مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
مقاله پژوهشی
جلد۱۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، صفحه ۸۴-۷۵

طراحی کنترل کلیدزن نظارتی اغتشاش به کمک مفاهیم کنترل ابطال‌ناپذیر

مجتبی نوری منظر

استادیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید بهشتی،تهران، ایران m_nourimanzar@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۷ ویرایش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

چکیده: کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر رویکرد داده‌محور کلیدزنی در کنترل تطبیقی مقاوم است که تنها بر اساس داده‌های ورودی-خروجی سیستم از میان بانک کنترلی در دسترس کنترل‌کننده پایدارساز را انتخاب می‌کند. این انتخاب بدون فعال‌سازی کنترل‌کننده‌ها و بر اساس سیگنال مرجع مجازی و یک تابع هزینه انجام شده و پایداری سیستم حلقه بسته تضمین می‌شود. در این مقاله با الهام از رویکرد کنترل ابطال‌ناپذیر، هدف یافتن کنترل‌کننده‌ای از میان بانک کنترلی از پیش طراحی شده در دسترس است که بیشترین میزان تضعیف اغتشاش را دارد. این تصمیم بر اساس داده‌های سیستم و بدون اندازه‌گیری اغتشاش به کمک یک تابع هزینه انجام می‌شود. با معرفی مفهوم جدیدی به نام اغتشاش مجازی، عملکردکنترل‌کننده‌ها بدون فعال‌سازی آن‌ها ارزیابی می‌شود. همگرایی الگوریتم و میزان تضعیف اغتشاش روش پیشنهادی در قضیه‌ای اثبات شده است. به کمک شبیه‌سازی روی یک سیستم توربین باد، عملکرد روش پیشنهادی برای اغتشاشات گوناگون از جنس سرعت باد نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: کنترل اغتشاش، کنترل نظارتی کلیدزن، کنترل ابطال‌ناپذیر، توربین بادی

Disturbance supervisory switch control design by using Unfalsified control concepts

Mojtaba Nouri Manzar

Abstract: Unfalsified adaptive control strategy is a data-driven approach in robust adaptive control that selects the stabilizing controller from an the available control bank based on the input-output system's data. Selection is done without activating the controllers by using the virtual reference signal and a cost function. Stability of the closed loop system is guaranteed. In this paper, inspired by the unfalsified control approach, the goal is to select a controller from the available pre-designed controller bank that has the highest level of disturbance attenuation. The selection is based on the system's data by using a cost function without disturbance measurement. By introducing a new concept called virtual disturbance, the performance of controllers is evaluated without activation. The convergence of the algorithm and the disturbance attenuation level of the proposed method have been proven in a theorem. Simulation results show performance of the proposed method on a wind turbine for various wind speed disturbances.

Keywords: Disturbance control, Supervisory Switching Control, Unfalsified control, Wind Turbine.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.6.4]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.75]

۱- مقدمه

وجود اغتشاش در سیستم‌های واقعی امری اجتناب‌ناپذیر است و موجب افت عملکرد سیستم کنترل می‌شود. به طور کلی دو رویکرد در ادبیات کنترل برای بهبود عملکرد در مواجهه با اغتشاشات وجود دارد: ۱- روش‌های بر اساس تخمینگر ۲- روش‌های بدون تخمینگر. از رویکردهای اولیه کنترل اغتشاش، کنترل مقاوم است که بدون استفاده از رویتگر، اثر اغتشاش را در خروجی عملکردسیستم کمینه می‌کند [۱].

کنترل اغتشاش بر اساس رویتگر (DOBC[1]) در اواخر دهه ۸۰ میلادی توسعه یافته است. ایده اصلی آن تخمین اغتشاش بوسیله یک رویتگر و جبران آن در حلقه کنترل است. در [۲] برای یک سیستم غیرخطی، یک روش DOBC با رویتگر غیرخطی اغتشاش برای سیستم یک ورودی-یک خروجی و در [۳] برای سیستم چند ورودی-چند خروجی ارائه شده است. همچنین، ترکیب DOBC با کنترل PI در [۴]، ترکیب DOBC با کنترل H_∞ در [۵]، ترکیب DOBC با کنترل مد لغزشی در [۶]، ترکیب DOBC با کنترل تطبیقی مقاوم در [۷] انجام شده است. یک DOBC با رویتگر غیرخطی برای سیستم نامعین فضاپیما در [۸] ارائه شده که هم تضعیف اغتشاش داشته و هم پایداری مقاوم را تضمین می‌کند. کنترل دفع اغتشاش فعال ADRC[2] نیز رویکردی شبیه به DOBC دارد. ADRC در وجود نامعینی مدل با در نظرگرفتن یک حالت مجازی[3] تلاش دارد که کل اغتشاشات را تخمین زده و آن در سیگنال کنترل جبران کند. معمولاً ADRC شامل دو جز اصلی مشتقگیر ردیاب[4] و رویتگر حالت تعمیم‌یافته[5] است [۹]. در زمینه ADRC مقالات متعددی وجود داشته و روی سیستم‌های مختلفی از جمله نیروگاه‌ها [۱۰]، موتورهای الکتریکی [۱۱] و غیره برای تضعیف و حذف اغتشاش پیاده‌سازی شده است. همچنین برای نرم‌افزار MATLAB نیز اخیراً جعبه‌ابزاری در زمینه ADRC توسعه یافته است [۱۲].

