مکانیسم یادگیری عاطفی مغز انسان

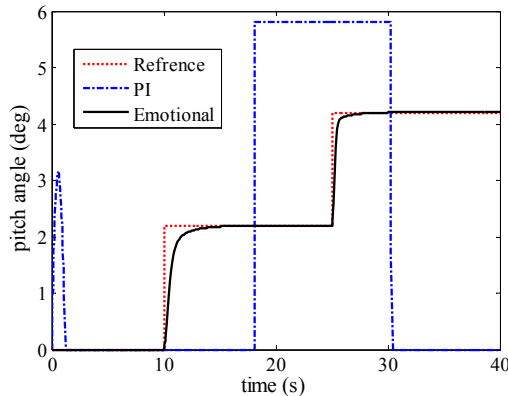
در این مقاله با استناد به مدل ارائه‌شده در [۲۲] از مکانیسم یادگیری عاطفی مغز انسان، یک استراتژی کنترلی هوشمند برای بلوک کنترل‌کننده زاویه گام توربین بادی ارائه شده است که عملکردی مشابه با یک کنترل‌کننده PID خود-تنظیم دارد. از این منظر، حداقل ارزش ساختار هوشمند پیشنهادی علاوه بر ویژگی‌های کلی و ارزشمند ساختارهای هوشمند (شامل سیستم-رهابودن، قدرت تطبیق و تعمیم بالا و ...)، حجم کم عملیات آماده‌سازی آن در قیاس با عملیات پرحجم و زمان‌بر خارج-خط آماده‌سازی یک کنترل‌کننده PID خود-تنظیم است چرا که ویژگی خود-تنظیمی آن بر پایه کارکرد یک مکانیسم یادگیری عاطفی و به صورت روی-خط محقق می‌شود. با صرف نظر از جزئیات، طرح شماتیکی سیستم یادگیری عاطفی مغز در شکل ۷ نشان داده شده است که در ادامه، جهت تشریح مدل محاسباتی پیشنهادی از سیستم یادگیری عاطفی آمیگدالا-اریتوفرانیتال استفاده شده است.



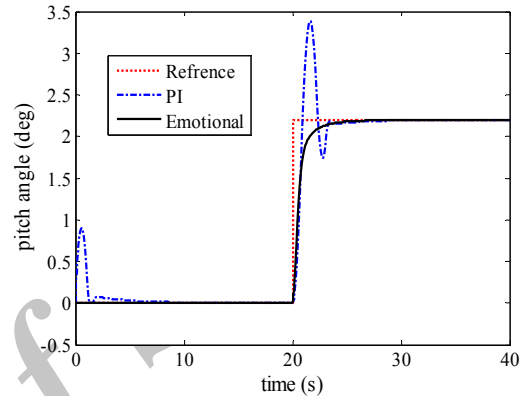
شکل ۱۲: پروفایل سرعت باد.



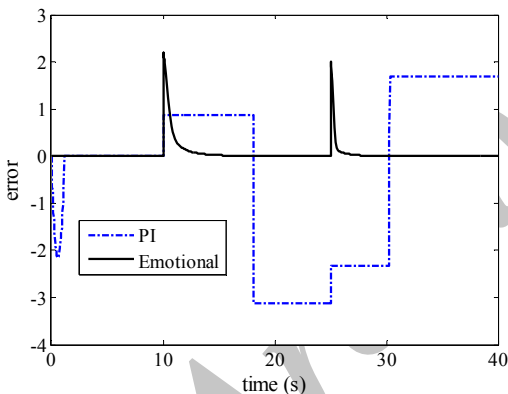
شکل ۹: پروفایل سرعت باد.



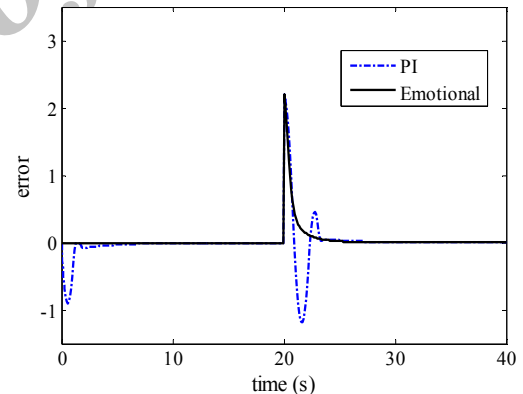
شکل ۱۳: تغییرات زاویه گام برای هر دو نوع کنترل کننده.



