



ساختار نوین کنترل توربین بادی با ژنراتور سنترون با هدف کاهش بارگذاری برج

آرش حاتمی^۱, بهنام معتمد ایمانی^{۲*}

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

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

* مشهد، صندوق پستی 9177948944

چکیده

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 سنترون با تحریک الکتریکی در ساختار درایو مستقیم (بدون گیریکس) به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش، مزیت بهره‌گیری از ولتاژ تحریک ژنراتور سنترون 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 متصرکز بر اساس مدل دینامیکی توربین بادی و با لحاظ کردن اثرات مقابله آبیودینامیکی، ارتعاشاتی و الکتریکی برج می‌گردد. تعیین بهره‌های ماتریس کنترلی با توجه به مدل غیرخطی و پیچیده توربین، با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی انجام می‌شود. رفتار آبیودینامیکی 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 ۲۶ درصد کاهش می‌یابد و در نتیجه عمر برج به عنوان یکی از اجزا اصلی توربین افزایش می‌یابد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دربافت: ۲۲ خرداد ۱۳۹۵

پذیرش: ۰۳ مهر ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۰۵ آبان ۱۳۹۵

کلید واژگان:

کنترل چندمتغیره- تطبیقی

شبیه‌ساز توربین بادی

کاهش بارهای مکانیکی

مدل غیرخطی

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.

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 [۲] کنترل کننده فیدبک حالت دینامیکی همراه تخمین‌گر سرعت باد را برای توربین بادی ۶۶۰ 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 تأمین انرژی الکتریکی ضروری می‌باشد. امروزه نیروگاههای بادی جایگاه ویژه‌ای در تولید برق دارند و استفاده از آن‌ها رو به گسترش است [۱]. هم‌زمان با پیشرفت توربین‌های بادی، سیستم کنترل آن‌ها نیز به لحاظ ساخت‌افزاری و نرم‌افزاری بهبود می‌یابد. دریافت بیشترین انرژی از جریان باد

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)

داده می‌شود. در طراحی ماتریس کنترلگر چندمتغیره با در نظر داشتن مزیت‌های کنترلگرهای مختلف کلاسیک، از ترکیب کنترلگرهای تناسبی و پی‌آی دی⁵ در ساختار متمرکز استفاده می‌شود. در طراحی سیستم کنترل، مدل آیرویدینامیکی غیرخطی پره‌ها و تاثیر متقابل سیستم‌های مکانیکی، الکتریکی و آیرویدینامیکی بر یکدیگر، باعث پیچیدگی معادله‌های غیرخطی مجموعه توربین بادی می‌شود. لذا بهره‌های ماتریس کنترلی به روش بهینه‌سازی تعیین می‌گردد. همچنین با توجه به وابستگی رفتار آیرویدینامیکی پره‌ها 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 حلقة⁶ پیاده‌سازی می‌گردد. در بستر آزمایش، سیستم الکتریکی و کنترلی توربین به صورت سختافزاری و رفتار آیرویدینامیکی 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 پارهای 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 بسته 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، انژوی جنبشی باد را به انژوی الکتریکی تبدیل می‌نمایند. زیرسیستم‌های اصلی در این فرایند؛ آیرویدینامیکی، 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 آیرویدینامیکی، گشتاور آیرویدینامیکی و نیروی تراست روتور بر حسب 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 واردۀ بر اجزاء، 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 سیم پیچ 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.

⁵ Proportional-Integral-Differentiator (PID)

⁶ Hardware In the Loop (HIL)

کرده‌اند.

هدف مهم دیگر سیستم کنترلی، محدود کردن سرعت دورانی و توان تولیدی توربین در سرعت‌های باد بیشتر از نامی می‌باشد. بوکار 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 سرعت‌های باد بیشتر از نامی طراحی کرده‌اند. کنترل گشتاور ژنراتور به روش غیرخطی و زاویه گام به روش الکیوچی¹ به طور مستقل طراحی شده و عملکرد آن‌ها به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته است.