تضعیف اغتشاش با کلیدزنی در زمان به وسیله منطق کلیدزنی زمان نشست متوسط[6] و تابع لیاپانوف تکه‌ای در [۱۳] بررسی شده و سطح تضعیف مشخصی تضمین می‌شود. برای سیستم‌های کنترل تحت شبکه با تاخیر متغیر با زمان و مفقود شدن داده، پایداری ضمن تضعیف اغتشاش با معیار H_∞ در [۱۴] ارائه شده است. در [۱۵]، یک کنترل مد لغزشی برای یک سیستم چندمتغیره با عدم قطعیت و تضعیف اغتشاش به کمک معادلات ریکاتی انجام شده است. برای یک سیستم کلیدزن مارکوف با حالت‌های غیررویت‌پذیر، کنترل ضداغتشاش[7] با ساختار سلسله‌مراتبی ارائه شده و شرایط کافی برای وجود کنترل‌کننده و رویتگر در [۱۶] به دست آمده است.

در این مقاله از ایده‌های کنترل ابطال‌ناپذیر برای انتخاب کنترل‌کننده با حداکثر تضعیف اغتشاش استفاده می‌شود. کنترل ابطال‌ناپذیر روش داده‌محوری است که تنها با داده ورودی-خروجی سیستم از میان بانک کنترلی کنترل‌کننده پایدارساز را انتخاب می‌کند. ایده کنترل ابطال ناپذیر برای مرتفع کردن فرض‌هایی که در طراحی سیستم‌های کنترل تطبیقی لازم بود (بطور مثال درجه نسبی مدل، علامت بهره فرکانس بالا و غیره) برای اولین بار در [۱۷] مطرح شد. پایداری کنترل تطبیقی نظارتی ابطال‌ناپذیر در [۱۸] با اصلاح تابع هزینه ارائه شد. در ادبیات کنترل، این رویکرد مورد توجه محققان قرار گرفت و مقالات متعددی تا امروز در این زمینه به چاپ رسیده است. از جمله آن‌ها می‌توان به بهبود عملکرد روش UASC با استفاده از مدل‌های چندگانه در [۱۹] (که به آن MMUASC [8] گفته می‌شود)، UASC با بانک کنترل‌کننده‌های پیش‌بین در [۲۰]، UASC با تابع هزینه چندهدفه در [۲۱]، تاثیر نویز و بررسی پایداری در UASC در [۲۲]، MMUASC برای سیستم‌های متغیر با زمان [۲۳] وUASC برای سیستم‌های متغیر با زمان غیرخطی در [۲۴] اشاره کرد.

در این مقاله در ابتدا مساله کنترل اغتشاش با بانک کنترلی طرح شده و سپس بکمک تابع هزینه عملکرد کنترل‌کننده‌های بانک کنترلی در دفع اغتشاش را بدون فعال کردن آن‌ها ارزیابی می‌شود. این ارزیابی با استفاده از سیگنال اغتشاش مجازی انجام می‌شود. کارایی روش پیشنهادی نیزدر یک مثال واقعی از توربین باد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

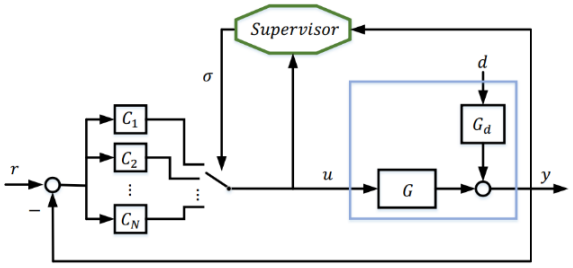
ساماندهی مقاله به این صورت است. در بخش ۲ مساله کنترل اغتشاش کلیدزن توضیح داده شده و در بخش ۳ الگوریتم پیشنهادی برای انتخاب کنترل‌کننده و تابع هزینه معرفی می‌شود. در بخش ۴ سیستم توربین باد تشریح شده و روش پیشنهادی روی آن پیاده‌سازی می‌شود. در انتها در بخش ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌شود.

