

مدل‌سازی غیرخطی و کنترل جامع مقاوم توربین بادی سرعت-متغیر با ژنراتور القایی قفس سنجابی و کنترل زاویه پیمچش پره‌ها

سید حسین اجتهاد

مربی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

ejtahed@kashanu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، پس از ارائه مدل فضای حالت غیرخطی توربین بادی با ژنراتور القایی قفس سنجابی، ابتدا مدل تجمیع‌یافته غیرخطی توربین بادی سرعت متغیر با تغییر زاویه پیمچش پره‌ها توسعه یافته، سپس کنترل‌کننده اولیه و مولد سیگنال مرجعی طراحی می‌شود که در سرعت‌های مختلف باد، ضمن کنترل ولتاژ پایانه خروجی ژنراتور، بالابردن بازدهی آن و افزایش توان استخراج‌شده از انرژی باد، سیستم را به نقطه کار مطلوب هدایت کند. در ادامه به روش H_{∞} برای مدل خطی شده، یک کنترل‌کننده تکمیلی مقاوم طراحی می‌شود که سیستم را در حضور نامعینی‌های ایجادشده در آن برای بهبود عملکرد در حالت گذرا کنترل نماید. ایده کنترل تکمیلی که قبل از این برای نیروگاه‌های آبی و حرارتی استفاده شده، در این مقاله برای توربین‌های بادی به کار رفته است.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی، مدل‌سازی، ژنراتور القایی قفس سنجابی سرعت متغیر، کنترل برداری، زاویه پیمچش پره، کنترل مقاوم H_{∞}

۱. مقدمه

در دسترس بودن انرژی الکتریکی، یک پیش‌شرط مهم برای فعالیت‌های اقتصادی و پیشرفت‌های اجتماعی است. از آنجا که روش‌های کنونی تولید انرژی الکتریکی نتایج نامطلوبی بر محیط زیست دارند و نیز منابع انرژی محدود طبیعی را مصرف می‌کنند، تولید الکتریسته از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌خصوص باد، مورد توجه خاص قرار گرفته است. برای تبدیل انرژی مکانیکی توربین‌های بادی به انرژی الکتریکی، بسته به اندازه سیستم، گونه‌های متفاوت ژنراتورهای^۱ DC، سنکرون و القایی به‌کار گرفته شده‌اند.

در مقالات، استراتژی‌های مختلفی برای کنترل زاویه پیچش پره‌های توربین بادی ارائه شده است. در مراجع [۱] و [۲] مقایسه‌ای بین روش‌های رایج کنترل زاویه پیچش صورت گرفته است. کاربرد تنظیم‌کننده‌های^۲ PID برای توربین بادی در [۳] بررسی شده است. در مرجع [۴] یک روش دینامیکی غیرخطی برای کنترل تغییرات ناخواسته گشتاور بحث شده است. روش‌های کنترل هوشمند مانند کنترل فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز می‌توانند در این مقوله در نظر گرفته شوند که برای نمونه در [۵] کنترل فازی و در [۶] شبکه عصبی شعاعی^۳ RBF برای توربین‌های بادی ارائه شده‌اند. کنترل مقاوم برای توربین بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه^۴ DFIG در [۷] بررسی و نتایج مطلوبی گزارش شده است.

از آنجا که در گستره ۲ مگاوات، ژنراتورهای القایی رایج‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌ترند، در این مقاله از ژنراتور القایی قفس سنجابی در حالتی که سرعت گردش آن قابل کنترل است، استفاده شده که به «ماشین قفس سنجابی سرعت متغیر»^۵ (VSCM) معروف است [۸]. ژنراتور القایی فقط زمانی می‌تواند کار کند که به یک منبع ولتاژ متصل باشد، که در اینجا شبکه قدرت این کار را انجام می‌دهد. اتصال مستقیم یک توربین بادی با ژنراتور القایی به خط انتقال در شبکه‌ای که هیچ کنترلی ندارد، می‌تواند در دسرافین باشد و به عملکرد غیربهبوده توربین و ناپایداری سیستم منجر شود.

در این مقاله، برای اینکه بتوان روی سیستم مولد توربین بادی کنترل انجام داد، از ساختار سیستم سرعت متغیر-فرکانس ثابت (VSCF) استفاده می‌شود که در آن، سرعت ژنراتور از طریق سیگنال‌های مرجع یکسوکننده^۶ PWM قابل کنترل است و با کنترل

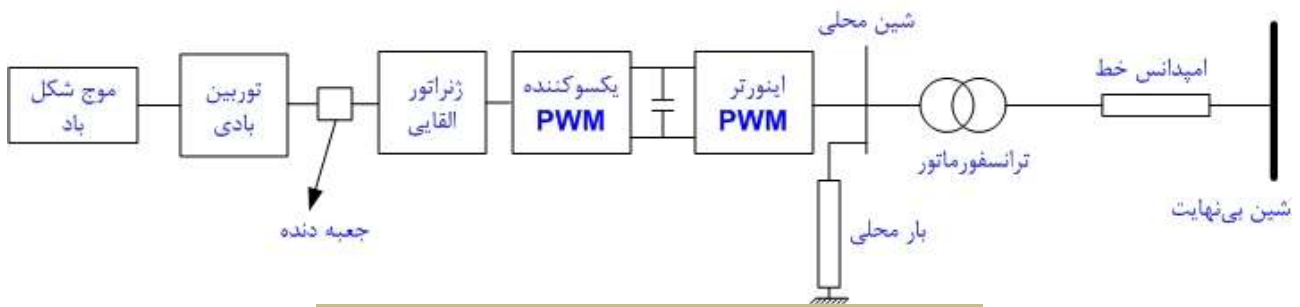
اینورتر PWM نیز می‌توان اندازه و فرکانس ولتاژ ترمینال توربین را کنترل کرد. کنترل سرعت ژنراتور القایی با استفاده از روش کنترل برداری انجام می‌شود [۹] و از امکان کنترل زاویه پیچش پره‌های توربین نیز به‌منظور کنترل توان آیرودینامیکی استخراج‌شده از انرژی باد استفاده شده است.

اهداف کنترل عبارت‌اند از: کنترل ولتاژ پایانه خروجی ژنراتور، افزایش بازدهی ژنراتور و افزایش توان استخراج‌شده از انرژی باد. برای دستیابی به این اهداف، در ابتدا یک کنترل‌کننده اولیه و مولد سیگنال مرجع، طراحی و نشان داده شده است که به‌ازای سرعت‌های مختلف باد، می‌تواند سیستم را به نقطه کار مطلوب هدایت کند؛ سپس با استفاده از تئوری کنترل مقاوم و روش^۷ H_{∞} در فضای متغیرهای حالت، برای مدل خطی شده سیستم، یک کنترل‌کننده تکمیلی مقاوم طراحی می‌شود که در حضور نامعینی‌های ایجادشده در ضرایب آیرودینامیکی سیستم (که به سبب تغییرات سرعت باد روی می‌دهد)، سیستم توربین بادی را برای بهبود عملکرد در حالت گذرا کنترل کند. ایده کنترل تکمیلی که قبل از این برای نیروگاه‌های آبی و حرارتی مورد استفاده قرار گرفته [۱۰]، در این مقاله برای توربین‌های بادی به‌کار رفته است و در ضمن، مولد سیگنال مرجع برای توربین بادی سرعت متغیر با تغییر زاویه پیچش پره‌ها نیز یک روش طراحی جدید برای کنترل مولد توربین بادی است.

۲. مدل‌سازی سیستم

در این بخش، مدل یک ژنراتور القایی قفس سنجابی سرعت متغیر که از یک سو توسط جعبه‌دنده به توربین بادی سه‌پره‌ای با محور افقی، کوپل مکانیکی شده است و از سوی دیگر با یک مبدل الکترونیک قدرت PWM به خط انتقال قدرت متصل است، ارائه می‌شود. در شکل (۱) طرح‌واره جعبه‌ای ساده‌ای از این مولد توربین بادی نشان داده شده است. قسمت‌های اصلی مدل مولد توربین بادی عبارت‌اند از: مولد شکل موج باد، توربین بادی (روتور)، جعبه‌دنده و محور انتقال قدرت مکانیکی، ژنراتور آسنکرون سرعت متغیر، مبدل الکترونیک قدرت PWM، بار محلی، ترانسفورماتور، خط انتقال و شین بی‌نیات. در ابتدا مدل هر یک از این قسمت‌ها به‌صورت جداگانه ارائه و سپس مدل کلی سیستم بیان می‌شود.

1. Direct Current
2. Proportional Integral Derivative
3. Radial Basis Function
4. Double fed Induction Generator
5. Variable Speed Cage Mashine
6. Pulse Width Modulation



شکل (۱): مدل توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور قفس سنجایی سرعت متغیر

۱.۲. مدل شکل موج باد

در صورتی توربین می‌تواند این انرژی را از باد بگیرد که سرعت باد پس از عبور از توربین صفر شود. اما در عمل، چنین چیزی محال است و باد پس از عبور از توربین، فقط مقدار کمی از سرعت خود را از دست می‌دهد. بنابراین تمام انرژی فوق را هرگز نمی‌توان به دست آورد. برای بیان درصدی از انرژی فوق که توربین می‌تواند مهار کند، پارامتر ضریب توان، C_p تعریف می‌شود؛ از این رو:

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A V_w^3 \quad (5)$$

برای گشتاور مکانیکی توربین نیز می‌توان رابطه زیر را به دست آورد:

$$T_{mech} = \frac{1}{2} \rho C_p A R V_w^2 / \lambda \quad (6)$$

یک خصوصیت C_p این است که به سرعت روتور توربین بستگی دارد؛ یعنی $C_p = f(\omega_t)$ که ω_t سرعت زاویه‌ای چرخش روتور توربین است. این نکته معمولاً با منحنی C_p برحسب λ ، سرعت نسبی نوک پره^۲ (TSR) نشان داده می‌شود. به عنوان نسبت سرعت خطی نوک پره توربین به سرعت باد به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{V_w} \quad (7)$$

ضریب توان C_p علاوه بر λ ، به زاویه پیش پره‌های توربین β نیز بستگی دارد. زاویه β که زاویه فراز توربین نیز گفته می‌شود، به عنوان زاویه‌ای تعریف می‌شود که پره توربین می‌تواند حول محور طولی خود بپیچد. در بسیاری از توربین‌های مدرن کنونی، امکان تغییر زاویه پیش پره‌ها وجود دارد. $C_p(\lambda, \beta)$ برای توربین‌های مختلف متفاوت است و توسط تولیدکنندگان توربین به صورت منحنی ارائه می‌شود. علاوه بر آن، کوشش‌هایی برای برآزش یک معادله ریاضی بر این منحنی‌ها نیز صورت گرفته است. معادله زیر در [۷] برای بیان ارتباط C_p با λ و β معرفی شده که در آن، β برحسب درجه است. منحنی متناظر این معادله به ازای زوایای صفر تا ۲۰ درجه در شکل (۲) رسم شده است.