در دو مرجع [3,2]، موضوع کاهش بارهای مکانیکی مورد توجه قرار نگرفته است. در حالیکه به دلیل تغییرات سرعت باد و بهره‌منش رفتار سازه و سیال، به اجزای مکانیکی توربین بادی مانند برج و پره‌ها بارهای نوسانی وارد می‌شود [5,4]. 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 مکوس نصب شده روی ارabe فرض شده است. همچنین ژنو و همکاران [8] کنترلگر زاویه گام را به روش الکیوار² و با هدف پایدارسازی نوسانات سرعت دورانی روتور و کاهش ارتعاشات برج طراحی کرده‌اند. در مدل مکانیکی، مود اول ارتعاشات خمی برج لحاظ شده است و پره‌ها به صورت صلب مدل‌سازی شده‌اند. البته در این مراجع [8,7] 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 تخمین گر 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 کنترل توربین بادی و کاهش بارگذاری مورد توجه قرار نگرفته است. در ساختار بسیاری از توربین‌های بادی درایو مستقیم (بدون گیربکس)، از ژنراتورهای سنکرون تحریک الکتریکی³ 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.

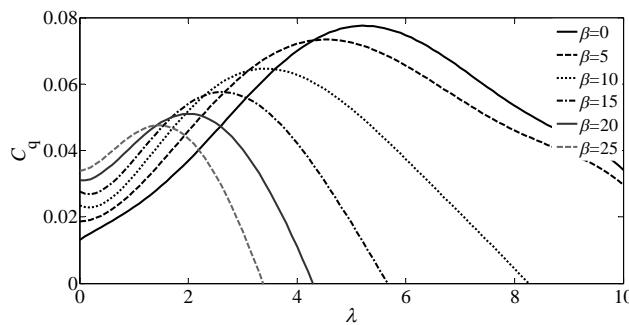
در مقاله حاضر، ساختار نوین کنترلگر چندمتغیره-تطبیقی برای تنظیم سرعت دورانی روتور و کاهش بارهای مکانیکی برج توسعه داده می‌شود. در این ساختار با کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون و زاویه گام پره‌ها، نوسانات سرعت دورانی روتور و ارتعاشات برج در جهت پسا-پیش⁴ کاهش

¹ Linear Quadratic Gaussian (LQG)

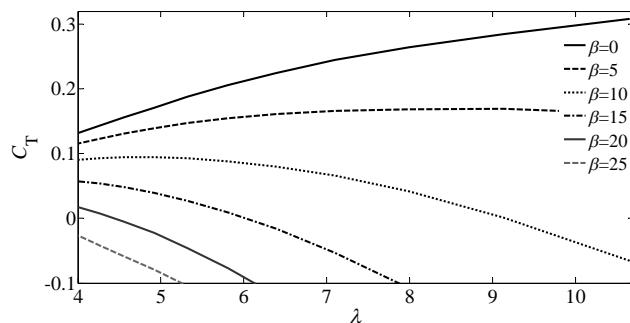
² Linear Quadratic Regulator (LQR)

³ Electrically Excited Synchronous Generator (EESG)

⁴ fore-aft



شکل ۲ منحنی‌های ضریب گشتاور بر حسب نسبت سرعت نوک برای زاویه‌های گام مختلف

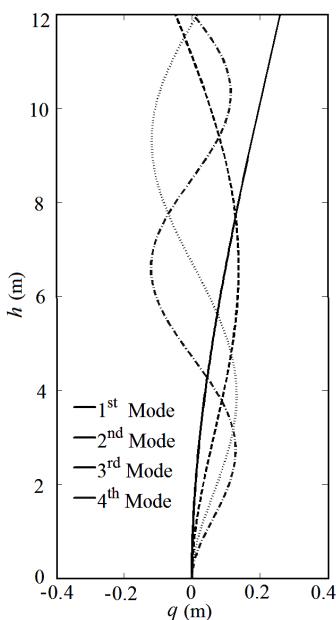


شکل ۳ منحنی‌های ضریب تراست بر حسب نسبت سرعت نوک برای زاویه‌های گام مختلف

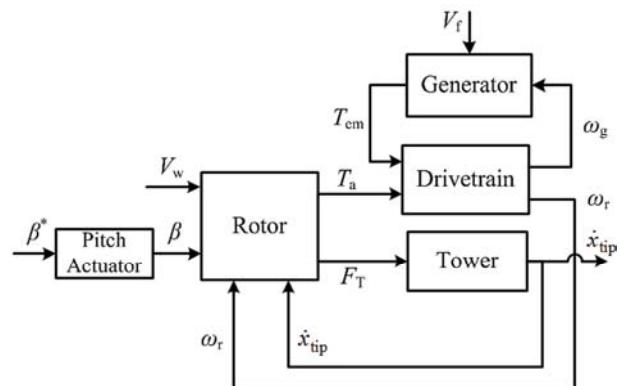
جدول ۱ فرکانس‌های طبیعی خمشی برج (هرتز)