۲- طرح مساله

ساختار کنترل نظارتی کلیدزن شکل ۱ را در نظر بگیرید. فرض کنید یک بانک کنترلی در دسترس بوده و هدف ناظر یافتن کنترل‌کننده‌ای است که بیشترین تضعیف اغتشاش d روی خروجی سیستم y را داشته باشد. باید عملکرد هر کدام از کنترل‌کننده‌ها در دفع اغتشاش ارزیابی شده و بهترین از میان آن‌ها انتخاب شود. در این مقاله روشی با الهام از کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر ارائه می‌شود که بدون فعال کردن کنترل‌کننده‌ها عملکرد آن‌ها ارزیابی شود. این ارزیابی به کمک تابع هزینه و همچنین مفهوم جدیدی به نام سیگنال اغتشاش مجازی انجام می‌شود. سیستم کلیدزن شکل ۱ بصورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

[1] Disturbance observer-based control
[2] Active disturbance rejection control
[3] Virtual state
[4] Tracking differentiator
[5] Extended state observer
[6] Average dwell time
[7] Anti-disturbance control
[8] Multi-Model Unfalsified Adaptive Control

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.6.4]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.75]



شکل ۱- ساختار کلی کنترل نظارتی کلیدزن

$$y(k)=G(q^{-1})u(k)+G_d(q^{-1})d(k) \quad ,k\in\mathbb{Z}^+$$
$$u(k)=C_{\sigma(k)}(y(k)-r(k)) \qquad (۱)$$

که در آن y، u و d به ترتیب خروجی سیستم، سیگنال کنترل و اغتشاش غیرقابل اندازه‌گیری است. در این رابطه k نشان دهنده زمان گسسته بوده (شماره نمونه) و q^{-1} اپراتور یک واحد تاخیر است. $\sigma(.)$ نیز نشان‌دهنده سیگنال انتخاب کنترل‌کننده یا همان سیگنال کلیدزنی است. G تابع تبدیل سیگنال کنترل به خروجی و G_d تابع تبدیل اغتشاش به خروجی است و بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$G=\frac{N(q^{-1})}{D(q^{-1})},\ G_d=\frac{N_d(q^{-1})}{D_d(q^{-1})} \qquad (۲)$$

که در این رابطه N، D، N_d و D_d چندجمله‌ای‌هایی بر حسب q^{-1} بوده و D یک چندجمله‌ای یکه[1] است ($D(0)=1$). همچنین فرض می‌شود توابع تبدیل G و G_d در دسترس باشد. فرض کنید بانک کنترلی $\mathbb{C}=\{C_1,C_2,\ldots,C_N\}$ از پیش طراحی شده در دسترس بوده که در آن تابع تبدیل هر کنترل‌کننده بصورت رابطه (۳) است.

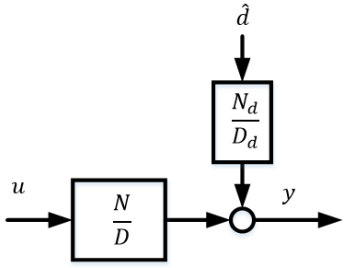
$$C_i(q^{-1})=\frac{N_i(q^{-1})}{D_i(q^{-1})},\ i=1,\ldots,N \qquad (۳)$$

۳- طراحی کنترل اغتشاش کلیدزن

در این بخش به طراحی الگوریتم مناسب انتخاب کنترل‌کننده پرداخته می‌شود. کلیدزنی طبق یک تابع هزینه و منطق هیسترزیس انجام می‌شود. برای محاسبه تابع هزینه هر کنترل‌کننده از کنترل‌کننده‌های موجود در بانک و ارزیابی عملکرد کنترلی آن‌ها بدون فعال‌سازی از سیگنال اغتشاش مجازی استفاده می‌شود.