سرعت باد پیوسته در حال تغییر است و اندازه آن در هر بازه زمانی، یک متغیر تصادفی است. برای شبیه‌سازی سرعت باد لازم است فرضیات ساده کننده‌ای در نظر گرفته شود. یک روش رایج ساده‌سازی این است که فرض شود میانگین سرعت باد برای یک بازه زمانی مشخص (مثلاً برای هر ده دقیقه) ثابت است. کمسیون بین‌المللی الکتروتکنیک استفاده از توزیع احتمالی رایللی^۱ را برای شکل موج باد پیشنهاد کرده است [۱۱]. معمولاً برای شبیه‌سازی شکل موج باد، به مقدار تصادفی با میانگین متغیر، اغتشاشات سینوسی نیز اضافه می‌کنند. یک فرمول پیشنهادی برای سرعت باد به شکل زیر است:

$$V_w = x(1 - 0.05 \cos(2\pi/20) - 0.05 \cos(2\pi/600)) \quad (1)$$

که x یک متغیر تصادفی است که از شبیه‌سازی مونت کارلو به دست می‌آید. برای مطالعه حالت ماندگار می‌توان از اغتشاشات سینوسی صرف نظر کرد، درحالی‌که برای مطالعه حالت گذرا می‌توان مقدار میانگین را ثابت فرض کرد.

۲.۲. مدل توربین

تمام انرژی جنبشی به دست آمده از باد در واحد زمان (توان)، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_t = \frac{1}{2} m_t V_w^2 \quad (2)$$

m_t نرخ عبور هوا از سطح مقطع مورد نظر برحسب $\text{Kg} \cdot \text{sec}^{-1}$ و V_w سرعت باد برحسب $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ است. نرخ جرم عبور هوا از سطح مقطع جاروب شده، A توسط پره‌های توربین بادی با شعاع R عبارت است از:

$$m_t = \rho \times (\text{Volume per sec}) = \rho A V_w \quad (3)$$

بنابراین:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad (4)$$

موقعیت روتور و به صورت متغیر با زمان تغییر می‌کند. برای غلبه بر این مشکل معمولاً از تبدیل پارک^۲ استفاده می‌شود. اگر این تبدیل به کار رود، معادلات نهایی ژنراتور با فرض اینکه بار آن متقارن باشد، به صورت زیر خواهد بود [۱۳]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{ds} &= v_{ds} - R_s i_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} \\ \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{qs} &= v_{qs} - R_s i_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} \\ \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{dr} &= -R_r i_{dr} + \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \psi_{qr} \\ \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{qr} &= -R_r i_{qr} - \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \psi_{dr} \end{aligned} \quad (10)$$

همانطور که در بخش ۳.۲ گفته شد، معادلات دینامیک روتور را نیز می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + D \cdot \omega_r \quad (11)$$

در [۷] نشان داده شده است:

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{4} PL_m (i_{dr} \cdot i_{qs} - i_{qr} \cdot i_{ds}) \\ &= \frac{3P}{4 \cdot \omega_b} (i_{qs} \cdot \psi_{ds} - i_{ds} \cdot \psi_{qs}) \end{aligned} \quad (12)$$

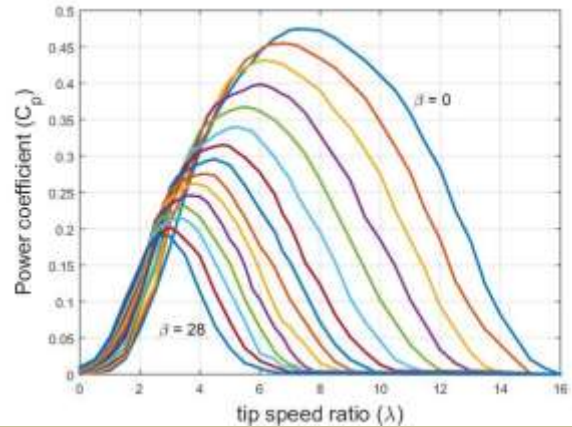
که P تعداد قطب‌های ژنراتور القایی است.

۵.۲. مدل مبدل الکترونیک قدرت PWM

مبدل الکترونیک قدرت که در شکل (۱) نشان داده شده، یک مبدل دوطرفه است که با روش مدولاسیون پهنای پالس کنترل می‌شود. منظور از مبدل الکترونیک قدرت دوطرفه این است که یک یکسوکنده و یک اینورتر از طریق پیوند DC به هم کوپل شده‌اند و توان الکتریکی می‌تواند در هر دو سو منتقل شود.

از آنجاکه سرعت ژنراتور و در نتیجه، فرکانس برق تولیدشده در آن متغیر است، یکسوکنده، انرژی الکتریکی با فرکانس متغیر تولیدی توسط ژنراتور VSCM را یکسو می‌کند و این ولتاژ یکسوشده توسط خط DC به اینورتر منتقل می‌شود. اینورتر نیز ولتاژ DC را به AC با فرکانس ثابت (فرکانس خط انتقال) تبدیل می‌کند؛ یعنی مبدل سمت استاتور ضمن تأمین توان رآکتیو موردنیاز، تمام توان اکتیو تولیدشده به وسیله ژنراتور را نیز منتقل می‌کند. مبدل سمت خط نیز توان اکتیو تولیدشده را با ضریب توان یک به شبکه تزریق می‌کند و ولتاژ خط DC را تنظیم می‌نماید. هدف نیز ثابت نگه داشتن فرکانس و دامنه ولتاژ خروجی اینورتر PWM است. مزیت استفاده از مبدل PWM

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} \right] - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (8)$$



شکل (۲): منحنی ضریب توان آیرودینامیکی توربین

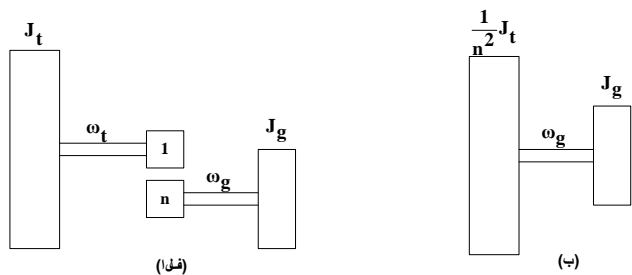
۳.۲. مدل محور انتقال قدرت و جعبه‌دنده

محور انتقال قدرت^۱ مشتمل بر اینرسی پره‌های توربین (J_a)، اینرسی ژنراتور (J_g) و جعبه‌دنده است که در شکل (۳-الف) دیده می‌شود. اگر مانند شکل (۳-ب) تمام مقادیر پارامترها به سمت کم‌سرعت (توربین) منتقل شوند، معادله گشتاور برای تمام سیستم به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = (T_m - T_e) / J \quad (9)$$

$$J = J_a / n^2 + J_g$$

که ω_r سرعت زاویه‌ای ژنراتور و T_m و T_e به ترتیب گشتاور مکانیکی و الکتریکی ژنراتور و n نسبت جعبه‌دنده است.



شکل (۳): محور انتقال قدرت توربین

۴.۲. مدل ژنراتور

مدل ژنراتور القایی روتور قفس سنجابی، پیچیده‌ترین قسمت مدل مولد بادی است؛ چون اندوکتانس متقابل روتور و استاتور بسته به

که عبارت‌اند از: چهار تا شارهای پیوندی ژنراتور آسنکرون که در روابط ۱۰ تعریف شدند، یک متغیر حالت از سرعت گردش روتور (ω_r) و متغیر حالت دیگر از زاویه پیچش پره‌های توربین (β). بنابراین بردار متغیرهای حالت به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \\ \omega_r \\ \beta \end{bmatrix} \quad (15)$$

ورودی‌های سیستم عبارت‌اند از: ولتاژ شین بی‌نهایت، مقادیر مرجع مؤلفه‌های d و q جریان‌های یکسوکننده و اینورتر PWM، سرعت باد و سیگنال فرمان زاویه پیچش پره‌ها. بنابراین بردار ورودی‌ها را به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_B \\ i_{qrec}^* \\ i_{drec}^* \\ i_{qinv}^* \\ i_{dinv}^* \\ V_W \\ \beta_u \end{bmatrix} \quad (16)$$

مؤلفه‌های d و q جریان‌های اندازه‌گیری شده ورودی یکسوکننده و خروجی اینورتر PWM که باید پس‌خور شوند نیز به‌عنوان چهار خروجی انتخاب شده‌اند. خروجی‌های دیگر عبارت‌اند از: مقادیر اندازه‌گیری شده زاویه پیچش، سرعت گردش روتور، گشتاور مکانیکی توربین و گشتاور الکتریکی ژنراتور. به‌علاوه، توان الکتریکی حقیقی و ظاهری ژنراتور نیز به‌عنوان دو خروجی سیستم در نظر گرفته شده‌اند. البته شایان ذکر است که تمام خروجی‌های مذکور به‌عنوان خروجی‌های پس‌خورشونده به‌کار نمی‌روند، بلکه برای مشاهده بعضی از این خروجی‌ها در شبیه‌سازی، به معادلات ریاضی آن‌ها نیاز است. در بخش ۵، به انتخاب خروجی‌های مناسب برای طراحی کنترل‌کننده پرداخته شده است.

با توجه به مطالب فوق، معادلات حالت غیرخطی سیستم تجمیع شده را می‌توان بدین صورت نوشت:

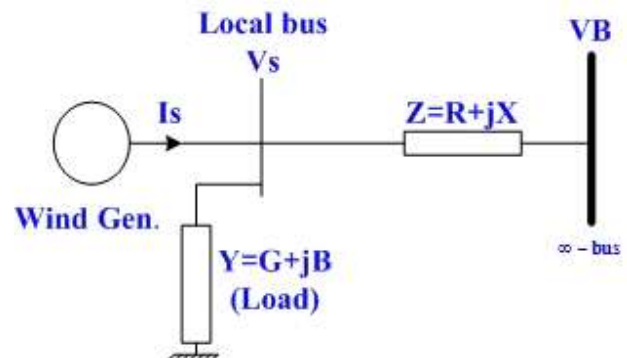
نسبت به سایر اینورترها کاهش هارمونیک در خروجی سیستم است. اگر مطالعه هارمونیک‌ها مدنظر نباشد، یکسوکننده و اینورتر را می‌توان با یک بهره ساده مدل کرد [۱۴]. در این مقاله، از آنجاکه عملکرد بهینه و کنترل هدف اصلی بوده، فقط هارمونیک اول در نظر گرفته شده است؛ از این رو برای مدل کردن یکسوکننده و اینورتر PWM، یک پس‌خور جریان و یک بهره به‌کار رفته است.

