

کنترل سکوه‌های پایه کششی با تأخیر چندگانه متغیر با زمان در توربین‌های بادی شناور فراساحلی بر اساس روش نامساوی ماتریسی خطی

سعید کیامینی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، ابوالفضل جلیوند^۲، دانشیار، صالح مبین^۱، استادیار

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - kiaminsaeed@znu.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - ajalilvand@znu.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - mobayen@znu.ac.ir

چکیده: در این مقاله به بررسی و کنترل سکوه‌های پایه کششی (TLP)^۱ که یکی از متداول‌ترین سیستم‌های توربین بادی شناور فراساحلی است پرداخته شده است. مهم‌ترین بحثی که در نصب این قبیل توربین‌ها وجود دارد، نحوه کنترل و شناور ساختن آن‌ها بر روی آب است. به منظور طراحی کنترل کننده برای سیستم مذکور، ابتدا یک تابع غیرخطی به عنوان کاندیدای لیاپانوف تعریف می‌شود. سپس ثابت می‌شود که سیستم TLP با تأخیر چندگانه متغیر با زمان، در حضور نیروی خارجی پایدار بوده و با کمک ابزار نامساوی‌های ماتریسی خطی (LMI)^۲ به طراحی کنترل کننده پرداخته می‌شود. در نهایت با شبیه‌سازی در محیط MATLAB-Simulink دیده می‌شود که تمامی متغیرهای حالت سیستم به صورت مجانبی پایدار بوده و در حالت تنظیم‌کنندگی^۳ به سمت صفر همگرا می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های TLP، توربین بادی شناور فراساحلی، تأخیرهای زمانی چندگانه، LMI.

Control of tension leg platforms with multiple time-varying delays in offshore floating wind turbines based on LMI method

S. Kiamini, MSc Student¹, A. Jalilvand, Associate Professor², S. Mobayen, Assistant Professor³

1- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, kiaminsaeed@znu.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, ajalilvand@znu.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, mobayen@znu.ac.ir

Abstract: In this paper, analysis and control of tension leg platforms (TLP) has been discussed, which is one of the most common offshore floating wind turbine systems. The most important subject about installation of these turbines is how to control and float them on the water. In order to design the controller for the system, first, a non-linear function will be defined as a Lyapunov candidate, then we will prove that TLP systems with multiple time-varying delays, in the presence of foreign force is stable and by linear matrix inequalities (LMI) tool, the controller will be designed. Finally, by simulation in Matlab-Simulink, we show that all of the state variables of the system are asymptotically stable and regulatory converge to zero.

Keywords: TLP systems, offshore floating wind turbine, multiple time-varying delays, LMI.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۰۱ و ۱۳۹۵/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۲/۲۲

نام نویسنده مسئول: ابوالفضل جلیوند

نشانی نویسنده مسئول: ایران - زنجان - کیلومتر ۶ جاده تبریز - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

از خود نشان می‌دهند که این امر سبب ناپایداری مکانی توربین می‌شود [۱۰].

از آنجاکه در اغلب سیستم‌های واقعی تأخیرهای ثابت یا متغیر با زمان رخ می‌دهد که باعث عملکرد ضعیف سیستم و ناپایداری در موقعیت مکانی سکوها می‌شود [۱۱-۱۲] بنابراین در این مقاله به کمک ابزارهایی که معرفی خواهند شد، روشی مطرح می‌گردد که بر اساس آن بتوان سیستم‌های TLP را در حضور تأخیر و اغتشاش، کنترل کرد.

در [۱۳]، ضمن پرداختن به بررسی پایداری سیستم‌های TLP به کمک قضیه لیاپانوف فازی، مدل‌سازی شبکه عصبی آن‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته است. در [۱۴-۱۵]، پس از توضیح اجمالی پیرامون مدل سیستم و اضافه کردن یک ترم تأخیر ثابت به مدل [۱۳]، سعی شده است به کمک قضیه لیاپانوف و قواعد فازی به اثبات پایداری سیستم پرداخته شود. در انتها نیز به طراحی کنترل‌کننده در حضور تأخیر ثابت پرداخته شده است. در [۱۶]، به تعیین ضوابطی برای تأخیرهای مستقل در سیستم‌های با تأخیر زمانی چندگانه و کاربرد آن در ساختار سیستم‌های کنترلی پرداخته شده است. در [۱۷]، کاربردی از تئوری لیاپانوف فازی در نامساوی‌های ماتریسی خطی برای یک سیستم بی‌نظم مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۸]، به منظور کنترل وضعیت ماهواره از نامساوی‌های ماتریسی خطی برای طراحی کنترل‌کننده استفاده شده است. در [۱۹]، تشخیص خطا در سیستم‌های با تأخیر زمانی به کمک روش‌های عملگر دلتا و تکنیک ورودی-خروجی صورت گرفته است. در [۲۰]، بهبود معیار و ضوابط پایداری برای سیستم‌های T-S فازی با تأخیر زمانی با تقسیم‌بندی نزدیک تأخیرها به یکدیگر، انجام پذیرفته است. در [۲۱]، تجزیه و تحلیل پایداری جامعه و سلسله‌مراتب اکوسیستم با استفاده از روش لیاپانوف، مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۲۲]، به بررسی و تحلیل سیستم توربین بادی پایه کششی با زمان تأخیر ثابت، با استفاده از روش‌های الگوریتم هوشمند و معیار پایداری عصبی-فازی پرداخته شده است. در [۲۳]، پس از مدل‌سازی عصبی-فازی برای یک اکوسیستم با N درجه آزادی، کنترل‌کننده مطلوب با استفاده از روش نابرابری ماتریس خطی طراحی شده است.

با توجه به مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده، کار منسجمی که تمامی جوانب در زمینه توربین‌های بادی شناور فراساحلی را در نظر گرفته باشد، صورت نگرفته است؛ از این‌رو در این مقاله قصد بر آن است که با در نظر گرفتن شرایط مناسب و با استفاده از نامساوی‌های ماتریسی خطی، برای سیستم‌های TLP با تأخیرهای متغیر با زمان و در حضور اغتشاش، یک کنترل‌کننده مطلوب با عملکرد بهینه طراحی شود.

