



## ساختار نوین کنترل توربین بادی با ژنراتور سنکرون با هدف کاهش بارگذاری برج

آرش حاتمی<sup>1</sup>، بهنام معتکف ایمانی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی 9177948944، imani@um.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 خرداد 1395

پذیرش: 03 مهر 1395

ارائه در سایت: 05 آبان 1395

کلید واژگان:

کنترل چندمتغیره-تطبیقی

شبیه‌ساز توربین بادی

کاهش بارهای مکانیکی

مدل غیرخطی

در سال‌های اخیر با توجه به کاربرد گسترده توربین‌های بادی، بهبود سیستم کنترلی آن‌ها با هدف کاهش بارهای مکانیکی مورد توجه بوده است. از طرفی در توربین‌های بادی مدرن، ژنراتور سنکرون با تحریک الکتریکی در ساختار درایو مستقیم (بدون گیربکس) به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش، مزیت بهره‌گیری از ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون و زاویه گام پره‌ها در ساختار کنترلی نوین چندمتغیره-تطبیقی توربین بادی مورد تحقیق قرار می‌گیرد. اهداف کنترلی محدود کردن نوسانات سرعت دورانی روتور و کاهش بارهای مکانیکی وارد بر برج می‌باشد. ساختار کنترلی متمرکز بر اساس مدل دینامیکی توربین بادی و با لحاظ کردن اثرات متقابل آیرودینامیکی، ارتعاشاتی و الکتریکی طراحی می‌گردد. تعیین بهره‌های ماتریس کنترلی با توجه به مدل غیرخطی و پیچیده توربین، با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی انجام می‌شود. رفتار آیرودینامیکی پره‌ها تابعی غیرخطی از شرایط کاری می‌باشد و برای دستیابی به رفتار دینامیکی یکنواخت، بهره‌های کنترلی در شرایط مختلف محاسبه و به روش جدول‌بندی بهره پیاده‌سازی می‌گردد. در توربین‌های بادی، عوامل مختلفی همچون دینامیک‌های سیستم الکتریکی، محدودیت‌های کنترل دیجیتال و نویز سیگنال می‌تواند بر عملکرد کنترلی تأثیرگذار باشد. به منظور بررسی این اثرات، شبیه‌ساز توربین بادی توسعه داده می‌شود و عملکرد کنترلگر چندمتغیره-تطبیقی به صورت سخت‌افزار در حلقه مورد تحقیق قرار می‌گیرد. با مقایسه عملکرد کنترلگر طراحی شده و کنترلگر چندمتغیره دو ورودی-یک خروجی در شرایط باد مغشوش، بارهای مکانیکی وارد بر برج به میزان 26 درصد کاهش می‌یابد و در نتیجه عمر برج به عنوان یکی از اجزا اصلی توربین افزایش می‌یابد.

## A novel control structure for wind turbine with synchronous generator for tower load reduction

Arash Hatami, Behnam Moetakef-Imani\*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\* P.O.B. 9177948944, Mashhad, Iran, imani@um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 11 June 2016  
Accepted 24 September 2016  
Available Online 26 October 2016

### Keywords:

Multivariable adaptive control  
Wind turbine simulator  
Mechanical load reduction  
Non-linear model

### ABSTRACT

The attenuation of mechanical load is one of the most effective approaches in wind turbine components cost reduction, and improving the control system reduces mechanical loads with minimum effort. In modern wind turbines, electrically-excited synchronous generators are mostly applied in direct-drive structure. In current research, generator field voltage along with the blade pitch angle is employed for tower load reduction in a novel multivariable-adaptive control structure. The controller is designed based on the extracted model with aerodynamic, vibratory and electrical interactions. The centralized multivariable structure is chosen to simultaneously reduce rotor speed fluctuations and tower vibrations. Since the nonlinear wind turbine model is complex, the controller is designed via optimization process. The nonlinear aerodynamic behavior of blades influences the closed-loop performance in different operating condition; therefore controller is adapted to the condition by employing gain-scheduling method. The effects of signal noise, digital control and higher-order dynamics of electrical system might defect the closed-loop stability. The designed controller is implemented on a wind turbine simulator which includes the previously-mentioned effects. By comparing the performance of the multivariable adaptive controller with a two input-one output multivariable controller, it is proven that the mechanical loads acting on tower have been greatly decreased.

### 1- مقدمه

با شرط عملکرد پایدار مجموعه توربین بادی، از اهداف اصلی سیستم کنترلی در سرعت‌های باد کمتر از نامی می‌باشد که در مراجع مختلف به آن پرداخته شده است. به عنوان مثال فضل‌الهی و تقی‌زاده [2] کنترل‌کننده فیدبک حالت دینامیکی همراه تخمین‌گر سرعت باد را برای توربین بادی 660 کیلووات طراحی کردند. ایشان ضمن مقایسه کنترلگر طراحی شده با کنترلگر کلاسیک، افزایش انرژی تولیدی در سرعت‌های باد کمتر از نامی را گزارش

بهره‌گیری از انرژی باد به عنوان یکی از مهمترین منابع انرژی پاک برای تامین انرژی الکتریکی ضروری می‌باشد. امروزه نیروگاه‌های بادی جایگاه ویژه‌ای در تولید برق دارند و استفاده از آن‌ها رو به گسترش است [1]. همزمان با پیشرفت توربین‌های بادی، سیستم کنترل آن‌ها نیز به لحاظ سخت‌افزاری و نرم‌افزاری بهبود می‌یابد. دریافت بیشترین انرژی از جریان باد

Please cite this article using:

A. Hatami, B. Moetakef-Imani, A novel control structure for wind turbine with synchronous generator for tower load reduction, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 45-53, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Hatami, B. Moetakef-Imani, A novel control structure for wind turbine with synchronous generator for tower load reduction, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 45-53, 2016 (in Persian)

کرده‌اند.

داده می‌شود. در طراحی ماتریس کنترلگر چندمتغیره با در نظر داشتن مزیت‌های کنترلگرهای مختلف کلاسیک، از ترکیب کنترلگرهای تناسبی و پی‌آی‌دی<sup>5</sup> در ساختار متمرکز استفاده می‌شود. در طراحی سیستم کنترل، مدل آیرودینامیکی غیرخطی پره‌ها و تاثیر متقابل سیستم‌های مکانیکی، الکتریکی و آیرودینامیکی بر یکدیگر، باعث پیچیدگی معادله‌های غیرخطی مجموعه توربین بادی می‌شود. لذا بهره‌های ماتریس کنترلی به روش بهینه-ساز تعیین می‌گردد. همچنین با توجه به وابستگی رفتار آیرودینامیکی پره-ها به تغییر سرعت باد و برای دستیابی به رفتار یکنواخت در سیستم حلقه بسته، بهره‌های کنترلی به روش جدول‌بندی بهره و به صورت تابعی از زاویه گام محاسبه و به‌روز می‌شود.

کنترلگر چندمتغیره-تطبیقی توسعه داده شده در بستر آزمایش و به صورت سخت‌افزار در حلقه<sup>6</sup> پیاده‌سازی می‌گردد. در بستر آزمایش، سیستم الکتریکی و کنترلی توربین به صورت سخت‌افزاری و رفتار آیرودینامیکی و مکانیکی به صورت نرم‌افزاری پیاده‌سازی شده است. در شبیه‌ساز توربین بادی اثرات مهمی همچون دینامیک‌های مدل نشده سیستم الکتریکی، نویز سیگنال و کنترل دیجیتال بر ساختار کنترلی، مورد آزمایش قرار می‌گیرد. عملکرد سیستم حلقه بسته در ثابت نگه داشتن سرعت دورانی روتور و کاهش بارهای مکانیکی وارد بر برج، با کنترلگر دو ورودی-یک خروجی مورد مقایسه قرار می‌گیرد و نتایج آزمایش نشان‌دهنده کاهش 26 درصدی در ارتعاشات برج می‌باشد.

به منظور بیان نتایج به دست آمده، در بخش 2 مدل ریاضی توربین بادی با لحاظ کردن درجه آزادی ارتعاشی برج ارائه می‌شود. ساختار کنترلگر چندمتغیره در بخش 3 طراحی شده و توسعه می‌یابد. در بخش 4 پایداری سیستم حلقه بسته با توجه به کنترلگر طراحی شده مورد تحقیق قرار می‌گیرد. در بخش 5، مشخصات بستر آزمایش برای تحقیق عملکرد کنترلگر ارائه می‌گردد. نتایج پیاده‌سازی کنترلگر بر شبیه‌ساز توربین بادی در بخش 6 مورد مطالعه قرار می‌گیرد و دستاوردهای این پژوهش در بخش 7 جمع‌بندی می‌شود.