Table 1 Natural frequencies of tower in Hz

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



شکل ۴ چهار شکل مود خمشی برج همراه جرم متتمرکز روی آن



شکل ۱ ارتباط متقابل زیرسیستم‌های آیرودینامیکی، مکانیکی و الکتریکی توربین بادی

2-1- مدل آیرودینامیکی روتور

خروجی سیستم آیرودینامیکی، گشتاور و نیروی تراست روتور می‌باشد که بر اساس تئوری مومنتوم [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، معروفی شده در رابطه (3)، و زاویه گام هستند.

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

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

$$\lambda = \frac{R \omega_r}{V_w} \quad (3)$$

در شکل‌های ۲ و ۳، 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، گیریکس و محور ژنراتور می‌باشد. گشتاورهای آیرودینامیکی و الکترومغناطیسی، نیروهای خارجی وارد بر مجموعه انتقال قدرت هستند. بر اساس روش نیوتون، معادله حرکت دورانی مجموعه انتقال قدرت به صورت رابطه (4) استخراج می‌گردد. در نتیجه سرعت دورانی روتور و ژنراتور با معروفی اینرسی و میرایی معادل اجزا دورانی در روابط (5) تعیین می‌شود.

$$J_{eq} \ddot{\omega}_r + B_{eq} \omega_r = T_a - N T_{em} \quad (4)$$

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

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 ۱ و شکل ۴ ارائه می‌گردد.

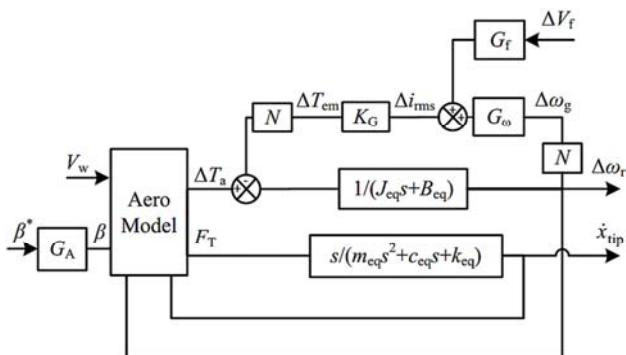


Fig. 5 Block diagram of wind turbine nonlinear model with flexible tower

شکل ۵ بلوک دیاگرام مدل غیرخطی توربین بادی با برج انعطاف‌پذیر

در یک نگرش کلان می‌توان روش‌های طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره را به دو دسته‌ی زیر تقسیم کرد [19,18]:

- سیستم‌های کنترل غیرمتتمرکز²
- سیستم‌های کنترل متتمرکز³

در سیستم‌های کنترل غیرمتتمرکز،تابع تبدیل کنترل کننده یک ماتریس قطعی است و حلقه‌های کنترلی ارتباط مستقیمی با یکدیگر ندارند. حال آنکه در سیستم‌های کنترل متتمرکز ماتریس تابع تبدیل کنترل کننده یک ماتریس است و اثرات متقابل در طراحی دیده می‌شود. مزایای اصلی طراحی‌های غیرمتتمرکز؛ سادگی طراحی و پیاده‌سازی، تعمیر و نگهداری آسان و هزینه‌ی کم است. عیب اصلی آنها نیز محدودیت در عملکرد سیستم حلقه بسته می‌باشد. از طرف دیگر، سیستم‌های کنترل متتمرکز معمولاً پیچیده هستند و طراحی، پیاده‌سازی و تعمیر و نگهداری آنها نیز دشوار است لیکن عملکرد حلقه بسته‌ی بهتری دارند.