در ادامه مقاله، در بخش دوم پس از معرفی سیستم، یک مدل جامع برای سیستم‌های TLP که شامل تأخیرهای متغیر با زمان و اغتشاش است، ارائه می‌شود. در بخش بعدی به کمک چند قضیه و لم

افزایش روزافزون جمعیت در سراسر دنیا همراه با رشد مصرف انرژی‌های فسیلی، انسان را واداشت تا به دنبال منابع جدید انرژی برود؛ منابعی که پاک، ارزان و تجدیدپذیر باشند. انرژی حاصل از باد از جمله این منابع است [۱]. از مدت‌ها قبل با نصب توربین‌هایی بر روی خشکی از این انرژی تجدیدپذیر استفاده شده است. توسعه‌دهندگان صنعت توربین‌های بادی برای نصب این توربین‌ها در خشکی با مشکلات زیادی مواجه بوده‌اند. این توربین‌ها می‌بایست دارای ارتفاع، قطر نازل و روتور بسیار بزرگی باشند و از این‌رو نیازمند اشغال مساحت گسترده‌تری هستند [۲-۳].

به دلیل وجود قابلیت‌های مناسب در دریاها، در سال‌های اخیر نظرها به سمت نصب توربین‌های بادی در دریاها (توربین‌های بادی شناور) جلب شده است [۴]. اولین توربین بادی شناور دور از ساحل در سال ۱۹۹۰ ساخته شد. در ابتدا جایگاه این توربین‌ها در آب‌های کم عمق دریای شمال بود [۵]. به نظر می‌رسید استفاده از توربین‌ها در آب‌های عمیق به دلیل گران بودن هزینه نصب و بهره‌برداری آن‌ها مقرون به صرفه نیست؛ ولی امروزه از این توربین‌ها برای تولید انرژی، استفاده‌های فراوانی می‌شود [۶-۷]. از جمله مناطقی که پتانسیل لازم جهت استفاده از این نوع توربین‌ها را دارند می‌توان به کشورهای نظیر هلند، دانمارک، نروژ و سواحل شمال شرقی ایالات متحده آمریکا اشاره کرد [۸].

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در حالت کلی نصب توربین‌های بادی شناور فراساحلی به سه روش صورت می‌پذیرد که پایداری هر یک از این روش‌ها تکنیک‌های خاص خود را می‌طلبد [۹].



شکل ۱: روش نصب انواع توربین‌های بادی شناور فراساحلی. سکوی پایه کششی (راست)، دکل شناور پایدار شده با شن و ماسه (وسط)، سکوی شناور بر روی سطح دریا (چپ)

هدف از این مقاله، بررسی پایداری توربین‌های بادی شناور نوع دوم و اقدام در جهت کنترل آن‌ها است. از جمله دلایل پرداختن به بررسی سیستم‌های TLP، آن است که این قبیل سیستم‌ها به دلیل داشتن وزن سبک در برخورد با موج‌های متلاطم دریا، حرکات نوسانی ناخواسته‌ای

$$w_i(t) = \prod_{p=1}^g (M_{ip} x_p(t)), \quad \hat{h}_i(t) = \frac{w_i(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(t)} \quad (4)$$

$$w_i(t) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^r w_i(t) > 0 \quad (5)$$

بنابراین می‌توان قانون کنترلی $U(t)$ را به صورت زیر بیان کرد:

$$\text{Rule } i: \text{IF } x_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } x_g(t) \text{ is } M_{ig} \\ \text{THEN } U(t) = -K_i X(t), \quad (i = 1, 2, \dots, r) \quad (6)$$

مدل نهایی برای بهره فیدبک حالت K_i برابر است با:

$$U(t) = -\frac{\sum_{i=1}^r w_i(t) K_i X(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(t)} = -\sum_{i=1}^r \hat{h}_i(t) K_i X(t) \quad (7)$$

مطابق مدل فازی (۳) و رابطه به دست آمده در (۷)، می‌توان مدل

یک سیستم TLP را پس از اصلاح، به همراه تأخیر چندگانه متغیر با زمان در نظر گرفت:

$$\dot{X}(t) = A_i X(t) + B_i U(t) \\ + \sum_{k=1}^n A_{dk} X(t - \tau_k(t)) + E_i \phi(t) \quad (8)$$

در این صورت رابطه کلی برای سیستم حلقه بسته با توجه به روابط

(۷) و (۸) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\dot{X}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{l=1}^r \hat{h}_i(t) \hat{h}_l(t) \times \left\{ (A_i - B_i K_l) X(t) \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^n A_{dk} X(t - \tau_k(t)) \right\} + E_i \phi(t) \quad (9)$$

۳- طراحی کنترل کننده با تکنیک لیاپانوف فازی برای سیستم TLP

به منظور به دست آوردن بهره فیدبک، در ابتدا با استفاده از قواعد فازی [۲۶] و قضیه لیاپانوف [۲۷] که مبتنی بر ساختار سیستم است، به اثبات پایداری سیستم TLP با تأخیر چندگانه متغیر با زمان و در حضور اغتشاش، پرداخته می‌شود. پس از طی مراحل اثبات پایداری، در انتهای کار به یک نامساوی ماتریسی دست یافته می‌شود. این نامساوی ماتریسی شرایط لازم برای به کارگیری تکنیک نامساوی ماتریسی خطی (LMI) که به عنوان یک ابزار قدرتمند برای محاسبه مباحث پیچیده کنترلی محسوب می‌شود را فراهم خواهد کرد [۲۸، ۲۹]. در انتهای کار کنترل کننده مطلوب به کمک همین روش و انجام محاسبات ریاضی لازم طراحی خواهد شد.

به منظور تحلیل پایداری سیستم‌های TLP، می‌بایست از تعدادی قضایا و لم‌های ریاضیاتی بهره گرفت که استفاده از این اصول و قواعد ما را در رسیدن به هدف بسیار کمک خواهد کرد.