۶.۲. مدل خط انتقال

برای شبیه‌سازی ژنراتور القایی و سیستم توربین بادی، به معادله‌ای که بیانگر ارتباط میان i_d, i_q, v_d, v_q باشد، نیاز است. این معادله با توجه به نحوه اتصال سیستم به خط انتقال مطابق شکل (۴)، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I = Y.V + (V - V_B)/Z \quad (13)$$

$$i_d + j i_q = (G + jB).(v_d + j v_q) + (v_d + j v_q - v_{Bd} - j v_{Bq})/(R + jX) \quad (14)$$



شکل (۴): اتصال ژنراتور به شین بی‌نهایت

۳. معادلات حالت تجمیع یافته غیرخطی

در بخش ۲، مدل قسمت‌های مختلف یک واحد توربین بادی سرعت متغیر به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که علاوه بر ژنراتور القایی که با مدل غیرخطی بیان می‌شود، مدل آیرودینامیکی روتور توربین نیز به شدت غیرخطی است؛ به نحوی که ضریب توان آیرودینامیکی توربین (C_p)، با منحنی‌های غیرخطی مانند شکل (۲) بیان می‌شود. از آنجاکه برای طراحی کنترل‌کننده براساس روش‌های مبتنی بر مدل، به مدل ریاضی کاملی از توربین مورد نیاز است، در این قسمت، مدل کامل تجمیع شده غیرخطی یک واحد مولد توربین بادی را وقتی منحنی ضریب توان آیرودینامیکی آن با استفاده از معادله (۸) بیان می‌شود، در فضای معادلات حالت ارائه می‌شود. طرح‌واره جعبه‌ای سیستم در شکل (۵) آمده است.

در مدل فضای حالت تجمیع شده، از ۶ متغیر حالت استفاده شده

۴. کنترل‌کننده اولیه مولد سیگنال مرجع

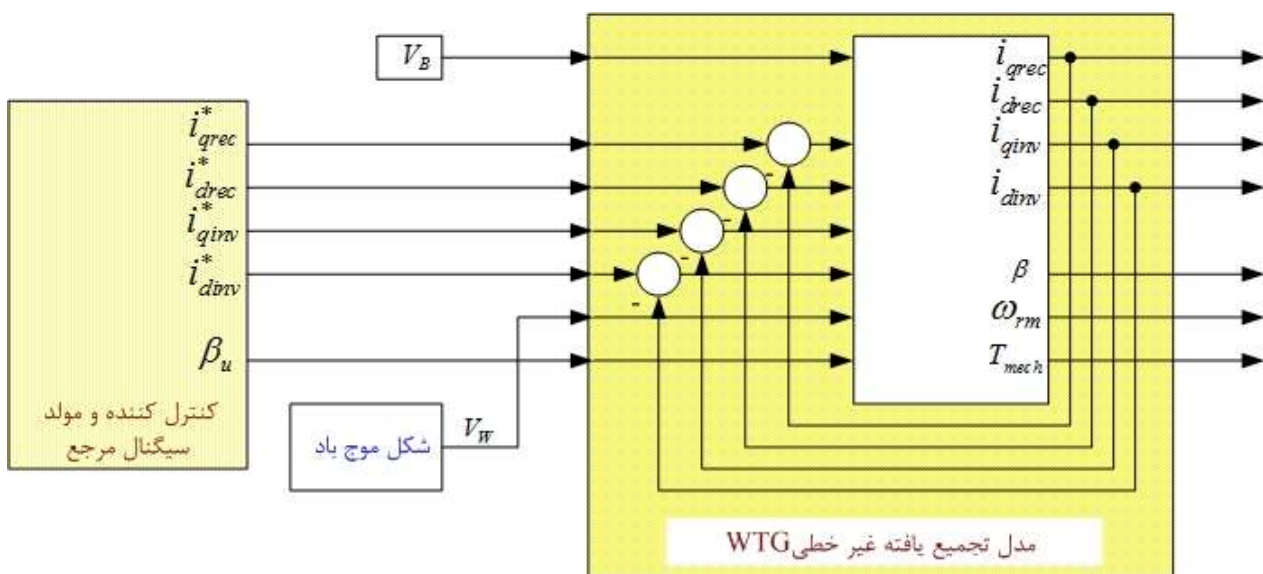
۱.۴. روش طراحی

در این بخش، یک کنترل‌کننده اولیه به نام «مولد سیگنال مرجع»، برای سیستم مولد توربین بادی طراحی می‌شود. هدف مولد سیگنال مرجع این است که در سرعت‌های کم باد، با تغییر سرعت گردش توربین به نحوی که همواره روی منحنی ضریب توان آیرودینامیکی توربین در مقدار λ_{max} قرار گیرد، ماکزیمم توان قابل استحصال از باد به دست آید و در سرعت‌های بالای باد که توان قابل استحصال از باد توسط توربین بیش از توان نامی ژنراتور است و استخراج تمام این توان برای ژنراتور مضر است، با افزایش زاویه پیچش پره توربین، توان استخراج‌شده از باد در حد توان نامی ژنراتور محدود سازد.

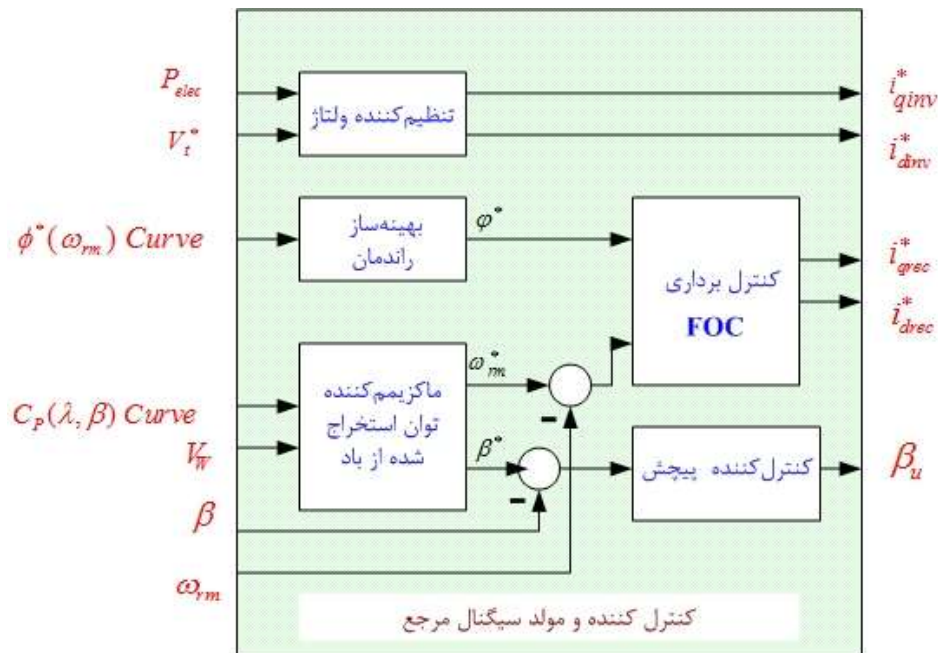
این کنترل‌کننده با توجه به سرعت باد و با استفاده از پس‌خورهایی که از متغیرهای قابل اندازه‌گیری توربین بادی به دست می‌آورد، مقادیر مرجع مناسب را برای مقادیر لحظه‌ای جریان‌های خروجی اینورتر PWM و جریان‌های ورودی یکسوکننده PWM و همچنین مقدار مطلوب زاویه پره‌ها تعیین می‌کند. سیگنال‌های کنترل سیستم عبارت‌اند از مقادیر مطلوب شکل موج جریان‌های (مؤلفه d و q) یکسوکننده و اینورتر و نیز مقدار مطلوب زاویه پیچش پره‌ها (شکل ۵). به دست آوردن این مقادیر بهینه در بلوکی با عنوان مولد سیگنال مرجع انجام خواهد شد (شکل ۶).

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x, u) = f_{11} x_1 + f_{12} x_3 + f_{13} u_3 \\ &\quad + x_2 x_5 + x_2 \frac{f_{14} x_2 + f_{15} x_4}{g_{21} x_1 + g_{22} x_3} \\ \dot{x}_2 &= f_2(x, u) = f_{21} x_2 + f_{22} x_4 + f_{23} u_2 \\ &\quad - x_1 x_5 + x_1 \frac{f_{24} x_2 + f_{25} x_4}{g_{21} x_1 + g_{22} x_3} \\ \dot{x}_3 &= f_3(x, u) = f_{31} x_1 + f_{32} x_3 \\ &\quad + x_4 \frac{f_{33} x_2 + f_{34} x_4}{g_{21} x_1 + g_{22} x_3} \\ \dot{x}_4 &= f_4(x, u) = f_{41} x_2 + f_{42} x_4 \\ &\quad + x_3 \frac{f_{43} x_2 + f_{44} x_4}{g_{21} x_1 + g_{22} x_3} \\ \dot{x}_5 &= f_5(x, u) = f_{51} x_1 x_4 + f_{52} x_2 x_3 + f_{53} x_6 u_6^2 \\ &\quad + f_{54} \frac{u_6^3}{x_5} \sin\left(\frac{x_5}{u_6 (f_{55} + f_{57} x_6)}\right) \\ &\quad + f_{56} \frac{x_6 u_6^3}{x_5} \sin\left(\frac{x_5}{u_6 (f_{55} + f_{57} x_6)}\right) \\ \dot{x}_6 &= f_6(x, u) = f_{61} x_6 + f_{62} u_7 \end{aligned} \tag{۱۷}$$

که f_{ij} ضرایب معادلات حالت غیرخطی هستند.



شکل (۵): طرح‌واره جعبه‌ای سیستم تجمیع‌یافته غیرخطی توربین بادی



شکل (۶): طرح‌وارهٔ جعبه‌ای واحد مولد سیگنال مرجع

به ناحیهٔ سوم نیز که دیگر هدف در آن مهار کردن بیشترین مقدار توان از باد نیست بلکه هدف، کاهش مقدار توان استخراج شده در حد توان نامی سیستم ژنراتور است، ناحیهٔ محدودسازی توان^۲ گفته می‌شود. برای این منظور ضریب توان آیرودینامیکی توربین کاهش می‌یابد. این ناحیه از سرعت نامی باد شروع می‌شود و تا سرعت قطع بالای باد ادامه می‌یابد.

طراحی واحد مولد سیگنال مرجع، با در نظر گرفتن اهداف یادشده و براساس یک ساختار سلسله‌مراتبی در سه مرحله صورت می‌گیرد. در ادامه، هر کدام از این مراحل توضیح داده می‌شود.