## 2-مدلسازی ریاضی توربین بادی

توربین‌های بادی محور افقی، انرژی جنبشی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نمایند. زیرسیستم‌های اصلی در این فرایند؛ آیرودینامیکی، مکانیکی و الکتریکی می‌باشند. سیستم مکانیکی توربین بادی به زیرمجموعه‌های سیستم انتقال قدرت، برج و عملگر گام تفکیک شده و در شکل 1 نمایش داده شده است.

در زیرسیستم آیرودینامیکی، گشتاور آیرودینامیکی و نیروی تراست روتور برحسب سرعت باد محیط، زاویه گام واقعی پره‌ها، سرعت دورانی روتور و سرعت نقطه بالای برج در جهت پسا-پیش، محاسبه می‌گردد. در سیستم مکانیکی، با معلوم بودن نیروها و گشتاورهای خارجی وارده بر اجزا، مشخصات سینماتیکی شامل زاویه گام، سرعت دورانی روتور و ژنراتور و سرعت نقطه بالای برج در جهت پسا-پیش مشخص می‌شود. در نهایت در سیستم الکتریکی شامل ژنراتور سنکرون با تحریک الکتریکی متصل به بار اهمی ثابت و منبع تغذیه برای تامین سیم‌پیچ تحریک، گشتاور الکترومغناطیسی با توجه به مقادیر ولتاژ تحریک و سرعت دورانی ژنراتور تعیین می‌گردد. در ادامه این بخش، مدل ریاضی این زیرسیستم‌ها ارائه می‌گردد.

هدف مهم دیگر سیستم کنترلی، محدود کردن سرعت دورانی و توان تولیدی توربین در سرعت‌های باد بیشتر از نامی می‌باشد. بوکزار و همکاران [3] کنترلگر غیرمتمرکز چندمتغیره را برای زاویه گام و گشتاور ژنراتور توربین بادی با هدف ثابت نگه داشتن توان و سرعت دورانی روتور در سرعت-های باد بیشتر از نامی طراحی کرده‌اند. کنترل گشتاور ژنراتور به روش غیرخطی و زاویه گام به روش ال‌کیوجی<sup>1</sup> به طور مستقل طراحی شده و عملکرد آن‌ها به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته است.

در دو مرجع [2,3]، موضوع کاهش بارهای مکانیکی مورد توجه قرار نگرفته است. درحالیکه به دلیل تغییرات سرعت باد و برهمکنش رفتار سازه و سیال، به اجزای مکانیکی توربین بادی مانند برج و پره‌ها بارهای نوسانی وارد می‌شود [4,5]. یکی از راه‌های موثر برای افزایش عمر اجزا مکانیکی، کاهش بارهای نوسانی وارد بر آن‌ها است که در حوزه کنترل توربین بادی به آن پرداخته شده است.

لیکاری و همکاران [6] کنترلگر گشتاور ژنراتور را با هدف افزایش میرایی در ارتعاشات پیچشی پره‌ها و سیستم انتقال قدرت طراحی کرده‌اند. ساختار کنترلی غیرمتمرکز با هدف کاهش بارهای مکانیکی سیستم انتقال قدرت و پره‌ها توسط ایشان توسعه داده شده است.

گیلر و کازلیز [7] با کنترل زاویه گام به صورت مجزا در ساختار کنترلی چندمتغیره به اهداف کاهش گشتاور در ریشه پره و افزایش میرایی برج دست یافته‌اند. در مدلسازی، توربین بادی به صورت پاندول معکوس نصب شده روی اریه فرض شده است. همچنین ژنو و همکاران [8] کنترلگر زاویه گام را به روش ال‌کیوآر<sup>2</sup> و با هدف پایداری نوسانات سرعت دورانی روتور و کاهش ارتعاشات برج طراحی کرده‌اند. در مدل مکانیکی، مود اول ارتعاشات خمشی برج لحاظ شده است و پره‌ها به صورت صلب مدلسازی شده‌اند. البته در این مراجع [7,8] کنترل توربین با تنظیم زاویه گام پره‌ها انجام شده است و از اثرهای دینامیکی و کنترلی سیستم الکتریکی صرف‌نظر شده است.

سلطانی و همکاران [9] با طراحی کنترل پیش‌بین همراه با تخمین‌گر سرعت باد میانگین، بارهای وارد بر برج و سیستم انتقال قدرت توربین بادی را در شرایط تندباد کاهش داده‌اند. در ساختار کنترلی، زاویه گام پره‌ها و گشتاور ژنراتور به عنوان ورودی‌های کنترلی در نظر گرفته شده است. در مدلسازی توربین بادی توسط ایشان، از دینامیک‌های ژنراتور صرف‌نظر شده است.

در پژوهش‌های انجام شده، تاثیر کنترل همزمان ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون و زاویه گام پره‌ها بر عملکرد کنترلی توربین بادی و کاهش بارگذاری مورد توجه قرار نگرفته است. در ساختار بسیاری از توربین‌های بادی درایو مستقیم (بدون گیربکس)، از ژنراتورهای سنکرون تحریک الکتریکی<sup>3</sup> برای تولید توان الکتریکی بهره‌گیری شده است. در این نوع ژنراتورها، با کنترل ولتاژ تحریک میدان، گشتاور الکترومغناطیسی و در نتیجه سرعت دورانی روتور قابل تنظیم می‌باشد.

در مقاله حاضر، ساختار نوین کنترلگر چندمتغیره-تطبیقی برای تنظیم سرعت دورانی روتور و کاهش بارهای مکانیکی برج توسعه داده می‌شود. در این ساختار با کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون و زاویه گام پره‌ها، نوسانات سرعت دورانی روتور و ارتعاشات برج در جهت پسا-پیش<sup>4</sup> کاهش

<sup>1</sup> Linear Quadratic Gaussian (LQG)

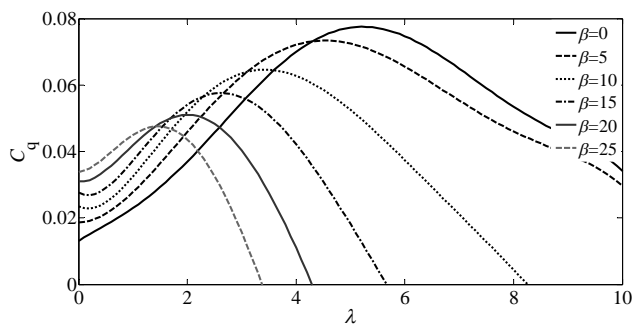
<sup>2</sup> Linear Quadratic Regulator (LQR)

<sup>3</sup> Electrically Excited Synchronous Generator (EESG)

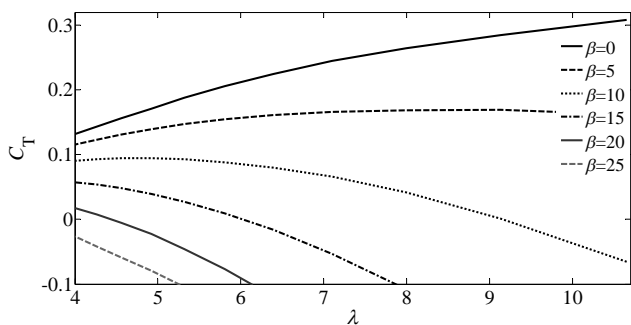
<sup>4</sup> fore-aft

<sup>5</sup> Proportional-Integral-Differentiator (PID)

<sup>6</sup> Hardware In the Loop (HIL)



**Fig. 2** Torque coefficient versus tip speed ratio for various pitch angle  
 شکل 2 منحنی‌های ضریب گشتاور بر حسب نسبت سرعت نوک برای زاویه‌های گام مختلف