به اثبات پایداری سیستم پرداخته می‌شود. در ادامه نیز پس از طراحی کنترل کننده به کمک روش LMI، با استفاده از شبیه‌سازی در محیط MATLAB-Simulink، نشان داده می‌شود که تمامی متغیرهای حالت سیستم پایدار می‌شوند.

۲- تشریح مدل سیستم‌های TLP

شرح کلی سیستم‌های TLP که در این مقاله استفاده شده است بر اساس طرح پیشنهادی Garrad-Hassan است [۵]. در اینجا به منظور دست‌یابی به معادلات فضای حالت توربین‌های بادی شناور فراساحلی از حوزه‌های زمان و فرکانس که شامل دو مدل آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی است بهره‌برداری شده است. در همین راستا برای مدل کردن سیستم مذکور، نیاز به بهره‌گیری از یک سری روابط، به خصوص بسط تیلور بود که با در نظر گرفتن فرض‌های معقولی از درجات بالا و عبارات‌های غیرخطی صرف نظر شد [۲۴]. در حالت کلی معادلات فضای حالت حاکم بر سیستم‌های TLP به شرح زیر است [۲۵]:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + f_e(t) \\ Y = CX(t) + DU(t) \quad (1)$$

در رابطه فوق $X(t)$ یک ماتریس $n \times 1$ ، A ماتریس $n \times n$ ، B ماتریس $n \times m$ ، $U(t)$ ماتریس $m \times 1$ ، C ماتریس $m \times n$ بوده و در نهایت $f_e(t)$ به صورت $f_e(t) = E\phi(t)$ در نظر گرفته می‌شود که در آن E ماتریس $n \times 1$ بوده و $\phi(t)$ ناشی از اغتشاش وارد بر سیستم است.

به منظور تضمین پایداری سیستم‌های TLP، از مدل فازی $T-S$ برای تحلیل پایداری استفاده می‌شود. از همین رو در ابتدای کار از i قاعده فازی برای رابطه (۱) استفاده شده است [۱۳]:

$$\text{Rule } i: \text{IF } x_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } x_p(t) \text{ is } M_{ip} \\ \text{THEN } \dot{X}(t) = A_i X(t) + B_i U(t) + E_i \phi(t) \quad (2)$$

که در آن r برابر تعداد قواعد فازی بوده و M_{ip} ($p = 1, 2, \dots, g$) به عنوان توابع عضویت فازی می‌باشند.

در ادامه با فرض فازی‌ساز منفرد و بهره‌گیری از موتور استنتاج حاصل ضرب و نافازی‌ساز میانگین مراکز، مدل دینامیکی سیستم فازی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{X}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(t) [A_i X(t) + B_i U(t) + E_i \phi(t)]}{\sum_{i=1}^r w_i(t)} \\ = \sum_{i=1}^r \hat{h}_i(t) [A_i X(t) + B_i U(t) + E_i \phi(t)] \quad (3)$$

در رابطه (۳) $\hat{h}_i(t)$ و $w_i(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$V(x(t)) = \sum_{i=1}^r h_i(t) X^T(t) P_i X(t) + \sum_{k=1}^n \int_{t-\tau_k}^t X^T(t-\tau_k(t)) R_k X(t-\tau_k(t)) d\tau \quad (16)$$

در رابطه (۱۶) ماتریس‌های $R = R^T > 0$ و $P = P^T > 0$ تعریف می‌شوند. حال از تابع V نسب به زمان مشتق می‌گیریم با این فرض که همواره به ازای تمامی مقادیر $k = 1, 2, \dots, n$ ، اندازه مشتق تأخیر زمانی در محدوده ζ_k قرار می‌گیرد. مطابق نامساوی $\zeta_k < \zeta$ ، $|\dot{\tau}_k(t)| \leq \zeta_k$ ، ζ یک باند بالا برای ζ_k است:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{p=1}^r \dot{h}_p X^T(t) P_p X(t) + \sum_{i=1}^r h_i(t) \{ \dot{X}^T(t) P_i X(t) + X^T(t) P_i \dot{X}(t) \} \\ &+ \sum_{k=1}^n X^T(t) R_k X(t) - \sum_{k=1}^n (1-\zeta_k) X^T(t-\tau_k(t)) R_k X(t-\tau_k(t)) \\ &= \sum_{p=1}^r \dot{h}_p X^T(t) P_p X(t) + \sum_{k=1}^n X^T(t) R_k X(t) - \sum_{k=1}^n (1-\zeta_k) X^T(t-\tau_k(t)) R_k X(t-\tau_k(t)) \\ &+ \sum_{i=1}^r h_i(t) \left\{ \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^r h_j(t) h_l(t) \left[(A_j - B_j K_l) X(t) + \sum_{k=1}^n A_{dk} X(t-\tau_k(t)) + E_i \phi(t) \right]^T P_i X(t) \right. \\ &\left. + X^T(t) P_i \left[\sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^r h_j(t) h_l(t) \times \left[(A_j - B_j K_l) X(t) + \sum_{k=1}^n A_{dk} X(t-\tau_k(t)) + E_i \phi(t) \right] \right] \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

بنابراین بر اساس رابطه (۱۷) داریم:

لم ۱: برای هر $A, B \in R^{n \times n}$ و برای هر ماتریس مثبت معینی مانند $G \in R$ رابطه زیر برقرار است [۳۰]:

$$-2A^T B \leq A^T G A + B^T G^{-1} B \quad (10)$$

لم ۲: سیستم فـازای حلقه بسـته

$$\dot{X}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{l=1}^r h_i(t) h_l(t) \{ (A_i - B_i K_l) X(t) \}$$