الف. مرحلهٔ اول

با مشخص بودن اهداف کنترل (استحصال ماکزیمم توان، کمینه‌سازی تلفات توان در ژنراتور القایی و کنترل ولتاژ شین محلی در مقدار مطلوب) و نیز با داشتن پارامترهای مشخصهٔ سیستم توربین، می‌توان مقدار مطلوب سرعت روتور (ω_m^*)، مقدار مطلوب زاویهٔ پیچش پره‌ها (β^*)، مقدار مطلوب شار (φ_m^*) و مقدار مطلوب توان رآکتیو مصرف‌شده یا تحویل‌شده توسط شبکه (Q^*) را محاسبه کرد. روش به‌دست آوردن مقادیر مطلوب برای یکایک این سیگنال‌های مرجع به شرح زیر است:

الف-۱. به‌دست آوردن مقادیر مرجع سرعت روتور (ω_m^*) و زاویهٔ پیچش پره‌ها (β^*)

اساساً عملکرد توربین با توانایی استخراج بیشترین توان ممکن از

طراحی واحد مولد سیگنال مرجع براساس یک ساختار سلسله‌مراتبی و در سه مرحله صورت می‌گیرد.

برای روشن شدن استراتژی کنترل، مقادیر مطلوب برای تنظیم سرعت گردش توربین (ω_r) و زاویهٔ پیچش پره‌های آن (β)، به‌ازای سرعت‌های متفاوت باد در جدول (۱) نشان داده شده است [۱۶]. برای تعیین این نقاط کار مطلوب، از اطلاعات توربین و ژنراتور که در ضمیمه آمده، استفاده شده است. این نقاط عملکرد به‌عنوان مقادیر مرجع برای متغیرهای یادشده به‌کار گرفته خواهند شد تا در تمام گسترهٔ سرعت باد، راهبرد کنترلی فوق اعمال شود.

جدول (۱): خلاصه استراتژی کنترل در سه ناحیه

نام ناحیه	از سرعت	تا سرعت	مرجع سرعت	مرجع β
قطع پایین	صفر	۵		
ناحیهٔ ۱	۵	۸/۵۳	رابطه (۷)	صفر
ناحیهٔ ۲	۸/۵۳	۱۲	سرعت نامی	بیشترین
ناحیهٔ ۳	۱۲	۲۵	سرعت نامی	ضریب توان
قطع بالا	۲۵			توان نامی

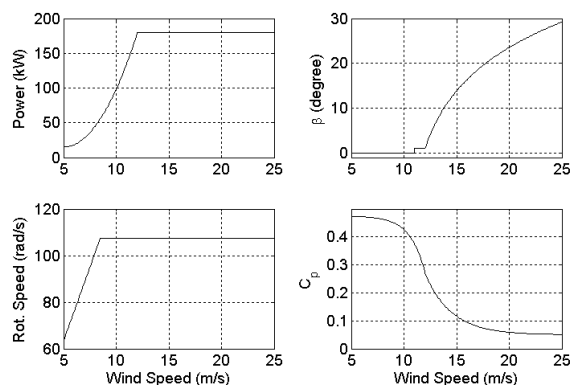
به نواحی اول و دوم که هدف در آن‌ها استخراج بیشترین توان ممکن از جریان هوا از طریق افزایش ضریب توان آیرودینامیکی توربین است، ناحیهٔ ماکزیمم‌سازی توان^۱ نیز گفته می‌شود. این دو ناحیه از سرعت قطع پایین باد شروع می‌شوند و تا سرعت نامی باد ادامه می‌یابند.

سرعت نامی افزایش می‌یابد، به حالت استال^۱ وارد می‌شوند. امروزه کنترل استال بیشتر برای توربین‌های سرعت ثابت به کار می‌رود. در این حالت هیچ سیستم کنترل فعالی به کار نمی‌رود و مقدار C_p نیز به زاویه پیچش پره‌ها وابسته نیست.

در توربین‌هایی که در آنها از کنترل زاویه پیچش پره‌ها استفاده می‌شود، هنگامی که سرعت باد به مقادیر بالای سرعت نامی افزایش می‌یابد، مقدار β را می‌توان طوری تنظیم کرد که توان استخراج شده از توربین از مقدار توان نامی ژنراتور بالاتر نرود. پیچانیدن پره‌ها در خلاف جهت باد و با استفاده از مکانیسم هیدرولیکی یا موتورهای الکتریکی انجام می‌گیرد. در مقایسه با کنترل استال، کنترل زاویه پیچش پره‌ها، احتیاج به سیستم کنترل فعال برای چرخاندن پره‌ها دارد.

وقتی سرعت باد بسیار زیاد می‌شود، انرژی موجود در جریان هوا و همچنین بار مکانیکی وارد بر توربین بسیار زیاد می‌شود و لذا توربین را از مدار عملکرد خارج می‌کنند. بسته به اینکه توربین بادی با توجه به شرایط محل نصب، برای سرعت‌های پایین یا بالای باد بهینه‌سازی شده باشد، سرعت قطع بالای آن بین ۱۷ تا ۳۰ متر بر ثانیه خواهد بود.

برای روشن شدن استراتژی کنترلی به کار رفته در این مقاله، مقادیر مطلوب انتخاب شده برای تنظیم سرعت گردش توربین، ω_r و زاویه پیچش پره‌های آن، β ، به‌ازای سرعت‌های متفاوت باد در شکل (۷) نشان داده شده است. برای تعیین این نقاط کار مطلوب، از اطلاعات توربین و ژنراتور که در ضمیمه آمده است، استفاده شده است. این نقاط عملکرد، به‌عنوان مقادیر مرجع برای متغیرهای یاد شده به کار گرفته خواهند شد، تا در تمام گستره سرعت باد، راهبرد کنترلی فوق اعمال شود.



شکل (۷): منحنی‌های نقاط کار بهینه توربین بادی

درضمن، سرعت قطع پایین باد 5 m.s^{-1} و سرعت قطع بالای آن

باد توسط توربین مشخص می‌شود. در سرعت‌های باد کمتر از سرعت قطع پایین که معمولاً سرعتی میان ۳ تا ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود، توربین اصلاً توانی تولید نمی‌کند؛ زیرا جریان هوا انرژی کمی در بر دارد و لذا توانایی به حرکت درآوردن پره‌های توربین با اینرسی زیاد را ندارد.

همان‌طور که از منحنی ضریب توان آیرودینامیکی توربین (شکل (۲)) مشاهده می‌شود، برای سرعت‌های کم باد (بالاتر از سرعت قطع پایین) عملکرد بهینه توربین در حالتی است که با C_p ماکزیمم کار کند. در طول این مدت، لزومی به تغییر زاویه β نیست. از آنجاکه $\lambda = \frac{R\omega}{V_w}$ است، در صورت افزایش سرعت باد می‌توان با افزایش سرعت گردش توربین، λ را در همین مقدار بهینه، ثابت نگه داشت تا جایی که سرعت توربین به سرعت نامی ژنراتور برسد. از این پس هرچه سرعت باد افزایش یابد، سرعت گردش توربین ثابت نگه داشته می‌شود؛ بنابراین λ در مقداری کمتر از λ_{max} قرار می‌گیرد. ولی می‌توان با تنظیم مقدار β^* در زاویه‌ای که ضریب توان آیرودینامیکی بیشتری را به‌ازای این مقدار جدید λ نتیجه می‌دهد، باز هم بیشترین مقدار توان را از باد استخراج کرد.

میان سرعت قطع پایین و سرعت نامی باد، توان تولیدشده مستقیماً وابسته به سرعت باد است، البته نه متناسب با آن، بلکه همان‌طور که می‌توان از معادله (۵) دریافت، توانی که می‌تواند از باد استخراج شود متناسب با توان سوم سرعت باد افزایش می‌یابد. سرعت نامی باد یعنی سرعتی که در آن توان نامی توربین به دست می‌آید معمولاً میان 11 m.s^{-1} تا 16 m.s^{-1} است. اما مقدار دقیق آن بستگی به قطر روتور توربین و توان نامی ژنراتور دارد که به‌عنوان یک پارامتر طراحی برای بهینه‌سازی توربین با توجه به شرایط منطقه نصب توربین، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، سرعت نامی باد ۱۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

وقتی سرعت باد به مقادیری بیش از سرعت نامی باد افزایش می‌یابد، توان تولید شده نمی‌تواند بیشتر افزایش یابد، به دلیل اینکه این امر باعث افزایش بار^۱ ژنراتور و کنورتر می‌شود.

بنابراین بازده آیرودینامیکی روتور باید کاهش یابد، تا توان استخراج شده از باد، به توان نامی ژنراتور محدود شود و این متناظر با کاهش ضریب کارایی، C_p ، توربین است.

در توربین‌هایی که امکان پیچش پره‌ها وجود ندارد، پره‌های روتور جوری طراحی می‌شوند که هنگامی که سرعت باد به مقادیر بالای

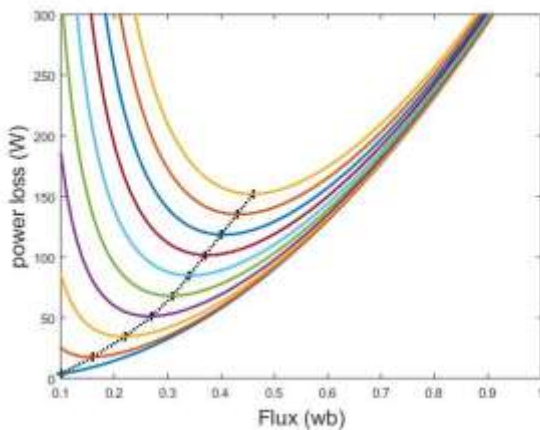
توسط توربین از باد استخراج شود. در ناحیه سوم، می توان از پسخور توان الکتریکی تولیدشده توسط توربین نیز برای کنترل توان بهره برد.

الف-۲. به دست آوردن مقدار مرجع شار ژنراتور القایی (φ_m^*)

هنگامی که مقدار مطلوب سرعت روتور تعیین شد، می توان مقدار مرجع شار در ماشین القایی را برای دستیابی به بازدهی بیشتر تعیین کرد. با استفاده از منحنی تلفات توان برحسب سرعت در ژنراتور القایی که در شکل (۹) آمده و با مشخص بودن سرعت روتور می توان شاری را که تلفات توان ژنراتور در آن کمترین مقدار است (φ_m^*) تعیین کرد.

الف-۳. به دست آوردن مقدار مرجع توان رآکتیو (Q^*):

تنظیم توان رآکتیو اینورتر را می توان برای کنترل افزایش ولتاژ شین محلی به کار برد. با دانستن توان اکتیو تولیدشده و نیز مقدار مطلوب ولتاژ، می توان برای آنالیز گذر بار^۱ در شین محلی سمت شبکه، آن را به صورت یک شین PV بیان نمود و از آنجا مقدار مطلوب توان رآکتیو را محاسبه کرد. واضح است که خط انتقال، بار محلی و سایر ساختارها (مانند شین های دیگر و سیستم های تولید) که در سیستم خارجی در نظر گرفته شده اند، بر نتایج این محاسبه تأثیر خواهند گذاشت.