در طراحی‌های متتمرکز، طراح با در نظر گرفتن تداخل در سیستم، تلاش می‌کند که از تمام عناصر موجود در ماتریس تابع تبدیل کنترل کننده استفاده کند و در نهایت با ماتریسی که اکثر یا تمام درایه‌های آن را عناصر دینامیکی و غیرصفر تشکیل می‌دهند، طراحی را خاتمه می‌دهد. در طراحی‌های غیرمتتمرکز، طراح تلاش می‌کند تا با یک ماتریس تابع تبدیل قطعی برای کنترل کننده به اهداف کنترلی برسد، برگرفته از [20].

در سیستم مورد بررسی، دو ورودی کنترلی (زاویه گام پره‌ها و ولتاژ تحریک ژنراتور)، یک ورودی اختشاش (سرعت باد) و دو خروجی کنترل شونده (سرعت دورانی روتور و ارتعاشات برج) وجود دارد. در نتیجه ابعاد ماتریس کنترلی، 2×2 می‌باشد. 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 می‌باشد. در این مدل، نیروی تراست بر ارتعاشات برج تاثیرگذار می‌باشد در نتیجه کنترل اندازه این نیرو، تأثیر مستقیم بر سرعت ارتعاشات برج دارد. مطابق رابطه (2)، نیروی تراست تابع زاویه گام پره‌ها است در نتیجه زاویه گام پره‌ها به عنوان عملگر در حلقة کنترل ارتعاشات برج به کار گرفته می‌شود. همچنین با توجه به اینکه تغییر ولتاژ تحریک تاثیر کوچک روی ارتعاشات برج دارد، این ابزار کنترلی در حلقة کنترل ارتعاشات برج لحاظ نمی‌گردد.

²decentralize
³centralize

ارتعاشات خمی برج در جهت بغل-بغل¹ دامنه به موابع کوچکتری نسبت به جهت پسا-پیش داشته و اثر کمتری بر بارهای مکانیکی وارد بر مجموعه برج دارد و قابل صرفنظر 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 فرکانس‌های قالب باد کمتر از 0.2 هرتز می‌باشد [14] و همچنین فرکانس دوران روتور در توربین مورد بررسی حدود 2.4 هرتز است، مود اول ارتعاشات خمی برج مهمترین مود می‌باشد. معادله ارتعاشات عرضی برج در جهت پسا-پیش با در نظر گرفتن شکل مود اول خمی به صورت رابطه (6) استخراج می‌شود.

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

همچنین عملگر محور گام، بخشی از زیرسیستم مکانیکی می‌باشد 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 به تغییرات ولتاژ تحریک و سرعت دورانی ژنراتور بر اساس [17] مطابق رابطه (8) استنتاج می‌شود. توابع تبدیل ولتاژ تحریک و سرعت دورانی ژنراتور با بهره‌گیری از روش‌های شناسایی سیستم بر داده‌های آزمایش، مطابق معادلات (9) و (10) تعیین گردیده است. همچنین ضربی گشتاور الکترومغناطیسی براساس آزمایش‌ها برابر 10.56 تخمین زده است.

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

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

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

در نهایت بلوک دیاگرام غیرخطی توربین بادی با توجه مدل‌های ریاضی زیرسیستم‌های مکانیکی و الکتریکی در شکل 5 به روز رسانی می‌شود.

3- طراحی کنترلگر چندمتغیره-تطبیقی

توربین‌های بادی در سرعت‌های باد مختلف، تولید توان می‌کنند. در سرعت‌های باد کمتر از نامی، توان تولیدی کمتر از مقدار نامی است. در حالیکه در سرعت‌های باد نامی و بیشتر از آن، توربین با ظرفیت نامی تولید توان می‌نماید. از آنجاییکه انرژی موجود در باد با نمای 3 سرعت باد رابطه دارد، لازم است که در سرعت‌های 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 پره‌ها و در نتیجه افزایش زاویه حمله ایرفویل‌ها در طول پره، گشتاور آبرویدینامیکی روی محور دوران توربین در مقدار نامی تنظیم می‌گردد.

در این پژوهش، توربین بادی دور متغیر-گام متغیر با ژنراتور سنترون تحریک الکتریکی مورد نظر است. در این نوع ژنراتور با تنظیم ولتاژ تحریک، گشتاور الکترومغناطیسی روی محور تغییر می‌کند. لذا کنترل همزمان زاویه گام و ولتاژ تحریک ژنراتور با هدف‌های ثابت نگه داشتن سرعت دورانی روتور و محدود کردن ارتعاشات برج در نوسانات سرعت باد در این بخش انجام می‌گیرد. برای این منظور، ساختار کنترلگر چندمتغیره بر اساس نحوه ارتباط خروجی‌ها به ورودی‌های کنترلی تعیین می‌شود و سپس ماتریس کنترلگر چندمتغیره-تطبیقی طراحی می‌گردد.