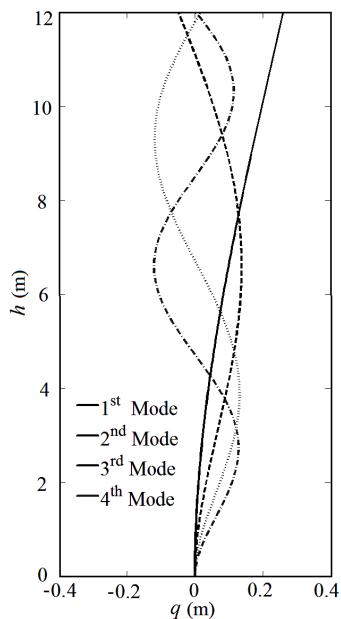


**Fig. 3** Thrust coefficient versus tip speed ratio for various pitch angle  
 شکل 3 منحنی‌های ضریب تراست بر حسب نسبت سرعت نوک برای زاویه‌های گام مختلف

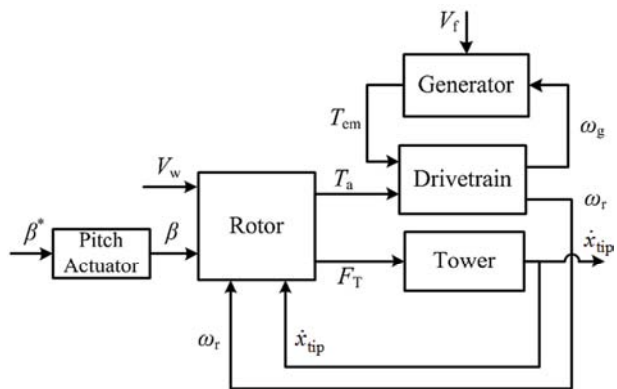
جدول 1 فرکانس‌های طبیعی خمشی برج (هرتز)

**Table 1** Natural frequencies of tower in Hz

مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم
0.99	7.80	23.40	47.13



**Fig. 4** Four mode shapes of tower with concentrated tip mass  
 شکل 4 چهار شکل مود خمشی برج همراه جرم متمرکز روی آن



**Fig. 1** Interaction of aerodynamic, mechanical and electrical subsystems of wind turbine

شکل 1 ارتباط متقابل زیرسیستم‌های آیرودینامیکی، مکانیکی و الکتریکی توربین بادی

**1-2- مدل آیرودینامیکی روتور**

خروجی سیستم آیرودینامیکی، گشتاور و نیروی تراست روتور می‌باشد که بر اساس تئوری مومنوم [10] به صورت توابعی از سرعت باد محیط، سرعت ارتعاشات بالای برج و ضرایب آیرودینامیکی روتور از رابطه‌های (1) و (2) محاسبه می‌شوند. ضریب‌های گشتاور و تراست روتور توابعی از نسبت سرعت نوک، معرفی شده در رابطه (3)، و زاویه گام هستند.

$$T_a = C_q(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho \pi R^3 (V_w - \dot{x}_{tip})^2 \tag{1}$$

$$F_T = C_T(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho \pi R^2 (V_w - \dot{x}_{tip})^2 \tag{2}$$

$$\lambda = \frac{R \omega_r}{V_w} \tag{3}$$

در شکل‌های 2 و 3، نمودارهای ضریب گشتاور و ضریب تراست روتور بر حسب نسبت سرعت نوک در زوایای گام مختلف برای توربین مورد مطالعه ترسیم شده است. با معلوم بودن این ضرایب، گشتاور آیرودینامیکی و نیروی تراست روتور در شرایط کاری مختلف محاسبه می‌گردد.

**2-2- مدل مجموعه‌های مکانیکی**

در این پژوهش، زیرسیستم مکانیکی توربین به سه مجموعه؛ انتقال قدرت، برج و عملگر گام تقسیم می‌شود. مجموعه انتقال قدرت در توربین‌های بادی به طور معمول شامل روتور، محور اصلی، گیربکس و محور ژنراتور می‌باشد. گشتاورهای آیرودینامیکی و الکترومغناطیسی، نیروهای خارجی وارد بر مجموعه انتقال قدرت هستند. بر اساس روش نیوتن، معادله حرکت دورانی مجموعه انتقال قدرت به صورت رابطه (4) استخراج می‌گردد. در نتیجه سرعت دورانی روتور و ژنراتور با معرفی اینرسی و میرایی معادل اجزا دورانی در روابط (5) تعیین می‌شود.

$$J_{eq} \dot{\omega}_r + B_{eq} \omega_r = T_a - N T_{em} \tag{4}$$

$$J_{eq} = J_r + N^2 J_g, \quad B_{eq} = B_r + N^2 B_g \tag{5}$$

برج، عضو سازه‌ای توربین است که تمامی نیروهای آیرودینامیکی وارد بر روتور را همراه با جرم ناسل و روتور تحمل می‌نماید. در مدل‌سازی برج، روش مودهای فرض شونده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در محاسبه فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشات خمشی برج از روش‌های پیشنهاد شده در مراجع [12,11] استفاده می‌شود. چهار فرکانس طبیعی و شکل مود برج با در نظر گرفتن جرم ناسل و روتور روی آن به ترتیب در جدول 1 و شکل 4 ارائه می‌گردد.

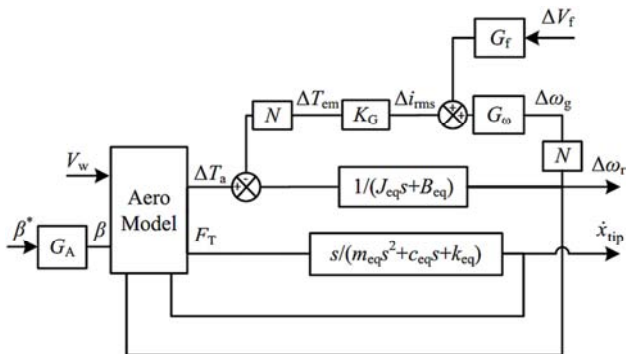


Fig. 5 Block diagram of wind turbine nonlinear model with flexible tower

شکل 5 بلوک دیاگرام مدل غیرخطی توربین بادی با برج انعطاف پذیر

در یک نگرش کلان می توان روش های طراحی سیستم های کنترل چندمتغیره را به دو دسته ی زیر تقسیم کرد [19,18]:

- سیستم های کنترل غیرمتمرکز<sup>2</sup>
- سیستم های کنترل متمرکز<sup>3</sup>

در سیستم های کنترل غیرمتمرکز، تابع تبدیل کنترل کننده یک ماتریس قطری است و حلقه های کنترلی ارتباط مستقیمی با یکدیگر ندارند. حال آنکه در سیستم های کنترل متمرکز ماتریس تابع تبدیل کنترل کننده غیرقطری است و اثرات متقابل در طراحی دیده می شود. مزایای اصلی طراحی های غیرمتمرکز؛ سادگی طراحی و پیاده سازی، تعمیر و نگهداری آسان و هزینه ی کم است. عیب اصلی آنها نیز محدودیت در عملکرد سیستم حلقه بسته می باشد. از طرف دیگر، سیستم های کنترل متمرکز معمولاً پیچیده هستند و طراحی، پیاده سازی و تعمیر و نگهداری آنها نیز دشوار است لیکن عملکرد حلقه بسته ی بهتری دارند.

در طراحی های متمرکز، طراح با در نظر گرفتن تداخل در سیستم، تلاش می کند که از تمام عناصر موجود در ماتریس تابع تبدیل کنترل کننده استفاده کند و در نهایت با ماتریسی که اکثر یا تمام درایه های آن را عناصر دینامیکی و غیرصفر تشکیل می دهند، طراحی را خاتمه می دهد. در طراحی های غیرمتمرکز، طراح تلاش می کند تا با یک ماتریس تابع تبدیل قطری برای کنترل کننده به اهداف کنترلی برسد، برگرفته از [20].

در سیستم مورد بررسی، دو ورودی کنترلی (زاویه گام پره ها و ولتاژ تحریک ژنراتور)، یک ورودی اغتشاش (سرعت باد) و دو خروجی کنترل شونده (سرعت دورانی روتور و ارتعاشات برج) وجود دارد. در نتیجه ابعاد ماتریس کنترلی، 2x2 می باشد. بلوک دیاگرام حلقه بسته سیستم غیرخطی در شکل 6 نمایش داده شده است.