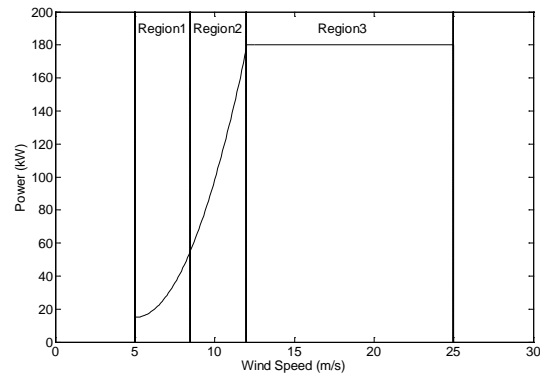
شکل (۹): منحنی تلفات توان در سرعت های (گشتاورهای) مختلف ژنراتور

ب. مرحله دوم

با مشخص شدن مقادیر مطلوب سرعت روتور (ω_m^*)، شار (φ_m^*) و توان رآکتیو (Q^*) و نیز با داشتن پارامترهای سیستم مولد توربین بادی، می توان مقادیر لحظه ای مطلوب مؤلفه های d و q جریان خروجی اینورتر و جریان ورودی یکسوکننده را به دست آورد.

25 m.s^{-1} در نظر گرفته شده است. در سرعت های باد کمتر از سرعت قطع پایین و بیشتر از سرعت قطع بالا، توربین به وسیله ترمز مکانیکی کاملاً از حرکت بازمی ایستد.

در شکل (۸) مشخص شده است که با توجه به سرعت باد، سه ناحیه مجزا برای کنترل توربین وجود دارد.



شکل (۸): نواحی مختلف کنترل توربین بادی

در ناحیه اول، ناحیه سرعت کم باد، از تنظیم سرعت توربین به منظور قرار گرفتن در بهترین نقطه عملکرد (C_{Pmax}) استفاده می شود. با توجه به اینکه ماکزیمم منحنی $\beta = 0^\circ$ از ماکزیمم همه منحنی های دیگر بالاتر است، در این ناحیه، زاویه پیچش پره ها در مقدار بهینه $\beta^* = 0^\circ$ ثابت نگه داشته می شود. تا زمانی که سرعت گردش توربین (ژنراتور) به سرعت نامی آن برسد، می توان در این ناحیه باقی ماند. با توجه به اینکه سرعت نامی ژنراتور القایی در نظر گرفته شده در این مقاله $107/5 \text{ rad.s}^{-1}$ است و نیز $\lambda_{max} = 7/25$ است، در سرعت باد برابر با $8/53$ متر بر ثانیه، توربین به سرعت نامی خود خواهد رسید.

در ناحیه دوم، ناحیه سرعت متوسط باد، سرعت ژنراتور کنترل می شود تا در مقدار نامی اش بماند؛ ولی برای استخراج توان ماکزیمم از باد می توان در صورت لزوم، زاویه پیچش پره توربین را تغییر داد. این ناحیه نیز تا سرعت نامی باد که توان استخراج شده از باد توسط توربین به توان نامی ژنراتور می رسد، ادامه می یابد. در اکثر توربین های واقعی، سرعت نامی باد برابر 12 m.s^{-1} است. در اینجا نیز سرعت نامی باد همین مقدار فرض شده است.

در ناحیه سوم، ناحیه سرعت زیاد باد، باز هم سرعت ژنراتور در مقدار نامی اش ثابت نگه داشته می شود؛ ولی چون از این پس با افزایش سرعت باد، توان قابل استحصال از آن توسط توربین نیز افزایش می یابد، زاویه پیچش پره توربین به نحوی تنظیم می شود که مقدار C_p کاهش یابد و در هر سرعتی از باد، معادل توان نامی ژنراتور

(۱۶) و با مشخص بودن مقدار مطلوب شار پیوندی، می‌توان در هر لحظه مقدار مطلوب جریان (i_{qrec}^*) را به‌دست آورد. مقدار مطلوب گشتاور الکتریکی نیز از طریق کنترل سرعت به‌دست می‌آید؛ یعنی با به‌دست‌آوردن خطای سرعت و با استفاده از یک کنترل‌کننده PI می‌توان مقدار مطلوب گشتاور را هم تعیین کرد.

بنابراین به کمک معادلات (۱۸) تا (۲۱) و با استفاده از زاویه شار روتور، به‌راحتی می‌توان مقادیر مطلوب ω_m^* و φ_m^* را به مقادیر مطلوب i_{drec}^* و i_{qrec}^* تبدیل کرد. جزئیات این تبدیلات در مراجع [4] و [۹] آمده است.

۲- به‌دست‌آوردن مقدار مطلوب جریان‌های خروجی اینورتر (i_{dinv}^* و i_{qinv}^*)

اینورتر باید توان اکتیو تولیدشده توسط ژنراتور (P^*) را به خط انتقال منتقل کند و همچنین مقدار مطلوب توان راکتیو را تنظیم نماید. در هر لحظه، توان خروجی ژنراتور القایی (P^*) را می‌توان اندازه گرفت. با داشتن مقادیر P^* و Q^* نیز می‌توان مقادیر مطلوب جریان‌های خروجی اینورتر (i_{dinv}^* و i_{qinv}^*) را محاسبه کرد. P^* را همچنین می‌توان با اندازه‌گیری سطح DC ولتاژ خروجی یکسوکننده و مقایسه آن با مقدار مطلوبش محاسبه کرد. سپس خطای حاصل از مقایسه مذکور به یک کنترل‌کننده PI وارد خواهد شد تا P^* را تولید کند. با داشتن مقدار توان اکتیو تولیدشده توسط ژنراتور (P^*) و مقدار مطلوب ولتاژ شین محلی (V^*) و استفاده از رابطه (۲۲) برای زاویه اختلاف فاز میان شین محلی و شین بی‌نهایت (δ)، می‌توان مقدار توان راکتیو مطلوب (Q^*) را محاسبه کرد. که در آن، V_b ولتاژ شین بی‌نهایت است.

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{(P^* - V^{*2} \cdot G)X}{V^* \cdot V_b} \right) \quad (22)$$

ج) مرحله سوم

با مشخص شدن مقادیر بهینه مرجع برای سیگنال‌های i_{drec}^* ، i_{qrec}^* ، i_{dinv}^* ، i_{qinv}^* و β^* و نیز با اندازه‌گیری مقادیر واقعی این متغیرها، کنترل مبدل الکترونیک قدرت PWM و محرک پیچش پره‌ها به‌منظور هدایت سیستم به نقطه عملکرد مطلوب انجام می‌گیرد.

در یکسوکننده، مقادیر لحظه‌ای مطلوب جریان‌های ورودی یکسوکننده (i_{drec}^* و i_{qrec}^*) با مقادیر واقعی‌شان مقایسه می‌شوند، سپس خطای حاصل در یک مدل ساده بهره‌بر برای PWM برای تولید ولتاژ لحظه‌ای ترمینال ماشین القایی به‌کار می‌رود. در اینورتر کنترل‌شده جریان PWM نیز مقادیر لحظه‌ای مطلوب جریان‌های خروجی اینورتر (i_{dinv}^* و i_{qinv}^*) با مقادیر واقعی‌شان مقایسه می‌شوند و سپس خطای حاصل برای محاسبه ولتاژ لحظه‌ای شین محلی به‌کار می‌رود.

در ادامه، مقادیر لحظه‌ای مطلوب جریان‌های ورودی به یکسوکننده (i_{drec}^* ، i_{qrec}^*) و نیز مقادیر لحظه‌ای مطلوب جریان‌های خروجی از اینورتر (i_{dinv}^* ، i_{qinv}^*) با استفاده از ω_m^* ، φ_m^* و Q^* محاسبه می‌شود.

ب- به‌دست‌آوردن مقدار مطلوب جریان‌های ورودی یکسوکننده (i_{drec}^* و i_{qrec}^*)

بهترین راه برای تعیین i_{drec}^* و i_{qrec}^* از روی ω_m^* و φ_m^* از طریق روش کنترل با جهت‌دهی میدان^۱ است. وقتی ماشین با ورودی سینوسی تحریک می‌شود، قاب شار روتور با سرعت سنکرون ولی با زاویه‌ای متفاوت از زاویه شار استاتور می‌گردد. لذا اگر محور d منطبق بر شار روتور فرض و معادلات ماشین به قاب شار روتور تبدیل شود، مؤلفه q شار صفر خواهد شد و این امر باعث ساده‌شدن معادلات خواهد گردید. در این قاب می‌توان معادلات شار و گشتاور را به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\psi_{qr} = x_r \cdot i_{qr} + x_m \cdot i_{qs} = 0 \Rightarrow i_{qr} = -\frac{x_m}{x_r} i_{qs} \quad (18)$$

$$T_e = -\frac{3P}{4} i_{qr} \cdot \psi_{dr} = \frac{3P}{4} \frac{x_m}{x_r} i_{qs} \psi_{dr} \quad (19)$$

$$\omega_r - \omega_e = \frac{R_r}{\psi_{dr}} i_{qr} \quad (20)$$

$$\lambda_{dr} = \frac{R_r \cdot x_m}{R_r + x_r \cdot p} \cdot i_{ds} \quad (21)$$

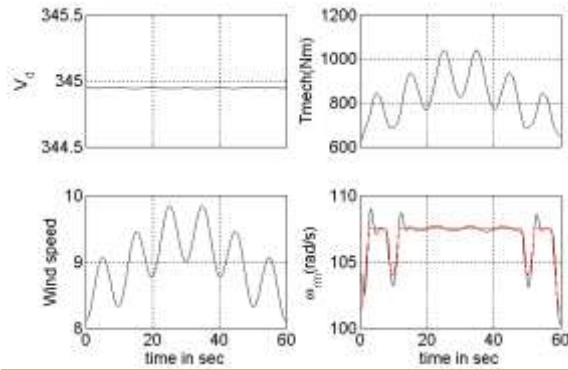
معادلات بالا اساس کنترل با جهت‌دهی میدان (FOC) یا کنترل برداری است. [۹] این روش کنترل ماشین القایی را بسیار ساده‌تر می‌کند. معادلات ماشین القایی در این روش بسیار شبیه یک ماشین DC تحریک مجزاست که در آن، شار به جریان تحریک وابسته است و گشتاور نیز متناسب با شار و جریان آرمیچر است. مسئله اساسی مطرح در کنترل برداری، این است که باید زاویه محورهای شار را تخمین زد. این کار هم با اندازه‌گیری شار در دو نقطه متفاوت (با ۹۰ درجه اختلاف فاز) و هم با تخمین شار با استفاده از اندازه‌گیری سرعت انجام شده است. در روش کنترل با جهت‌دهی میدان، مقادیر متغیرهای سه فاز به قاب گردان شار روتور تبدیل می‌شود. با استفاده از این تبدیل، شار فقط به مؤلفه i_{ds} جریان بستگی خواهد داشت (معادله ۲۱) و گشتاور نیز به شار و مؤلفه i_{qs} جریان (معادله ۱۹).