سمت نقطه‌ی تعادلش همگرا می‌شود، اگر یک ماتریس مثبت معین مانند $P = P^T > 0$ وجود داشته باشد به طوری که [۳۱]:

$$(A_i - B_i K_l)^T P + P (A_i - B_i K_l) < 0 \quad (11)$$

لم ۳: با توجه به عملکرد کنترل H^∞ و به منظور کاهش تأثیرپذیری تابع $\phi(t)$ بر روی متغیر حالت $X(t)$ داریم [۳۲-۳۵]:

$$\int_0^{t_f} X^T(t) Q X(t) dt \leq \eta^2 \int_0^{t_f} \phi^T(t) \phi(t) dt \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) ماتریس Q یک ماتریس مثبت معین بوده و η تأثیر $\phi(t)$ بر روی $X(t)$ است. همچنین اگر بخواهیم شرایط اولیه را وارد معادله کنیم نامساوی (۱۲) به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$\int_0^{t_f} X^T(t) Q X(t) dt \leq X^T(0) P X(0) + \eta^2 \int_0^{t_f} \phi^T(t) \phi(t) dt \quad (13)$$

لم ۴: مجموعه نامساوی‌های غیرخطی به شکل $R(x) > 0$ ، $Q(x) - S(x) R^{-1}(x) S^T(x) > 0$ ، $R(x) > 0$ و $R(x) = R^T(x)$ و $S(x) = S^T(x)$ به صورت زیر قابل تبدیل است [۳۶]:

$$\begin{bmatrix} Q(x) & S(x) \\ S(x)^T & R(x) \end{bmatrix} > 0 \quad (14)$$

قضیه ۱: سیستم حلقه بسته (Λ) پایدار است به شرط آن که یک ماتریس مثبت معینی نظیر $P \in R$ ، یک عدد ثابت مثبت مانند η و بهره فیدبک K_l وجود داشته باشد، به نحوی که رابطه نامساوی زیر برقرار گردد:

$$\sum_{p=1}^r \phi_p P_p + (A_j - B_j K_l) P_i + P_i (A_j - B_j K_l) + \sum_{k=1}^n R_k + P_i \sum_{k=1}^n A_{dk} R_k^{-1} A_{dk}^T P_i + Q < 0 \quad (15)$$

که در آن مقادیر بهره K_l و ماتریس‌های R_k به کمک لم شر و رابطه (۱۵) به دست می‌آیند.

اثبات: با در نظر گرفتن یک تابع مثبت معین V به عنوان کاندید لیاپانوف، در ادامه ثابت خواهد شد که مشتق تابع معرفی شده منفی است. در این صورت پایداری سیستم تضمین می‌گردد.

$$\sum_{k=1}^n X^T(t - \tau_k(t)) A_{dk}^T P_i X(t) + X^T(t) P_i \sum_{k=1}^n A_{dk} X(t - \tau_k(t))$$

$$\leq - \sum_{k=1}^n (1 - \zeta_k) X^T(t - \tau_k(t)) R_k X(t - \tau_k(t))$$

$$+ X^T(t) \left[P_i \sum_{k=1}^n A_{dk} R_k^{-1} A_{dk}^T P_i \right] X(t)$$

بر اساس رابطه بیان شده در (۱۸) و فرض بالا، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{V} \leq \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^r \dot{h}_i(t) \dot{h}_j(t) \dot{h}_l(t) X^T(t)$$

$$\times \left\{ \sum_{p=1}^r \phi_p P_p + (A_j - B_j K_l) P_i + P_i (A_j - B_j K_l) \right. \quad (۱۹)$$

$$\left. + \sum_{k=1}^n R_k + P_i \sum_{k=1}^n A_{dk} \bar{R}_k A_{dk}^T P_i + \bar{\eta} P_i E_i E_i^T P_i \right\} X(t)$$

با تغییر متغیر $\bar{R} = R^{-1}$ و $\bar{\eta} = \eta^{-2}$ در رابطه فوق و همچنین با بهره‌گیری از قضیه ۱ و استفاده از روابط (۱۶) تا (۱۹) داریم:

$$\dot{V} \leq \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^r \dot{h}_i(t) \dot{h}_j(t) \dot{h}_l(t) X^T(t) \{-Q\} X(t) \quad (۲۰)$$

$$+ \eta^2 \|\phi(t)\|^2 = -X^T(t) Q X(t) + \eta^2 \|\phi(t)\|^2$$

در ادامه با انتگرال‌گیری از طرفین نامساوی فوق از $t = 0$ تا $t = t_f$ و همچنین با در نظر گرفتن رابطه (۱۶) داریم:

$$\int_0^{t_f} X^T(t) Q X(t) dt \leq$$

$$X^T(0) P X(0) + \eta^2 \int_0^{t_f} \phi(t)^T \phi(t) dt$$

نامساوی فوق همان لم ۳ است. بنابراین به کارایی کنترل کننده H^∞ دست یافته شد. حال می‌توان به کمک لم شور، قضیه ۱ را بازنویسی کرد و پس از تغییر متغیر مناسب به یک مسئله LMI تبدیل کرد.

$$\begin{bmatrix} \bar{Y} & * & * & * & * & * & * & * \\ W_i & -\bar{Q} & * & * & * & * & * & * \\ W_i & 0 & -\bar{R}_1 & * & * & * & * & * \\ W_i & 0 & 0 & \ddots & * & * & * & * \\ W_i & 0 & 0 & 0 & -\bar{R}_n & * & * & * \\ W_i & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_1 P_1 & * & * \\ W_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & * \\ W_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_r P_r \end{bmatrix} < 0 \quad (۲۱)$$