به منظور تعیین توابع تبدیل ماتریس کنترلگر، ماهیت مدل استخراج شده حائز اهمیت می باشد. در این مدل، نیروی تراست بر ارتعاشات برج تاثیرگذار می باشد در نتیجه کنترل اندازه این نیرو، تاثیر مستقیم بر سرعت ارتعاشات برج دارد. مطابق رابطه (2)، نیروی تراست تابع زاویه گام پره ها است در نتیجه زاویه گام پره ها به عنوان عملگر در حلقه کنترل ارتعاشات برج به کار گرفته می شود. همچنین با توجه به اینکه تغییر ولتاژ تحریک تاثیر کوچکی روی ارتعاشات برج دارد، این ابزار کنترلی در حلقه کنترل ارتعاشات برج لحاظ نمی گردد.

ارتعاشات خمشی برج در جهت بغل-بغل<sup>1</sup> دامنه به مراتب کوچکتری نسبت به جهت پسا-پیش داشته و اثر کمتری بر بارهای مکانیکی وارد بر مجموعه برج دارد و قابل صرف نظر است، برای جزئیات بیشتر رجوع شود به [13]. لذا در مدلسازی توربین در پژوهش حاضر، ارتعاشات پسا-پیش مورد نظر قرار دارد. با توجه به اینکه فرکانس های قالب باد کمتر از 0.2 هرتز می باشد [14] و همچنین فرکانس دوران روتور در توربین مورد بررسی حدود 2.4 هرتز است، مود اول ارتعاشات خمشی برج مهمترین مود می باشد. معادله ارتعاشات عرضی برج در جهت پسا-پیش با در نظر گرفتن شکل مود اول خمشی به صورت رابطه (6) استخراج می شود.

$$m_{eq}\ddot{x}_{tip} + c_{eq}\dot{x}_{tip} + k_{eq}x_{tip} = F_T \quad (6)$$

همچنین عملگر محور گام، بخشی از زیرسیستم مکانیکی می باشد و مدل دینامیکی آن در مراجع معتبر [16,15] به صورت مرتبه اول و مشابه رابطه (7) پیشنهاد شده است.

$$T_p\dot{\beta} + \beta = \beta^* \quad (7)$$

### 2-3- مدل الکتریکی ژنراتور

در سیستم الکتریکی، مدل خطی تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی نسبت به تغییرات ولتاژ تحریک و سرعت دورانی ژنراتور بر اساس [17] مطابق رابطه (8) استنتاج می شود. توابع تبدیل ولتاژ تحریک و سرعت دورانی ژنراتور با بهره گیری از روش های شناسایی سیستم بر داده های آزمایش، مطابق معادلات (9) و (10) تعیین گردیده است. همچنین ضریب گشتاور الکترومغناطیسی براساس آزمایش ها برابر 10.56 تخمین زده شده است.

$$\Delta T_{em} = K_G \times [G_f \quad G_{\omega}] \begin{bmatrix} \Delta V_f \\ \Delta \omega_g \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$G_f = \frac{0.029}{(1 + 0.071s)^2} \quad (9)$$

$$G_{\omega} = \frac{0.025(1 + 0.073s)}{1 + 0.056s + 0.00098s^2} \quad (10)$$

در نهایت بلوک دیاگرام غیرخطی توربین بادی با توجه مدل های ریاضی زیرسیستم های مکانیکی و الکتریکی در شکل 5 به روز رسانی می شود.

### 3- طراحی کنترلگر چندمتغیره- تطبیقی

توربین های بادی در سرعت های باد مختلف، تولید توان می کنند. در سرعت های باد کمتر از نامی، توان تولیدی کمتر از مقدار نامی است. در حالیکه در سرعت های باد نامی و بیشتر از آن، توربین با ظرفیت نامی تولید توان می نماید. از آنجاییکه انرژی موجود در باد با نامی 3 سرعت باد رابطه دارد، لازم است که در سرعت های باد بیشتر از نامی، توان ورودی به مجموعه انتقال قدرت و ژنراتور محدود شود. لذا در این شرایط به طور معمول با افزایش زاویه گام پره ها و در نتیجه افزایش زاویه حمله ایرفویل ها در طول پره، گشتاور آیرودینامیکی روی محور دوران توربین در مقدار نامی تنظیم می گردد.

در این پژوهش، توربین بادی دور متغیر-گام متغیر با ژنراتور سنکرون تحریک الکتریکی مورد نظر است. در این نوع ژنراتور با تنظیم ولتاژ تحریک، گشتاور الکترومغناطیسی روی محور تغییر می کند. لذا کنترل همزمان زاویه گام و ولتاژ تحریک ژنراتور با هدف های ثابت نگه داشتن سرعت دورانی روتور و محدود کردن ارتعاشات برج در نوسانات سرعت باد در این بخش انجام می گیرد. برای این منظور، ساختار کنترلگر چندمتغیره بر اساس نحوه ارتباط خروجی ها به ورودی های کنترلی تعیین می شود و سپس ماتریس کنترلگر چندمتغیره-تطبیقی طراحی می گردد.

<sup>2</sup> decentralize

<sup>3</sup> centralize

<sup>1</sup> side-side

$$\max(\beta_i) - \min(\beta_i) < 0.2, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (د-13)$$

با توجه به ویژگی‌های آیرودینامیکی غیرخطی پره‌ها متناظر با هر سرعت باد، زاویه گام متفاوتی مورد نیاز می‌باشد. به منظور حفظ عملکرد سیستم حلقه بسته در شرایط کاری مختلف، در تنظیم بهره‌های کنترلگر زاویه گام روش جدول‌بندی بهره<sup>3</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهره‌های کنترلی حاصل شده از تکرار روش بهینه‌سازی به صورت تابعی از زاویه گام در شکل 7 نمایش داده شده است.

#### 4- بررسی پایداری حلقه بسته

یکی از مباحث مهم کنترلی، پایداری می‌باشد که لازم است در مراحل طراحی کنترلگر مورد توجه قرار گیرد. پس از طراحی کنترلگر چندمتغیره به صورت جدول‌بندی بهره، در این بخش پایداری سیستم حلقه بسته مورد تحقیق می‌باشد. سیستم حلقه بسته ایجاد شده از نوع غیرخطی و پارامتر متغیر است. به منظور بررسی پایداری این سیستم، ابتدا معادلات حول نقاط کاری پایدار خطی‌سازی می‌شود. سپس پایداری سیستم خطی‌شده حول نقاط کاری مختلف، مورد تحقیق قرار می‌گیرد.

شرایط کارکرد پایدار توربین با فرض میدان باد یکنواخت در سرعت‌های باد بیشتر از نامی، تعیین می‌گردد. در چنین شرایطی، سرعت‌های دورانی روتور و ژنراتور، گشتاور آیرودینامیکی روتور و گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور برابر مقادیر نامی هستند. همچنین متناظر با هر سرعت باد، زاویه گام مثبتی برای کارکرد پایدار توربین مورد نیاز می‌باشد که با توجه به مدل آیرودینامیکی تعیین می‌گردد و در شکل 8 نمایش داده شده است. با توجه به سرعت باد و زاویه گام تعیین شده، نیروی تراست از رابطه (2) محاسبه می‌گردد. پس از تعیین نیروی تراست، تغییر شکل نوک برج از رابطه (14) استخراج می‌شود.

$$x_{tip} = F_T / k_{eq} \quad (14)$$

مدل خطی توربین با خطی‌سازی معادلات آیرودینامیکی روتور حول شرایط کاری پایدار، حاصل می‌شود. در روابط خطی (15) و (16)، گشتاور آیرودینامیکی و نیروی تراست روتور، برگرفته شده از [8]، ارائه می‌شود.

$$\Delta T_a = \tau_v(\Delta V_w - \dot{x}_{tip}) + \tau_\beta \Delta \beta + \tau_\omega \Delta \omega_r \quad (15)$$

$$\Delta F_T = f_v(\Delta V_w - \dot{x}_{tip}) + f_\beta \Delta \beta + f_\omega \Delta \omega_r \quad (16)$$

بدین ترتیب، مدل خطی تمامی زیرسیستم‌های آیرودینامیکی، مکانیکی و الکتریکی توربین استخراج شده است و می‌توان بلوک دیاگرام حلقه بسته سیستم خطی را مطابق شکل 9 نمایش داد. ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم حلقه بسته مطابق رابطه (17) می‌باشد. در این رابطه، تغییرات سرعت دورانی روتور و سرعت نقطه بالای برج، خروجی‌ها می‌باشند که در