بنابراین با مشخص بودن مقدار مطلوب شار، φ_m^* (و از آنجا ψ_{dr}^*) می‌توان مقدار مطلوب جریان (i_{drec}^*) را به‌دست آورد. برای به‌دست‌آوردن مقدار مطلوب جریان (i_{qrec}^*) نیز باید ابتدا مقدار مطلوب گشتاور الکتریکی (T_e^*) را تعیین کرد و با استفاده از معادله

شین محلی از طریق یک خط انتقال و بار محلی به شین بی نهایت متصل است.

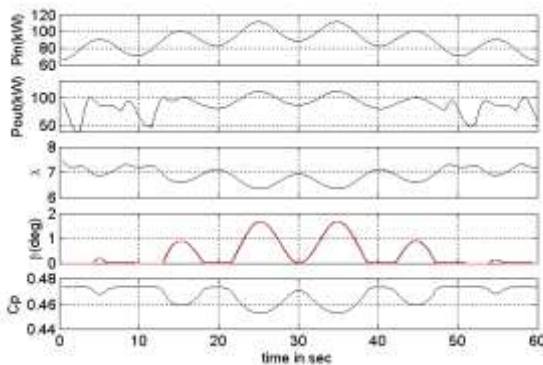
۲.۴. شبیه سازی

در این بخش، با استفاده از مدل ارائه شده در بخش ۲، سیستم حلقه بسته با کنترل کننده طراحی شده در بخش ۳ در سرعت های مختلف باد شبیه سازی شده، نشان داده می شود که اهداف یاد شده در بخش ۱ به خوبی برآورده می شوند. در شکل های (۱۰) و (۱۱) نتایج شبیه سازی به ازای سرعت متغیر باد با میانگین ۷/۴ متر بر ثانیه رسم شده است.



شکل (۱۲): نتایج شبیه سازی با سرعت باد متغیر با میانگین 9 m.s^{-1}

همانطور که ملاحظه می شود در سرعت های باد بالای $8/53$ متر بر ثانیه، سرعت ژنراتور در مقدار نامی آن ثابت نگه داشته شده است. در این شبیه سازی، سرعت باد در دو ناحیه اول و دوم قرار دارد، بنابراین انتظار می رود مواقعی که سرعت باد در ناحیه دوم است، با تغییر زاویه پیدچس پره های توربین، نسبت به زمانی که کنترل پیدچس به کار نمی رود، توان بیشتری از باد استخراج شود. شکل (۱۳) صحت این امر را نشان می دهد.

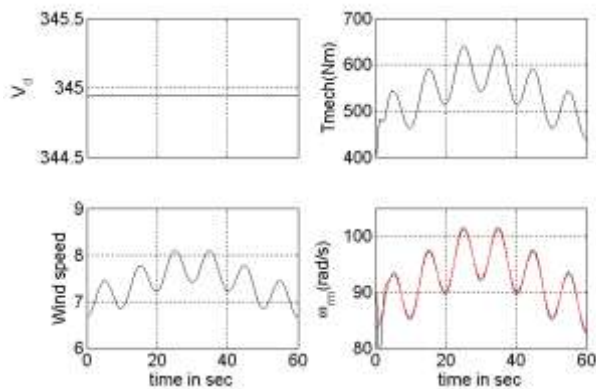


شکل (۱۳): نتایج شبیه سازی با سرعت باد متغیر با میانگین 9 m.s^{-1}

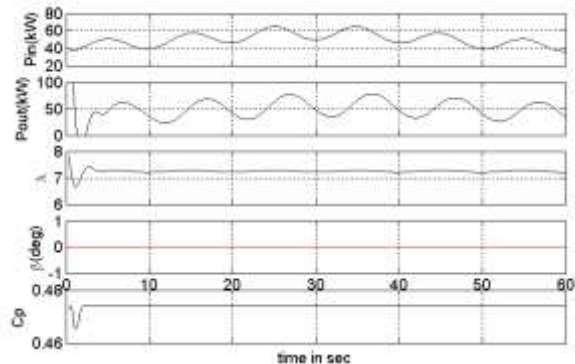
برای مقایسه تأثیر کنترل زاویه پیدچس پره توربین در استخراج توان بیشتر از جریان هوا می توان با محاسبه سطح زیر منحنی توان در هر دو حالت، انرژی به دست آمده را در دو حالت با هم مقایسه کرد. در این شبیه سازی، توان توربین همواره از توان نامی آن (180 کیلووات) کمتر است.

در شبیه سازی بعدی، میانگین سرعت باد $11/5 \text{ m.s}^{-1}$ فرض شده است. در شکل (۱۴) نشان داده شده است که سرعت گردش روتور در سرعت نامی تنظیم شده است.

در شکل (۱۵) نیز تغییرات زاویه پیدچس پره ها نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود در سرعت های کمتر از 12 متر بر ثانیه، زاویه پره ها برای مهار کردن انرژی بیشتر از باد تغییر یافته و در سرعت های بالاتر از 12 متر بر ثانیه، که توان توربین به توان نامی



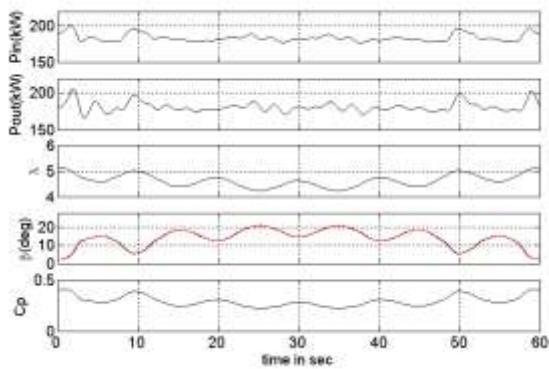
شکل (۱۰): نتایج شبیه سازی با سرعت باد متغیر با میانگین $7/4 \text{ m.s}^{-1}$



شکل (۱۱): نتایج شبیه سازی با سرعت باد متغیر با میانگین $7/4 \text{ m.s}^{-1}$

در این شبیه سازی، سرعت باد تماماً در ناحیه اول بوده است، بنابراین در این ناحیه، نیازی به تنظیم زاویه پیدچس پره توربین نبوده ولی سرعت توربین برای ثابت نگه داشتن سرعت نسبی نوک پره (و در نتیجه، کسب ضریب توان آیرودینامیکی ماکزیمم) در سرعت های مختلف باد تنظیم شده است.

در شکل (۱۲)، نتایج شبیه سازی به ازای سرعت باد متغیر با میانگین 9 m.s^{-1} رسم شده است.



شکل (۱۷): نتایج شبیه‌سازی با سرعت باد با میانگین 13.5 m.s^{-1}

مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه پیچش پره‌ها، توان توربین به‌خوبی در توان نامی نگه داشته شده است. باید توجه داشت که اگر از کنترل زاویه پره‌ها استفاده نمی‌شد، توان مهارشده از باد توسط توربین بسیار بیش از این می‌بود.

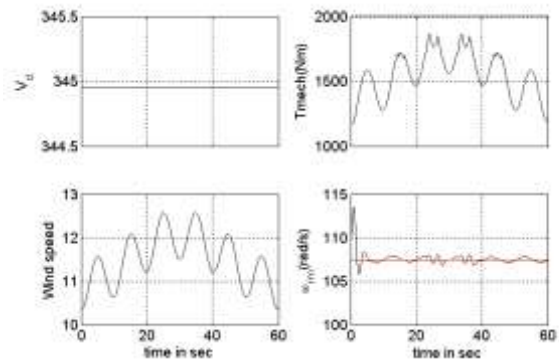
شبیه‌سازی‌ها نشان داد که کنترل‌کننده طراحی شده، به‌خوبی اهداف موردنظر را برآورده می‌سازد. با استفاده از مبدل الکترونیک قدرت PWM به‌خوبی فرکانس و ولتاژ شین محلی در مقدار مطلوب تنظیم شد و با استفاده از کنترل زاویه پیچش پره‌های توربین و نیز کنترل سرعت ژنراتور توان خروجی مولد توربین بادی در حد مطلوب تنظیم گردید؛ به این معنی که در نواحی‌ای که توان توربین هنوز به مقدار نامی آن نرسیده است، با تنظیم سرعت ژنراتور و در صورت لزوم، تنظیم زاویه پره‌ها، حداکثر توان ممکن از باد مهار می‌شود و در نواحی که توان قابل استحصال از باد از توان نامی ژنراتور بیشتر است، با تنظیم زاویه پیچش پره‌ها توان محدود می‌شود. کنترل سرعت ژنراتور القایی قفس سنجابی با استفاده از تئوری کنترل برداری انجام گرفته و نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با توجه به اینرسی زیاد پره‌های توربین (در حدود 5000 برابر اینرسی ژنراتور) کنترل‌کننده طراحی شده به‌خوبی توانسته است سرعت را در مقدار موردنظر تنظیم کند. باید دقت داشت که اینرسی زیاد پره‌های توربین اگرچه باعث کند شدن تنظیم سرعت سیستم می‌شود، این مزیت را نیز دارد که در هنگام افزایش سرعت توربین، انرژی باد به‌صورت انرژی پتانسیل در خود ذخیره و در هنگام کاهش سرعت توربین، به‌صورت انرژی جنبشی آزاد می‌شود. درحقیقت، اینرسی توربین مانند یک اندوکنانس در مدار الکتریکی عمل می‌کند که از آن می‌توان به‌منظور تنظیم توان استفاده کرد.

۵. کنترل‌کننده تکمیلی مقاوم

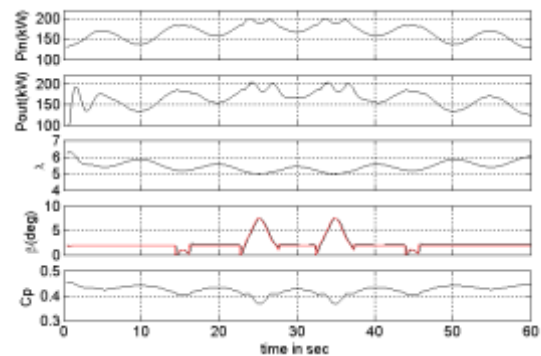
۱.۵. هدف کنترل تکمیلی

هدف از طراحی کنترل‌کننده تکمیلی مقاوم، کمینه‌سازی نرم بی‌نهایت

ژنراتور رسیده است، تغییر زاویه پره‌ها به‌منظور محدودسازی توان استخراج‌شده از باد انجام گرفته است.