شکل ۱۰: تغییرات زاویه گام برای هر دو نوع کنترل کننده.



شکل ۱۴: خطای مربوط به هر دو کنترل کننده PI و عاطفی.

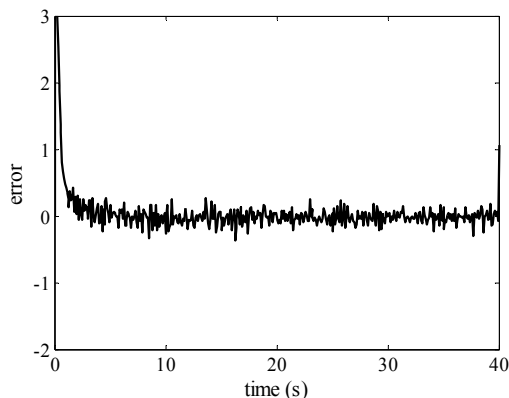


شکل ۱۱: خطای مربوط به هر دو کنترل کننده PI و عاطفی.

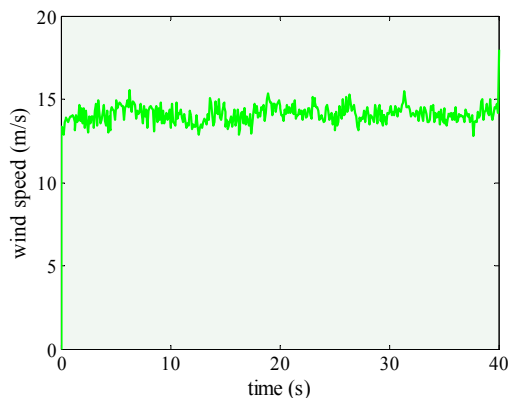
سرعت شکل ۹ است) و تغییر در ضریب انتگرال گیر موجود در سیستم زاویه گام (K) به میزان ۸۰ درصد، در شکل ۱۳ آورده شده است. در شکل ۱۳ عملکرد کنترل کننده PI در وضعیت جدید نیز نشان داده شده است. در شکل ۱۴ نیز خطای مربوط به کنترل کننده‌های PI و عاطفی به ازای پروفایل سرعت باد شکل ۱۲ نشان داده شده است. مقایسه نتایج اخیر مؤید تطابق عالی کنترل کننده هوشمند با وضعیت جدید است در حالی که کنترل کننده PI (که برای وضعیت قبلی تنظیم شده بود) رفتار نامطلوبی از خود نشان داده است.

برای نشان دادن قدرت تطبیق بسیار خوب کنترل کننده پیشنهادی در قبال سرعت باد نوسانی، عملکرد این کنترل کننده در قبال پروفایل سرعت باد شکل ۱۵ (برگرفته از مدل سرعت باد ارائه شده در بخش ۲) و تغییر در ضریب انتگرال گیر موجود در سیستم زاویه گام (K) به میزان ۸۰ درصد، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در شکل ۱۷ نیز خطای مربوط به کنترل کننده عاطفی به ازای پروفایل سرعت باد شکل ۱۵ آمده است. در

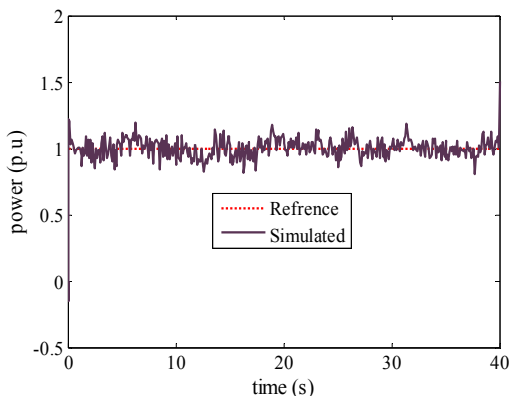
شکل ۱۰ زاویه گام مرجع تولیدشده توسط look up table (تشریح شده در شکل ۵)، خروجی سیستم زاویه گام در صورت استفاده از کنترل کننده PI و خروجی سیستم زاویه گام به هنگام استفاده از کنترل کننده هوشمند نشان داده شده است. شکل ۱۰ گویای عملکرد بهتر کنترل کننده عاطفی پیشنهادی در قیاس با کنترل کننده کلاسیک PI، از جهت حذف بالازدگی و سرعت پاسخدهی است. در شکل ۱۱ نیز خطای مربوط به کنترل کننده‌های PI و عاطفی به ازای پروفایل سرعت باد شکل ۹ آمده است. لازم به توضیح است که طراحی کنترل کننده PI زاویه گام (که البته مبنای طراحی اولیه کنترل کننده هوشمند زاویه گام نیز هست) به صورت سعی و خطا و در راستای ردیابی مطلوب پروفایل زاویه گام مرجع مندرج در شکل ۹ انجام گرفته است. در هر حال به منظور نمایش توان ساختاری قابل ملاحظه کنترل کننده هوشمند پیشنهادی در قبال تغییرات نقطه کار و پارامترهای سیستم، عملکرد این کنترل کننده در قبال پروفایل سرعت باد شکل ۱۲ (که تا حد زیادی متفاوت از پروفایل