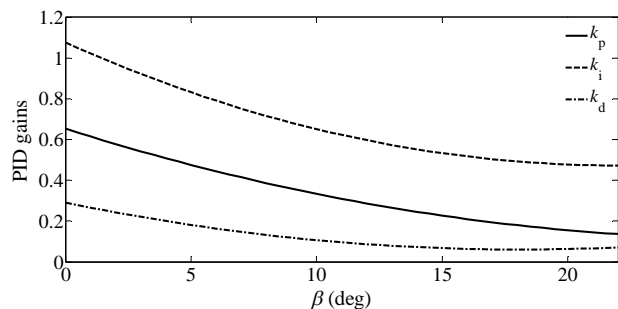


Fig. 7 Pitch control gains as functions of pitch angle

شکل 7 بهره‌های کنترلگر زاویه گام به صورت تابعی از زاویه گام پره‌ها

<sup>3</sup> gain-scheduling

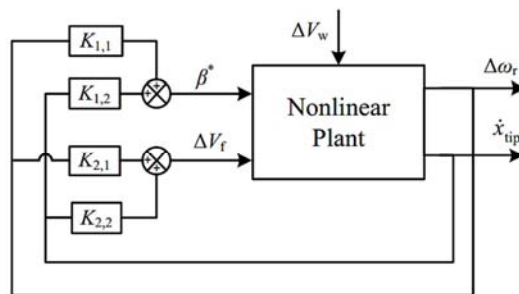


Fig. 6 Closed-loop nonlinear block diagram for wind turbine

شکل 6 بلوک دیاگرام حلقه بسته مدل غیرخطی توربین بادی

در مدل توربین بادی، گشتاور آیرودینامیکی روتور و گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور بر سرعت دورانی روتور تاثیرگذار می‌باشند. زاویه گام بر گشتاور آیرودینامیکی اثر مستقیم دارد و ولتاژ تحریک ژنراتور گشتاور الکترومغناطیسی را تغییر می‌دهد. بنابراین از هر دو ابزار کنترلی در حلقه کنترل سرعت دورانی روتور بهره‌گیری می‌شود.

روش‌های کنترل کلاسیک دارای مشخصات مناسب برای کاربرد توربین بادی می‌باشد [22,21] و در پژوهش حاضر از ترکیب کنترلگرهای تناسبی و پی‌آی‌دی در ماتریس کنترلگر بهره‌گیری می‌شود. در نهایت، ماتریس کنترلگر توربین با دو ورودی سرعت دورانی روتور و سرعت نقطه بالای برج و خروجی‌های زاویه گام و ولتاژ تحریک به صورت رابطه (11) ارائه می‌گردد.

$$K(s) = \begin{bmatrix} k_p + k_i/s + k_d s & k_f \\ k_T & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

تنظیم بهره‌های ماتریس کنترلی به روش‌های کلاسیک با توجه به مرتبه بالا و غیرخطی بودن مدل، امکان‌پذیر نمی‌باشد، لذا روش بهینه‌سازی به کار گرفته می‌شود. در روش بهینه‌سازی، مجهول‌ها عبارتند از بهره‌های ماتریس کنترلی که در فرایند جستجو، با توجه به تابع هدف و قیود مسئله محاسبه می‌گردند. تابع هدف و قیود به نحوی تعیین می‌شود که عملکرد مطلوب سیستم حلقه بسته در پاسخ به پله سرعت باد تضمین شود. در پاسخ سیستم حلقه بسته به ورودی پله واحد سرعت باد عوامل زیر مورد نظر می‌باشند.

- فرجهش و فروجهش سرعت دورانی روتور
- فرجهش و فروجهش زاویه گام
- میزان تغییر زاویه گام
- زمان نشست سرعت دورانی روتور

با توجه به مدل توربین بادی، واکنش سریعتر زاویه گام به تغییرات سرعت باد، فرجهش سرعت دورانی روتور را کاهش اما نوسانات زاویه گام و در نتیجه خستگی مکانیزم گام را افزایش می‌دهد. بنابراین تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی با انجام سعی و خطای فراوان به صورت روابط (12) و (13) طراحی می‌شود. تابع هدف به صورت مجموع وزین نرم-2<sup>1</sup> [23] سرعت دورانی روتور و نرم-2 تغییرات زاویه گام تعریف می‌گردد و قیود مسئله نیز با توجه به مفاهیم نرم-بینهایت<sup>2</sup> سرعت دورانی روتور و نرم-بینهایت زاویه گام تعریف می‌شود.

$$f = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n (\Delta \omega_i)^2 + 0.05 \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta \beta_i}{\Delta t} \right)^2 \right] \quad (12)$$

$$6 < \max(\Delta \omega_i) < 7, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (الف-13)$$

$$-0.3 < \min(\Delta \omega_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (ب-13)$$

$$0.001 < \max(\beta_i) - \beta_n < 0.15, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (ج-13)$$

<sup>1</sup> 2-norm  
<sup>2</sup> ∞-norm

سیستم حلقه بسته خطی سازی شده به طور موضعی پایدار باشد و تغییرات بهره‌های کنترلگر به آرامی صورت بگیرد، پایداری روش کنترلی جدول بندی بهره اثبات می‌شود، رجوع شود به [24].

تغییرات میرایی زوج قطب‌های غالب برای دو تابع تبدیل حلقه بسته، به عنوان معیار مقاوم بودن کنترلگر طراحی شده نسبت به عدم قطعیت مدل، در شکل 11 ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که میرایی زوج قطب‌های غالب توابع تبدیل حلقه بسته در عمده شرایط کاری بین 0.45 و 0.6 قرار دارد که قابل قبول می‌باشد. البته در سرعت‌های باد نزدیک به نامی، این مقدار برای تابع تبدیل سرعت باد به سرعت دورانی روتور به کمتر از 0.4 می‌رسد که می‌تواند به نوسانات بیشتر سرعت دورانی روتور در این شرایط منجر شود.

### 5- معرفی بستر آزمایش

در مراحل ساخت و آزمون زیرسیستم‌های مجموعه‌های پیچیده، شبیه‌سازها نقش بسزایی در شناسایی مشکلات و رفع آن‌ها ایفا می‌نمایند. در بسیاری از مراجع [27-25]، شبیه‌سازهای توربین بادی با توجه به پیچیدگی‌های آن و با اهداف کنترلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، بستر آزمایش

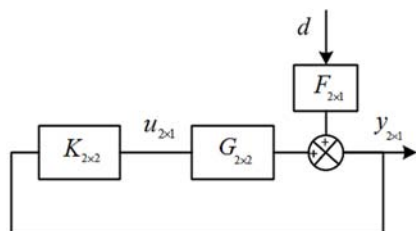


Fig. 9 Concentrated multivariable control structure

شکل 9 ساختار کنترلگر چندمتغیره متمرکز

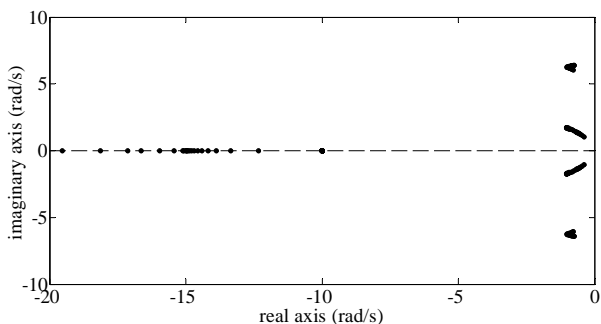


Fig. 10 Closed-loop poles in s-plane

شکل 10 قطب‌های تابع تبدیل حلقه بسته سرعت باد به سرعت دورانی روتور

در صفحه اس

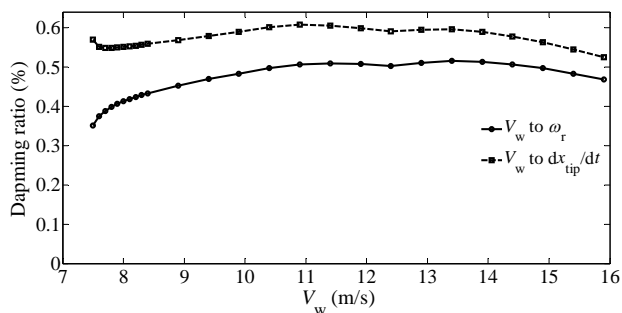


Fig. 11 The variation of closed-loop poles damping ratio with respect to wind speed