¹ side-side

$$\max(\beta_i) - \min(\beta_i) < 0.2, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5-13)$$

با توجه به ویژگی‌های آبیودینامیکی غیرخطی پره‌ها متناظر با هر سرعت باد، زاویه گام متفاوتی مورد نیاز می‌باشد. به منظور حفظ عملکرد سیستم حلقة بسته در شرایط کاری مختلف، در تنظیم بهره‌های کنترلگر زاویه گام روش جدول‌بندی بهره³ 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 حلقة 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 حلقة بسته مورد تحقیق می‌باشد. سیستم حلقة 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 آبیودینامیکی روتور و گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور برابر مقادیر نامی هستند. همچنین متناظر با هر سرعت باد، زاویه گام مشتبه برای کارکرد پایدار توربین مورد نیاز می‌باشد که با توجه به مدل آبیودینامیکی تعیین می‌گردد و در شکل 8 نمایش داده 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.

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

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

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

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

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

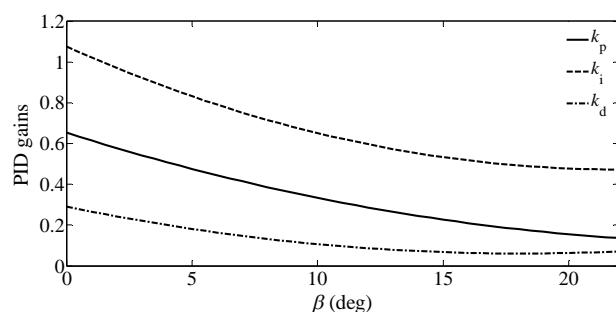
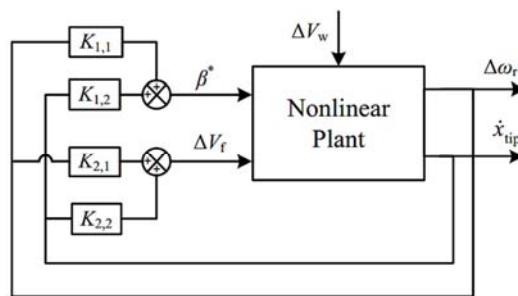


Fig. 7 بهره‌های کنترلگر زاویه گام به صورت تابعی از زاویه گام پرده

³ gain-scheduling



شکل 6 بلوك دیاگرام حلقة بسته مدل غیرخطی توربین بادی

در مدل توربین بادی، گشتاور آبیودینامیکی روتور و گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور بر سرعت دورانی روتور تاثیرگذار می‌باشند. زاویه گام بر گشتاور آبیودینامیکی اثر مستقیم دارد و ولتاژ تحریک ژنراتور گشتاور الکترومغناطیسی را تغییر می‌دهد. بنابراین از هر دو ابزار کنترلی در حلقة 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 تنسابی و پی‌آی دی 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، امکان‌بزیر نمی‌باشد، لذا روش بهینه‌سازی به کار گرفته می‌شود. در روش بهینه‌سازی، مجهول‌ها عبارتند از بهره‌های ماتریس کنترلی که در فرایند جستجو، با توجه بهتابع هدف و قیود مسئله محاسبه می‌گردد. تابع هدف و قیود به نحوی تعیین می‌شود که عملکرد مطلوب سیستم حلقة بسته در پاسخ به پله سرعت باد تضمین شود. در پاسخ سیستم حلقة بسته به ورودی پله واحد سرعت باد عوامل زیر مورد نظر می‌باشد.

- 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 نرم¹ [23] سرعت دورانی روتور و نرم² تغییرات زاویه گام تعریف می‌گردد و قیود مسئله نیز با توجه به مفاهیم نرم-بینهایت² سرعت دورانی روتور و نرم-بینهایت زاویه گام تعریف می‌شود.