تعریف ۱: سیگنال اغتشاش مجازی $\hat{d}$ سیگنال اغتشاشی است با توجه به داده‌های ورودی و خروجی ذخیره شده از سیستم از رابطه زیر حاصل می‌شود

$$N_d(q^{-1})D(q^{-1})\hat{d}(k)=D_d(q^{-1})D(q^{-1})y(k)-D_d(q^{-1})N(q^{-1})u(k) \qquad (۴)$$



شکل ۲- سیگنال اغتشاش مجازی

لم ۱: میان سیگنال اغتشاش مجازی و اغتشاش واقعی رابطه زیر برقرار است:

$$\|\hat{d}\|\le\|d\|+\alpha \qquad (۵)$$

اثبات: مطابق تعریف سیگنال مرجع مجازی از رابطه (۴) حاصل شده اما سیگنال اغتشاش مطابق شکل (۱) به سیستم وارد می‌شود. درنتیجه به دلیل وجود شرایط اولیه نامعلوم نمی‌توان اغتشاش را در همه زمان‌ها بدرستی تخمین زد اما با توجه به رابطه (۴) و رابطه (۱) زمان k_1 وجود دارد که

$$\hat{d}(k)=d(k),\ \ \forall k\ge k_1 \qquad (۶)$$

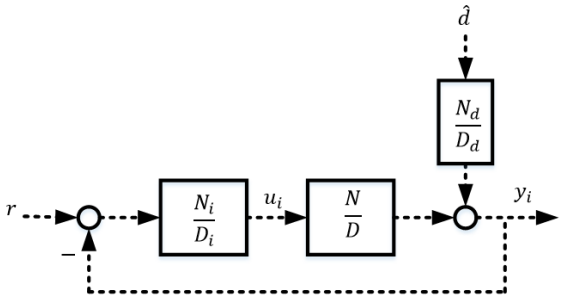
بنابراین $\alpha\ge 0$ وجود دارد بطوریکه

$$\|\hat{d}-d\|\le\alpha \qquad (۷)$$

و در نتیجه رابطه (۵) برقرار خواهد بود.

■

برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌های بانک کنترلی بدون فعال‌سازی آن‌ها از حلقه‌های مجازی عملکرد مطابق شکل ۳ استفاده می‌شود. این حلقه‌ها بصورت واقعی وجود ندارند و فقط سیگنال‌های y_i و u_i محاسبه می‌شود. ورودی اغتشاش برای حلقه مجازی ارزیابی عملکرد، سیگنال اغتشاش مجازی است. مطابق شکل ۳، مقادیر y_i و u_i بصورت رابطه (۸) و (۹) حاصل می‌شوند.



شکل ۳- حلقه مجازی ارزیابی عملکرد

[1] Monic

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.6.4]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.75]

$$y_i(k)=\frac{N(q^{-1})N_i(q^{-1})}{D(q^{-1})D_i(q^{-1})+N(q^{-1})N_i(q^{-1})}r(k)+\frac{N_d(q^{-1})D(q^{-1})D_i(q^{-1})}{D_d(q^{-1})D(q^{-1})D_i(q^{-1})+D_d(q^{-1})N(q^{-1})N_i(q^{-1})}\hat{d}(k) \quad (۸)$$

$$u_i(k)=\frac{D(q^{-1})N_i(q^{-1})}{D(q^{-1})D_i(q^{-1})+N(q^{-1})N_i(q^{-1})}r(k)-\frac{N_d(q^{-1})D(q^{-1})N_i(q^{-1})}{D_d(q^{-1})D(q^{-1})D_i(q^{-1})+D_d(q^{-1})N(q^{-1})N_i(q^{-1})}\hat{d}(k) \quad (۹)$$

برای بررسی میزان تضعیف اغتشاش هر کنترل‌کننده می‌توان از تابع هزینه زیر استفاده کرد

$$J(C_i,u(k),y(k))=\frac{\|y_i\|_k}{\|\hat{d}\|_k+\epsilon},i=\{1,\dots,N\} \quad (۱۰)$$

که در این رابطه ϵ ثابت مثبت کوچک و $\|.\|_k$ نشانگر نرم ۲ سیگنال با رابطه زیر است

$$\|x\|_k^2=\sum_{i=0}^{k}|x(i)|^2$$

فرض ۱ (شدنی بودن مساله اغتشاش[1]): حداقل یک کنترل‌کننده برای هر ورودی اغتشاش $d\in l_{2e}$ در بانک کنترلی وجود دارد که سطح تضعیف محدودی داشته باشد.

برای توضیح سطح تضعیف به مساله طراحی کنترل H_∞ توجه کنید. در این مساله باید روابط زیر برقرار باشد

- پایداری مجانبی حلقه بسته وقتی که اغتشاش وجود نداشته باشد.
- برای هر اغتشاش غیرصفر $d\in l_2$، اسکالر مثبت γ وجود داشته باشد بطوریکه

$$\frac{\|y\|}{\|d\|}<\gamma^2 \quad (۱۱)$$

و به γ سطح تضعیف اغتشاش می‌گویند.

فرض ۲: اغتشاش دارای انرژی محدود است و یا $d\in l_2$.