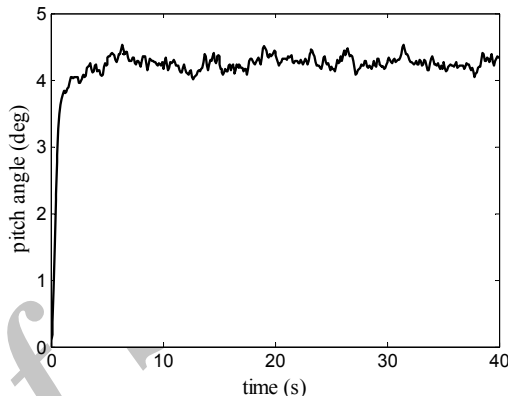
شکل ۱۷: خطای مربوط به هر دو کنترل کننده عاطفی.



شکل ۱۵: پروفایل سرعت باد.



شکل ۱۸: منحنی توان مکانیکی توربین بادی.



شکل ۱۶: تغییرات زاویه گام برای کنترل کننده عاطفی.

از لحاظ سرعت پاسخ‌دهی، ریپل پاسخ و خطای ماندگار ردیابی).
 (۲) قوام قابل ملاحظه در قبال تغییرات نقطه کار (تغییر سرعت باد) و پارامترهای سیستم (با تغییر نقطه کار و پارامترهای سیستم، نیاز به طراحی مجدد نداشته بلکه در برابر این تغییرات به طور خودکار اصلاح و عملکرد بهینه خود را حفظ کند).

مراجع

- [1] K. J. Astrom and T. Haggund, *PID Controller: Theory, Design, and Tuning*, 2nd Edition, 1995.
- [2] G. Tapia, A. Tapia, and J. X. Ostolaza, "Two alternative modeling approaches for the evaluation of wind farm active and reactive power performances," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 21, no. 4, pp. 909-920, Dec. 2006.
- [3] M. M. Hand and M. J. Balas, "Systematic approach for PID controller design for pitch-regulated, variable-speed wind turbines," in *17th ASME Wind Energy Symposium Proc.*, vol. 3, pp. 89-94, Jun. 1998.
- [4] World Wind Energy Association, *Half-Year Report 2012*, available at: www.wwindea.com. Date of Publication, Oct. 2012.
- [5] B. Beltran, T. Ahmed-Ali, and M. E. Benbouzid, "Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 23, no. 2, pp. 551-558, Jun. 2008.
- [6] V. I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 23-36, Feb. 1993.
- [7] C. Lascu, I. Boldea, and F. Blaabjerg, "Direct torque control of sensorless induction motor drives: a sliding-mode approach," *IEEE Trans. on Industrial Applications*, vol. 40, no. 2, pp. 582-590, Mar. 2004.
- [8] J. P. A. Vieira, M. V. A. Nunes, U. H. Bezerra, and W. Jr. Barra, "Novas estrategias de controle fuzzy aplicadas ao conversor do DFIG para melhoria da estabilidade transitoria em sistemas eolicos," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 5, no. 3, pp. 143-150, Jun. 2007.
- [9] X. Y. Zhang, J. Cheng, and W. Q. Wang, *The Intelligent Control Method Study of Variable Speed Wind Turbine Generator*, ICSET, 2008.

شکل ۱۸ توان مکانیکی توربین بادی به ازای پروفایل سرعت باد شکل ۱۵ آمده است. شکل ۱۸ نشان‌دهنده عملکرد خوب کنترل کننده عاطفی در حفظ توان مکانیکی نامی تولیدی توربین بادی است.