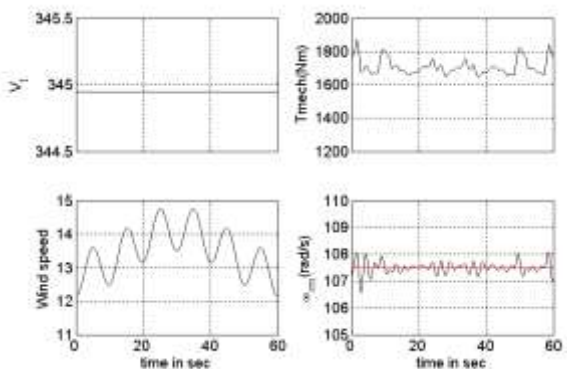


شکل (۱۴): نتایج شبیه‌سازی با سرعت باد با میانگین 11.5 m.s^{-1}



شکل (۱۵): نتایج شبیه‌سازی به‌ازای سرعت باد با میانگین 11.5 m.s^{-1}

شبیه‌سازی بعدی با سرعت باد متغیر با میانگین 13.5 متر بر ثانیه انجام شده؛ در این حالت، سرعت باد همواره در ناحیه سوم عملکرد توربین است و کنترل‌کننده ضمن تنظیم سرعت توربین در سرعت نامی، زاویه پیچش پره‌ها را به‌منظور محدودسازی توان به‌دست‌آمده از انرژی باد تنظیم می‌کند. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) آورده شده است.



شکل (۱۶): نتایج شبیه‌سازی با سرعت باد با میانگین 13.5 m.s^{-1}

$$u = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_w \\ P_{ref} \\ i_{qrec}^* \\ i_{drec}^* \\ \beta_u \\ \Delta i_{qrec}^* \\ \Delta i_{drec}^* \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$y = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_{elec} \\ T_e \\ P_{elec} \\ \omega_{rm} \end{bmatrix} \quad (25)$$

با توجه به معادلات (۲۳) تا (۲۵) ماتریس‌های A و B و C و D

به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & x_2 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & -x_1 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 \\ f_{51}x_4 & f_{51}x_3 & f_{52}x_2 & f_{51}x_1 & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{61} \end{bmatrix} \Big| (x_0, u_0)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & f_{13} & 0 & 0 & f_{13} \\ 0 & 0 & f_{23} & 0 & 0 & f_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_{62} & 0 & 0 \end{bmatrix} \Big| (x_0, u_0)$$

$$C = \begin{bmatrix} -c_{91} & -c_{92} & -c_{93} & -c_{94} & 0 & 0 \\ c_{81} & c_{82} & c_{83} & c_{84} & 0 & 0 \\ c_{91} & c_{92} & c_{93} & c_{94} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_{61} & 0 \end{bmatrix} \Big| (x_0, u_0)$$

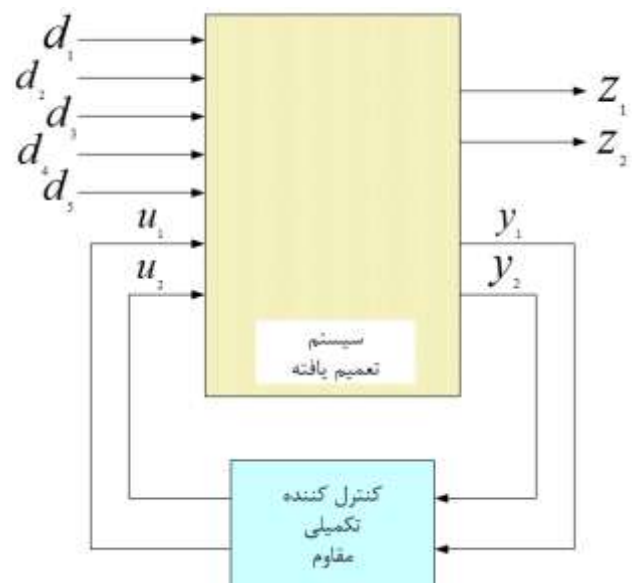
$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -d_{92} & -d_{93} & 0 & -d_{92} & -d_{93} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{92} & d_{93} & 0 & d_{92} & d_{93} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Big| (x_0, u_0) \quad (26)$$

که (x_0, u_0) معرف نقطه کار سیستم است و همه پارامترهای موجود در ماتریس‌های فوق، در هر نقطه کار مقادیر ثابتی خواهند بود.

۲.۵. عدم قطعیت‌های موجود در سیستم

گام نخست در طراحی کنترل‌کننده مقاوم، معرفی عدم قطعیت‌های موجود در سیستم است. معمولاً عدم قطعیت بر پایه کلاس‌های مشخصی از انحرافات (شامل انحرافات غیرپارامتری و انحرافات

توابع تبدیل خروجی‌های (z) به ورودی‌های خارجی (w) یا (d) است. با این هدف که توان الکتریکی تولیدشده از مقدار نامی توان ژنراتور فراتر نرود، سیگنال خطای توان الکتریکی تولیدشده از مقدار نامی، به‌عنوان یک خروجی کمینه‌شونده (z_1) در نظر گرفته می‌شود. در بخش ۴ نشان داده شد که کنترل‌کننده اولیه طراحی شده، مقدار توان الکتریکی را در حالت ماندگار در توان نامی محدود می‌سازد. برای تأمین این هدف در حالت گذرا توسط کنترل‌کننده تکمیلی، مقادیر مرجع جریان‌های ورودی یکسوسکننده به‌عنوان سیگنال‌های کنترل تغییر داده می‌شود. لذا ورودی‌های کنترل (خروجی‌های کنترل‌کننده مقاوم تکمیلی) عبارت‌اند از: $u_1 = \Delta i_{qrec}^*$ و $u_2 = \Delta i_{drec}^*$. دسته دوم ورودی‌ها که ورودی‌های خارجی نامیده می‌شوند نیز عبارت‌اند از: $d_1 = V_w$, $d_2 = P_{ref}$, $d_3 = i_{q r}^*$, $d_4 = i_{d r}^*$ و $d_5 = \beta_u$. خروجی‌های پس‌خورشونده (ورودی‌های کنترل‌کننده تکمیلی) نیز عبارت‌اند از: سیگنال توان الکتریکی (y_1) و سرعت ژنراتور (y_2) . لذا مدل سیستم مولد توربین بادی برای طراحی کنترل مقاوم را می‌توان به صورت شکل (۱۸) نشان داد.

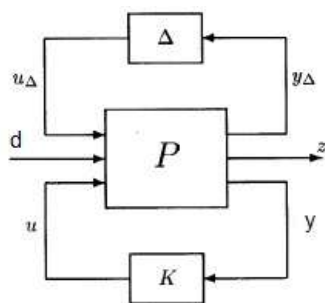


شکل (۱۸): طرح‌واره جعبه‌ای سیستم تعمیم‌یافته توربین بادی

با توجه به معادلات حالت غیرخطی سیستم مولد توربین بادی که در بخش ۳ ارائه شد و با دسته‌بندی ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم به‌نحوی که در بالا توضیح داده شد، معادلات حالت سیستم تعمیم‌یافته را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (23)$$

که در آن، بردار متغیرهای حالت با معادله (۱۵) بیان می‌شود و بردارهای ورودی و خروجی نیز عبارت‌اند از:



شکل (۱۹): ساختار مسئله طراحی کنترل مقاوم

در این طرح‌واره، P دربرگیرنده ساختار سیستم نامی و همه مدل‌های عدم قطعیت پارامتریک است (رابطه ۲۸). مشخصه عملکرد سیستم در برابر دفع اغتشاشات در خروجی نیز که به وسیله وزن W_p مشخص می‌شود، در P داده شده است. این وزن‌ها نقش مهمی در عملکرد کنترل‌کننده ایفا می‌کنند؛ ولی باعث افزایش درجه کنترل‌کننده نیز می‌شوند (درجه کنترل‌کننده برابر با درجه مدل نامی به اضافه درجه وزن‌هاست) لذا بهتر است حتی‌الامکان وزن‌ها از مرتبه پایین‌تر انتخاب شود. تعیین این وزن‌ها بستگی به فیزیک مسئله داشته و بدون انجام شبیه‌سازی‌های مکرر امکان‌پذیر نیست. درضمن، تمام ورودی‌های خارجی سیستم نیز باید نرمالیزه شوند. پس از مشخص شدن سیستم تعمیم‌یافته، به کمک نرم‌افزار MATLAB به طراحی کنترل‌کننده H_∞ برای سیستم مذکور پرداخته می‌شود.

۴.۵. نتایج شبیه‌سازی در حوزه زمان

در این بخش، شبیه‌سازی سیستم مولد توربین بادی با مولد سیگنال مرجع با کنترل‌کننده تکمیلی مقاوم ارائه و نشان داده می‌شود. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، کنترل‌کننده مقاوم می‌تواند توان الکتریکی خروجی مولد توربین بادی را در حالت گذرا به نحو مطلوبی کنترل کند، کما اینکه قبلاً با استفاده از کنترل‌کننده اولیه (مولد سیگنال مرجع) مقدار توان در حالت ماندگار کنترل شد.

در این شبیه‌سازی، سرعت باد را ۱۳ متر بر ثانیه فرض و پس از ۱۵ ثانیه، یک تغییر پالس در سرعت باد اعمال شده است. بر اثر این تغییر سرعت باد، پارامترهای سیستم تغییر خواهند کرد. درحقیقت عملکرد کنترل مقاوم در قبال تغییر پارامترها که ناشی از تغییر سرعت باد است، نشان داده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) و (۲۲) آمده است.

پارامتری) توصیف می‌شود. تعیین نوع عدم قطعیت با مطالعه بر روی سیستم تعیین می‌شود.

از آنجایی که یکی از ویژگی‌های برجسته سیستم توربین بادی، متغیر بودن سرعت باد است؛ از این رو پارامترهای مدل ارائه شده در بخش ۱.۵، تابع نقطه کار و سرعت باد بوده، مقدار معینی نخواهند داشت.

فرض می‌شود که هر کدام از ضرایب و پارامترهای مدل سیستم در بازه‌های مشخصی تغییر کنند. با این نگرش، عدم قطعیت سیستم از نوع ساختاریافته پارامتریک خواهد بود. اگر a_i پارامتر عدم قطعیت‌دار i ام سیستم بوده و a_i^+ و a_i^- به ترتیب مقادیر حد بالا و پایین آن باشند، می‌توان هر کدام از عدم قطعیت‌های سیستم را در بازه تغییراتش به صورت زیر نشان داد:

$$a_i = a_{i0} + \delta_i \Delta a_i \quad |\delta_i| \leq 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, 35 \quad (27)$$

$$a_{i0} = \frac{a_i^+ + a_i^-}{2} \quad \Delta a_i = a_i^+ - a_{i0} = \frac{a_i^+ - a_i^-}{2}$$

با توجه به مطالب فوق و رابطه (۲۷) برای هر عدم قطعیت، ماتریس‌های A و B و C و D را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$A = A_0 + \sum_{i=1}^{35} \delta_i A_i$$

$$B = B_0 + \sum_{i=1}^{35} \delta_i B_i$$

$$C = C_0 + \sum_{i=1}^{35} \delta_i C_i$$

$$D = D_0 + \sum_{i=1}^{35} \delta_i D_i \quad (28)$$

که در آن، A_0 و B_0 و C_0 و D_0 ماتریس‌های نامی سیستم بوده و عناصر ماتریس‌های A_i و B_i و C_i و D_i از مشتق‌گیری مؤلفه‌های ماتریس‌های A و B و C و D نسبت به عدم قطعیت i ام پدید می‌آیند.