شکل 11 تغییرات میرایی قطب‌های غالب توابع تبدیل حلقه بسته به ازای سرعت‌های باد مختلف

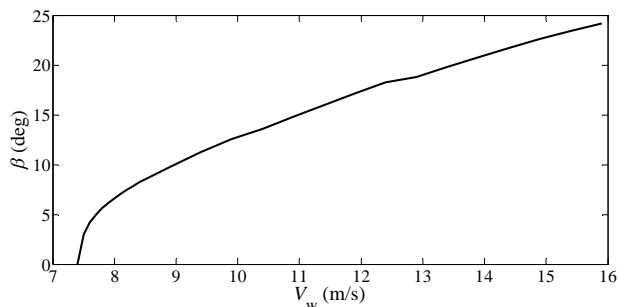


Fig. 8 Pitch angle variation above the rated wind speed for stable operation

شکل 8 تغییرات زاویه گام پرها در سرعت بادهای باد بیشتر از نامی در شرایط کارکرد پایدار

رابطه (18) ارائه می‌شود. همچنین زاویه گام پرها و ولتاژ تحریک ژنراتور، ورودی‌های کنترلی و سرعت باد، ورودی اغتشاش می‌باشند.

$$y = Gu + Fd \quad (17)$$

$$y = [\Delta\omega_r \quad \dot{x}_{tip}]^T, u = [\beta^* \quad V_r]^T, d = \Delta V_w \quad (18)$$

ماتریس میان ورودی‌های کنترلی و خروجی‌های سیستم در رابطه (19) ارائه می‌گردد. توابع تبدیل مربوط به دینامیک ارتعاشات برج و دوران روتور در روابط (20) و (21) معرفی شده‌اند. به علاوه ماتریس میان سرعت باد و خروجی‌های سیستم، بر اساس معادلات مدل استخراج شده برای توربین بادی، مطابق رابطه (22) می‌باشد.

$$G = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \quad (19\text{-الف})$$

$$E = 1 + f_\omega \tau_V G_T G_R \quad (19\text{-ب})$$

$$g_{11} = (\tau_\beta - \tau_V f_\beta G_T) G_R G_A \quad (19\text{-ج})$$

$$g_{12} = -N K_G G_T G_R \quad (19\text{-د})$$

$$g_{21} = (f_\beta + f_\omega \tau_\beta G_R) G_T G_A \quad (19\text{-ه})$$

$$g_{22} = -N f_\omega K_G G_T G_R G_T \quad (19\text{-و})$$

$$G_R = \frac{1}{J_{eq} s + B_{eq} + N^2 K_G G_\omega - \tau_\omega} \quad (20)$$

$$G_T = \frac{1}{m_{eq} s^2 + (c_{eq} + f_V) s + k_{eq}} \quad (21)$$

$$F = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \end{bmatrix} \quad (22\text{-الف})$$

$$f_{11} = \tau_V (1 - f_V G_T) G_R \quad (22\text{-ب})$$

$$f_{21} = (f_\omega \tau_V G_R + f_V) G_T \quad (22\text{-ج})$$

با توجه به ماتریس کنترلی طراحی شده، قانون کنترلی به صورت رابطه (23) است. به منظور بررسی پایداری سیستم حلقه بسته، تابع تبدیل اغتشاش (سرعت باد) به خروجی‌ها (سرعت دورانی روتور و سرعت نقطه بالای برج) مورد نیاز می‌باشد. این توابع تبدیل حلقه بسته با جایگذاری قانون کنترلی در مدل خطی، به صورت رابطه (24) به دست می‌آید.

$$u = Ky \quad (23)$$

$$y = (I - GK)^{-1} Fd \quad (24)$$

با تعیین توابع تبدیل حلقه بسته، می‌توان قطب‌های حلقه بسته را محاسبه کرد. موقعیت قطب‌های حلقه بسته تابع تبدیل سرعت باد به سرعت دورانی روتور در صفحه اس<sup>1</sup> به ازای سرعت‌های باد مختلف در شکل 10 نشان داده شده است. این تابع تبدیل دارای دو زوج قطب مختلط و دو قطب روی محور حقیقی می‌باشد و تمامی قطب‌های مذکور پایدار هستند. در شرایطی که

<sup>1</sup> s-plane

ورودی-دو خروجی با توجه به وجود حلقه پسخور ارتعاشات برج، بیشتر است. با توجه به اینکه حلقه کنترلی ولتاژ تحریک در هر دو ساختار کنترلی بر اساس سرعت دورانی روتور بسته شده است، نوسانات ولتاژ تحریک ژنراتور در هر دو ساختار کنترلی مشابه هستند.

دامنه ارتعاشات برج متناسب با تغییر شکل سازه برج و در نتیجه بارهای مکانیکی وارد بر آن می‌باشد. در شکل 17 این متغیر برای دو ساختار کنترلی مورد مطالعه نمایش داده می‌شود. کاهش دامنه ارتعاشات برج با به‌کارگیری کنترلگر دو ورودی-دو خروجی، به کاهش بارهای خستگی وارد بر برج و در نتیجه افزایش عمر این سازه منجر می‌شود.

به منظور بررسی کمی نتایج، مقادیر مجموع کارکرد زاویه گام<sup>2</sup> معرفی شده در [21]، انحراف معیار سرعت دورانی و ارتعاشات برج در جدول 3 فهرست می‌شود. نتایج این جدول نشان دهنده کاهش 26 درصدی انحراف معیار ارتعاشات برج همراه با افزایش مجموع تغییرات زاویه گام می‌باشد. در نتیجه با افزایش کارکرد مکانیزم گام، می‌توان بارهای خستگی وارد بر برج را به طور قابل توجهی کاهش داد. این دستاورد به افزایش عمر برج که یکی از اجزا مهم با حدود 18% از قیمت کل توربین [28] می‌باشد، منجر می‌شود.

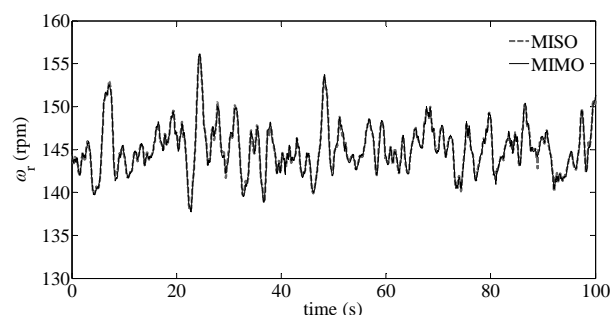


Fig. 13 Rotor speed via MIMO and MISO controllers

شکل 13 سرعت دورانی روتور متناظر با دو کنترلگر چندمتغیره

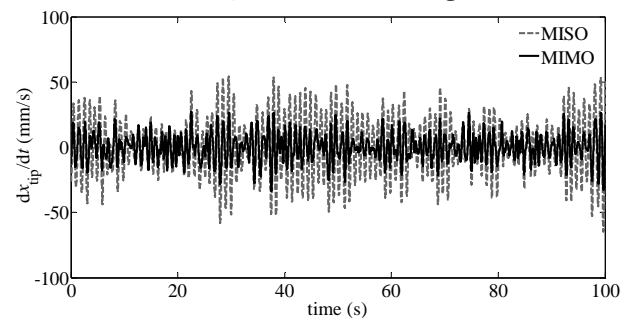


Fig. 14 Tower top velocity via MIMO and MISO controllers

شکل 14 سرعت نقطه بالای برج متناظر با دو کنترلگر چندمتغیره

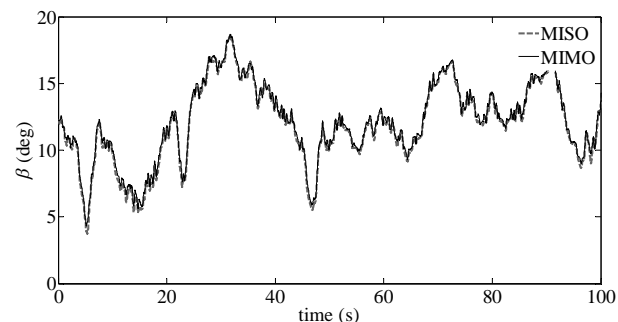


Fig. 15 Pitch angle via MIMO and MISO controllers

شکل 15 زاویه گام پره ها متناظر با دو کنترلگر چندمتغیره

برای شبیه‌سازی سیستم‌های الکتریکی و کنترلی به صورت سخت‌افزار در حلقه توسعه داده شده است.