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

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

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

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

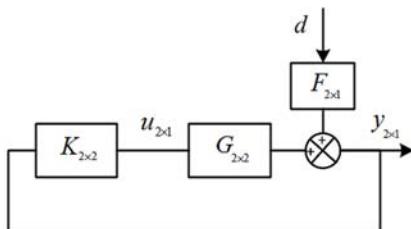
¹ 2-norm
² ∞-norm

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

تغییرات میرایی زوج قطب‌های غالب برای دوتابع 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 عمدۀ 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.

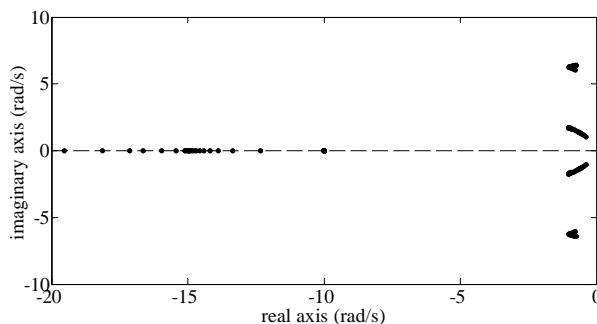
5- معرفی بستر آزمایش

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



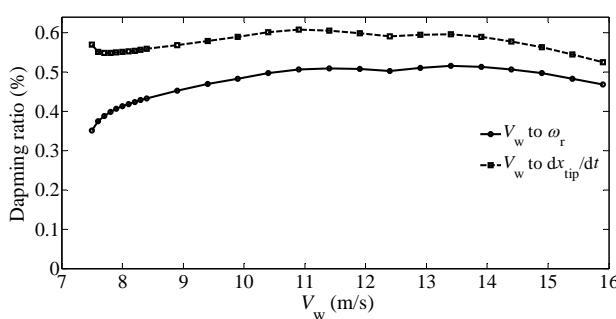
شکل 9 ساختار کنترلگر چندمتغیره متتمرکز

شکل 9 ساختار کنترلگر چندمتغیره متتمرکز

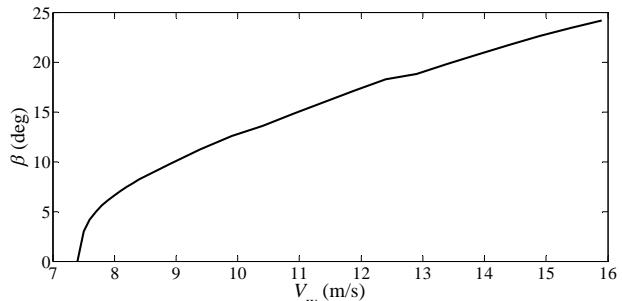


شکل 10 قطب‌های تابع تبدیل حلقه بسته سرعت باد به سرعت دورانی روتور

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



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



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

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

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

$$y = [\Delta\omega_r \quad x_{tip}]^T, u = [\beta^* \quad V_f]^T, d = \Delta V_w \quad (18)$$

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.

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

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

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

$$g_{12} = -N K_G G_f G_R \quad (20\text{-ا})$$

$$g_{21} = (f_\beta + f_\omega \tau_\beta G_R) G_T G_A \quad (20\text{-ب})$$

$$g_{22} = -N f_\omega K_G G_f G_R G_T \quad (20\text{-ج})$$

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

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

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

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

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

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 تابع 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 اس¹ 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

¹ s-plane

وروودی-دو خروجی با توجه به وجود حلقه پسخور ارتعاشات برج، بیشتر است. با توجه به اینکه حلقه کنترلی ولتاژ تحریک در هر دو ساختمان 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 به کارگیری 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 گام² معروف 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.