که در آن تغییر متغیرها به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\dot{V} \leq \sum_{p=1}^r \dot{h}_p X^T(t) P_p X(t) + \sum_{k=1}^n X^T(t) R_k X(t)$$

$$- \sum_{k=1}^n (1 - \zeta_k) X^T(t - \tau_k(t)) R_k X(t - \tau_k(t))$$

$$+ \phi^T(t) E_i^T P X(t) + X^T(t) P E_i \phi(t)$$

$$- \left[\eta^2 \phi^T(t) \phi(t) + \frac{1}{\eta^2} X^T(t) P E_i E_i^T P X(t) \right]$$

$$+ \left[\eta^2 \phi^T(t) \phi(t) + \frac{1}{\eta^2} X^T(t) P E_i E_i^T P X(t) \right]$$

$$+ \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^r \dot{h}_i(t) \dot{h}_j(t) \dot{h}_l(t) X^T(t) \left\{ (A_j - B_j K_l) P_i \right.$$

$$+ P_i (A_j - B_j K_l)^T \left. \right\} X(t)$$

$$+ \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^r \dot{h}_i(t) \dot{h}_j(t) \dot{h}_l(t)$$

$$\times \left[\sum_{k=1}^n X^T(t - \tau_k(t)) A_{dk}^T P_i X(t) \right.$$

$$\left. + X^T(t) P_i \sum_{k=1}^n A_{dk} X(t - \tau_k(t)) \right]$$

در ادامه خواهیم داشت:

$$\dot{V} \leq \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^r \dot{h}_i(t) \dot{h}_j(t) \dot{h}_l(t) X^T(t) \left\{ \sum_{p=1}^r \phi_p P_p \right.$$

$$\left. + (A_j - B_j K_l) P_i + P_i (A_j - B_j K_l) + \frac{1}{\eta^2} P E_i E_i^T P \right\} X(t)$$

$$- \left(\frac{1}{\eta} (P E_i)^T X(t) - \eta \phi(t) \right)^T \left(\frac{1}{\eta} (P E_i)^T X(t) - \eta \phi(t) \right)$$

$$+ \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^r \dot{h}_i(t) \dot{h}_j(t) \dot{h}_l(t)$$

$$\times \left[\sum_{k=1}^n X^T(t - \tau_k(t)) A_{dk}^T P_i X(t) \right. \quad (۱۸)$$

$$\left. + X^T(t) P_i \sum_{k=1}^n A_{dk} X(t - \tau_k(t)) \right]$$

$$+ \eta^2 \|\phi(t)\|^2 + \sum_{k=1}^n X^T(t) R_k X(t)$$

$$- \sum_{k=1}^n (1 - \zeta_k) X^T(t - \tau_k(t)) R_k X(t - \tau_k(t))$$

مطابق لم ۱، نامساوی زیر را می‌توان به دست آورد:

جدول ۱: معرفی متغیرهای حالت سیستم

$x_7(t) = \bar{w}(t) \text{ (rad/s)}$	سرعت متوسط چرخش روتور
$x_8(t) = \zeta(t) - \bar{\zeta}(t) \text{ (m)}$	انحراف از میانگین مکان موج
$x_9(t) = \dot{\zeta}(t) \text{ (m/s)}$	سرعت موج
$x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t) \text{ (Nm/s)}$	تأثیرات حفظه‌ای سیستم

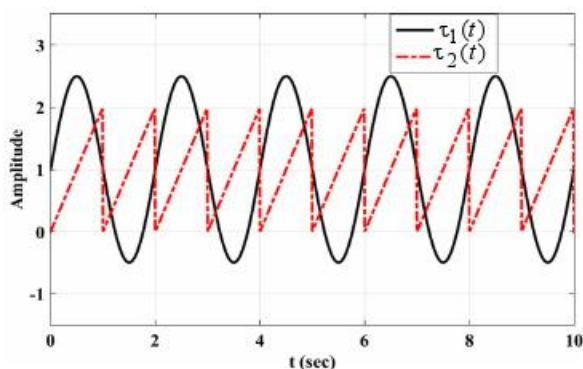
$$A_{d1} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0.05 & 0 & 0.07 & 0 & -0.1 \\ 0 & 0 & 0.17 & 0.01 & 0 & 0.01 & 0.1 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0.15 & 0 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & -0.06 & 0.07 & 0.021 & 0 & 0.12 \\ 0.1 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 \\ 0.2 & 0.3 & 0.05 & 0.01 & 0.01 & -0.02 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$A_{d2} = \begin{bmatrix} -0.6 & 0.15 & -0.05 & 0 & 0 & 0.3 & 0.12 \\ -0.1 & 0.5 & 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0.1 \\ 0.21 & 0.1 & 0 & 0 & 0.25 & 0 & 0.1 \\ 0.06 & -0.5 & -0.06 & 0.07 & 0.121 & 0 & 0.2 \\ 0.1 & -0.15 & 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0.3 \\ -0.3 & 0.05 & 0.25 & 0.01 & -0.01 & -0.12 & 1 \\ 0.2 & 0.1 & 0 & -0.01 & 0.01 & -0.21 & -0.1 \end{bmatrix}$$

به‌منظور آنکه بتوان کارایی و مقاوم بودن کنترل‌کننده طراحی شده را بهتر نشان داد، فرآیند شبیه‌سازی بر اساس دو سناریو پیاده‌سازی شده است.

در حالت اول شرایط اولیه سیستم برابر $x_0 = [0.5 \ 0.9 \ 0.7 \ 0.5 \ -0.75 \ -0.8 \ 0.45]^T$ و اغتشاش وارد شده بر سیستم به صورت $\phi(t) = 100 \sin(\pi t)$ در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۲ تأخیرهای زمانی سیستم یکی به شکل سینوسی $\tau_1(t) = 1 + 1.5 \sin(\pi t)$ و دیگری نیز به صورت دندان‌اره‌ای در نظر گرفته شده است.

در ادامه پس از جایگذاری مقادیر محاسبه‌شده، با اعمال تأخیر و در حضور اغتشاش، به شبیه‌سازی سیستم در محیط MATLAB-Simulink پرداخته می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم TLP در این سناریو در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲: تأخیرهای سیستم TLP

$$H_{jl} = A_j - B_j K_l, W_i = P_i^{-1}, \bar{Q} = Q^{-1}, \bar{R} = R^{-1}$$

$$\bar{Y} = H_{jl} W_i + W_i^T H_{jl}^T + P_i \sum_{k=1}^n A_{dk} \bar{R}_k A_{dk}^T P_i + \bar{\eta} \bar{E}_i \bar{E}_i^T$$

$i, j, l = 1, 2, \dots, r$ و علامت * بیانگر درایه‌هایی از ماتریس (۲۱) است که به صورت متقارن نسبت به قطر اصلی قرار گرفته‌اند.