در هر حال عملکرد کنترل کننده عاطفی پیشنهادی در این مقاله به ازای چندین پروفایل پیش‌فرض اعم از پله‌ای و نوسانی و تغییرات دینامیک‌های سیستم ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده مقاومت در کنترل کننده پیشنهادی در شرایط جدید و برخورداری از سرعت پاسخ‌دهی، ریپل و خطای ماندگار مطلوب است و این در حالی است که کنترل کننده‌های عصبی مربوط به [۱۱] با وجود ساختار سنگین و بزرگ (به دلیل استفاده از داده‌های آموزشی زیاد بر اساس اطلاعات ورودی و خروجی تعریف شده) فقط عملکردشان به ازای یک پروفایل سرعت باد پله‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته و قوام این کنترل کننده‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است.

۶- نتیجه‌گیری

مسئله کنترل کارآمد توان و سرعت (فرکانس) در سیستم‌های برق بادی، به علت متغیر بودن و در عین حال غیر قابل کنترل بودن سرعت باد (نامعینی) از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مقاله یک کنترل کننده هوشمند جدید مبتنی بر یادگیری عاطفی مغز از جهت کنترل مطلوب زاویه گام طراحی شده است. با فرموله‌بندی مناسب مکانیسم یادگیری عاطفی مغز، کنترل کننده هوشمند پیشنهادی عملکردی مشابه یک کنترل کننده PID خود-تنظیم یافته است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، ویژگی‌های برجسته زیر برای کنترل کننده هوشمند پیشنهادی قابل ذکر است:

(۱) کیفیت مطلوب از منظر شاخص‌های رفتار گذرا و ماندگار در عین سادگی ساختار در قیاس با کنترل کننده‌های سنتی (کیفیت مطلوب

محسن فرشاد در شهریور ماه ۱۳۶۹ مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه صنعتی شریف و متعاقباً مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق- کنترل در بهمن ماه ۱۳۷۲ از دانشگاه تهران دریافت نمود. از خرداد ۱۳۷۶ تا شهریور ۱۳۷۸ به عنوان عضو هیأت علمی در دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند مشغول به کار بود. در مهر ماه ۱۳۷۸ به دوره دکتری مهندسی برق- کنترل دانشگاه تهران وارد گردید و در شهریور ماه ۱۳۸۵ موفق به اخذ درجه دکتری از دانشگاه مذکور گردید. دکتر محسن فرشاد در حال حاضر به عنوان استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند مشغول به انجام فعالیت‌های آموزشی و پژوهشی است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده عبارتند از: محاسبات نرم (شامل: الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند، شبکه‌های عصبی و منطق فازی)، مدل‌سازی و کنترل درایوهای الکتریکی، بهینه‌سازی و کنترل سیستم‌ها، ترافیک و مسائل نقلیه.

حمیدرضا نجفی متولد ۱۳۳۹ مشهد، مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۷۰ از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. در فاصله سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۶ در دانشگاه‌های علم و صنعت ایران و بیرجند به تحقیق و تدریس پرداخت. او مدرک دکتری تخصصی خود را در رشته مهندسی برق گرایش قدرت در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. دکتر نجفی در حال حاضر استادیار رسمی گروه مهندسی قدرت دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند است. وی عضو IEEE می‌باشد و بیش از ۴۰ مقاله در کنفرانس‌های معتبر داخلی و بین‌المللی ارائه نموده و بیش از ۱۰ مقاله در مجلات علمی- پژوهشی معتبر داخلی و خارجی انتشار داده است. از سوابق علمی- اجرایی ایشان می‌توان چهار سال مدیریت گروه و چهار سال ریاست دانشکده را نام برد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: مدل‌سازی، قابلیت اطمینان و پایداری سیستم‌های قدرت، تولید پراکنده، منابع انرژی تجدیدپذیر، کاربرد روش‌ها و سیستم‌های هوشمند در طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت.

رضا صدقاتی در سال ۱۳۸۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون و در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول دریافت نمود. در حال حاضر ایشان به‌عنوان مدرس در دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیضا مشغول به فعالیت هستند و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشگاه می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ادوات FACTS، انرژی‌های تجدید پذیر و سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی می‌باشد.