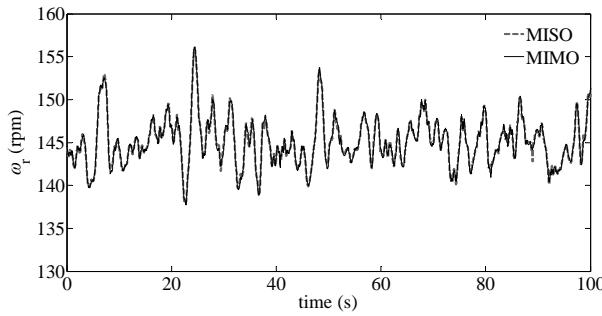


Fig. 13 Rotor speed via MIMO and MISO controllers

شکل 13 سرعت دورانی روتور متناظر با دو کنترلگر چندمتغیره

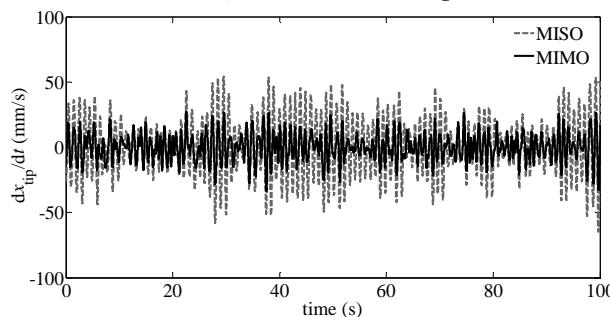


Fig. 14 Tower top velocity via MIMO and MISO controllers

شکل 14 سرعت نقطه بالای برج متناظر با دو کنترلگر چندمتغیره

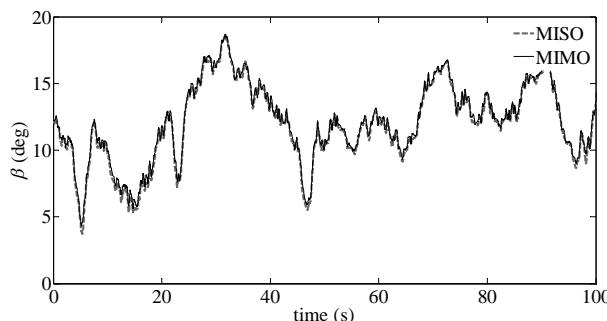


Fig. 15 Pitch angle via MIMO and MISO controllers

شکل 15 زاویه گام پره ها متناظر با دو کنترلگر چندمتغیره

² Duty cycle

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

در بستر آزمایش، محاسبات آیرودبینامیکی و مکانیکی به صورت نرم-افزاری انجام می‌گیرد و مجموعه‌های ژنراتور و کنترلگر به صورت ساخت‌افزاری 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 حلقة بسته مورد تحقیق قرار می‌گیرد. این بستر آزمایش شامل سرو 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 می-گردد.

6- نتایج

در اکثر زمان‌های کارکرد، توربین بادی با سرعت باد مغذیوش مواجه می‌باشد. در این بخش، عملکرد کنترلگر چندمتغیره پیاده‌سازی شده در بستر آزمایش در شرایط باد مغذیوش مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین با هدف مقایسه، کنترلگر دو ورودی-یک خروجی¹ با حذف حلقة 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 حلقة بسته در شکل‌های 13 و 14 نمایش داده می‌شود. نوسانات سرعت دورانی روتور حول مقدار نامی برای هر دو ساختار کنترلی مشابه می-باشد 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	سرو موتور
2	گشتاورسنج
3	ژنراتور سنکرون
4	تابلو برق
5	بار اهمی
6	رایانه

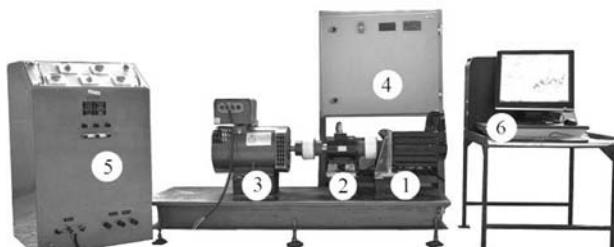
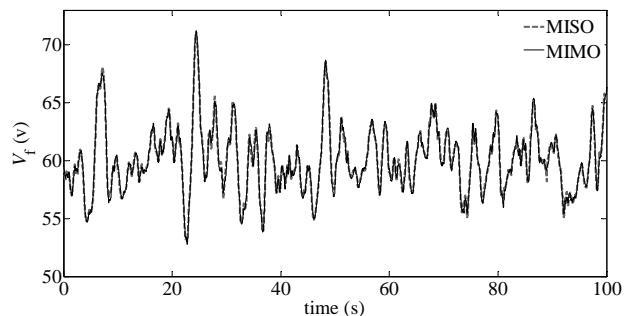


Fig. 12 Test setup structure

شکل 12 ساختار بستر آزمایش

¹ Multi-Input Single-Output (MISO)