اکنون با در نظر گرفتن دو تأخیر متغیر با زمان $(n = 2)$ و $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p$ برابر با صفر، رابطه (۲۱) با شرایط بیان‌شده، به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \bar{Y} & * & * & * \\ W_i & -\bar{Q} & * & * \\ W_i & 0 & -\bar{R}_1 & * \\ W_i & 0 & 0 & -\bar{R}_2 \end{bmatrix} < 0 \quad (22)$$

به این ترتیب پس از آنکه پایداری سیستم تضمین گردید به کمک تکنیک LMI، از نامساوی ماتریسی فوق برای به دست آوردن بهره کنترلی استفاده خواهد شد.

۴- شبیه‌سازی

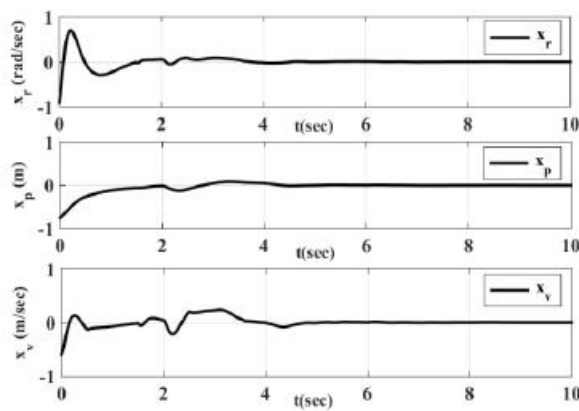
در بخش قبل ضمن اثبات پایداری سیستم به نامساوی (۱۵) دست یافتیم. چون نامساوی به‌دست‌آمده به اصطلاح Affine (شامل دو عبارت با مقادیر نامعلوم که در همدیگر ضرب شده‌اند) نیست، با ضرب کردن طرفین نامساوی در $W_i = P_i^{-1}$ به یک عبارت Affine خواهیم رسید. در این صورت با بهره‌گیری از لم شور شرایط لازم برای دست‌یابی به نامساوی ماتریسی خطی (LMI) فراهم خواهد شد. اکنون با کد نویسی و استفاده از جعبه‌ابزار LMI در نرم‌افزار MATLAB و همچنین بهره‌گیری از YALMIP به‌عنوان حل‌کننده نامعادلات ماتریسی خطی [۳۷]، می‌توان مقادیر بهینه $\bar{Y}, \bar{R}_1, \bar{R}_2$ را با انتخاب مقدار مناسب برای ماتریس Q به دست آورد. درنهایت با داشتن \bar{Y} می‌توان $H_{jl} = A_j - B_j K_l$ را محاسبه کرد و سپس از طریق آن K_l نیز به دست خواهد آمد که این امر منجر به حصول بهره بهینه کنترل‌کننده می‌شود. اکنون پس از معرفی پارامترهای سیستم، مقادیر عددی موردنیاز را از توربین بادی NREL 5MW استخراج می‌کنیم [۱۰].

پس از اعمال تأخیرهای متغیر با زمان به سیستم‌های TLP، می‌توان مدل استاندارد فضای حالت سیستم را در حضور اغتشاش به صورت زیر بیان کرد [۱۴]:

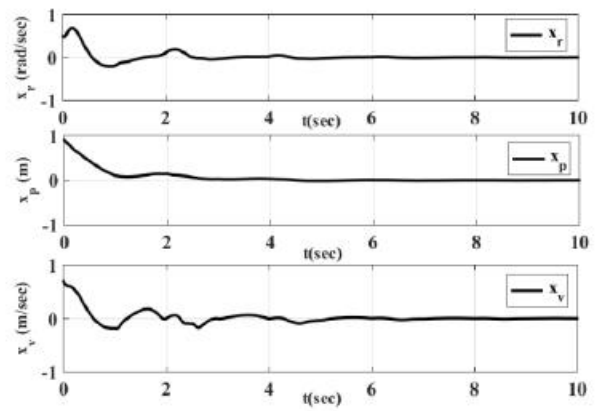
$$\dot{X}(t) = AX(t) + \sum_{k=1}^2 A_k X(t - \tau_k(t)) + BU(t) + E\phi(t) \quad (23)$$

$$X(t) = [x_7(t), x_8(t), x_9(t), x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)]^T$$

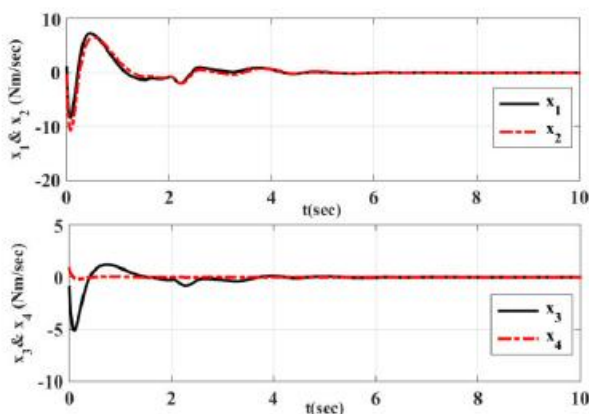
که در آن تعریف متغیرهای حالت مطابق جدول ۱ در نظر گرفته می‌شود.