۳.۵. فرمول‌بندی مسئله کنترل مقاوم

همان‌طور که گفته شد، هدف از طراحی کنترل‌کننده تکمیلی مقاوم برای یک سیستم مولد توربین بادی، پایداری کل سیستم در حضور عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات سرعت باد و کنترل توان است. توان الکتریکی خروجی توربین و نیز سرعت گردش ژنراتور به‌عنوان سیگنال‌های ورودی به کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شوند.

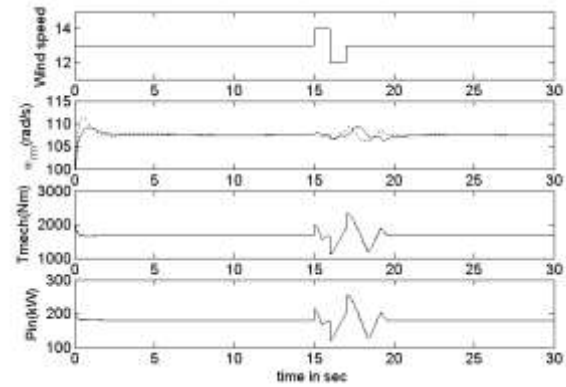
به‌منظور فرموله کردن مسئله طراحی در چارچوب استاندارد H_∞ ، در بخش قبل عدم قطعیت‌ها از سیستم جدا شد. شکل (۱۹) روش صحیح فرمول‌بندی مسئله طراحی کنترل مقاوم را برای این سیستم

کیلووات) محدود شود. در شکل (۲۰) نیز تغییر سرعت گردش ژنراتور در حالت کنترل مقاوم نشان داده شده است. درحقیقت، کنترل‌کننده تکمیلی مقاوم در زمان تغییر سرعت باد با اعمال سیگنال‌های کنترل مناسب به سیستم، سعی در محدود نگه داشتن توان الکتریکی خروجی توربین در مقدار نامی توان ژنراتور دارد.

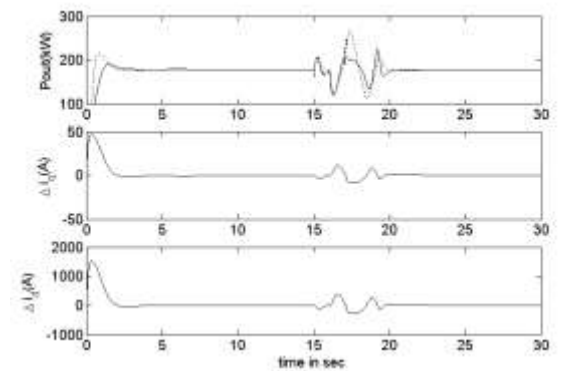
با توجه به اینرسی زیاد پره‌های توربین، تعبیر عملکرد کنترل‌کننده تکمیلی این است که در زمانی که توان ورودی توربین از توان نامی ژنراتور بیشتر است، سیگنال‌های کنترل اعمال شده به سیستم توسط کنترل‌کننده مقاوم (Δi_d و Δi_q) با تغییر مناسب سرعت گردش ژنراتور سعی در ذخیره‌سازی این توان در پره‌های توربین دارند. هنگامی که توان ورودی توربین از توان نامی ژنراتور کمتر می‌شود، با کاهش یافتن سرعت توربین توان ذخیره‌شده در پره‌ها نیز به‌صورت انرژی جنبشی آزاد می‌گردد و در نتیجه، توان خروجی توربین افزوده می‌شود. عملکرد اینرسی زیاد پره‌های توربین را می‌توان مشابه عملکرد اندوکتانس در مدارهای الکترونیکی دانست.

۶. نتیجه‌گیری

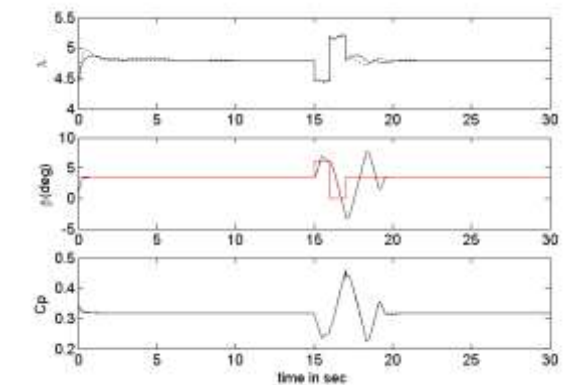
در این مقاله، ابتدا مدل مناسبی برای قسمت‌های مختلف توربین بادی سرعت-متغیر ارائه و سپس کنترل‌کننده «مولد سیگنال مرجع» برای سیستم مولد توربین بادی طراحی شد. سپس با استفاده از مدل خطی شده سیستم توربین بادی، با هدف محدودسازی توان الکتریکی خروجی توربین در توان نامی ژنراتور و نیز محدودسازی تغییرات زیاد گشتاور الکتریکی در سرعت‌های مختلف باد، یک کنترل‌کننده تکمیلی مقاوم H_{∞} برای سیستم مولد توربین بادی طراحی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مولد سیگنال مرجع به‌خوبی، سیستم را به نقاط کار مطلوب هدایت می‌کند و در صورت تغییر سرعت باد، کنترل‌کننده تکمیلی مقاوم طراحی شده، حالت گذرای سیستم را بهبود می‌بخشد. در سیستم‌های توربین بادی با سرعت قابل کنترل، اینرسی زیاد پره‌های توربین نقش مهمی در کنترل سیستم دارد؛ زیرا از طرفی بر اثر اینرسی زیاد، امکان تغییر سریع سرعت وجود ندارد. از طرف دیگر، اینرسی زیاد در سیستم توربین بادی مانند اندوکتانس در مدارهای الکتریکی عمل می‌کند و می‌توان از آن به‌عنوان ذخیره‌کننده انرژی در هنگام افزایش سرعت سیستم (شتاب مثبت) استفاده کرد و در هنگام کاهش سرعت (شتاب منفی) از انرژی ذخیره‌شده در پره‌های توربین برای تأمین توان موردنیاز توربین استفاده نمود.



شکل (۲۰): مقایسه عملکرد کنترل مقاوم (—) با سیستم بدون کنترل مقاوم (---)



شکل (۲۱): مقایسه عملکرد کنترل مقاوم (—) با سیستم بدون کنترل مقاوم (---)



شکل (۲۲): مقایسه عملکرد کنترل مقاوم (—) با سیستم بدون کنترل مقاوم (---)

همان‌طور که در شکل (۲۲) مشاهده می‌شود، سیگنال کنترل خروجی کنترل‌کننده تکمیلی در حالت ماندگار صفر است و در هنگام تغییر سرعت باد، سیگنال کنترل مناسب به سیستم اعمال و باعث می‌شود که توان الکتریکی خروجی مولد توربین بادی که در عدم حضور کنترل‌کننده تکمیلی حتی فراتر از ۲۸۰ کیلووات نیز شده است، حتی‌الامکان در مقدار نامی توان ژنراتور (۱۸۰

۱۸۰ kW	توان نامی
۴۰۰ ولت	ولتاژ نامی
۵۰	فرکانس نامی
۶	تعداد قطب
۱۰۰۰ rpm	سرعت سنکرون
۱۸۰۰ Kg.m ⁻²	اینرسی روتور
۰	میرایی مکانیکی

جدول (۲): پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

توربین	
۲۳/۲ m	قطر روتور
۵۵۵۰۰ Kg.m ⁻²	اینرسی
۲۰	ضریب گیربکس

مراجع

- [1] Aimani, S. E., "Comparison of Control Structures for Variable Speed Wind Turbine", 27th International Conference on Microelectronics (ICM), 2015
- [2] Smida, M.B., Sakly, A., "Different Conventional Strategies of Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines", 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic control and computer engineering- STA'2014, Tunisia.
- [3] Smida, M.B., Sakly, A., "Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines", Journal of Renewable Energy and Sustainable Development (RES D), June 2015.
- [4] Vidal, Y., Acho, L., Luo, N., Zapateiro, M., Pozo, F., "Power Control Design for Variable-Speed Wind Turbines", Energies Journal, Vol. 5, No.8, pp. 3033-3050, 2012.
- [5] Smida, M.B., Sakly, A., "Fuzzy Pitch Angle Control for Grid Connected Variable-Speed Wind Turbine System", 7th International Renewable Energy Congress (IREC), March 2016
- [6] Zhongpeng, L., Feng, H., Shuowen, X., Xuesong, Z., Shilong, Z., Guorui, J., Haitao, D., Jian, F., "Individual Pitch Control of Wind Turbine Based on RBF Neural Network", Proceedings of the 35th Chinese Control Conference July 27-29, 2016, Chengdu, China
- [7] Wang, Y., Wu, Q., Gong, W., Peter, M., Gryning, S., " H_{∞} Robust Current Control for DFIG Based Wind Turbine Subject to Grid Voltage Distortions", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Issue: 99, 2016.
- [8] Simoes, M.G., Bose, B.K., "Fuzzy Logic Based Intelligent Control of a Variable Speed Cage Machine Wind Generation System", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12, No.1, pp. 87-95, Jan 1997.
- [9] Vas, P., "Field Oriented Control", Printce-Hall, 2001.
- [۱۰] کراری، مهدی، «دینامیک و کنترل سیستم‌های قدرت»، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، زمستان ۱۳۸۲
- [11] Karrari, M., Rosehart, W., Malik, O.P., "Comprehensive Control Strategy for a Variable Speed Cage Machine Wind Generation Unit", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No.2, pp. 415-423, may 2005.
- [12] Abdin, E.S., Xu, W., "Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine-Induction Generator Unit", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 15, No.1, pp. 91-96, 2000.
- [13] Ong, C.-M., "Dynamic Simulation of Electric Machinery, Using MATLAB and SIMULINK", Printce-Hall, London, 1997.
- [۱۴] کراوز، پ. سی. «تحلیل ماشین‌های الکتریکی»، ترجمه سقائیان‌نژاد، مرتضی، چاپ اول، اصفهان، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۶.
- [15] Edjtahed, S.H., Karrari, M., Rosehart, W., Malik, O.P., "Nonlinear State Space Modeling of a Variable Speed Wind Power Generation System", IEEE PES General Meeting, 2006.
- [16] Rasila, M., "Torque and Speed Control of a Pitch Regulated Wind Turbine", Msc Thesis, Chalmers University of Technology, Seweden, 2003.