در بستر آزمایش، محاسبات آیرودینامیکی و مکانیکی به صورت نرم-افزاری انجام می‌گیرد و مجموعه‌های ژنراتور و کنترلگر به صورت سخت‌افزاری مورد آزمون واقع می‌شود. در این بستر، اثرات موارد مهمی همچون نویز سیگنال، سیستم اکتساب داده، پیاده‌سازی کنترلگر به صورت دیجیتال و دینامیک‌های مرتبه بالاتر سیستم الکتریکی در عملکرد حلقه بسته مورد تحقیق قرار می‌گیرد. این بستر آزمایش شامل سروو موتور (شماره 1)، گشتاورسنج (شماره 2)، ژنراتور سنکرون (شماره 3)، تابلو برق (شماره 4)، رایانه (شماره 5) و بار اهمی (شماره 6) می‌باشد که در شکل 12 نمایش داده شده است. همچنین مشخصات اجزا اصلی این شبیه‌ساز در جدول 2 ارائه می‌گردد.

### 6- نتایج

در اکثر زمان‌های کارکرد، توربین بادی با سرعت باد مغشوش مواجه می‌باشد. در این بخش، عملکرد کنترلگر چندمتغیره پیاده‌سازی شده در بستر آزمایش در شرایط باد مغشوش مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین با هدف مقایسه، کنترلگر دو ورودی-یک خروجی<sup>1</sup> با حذف حلقه پسخور سرعت ارتعاشات نقطه بالای برج پیاده‌سازی می‌گردد. در شکل‌های این بخش برای وضوح بیشتر، 100 ثانیه از نتایج آزمایش نمایش داده می‌شود.

سرعت دورانی روتور و سرعت ارتعاشات نقطه بالای برج به عنوان خروجی‌های حلقه بسته در شکل‌های 13 و 14 نمایش داده می‌شود. نوسانات سرعت دورانی روتور حول مقدار نامی برای هر دو ساختار کنترلی مشابه می‌باشد در حالیکه دامنه ارتعاشات برج در ساختار دو ورودی-دو خروجی به مراتب کاهش پیدا می‌کند.

زاویه گام پره‌ها و ولتاژ تحریک ژنراتور به عنوان ورودی‌های کنترلی در شکل‌های 15 و 16 نمایش داده می‌شود. تغییرات زاویه گام در ساختار دو

جدول 2 مشخصات اجزا بستر آزمایش

Table 2 Test setup components properties

نام تجهیز	مشخصات تجهیز
1 سروو موتور	توان نامی 5.5 کیلووات - دورنامی 1500 دوربردقیقه
2 گشتاورسنج	ظرفیت 100 کیلوگرم متر
3 ژنراتور سنکرون	توان نامی 3 کیلووات - دورنامی 1500 دوربردقیقه
4 تابلو برق	درایو سروو موتور و منبع تغذیه ژنراتور و اکتساب داده
5 بار اهمی	380 ولت با اتصال ستاره‌ای
6 رایانه	نرم‌افزار شبیه‌سازی و کنترل

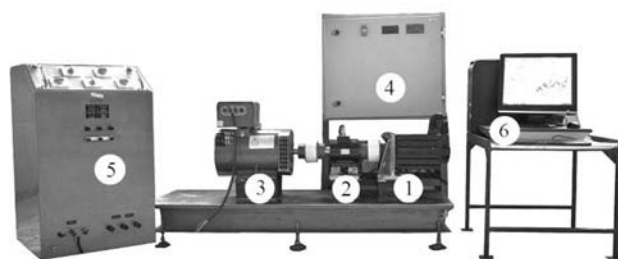


Fig. 12 Test setup structure

شکل 12 ساختار بستر آزمایش

<sup>2</sup> Duty cycle

<sup>1</sup> Multi-Input Single-Output (MISO)

8- فهرست علائم

میرایی دورانی معادل ( $\text{kgm}^2\text{s}^{-1}$ )	$B_{eq}$
میرایی محور ژنراتور ( $\text{kgm}^2\text{s}^{-1}$ )	$B_g$
میرایی محور روتور ( $\text{kgm}^2\text{s}^{-1}$ )	$B_r$
میرایی معادل سازه برج ( $\text{kgs}^{-1}$ )	$c_{eq}$
ضریب گشتاور آیرودینامیکی روتور	$C_q$
ضریب تراست آیرودینامیکی روتور	$C_T$
ماتریس تابع تبدیل سرعت باد به خروجی‌ها	$F$
ضریب تراست به زاویه گام ( $\text{Ndeg}^{-1}$ )	$f_\beta$
تراست آیرودینامیکی روتور ( $\text{kgms}^{-2}$ )	$F_T$
ضریب تراست به سرعت باد ( $\text{Nsm}^{-1}$ )	$f_V$
ضریب تراست به سرعت دورانی روتور ( $\text{Nsrad}^{-1}$ )	$f_\omega$
ماتریس تابع تبدیل ورودی‌های کنترلی به خروجی‌ها	$G$
تابع تبدیل عملگر گام	$G_A$
تابع تبدیل ولتاژ تحریک ( $\text{Av}^{-1}$ )	$G_f$
تابع تبدیل معادل دوران روتور ( $\text{rads}^{-1}\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ )	$G_R$
تابع تبدیل معادل ارتعاشات برج ( $\text{ms}^{-1}\text{N}^{-1}$ )	$G_T$
تابع تبدیل سرعت دورانی ژنراتور ( $\text{As}$ )	$G_\omega$
ارتفاع نقطه‌ای روی برج ( $\text{m}$ )	$h$
اینرسی دورانی معادل ( $\text{kgm}^2$ )	$J_{eq}$
اینرسی ژنراتور ( $\text{kgm}^2$ )	$J_g$
اینرسی روتور ( $\text{kgm}^2$ )	$J_r$
ماتریس کنترلی	$K$
سختی معادل سازه برج ( $\text{kgs}^{-2}$ )	$k_{eq}$
ضریب گشتاور ژنراتور ( $\text{kgm}^2\text{s}^{-2}\text{A}^{-1}$ )	$K_G$
جرم معادل روتور، ناسل و برج ( $\text{kg}$ )	$m_{eq}$
نسبت تبدیل گیربکس	$N$
جابه‌جایی نقطه‌ای روی برج متناظر با شکل مود ( $\text{m}$ )	$q$
شعاع روتور ( $\text{m}$ )	$R$
گشتاور آیرودینامیکی روتور ( $\text{kgm}^2\text{s}^{-2}$ )	$T_a$
گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور ( $\text{kgm}^2\text{s}^{-2}$ )	$T_{em}$
ثابت زمانی عملگر گام ( $\text{s}$ )	$T_p$
ولتاژ تحریک ژنراتور ( $\text{v}$ )	$V_f$
سرعت باد ( $\text{ms}^{-1}$ )	$V_w$
جابه‌جایی نقطه بالای برج ( $\text{m}$ )	$x_{tip}$
سرعت نقطه بالای برج ( $\text{ms}^{-1}$ )	$\dot{x}_{tip}$
شتاب نقطه بالای برج ( $\text{ms}^{-2}$ )	$\ddot{x}_{tip}$

علائم یونانی

زاویه گام پرها ( $\text{deg}$ )	$\beta$
زاویه گام مرجع پرها ( $\text{deg}$ )	$\beta^*$
نسبت سرعت نوک	$\lambda$
چگالی هوا ( $\text{kgm}^{-3}$ )	$\rho$
ضریب گشتاور آیرو به زاویه گام ( $\text{Nmdeg}^{-1}$ )	$\tau_\beta$
ضریب گشتاور آیرو به سرعت باد ( $\text{Ns}$ )	$\tau_V$
ضریب گشتاور آیرو به سرعت روتور ( $\text{Nmsrad}^{-1}$ )	$\tau_\omega$
سرعت دورانی ژنراتور ( $\text{rad/s}$ )	$\omega_g$