محمود جورابیان دارای مدارک کارشناسی از دانشگاه نیهیون آمریکا و کارشناسی ارشد از دانشگاه صنعتی رن سی لیر آمریکا و دکتری از دانشگاه باث انگلستان می‌باشد. از جمله آثار علمی این ایشان می‌توان به ترجمه کتاب‌های منطق فازی و شبکه‌های عصبی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، انتقال و توزیع قدرت الکتریکی، دینامیک و کنترل سیستم‌های قدرت، ریزشکها و شبکه‌های توزیع هوشمند، کنترل کننده‌های FACTS در انتقال و توزیع توان، بررسی سیستم‌های قدرت با کمک کامپیوتر و بازارهای برق و عملیات سیستم‌های قدرت و تالیف کتاب سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر (FACTS) اشاره نمود. ایشان دارای مقالات علمی متعدد می‌باشد. ایشان هم‌اکنون عضو هیأت علمی و استاد دانشگاه شهید چمران اهواز است. علائق پژوهشی ایشان عبارت است از: کیفیت توان در سیستم‌های قدرت، کاربرد سیستم‌های هوشمند در مسائل سیستم‌های قدرت، الکترونیک قدرت و ادوات FACTS، بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت، طراحی و ساخت ژنراتور مغناطیس دائم دور پایین جهت کوپل مستقیم و توربین‌های بادی، ریزشکها و شبکه‌های توزیع هوشمند.

- [10] L. Jerbi, L. Krichen, and A. Ouali, "A fuzzy logic supervisor for active and reactive power control of a variable speed wind energy conversion system associated to a flywheel storage system," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 6, pp. 919-925, Jun. 2009.
- [11] A. S. Yilmaz and Z. Zer, "Pitch angle control in wind turbines above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural networks," *Expert Systems with Application*, vol. 36, no. 6, pp. 9767-9775, Aug. 2009.
- [12] G. Peng, "Nonlinear feed forward pitch controller for wind turbine based on rotor's aerodynamic characteristic," in *Proc. of the 9th Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics*, vol. 2, pp. 879-883, Jul. 2010.
- [13] A. F. Bati and S. K. Leabi, "NN Self-Tuning Pitch Angle Controller of Wind Power Generation Unit," in *Proc. IEEE Power Systems Conference and Exposition*, vol. 4, no. 2, pp. 2019-2022, Nov. 2006..
- [14] N. A. Schinas, N. A. Vovos, and G. B. Giannakopoulos, "An autonomous system supplied only by a pitch-controlled variable-speed wind turbine," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 325-331, Jun. 2007.
- [15] H. Takaai, Y. Chida, K. Sakurai, and T. Isobe, "Pitch angle control of wind turbine generator using less conservative robust control," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Control Applications*, vol. 3, pp. 542-547, Jul. 2009.
- [16] A. Abdelkafi and L. Krichen, "New strategy of pitch angle control for energy management of a wind farm," *Energy J.*, vol. 36, no. 3, pp. 1-10, Mar. 2011.
- [17] Y. Joo and J. Back, "Power regulation of variable speed wind turbines pitch control based on disturbance observer," *J. of Electrical Engineering & Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 273-280, Feb. 2012.
- [18] P. M. Anderson and A. Bose, "Stability simulation of wind turbine systems," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 12, no. 12, pp. 3791-3795, Dec. 1983.
- [19] J. G. Slootweg, H. Polinder, and W. L. Kling, "Initialization of wind turbine models in power system dynamics simulations," in *Proc. of IEEE Porto Power Tech. Conf., Porto*, vol. 4, pp. 324-332, Sep. 2001.
- [20] V. Rimas, M. Shinozuka, and M. Takeno, "Parameters study of wind loading on structures," *J. of the Structural Div., ASCE*, vol. 99, no. 3, pp. 453-468, Mar. 1973.
- [21] J. Zaragoza, J. Pou, A. Arias, C. Spiteri, E. Robles, and S. Ceballos, "Study and experimental verification of control tuning strategies in a variable speed wind energy conversion system," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 1421-1430, May 2011.
- [22] J. Moren and C. Balkenius, "A computational model of emotional learning in the amygdala," In J. -A. Mayer, A. Berthoz, D. Floreano, H. L. Roitblat, and S. W. Wilson, editors, *From Animals to Animals* 6, pages 383-391. MIT Press, Cambridge, MA. 2000..

مهدی حیات داودی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۰ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون و دانشگاه بیرجند به پایان رسانده است و پس از پایان تحصیلات، در دانشگاه آزاد اسلامی واحد برازجان مشغول به تدریس بوده است. ایشان هم‌اکنون در معاونت طراحی و تحقیقات سازمان هوا و فضا مشغول به فعالیت هستند. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: انرژی‌های نو، الکترونیک قدرت و همچنین مدل‌سازی و کنترل ماشین‌های الکتریکی.