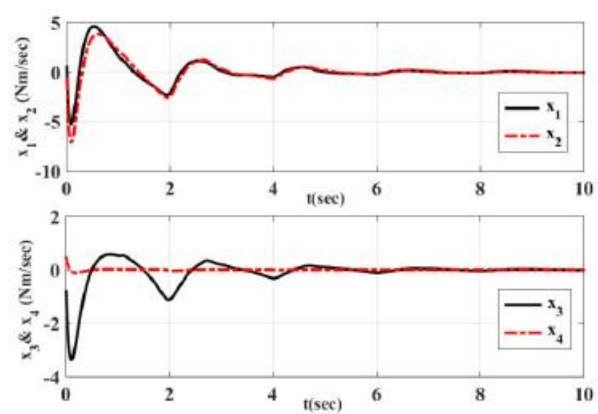
شکل ۶: متغیرهای حالت x_r, x_p, x_v سیستم TLP



شکل ۳: متغیرهای حالت x_r, x_p, x_v سیستم TLP



شکل ۷: متغیرهای حالت x_1, x_2, x_3, x_4 سیستم TLP



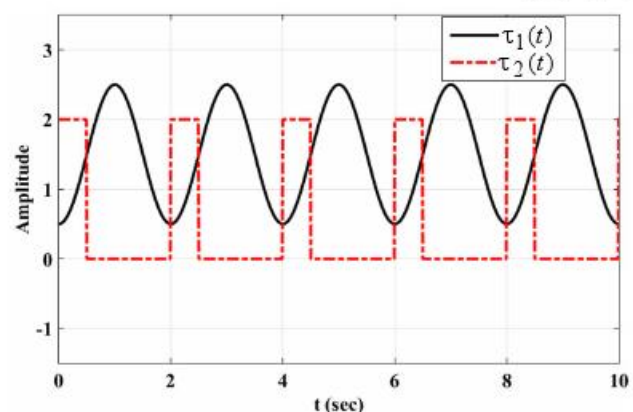
شکل ۴: متغیرهای حالت x_1, x_2, x_3, x_4 سیستم TLP

بر اساس نتایج حاصل در هر دو سناریو مشاهده می‌شود که تمامی متغیرهای حالت سیستم پس از گذشت مدت زمان کوتاهی (عبور از حالت گذار) به صورت رگولاتوری به سمت صفر میل می‌کنند.

۵- نتیجه گیری

گسترش روزافزون بهره‌گیری از توربین‌های بادی شناور فراساحلی انگیزه‌ای بود که در این مقاله به معرفی مدل جامع و کاملی که تاکنون صورت نگرفته است، پرداخته شود. در کار ارائه شده پس از معرفی مدل سیستم‌های TLP با تأخیر چندگانه متغیر با زمان، قانون کنترلی LMI در حضور اغتشاش، مستقیماً از طریق پایداری لیاپانوف و با بهره‌گیری از لم شور به دست آورده شد. همچنین یک تابع غیرخطی به عنوان تابع کاندید لیاپانوف پیشنهاد شد که با این انتخاب، علاوه بر اینکه متغیرهای حالت سیستم با حداقل دامنه نوسانات و طی مدت زمان کوتاهی از حالت گذار عبور کرده و به حالت ماندگار رسیدند، با بهبود ثنوری پایداری مجانبی شرایط مناسبی برای طراحی کنترل کننده فراهم شد که در عین سادگی نتایج مطلوبی به همراه داشت. در انتهای کار با شرایط فراهم شده، سیستم مورد مطالعه در محیط MATLAB-Simulink طی دو سناریوی مختلف شبیه‌سازی شد. بر اساس نتایج حاصل شده مشاهده شد که در هر دو حالت سیستم به

در حالت بعدی، شرایط اولیه به شکل $x_0 = [0.9 \ -0.75 \ -0.6 \ 0.9 \ -0.5 \ -1 \ 0.8]^T$ شده، اغتشاش به صورت $\phi(t) = 50 \sin(3\pi t) + 75x_1 \cos(2\pi t)$ و تأخیرهای زمانی وارد شده بر روی سیستم، همانند شکل ۵ به صورت $\tau_1(t) = 1.5 - \cos(\pi t)$ و دیگری نیز به صورت یک موج پالسی با دامنه ۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: تأخیرهای سیستم TLP

در این حالت نیز همانند شرایط قبل، پس از اعمال مقادیر فوق سیستم مورد مطالعه در محیط MATLAB-Simulink شبیه‌سازی شد که نتایج حاصل در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