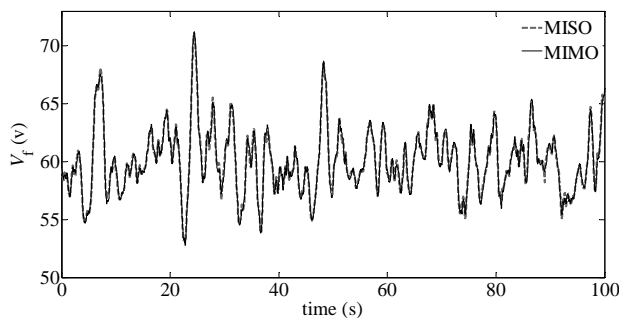


Fig. 16 Excitation voltage via MIMO and MISO controllers

شکل 16 ولتاژ تحریک ژنراتور متناظر با دو کنترلگر چندمتغیره

7- نتیجه گیری

کنترل توربین‌های بادی، با توجه به رفتارهای آیرودینامیکی غیرخطی و برهمکنش سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، کنترلگر چندمتغیره-تطبیقی زاویه گام پرها و ولتاژ تحریک ژنراتور به روش بهینه‌سازی طراحی گردید. با هدف دستیابی به عملکرد مطلوب در تمامی شرایط کارکرد توربین، روش جدول‌بندی بهره در ساختار کنترلی در نظر گرفته شد. به منظور بررسی اثرات نویز، کنترل دیجیتال و دینامیک‌های سیستم الکتریکی، شبیه‌ساز توربین بادی توسعه داده شد و عملکرد کنترلگر چندمتغیره-تطبیقی به صورت سخت‌افزار در حلقه مورد تحقیق قرار گرفت. توسعه ساختار کنترلی نوین با ورودی‌های ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون و زاویه گام پرها و با اهداف پایدارسازی نوسانات سرعت دورانی توربین و کاهش بارهای وارد بر برج نوآوری اصلی این پژوهش بوده که در شرایط باد مغشوش و به صورت سخت‌افزار در حلقه مورد آزمون قرار گرفته است.

ساختار کنترلی چندمتغیره-تطبیقی توسعه داده شده در مقایسه با کنترلگر دو ورودی-یک خروجی، بارهای خستگی وارد بر سازه برج را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در نتیجه با اصلاح ساختار کنترلی توربین، عمر برج به عنوان یکی از اجزا اصلی توربین افزایش می‌یابد و از هزینه‌های تولید برق بادی کاسته می‌شود.

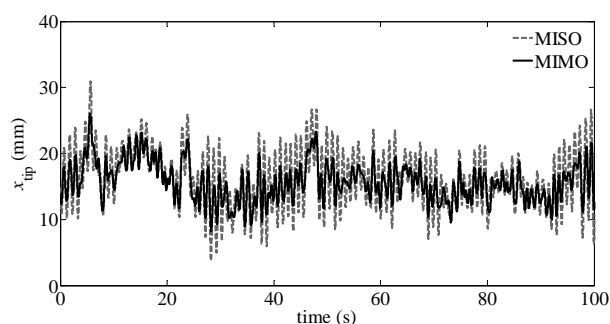


Fig. 17 Tower top displacement via MIMO and MISO controllers

شکل 17 جابه‌جایی نقطه بالای برج متناظر با دو کنترلگر چندمتغیره

جدول 3 مقایسه عملکرد کنترلگرهای چندمتغیره

Table 3 Comparison of the multivariable controllers' performance

انحراف معیار	انحراف معیار	کارکرد گام	نوع کنترلگر
خیز برج	سرعت روتور	956	دو ورودی-یک خروجی
4.20	2.89	1074	دو ورودی-دو خروجی
3.11	2.95	-	درصد بهبود
26%	-	-	



$\omega_r$  سرعت دورانی روتور (rad/s)

### 9- تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت پژوهشکده هواخوردانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است، که از زحمات این سازمان تقدیر و تشکر می‌گردد.

### 10- مراجع

- of cantilever beams under linearly varying axial load carrying an eccentric end rigid body, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 37, No. 1, pp. 89-110, 2013.
- [13] A. D. Wright, *Modern control design for flexible wind turbines*, NREL, USA, pp. 57-62, 2004.
- [14] D. A. Spera, *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, Second Edition, pp. 467-540, New York: ASME press, 2009.
- [15] A. Kumar, K. Stol, Simulating feedback linearization control of wind turbines using high-order models, *Wind Energy*, Vol. 13, No. 5, pp. 419-432, 2010.
- [16] F. D. Bianchi, H. D. Battista, R. J. Mantz, *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*, First Edition, pp. 42-43, Germany: Springer-Verlag, 2007.
- [17] P.C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, Second Edition, pp. 191-255, New Jersey: IEEE press, 2002.
- [18] A. K. Sedigh, B. Moaveni, *Control Configuration Selection for Multivariable Plants*, First Edition, pp. 1-12, Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [19] S. Skogestad, I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*, Second Edition, pp. 405-458, Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- [20] A. K. Sedigh, *Analysis and Design of Multivariable Control Systems*, Second Edition, pp. 269-270, Tehran: KNUT press, 2011. (in Persian فارسی)
- [21] M. Maureen Hand, M. J. Balas, *Systematic controller design methodology for variable-Speed wind turbines*, NREL, USA, pp. 4-5, 2002.
- [22] M. H. Hansen, A. Hansen, T. J. Larsen, S. Oye, P. Sorensen, P. Fuglsang, *Control design for a pitch-regulated variable speed wind turbine*, Riso, Denmark, pp. 14-17, 2005.
- [23] K. Zhou, J. C. Doyle, *Essentials of Robust Control*, First Edition, pp. 11-24, New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [24] J.S. Shamma, M. Athans, Models analysis of gain scheduled control for nonlinear plants, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 35, No. 8, pp. 898-907, 1990.
- [25] R. Bajpai, M. Goyal, R. Gupta, Modeling and control of variable speed wind turbine using laboratory simulator, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 7, No. 5, pp. 053127, 2015.
- [26] A. Sajadi, L. Roslaniec, M. Klos, P. Biczal, K.A. Loparo, An emulator for fixed pitch wind turbine studies, *Renewable Energy*, Vol. 87, No. 1, pp. 391-402, 2016.
- [27] M. Monfared, H. M. Kojabadi, H. Rastegar, Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled dc motor, *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 5, pp. 906-913, 2008.
- [28] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, First Edition, pp. 329-333, England: John Wiley & Sons, 2001.
- [1] H. Moradtabrizi, A. Nejat, Aerodynamic design and optimization of a megawatt wind turbine blade based on blade element momentum theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 279-290, 2015. (in Persian فارسی)
- [2] V. Fazlollahi, M. Taghizadeh, Modeling and design of dynamic state feedback controller with wind speed estimator, in variable speed wind turbines, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 361-371, 2016. (in Persian فارسی)
- [3] B. Boukezzar, L. Lupu, H. Siguerdidjane, M. Hand, Multivariable control strategy for variable speed variable pitch wind turbines, *Renewable Energy*, Vol. 32, No. 8, pp. 1273-1287, 2007.
- [4] M. H. Giahi, A. Jafarian Dehkordi, FSI simulation of a small size horizontal axis wind turbine to investigate the effects of blade thickness and material on blade deformation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 145-152, 2015. (in Persian فارسی)
- [5] H. Moeenfarid, B. Moetakef Imani, M. Davoudi, A. Rahimzadeh, Dynamic instability in tapered beams under wind excitation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 153-161, 2015. (in Persian فارسی)
- [6] J. Licari, C. E Ugalde-Loo, J. Liang, J. Ekanayake, N. Jenkins, Torsional damping considering both shaft and blade flexibilities, *Wind Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 181-195, 2012.
- [7] M. Geyler, P. Caselitz, Robust multivariable pitch control design for load reduction on large wind turbines, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 130, No. 3, pp. 1-12, 2008.
- [8] J. Genov, B. Gilev, Y. Slavchev, G. Venkov, Modeling and control of wind turbine tower vibrations, *AIP Conference Proceeding 1293*, Bulgaria: AIP Publishing, pp. 30-38, 2010.
- [9] M. Soltani, R. Wisniewski, P. Brath, S. Boyd, Load reduction of wind turbines using receding horizon control, *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, Denver: IEEE Publication, pp. 852-857, 2011.
- [10] M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*, Second Edition, pp. 27-40, London: Earthscan, 2008.
- [11] W. H. Liu, C. C. Huang, Free vibration of restrained beam carrying concentrated massed, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 123, No. 1, pp. 31-42, 1988.
- [12] S. A. Mousavi Lajimi, G. R. Heppler, Free vibration and buckling