8- فهرست علایم	
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 (kgs^{-1})	c_{eq}
ضریب گشتاور آیروдинامیکی روتور	C_q
ضریب تراست آیروдинامیکی روتور	C_T
ماتریس تابع تبدیل سرعت باد به خروجی‌ها	F
ضریب تراست به زاویه گام (Ndeg^{-1})	f_β
تراست آیروдинامیکی روتور (kgms^{-2})	F_T
ضریب تراست به سرعت باد (Nsm^{-1})	f_V
ضریب تراست به سرعت دورانی روتور (Nsrad^{-1})	f_ω
ماتریس تابع تبدیل ورودی‌های کنترلی به خروجی‌ها	G
تابع تبدیل عملگر گام	G_A
تابع تبدیل ولتاژ تحریک (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 (As)	G_ω
ارتفاع نقطه‌ای روی برج (m)	h
اینرسی دورانی معادل (kgm^2)	J_{eq}
اینرسی ژنراتور (kgm^2)	J_g
اینرسی روتور (kgm^2)	J_r
ماتریس کنترلی	K
سختی معادل سازه برج (kgs^2)	k_{eq}
ضریب گشتاور ژنراتور ($\text{kgm}^2\text{s}^{-2}\text{A}^{-1}$)	K_G
جرم معادل روتور، ناسل و برج (kg)	m_{eq}
نسبت تبدیل گیریکس	N
جا به جایی نقطه‌ای روی برج متناظر با شکل مود (m)	q
شعاع روتور (m)	R
گشتاور آیروдинامیکی روتور ($\text{kgm}^2\text{s}^{-2}$)	T_a
گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور ($\text{kgm}^2\text{s}^{-2}$)	T_{em}
ثابت زمانی عملگر گام (s)	T_p
ولتاژ تحریک ژنراتور (v)	V_f
سرعت باد (ms^{-1})	V_w
جا به جایی نقطه بالای برج (m)	x_{tip}
سرعت نقطه بالای برج (ms^{-1})	\dot{x}_{tip}
شتاپ نقطه بالای برج (ms^{-2})	\ddot{x}_{tip}
علایم یونانی	
زاویه گام پره‌ها (deg)	β
زاویه گام مرجع پره‌ها (deg)	β^*
نسبت سرعت نوک	λ
چگالی هوا (kgm^{-3})	ρ
ضریب گشتاور آیرو به زاویه گام (Nmdeg^{-1})	τ_β
ضریب گشتاور آیرو به سرعت باد (Ns)	τ_V
ضریب گشتاور آیرو به سرعت روتور (Nmsrad^{-1})	τ_ω
سرعت دورانی ژنراتور (rad/s)	ω_g

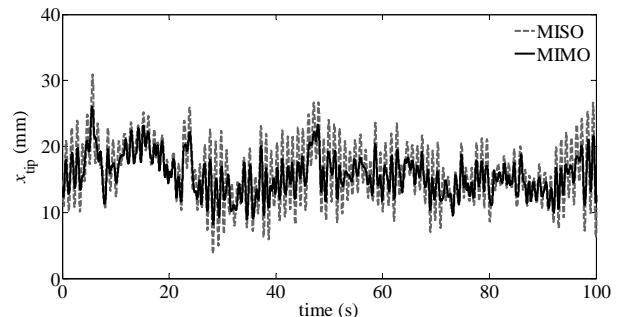


شکل ۱۶ ولتاژ تحریک ژنراتور متناظر با دو کنترلگر چندمتغیره

7- نتیجه‌گیری

کنترل توربین‌های بادی، با توجه به رفتارهای آیروдинامیکی غیرخطی و برهمکنش سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، کنترلگر چندمتغیره-تطبیقی زاویه گام پره‌ها 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 پره‌ها 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.



شکل ۱۷ جایه‌جایی نقطه بالای برج متناظر با دو کنترلگر چندمتغیره
جدول ۳ مقایسه عملکرد کنترلگرهای چندمتغیره

Table 3 Comparison of the multivariable controllers' performance

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

- 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. Waszczuk, 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. Biczel, 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.

$$\omega_r \text{ سرعت دورانی روتور (rad/s)}$$

9- تقدیر و تشکر

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

10- مراجع

- [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. Moeenfar, 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