- [16] C. W. Chen, "Delay independent criterion for multiple time-delay systems and its application in building structure control systems," *Journal of Vibration and Control*, vol. 19, no. 3, pp. 395-414, 2013.
- [17] C. W. Chen, "Applications of the fuzzy Lyapunov linear matrix inequality criterion to a chaotic structural system," *Journal of Vibration and Control*, vol. 18, no. 13, pp. 1925-1938, 2012.
- [18] فاطمه پیروزمند، نعمت‌الله قهرمانی و محمدرضا عارون، «طراحی کنترل کننده پیش‌بین مقاوم با استفاده از نامساوی‌های ماتریسی خطی برای سیستم کنترل وضعیت ماهواره»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۴، شماره ۴، زمستان ۹۳.
- [19] H. Li, Y. Gao, L. Wu and H. K. Lam, "Fault detection for T-S fuzzy time-delay systems: Delta operator and input-output methods," *IEEE Transactions on Cybernetic*, vol. 45, no. 2, pp. 229-241, 2015.
- [20] J. An and G. Wen, "Improved stability criteria for time-varying delayed T-S fuzzy systems via delay partitioning approach," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 185, no. 1, pp. 83-94, 2011.
- [21] M. L. Lin and C. W. Chen, "Stability analysis of community and ecosystem hierarchies using the Lyapunov method," *Journal of Vibration and Control*, vol. 17, no. 13, pp. 1930-193, 2010.
- [22] C. W. Chen, "A review of intelligent algorithm approaches and neural-fuzzy stability criteria for time-delay tension leg platform systems," *Journal of Vibration and Control*, vol. 20, no. 4, pp. 561-575, 2014.
- [23] M. L. Lin and C. W. Chen, "Fuzzy neural modeling for n-degree ecosystems using the linear matrix inequality approach," *Journal of Vibration and Control*, vol. 20, no. 1, pp. 82-93, 2014.
- [24] C. Casanovas, *Advanced Controls for Floating Wind Turbines*, M.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [25] C. W. Chen, "Stability conditions of fuzzy systems and its application to structural and mechanical systems," *Advances in Engineering Software*, vol. 37, no. 9, pp. 624-629, 2006.
- [26] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965.
- [27] فاطمه منفرد، محمدحسین شفیع و طاهره بینازاد، «طراحی کنترل کننده ردیاب مقاوم برای یک روبات متحرک غیرهولونومیک دارای لغزش جانبی با روش‌های بازطراحی لیاپانوفی و H_∞ غیرخطی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۵۴، شماره ۵، زمستان ۹۴.
- [28] S. Mobayen, "An LMI-based robust tracker for uncertain linear systems with multiple time-varying delays using optimal composite nonlinear feedback technique," *Nonlinear Dynamics*, vol. 80, no. 1, pp. 927-917, 2015.
- [29] W. Assawinchaichote, E.K. Boukas, S.K. Nguang and P. Shi, "H_∞ fuzzy state-feedback control design for nonlinear systems with D-stability constraints: an LMI approach," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 78, no. 4, pp. 514-531, 2008.
- [30] X. Li and C. D. Souza, "Criteria for robust stability and stabilization of uncertain linear systems with state delay," *Automatica*, vol. 33, no. 9, pp. 1657-1662, 1997.
- [31] F. H. Wang, K. Tanaka and M. F. Griffin, "An approach to fuzzy control of nonlinear systems: stability and design ازای تأخیرات زمانی و اغتشاشات وارد شده پاسخ مطلوبی از خود نشان داد و تمامی متغیرهای حالت سیستم با حداقل دامنه نوسانات به‌سمت صفر میل کردند.
- مراجع
- [1] G. R. Fulton, D.J. Malcolm, H. Elwany, W. Stewart, E. Moroz and H. Dempster, *Semi-submersible platform and anchor foundation systems for wind turbine support*, National Laboratory of U.S Department of Energy, 2007.
- [2] M. Karimirad, *Stochastic Dynamic Response Analysis of Spar-Type Wind Turbines with Catenary or Taut Mooring Systems*, Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [3] O. J. Emmerhoff and P. D. Sclavounos, "The slow drift motion of arrays of vertical cylinders," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 242, pp. 31-50, 1992.
- [4] M. Reiszadeh and S. Motaha, "The wind energy potential in the coasts of persian gulf used in design and analysis of a horizontal axis wind turbine," *World Renewable Congress*, vol. 15, pp. 4058-4065, 2011.
- [5] A. R. Henderson and K. Argyriadis, "Offshore wind turbines on TLPs - Assessment of floating support structures for offshore wind farms in german waters," *10th German Wind Energy Conference Bremen*, 2010.
- [6] T. Perez and T. I. Fossen, "Practical aspects of frequency-domain identification of dynamic models of marine structures from hydrodynamic data," *Ocean Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 426-435, 2011.
- [7] W. Koo and M.H. Kim, "Freely floating-body simulation by a 2D fully nonlinear numerical wave tank," *Ocean Engineering*, vol. 31, no. 16, pp. 2011-2046, 2004.
- [8] J. Jonkman and D. Matha, *Quantitative Comparison of the Responses of Three Floating Platforms*, National Renewable Energy Laboratory of U.S, Department of Energy, 2010.
- [9] T. Shikha, S. Bhatti and D. P. Kothari, "Aspects of technological development of wind turbines," *Journal of Energy Engineering*, vol. 129, no. 3, pp. 81-95, 2003.
- [10] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*, National Laboratory of U.S Department of Energy, 2009.
- [11] S. Mobayen, "Fast terminal sliding mode controller design for nonlinear second-order systems with time-varying uncertainties," *Complexity*, vol. 21, no. 2, pp. 239-244, 2015.
- [12] M. C. Pai, "Design of adaptive sliding mode controller for robust tracking and model following" *Journal of the Franklin Institute*, vol. 347, no. 10, pp. 1837-1849, 2010.
- [13] J. W. Lin, C. W. Huang, C. H. Shih and C. Y. Chen, "Fuzzy lyapunov stability analysis and NN modeling for tension leg platform systems," *Journal of Vibration and Control*, vol. 17 no. 1, pp. 151-158, 2011.
- [14] C. W. Chen, "Modeling, control, and stability analysis for time-delay TLP systems using the fuzzy Lyapunov method," *Neural Computing and Application*, vol. 20, pp. 527-534, 2011.
- [15] C. Y. Chen, J. W. Lin, W. I. Lee and C. W. Chen, "Fuzzy control for an oceanic structure: A case study in time-delay TLP system," *Journal of Vibration and Control*, vol. 16, no. 1, pp. 147-160, 2010.

- issues," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 14-23, 1996.
- [32] F. H. Hsiao, C. W. Chen, Y. W. Liang, S. D. Xu and W. L. Chiang, "T-S fuzzy controllers for nonlinear interconnected systems with multiple time delays," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 52, no. 9, pp. 1883-1893, 2005.
- [33] F. H. Hsiao, C. W. Chen, Y. H. Wu and W. L. Chiang, "Fuzzy controllers for nonlinear interconnected TMD systems with external force," *Journal of Chinese Institute of Engineering*, vol. 28, no. 1, pp. 175-18, 2005.
- [34] F. H. Hsiao, W. L. Chiang, C. W. Chen, S. D. Xu and S.L. Wu, "Application and robustness design of fuzzy controller for resonant and chaotic systems with external disturbance," *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, vol. 13, no. 3, 2005.
- [35] F. H. Hsiao, J. D. Hwang, C. W. Chen and Z. R. Tsai, "Robust stabilization of nonlinear multiple time-delay large-scale systems via decentralized fuzzy control," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 152 - 163, 2005.
- [36] Z. Feng and J. Lam, "Integral partitioning approach to robust stabilization for uncertain distributed time-delay systems," *International Journal of Robust Nonlinear Control*, vol. 26, no. 2, pp. 676-689, 2012.
- [37] J. Lofberg, "YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB", *IEEE International symposium on Computer Aided Control Systems*, pp. 284-289, 2004.

زیرنویس‌ها

-
- † Tension Leg Platform
 - ‡ Linear Matrix Inequality
 - * Regulatory