برای منطق کلیدزنی نیز از الگوریتم هیسترزیس و تابع هزینه نهایی V بصورت زیر استفاده می‌شود.

$$V(C_i,u(k),y(k))=\max_{\tau\le k}J(C_i,u(\tau),y(\tau)) \quad (۱۲)$$

الگوریتم ۱-الگوریتم کنترل کلیدزن اغتشاش با منطق هیسترزیس

۱- $k=0$، $\sigma(0)$ دلخواه و انتخاب یک h مثبت.
۲- $k+1\leftarrow k$. و جمع آوری y، u و r.
۳- محاسبه سیگنال اغتشاش مجازی.
۴- محاسبه y_i از حلقه‌های مجازی ارزیابی عملکرد.
۵- محاسبه توابع هزینه.
۶- اگر $V(C_{\sigma(k)},y,u)>\min_i V(C_i,y,u)+h$

$$\sigma(k+1)=\min_i V(C_i,y,u)$$

در غیر این صورت

$$\sigma(k+1)=\sigma(k)$$

۷- بازگشت به گام ۲.

قضیه: سیستم کلیدزن مطابق رابطه (۱) را در نظر بگیرید. فرض کنید بانک کنترلی $\mathbb{C}$ فرض ۱ و اغتشاش فرض ۲ را برآورده کند. درنتیجه کلیدزنی در زمان محدود متوقف شده و عملکرد تضعیف اغتشاش نیز حد بالای $\min_i V(C_i)+h$ را دارد.

اثبات: مطابق فرض شدنی بودن مساله اغتشاش کنترل‌کننده C_j وجود داشته که سطح تضعیف محدود $0<\eta<\infty$ بطوریکه

$$\|y_j\|_k<\eta^2\|\hat{d}\|_k \quad (۱۳)$$

با درنظر گرفتن نامساوی (۵)، داریم

$$\|y_j\|_k\le\eta^2\|d\|_k+\eta\alpha \quad (۱۴)$$

در نتیجه حداقل یکی از توابع هزینه در همه زمان‌ها محدود است. بنابراین ثابت $Q>0$ وجود دارد بطوریکه

$$V(C_j)\le Q \quad (۱۵)$$

اگر منطق کلیدزنی هیسترزیس با پارامتر h بکارگرفته شود حداکثر تعداد کلیدزنی $\frac{Q}{h}+1$ خواهد بود. بنابراین کلیدزنی درزمان محدود متوقف خواهد شد. فرض کنید آخرین کنترل‌کننده فعال C_f باشد. پس حتما تابع هزینه آن نیز مقدار محدودی خواهد داشت.

$$V(C_f)\le\bar{Q} \quad (۱۶)$$

که در آن $\bar{Q}=\min_i V(C_i)+h$ که این تضمین‌کننده انتخاب کنترل‌کننده با کمترین سطح تضعیف است.

■

با توجه به یکسان بودن مخرج توابع هزینه برای همه کنترل‌کننده‌ها، این مخرج قابل صرف نظر کردن بوده اگرچه محاسبه سیگنال اغتشاش مجازی برای محاسبه y_i لازم است. در ادامه نشان داده خواهد شد که چگونه y_i مستقیماً از داده ورودی خروجی قابل محاسبه بوده و محاسبه سیگنال اغتشاش مجازی دیگر لازم نیست.

لم ۲: برای محاسبه مستقیم y_i از داده ورودی خروجی از رابطه زیر استفاده می‌شود

[1] Feasibility in disturbance attenuation

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.6.4]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.75]

$$y_i(k)=\frac{N(q^{-1})N_i(q^{-1})}{D(q^{-1})D_i(q^{-1})+N(q^{-1})N_i(q^{-1})}r(k)+\frac{D(q^{-1})D_i(q^{-1})}{D(q^{-1})D_i(q^{-1})+N(q^{-1})N_i(q^{-1})}y(k)-\frac{N(q^{-1})D_i(q^{-1})}{D(q^{-1})D_i(q^{-1})+N(q^{-1})N_i(q^{-1})}u(k) \quad (۱۷)$$

اثبات: با درنظر گرفتن $v(k)=G_d(q^{-1})d(k)$، می‌توان نشان داد

$$D(q^{-1})\hat{v}(k)=D(q^{-1})y(k)-N(q^{-1})u(k) \quad (۱۸)$$

که در آن $\hat{v}$ سیگنال اغتشاش مجازی جدید با تعریف $\hat{v}=G_d\,\hat{d}$ است. به کمک حلقه مجازی ارزیابی عملکرد مطابق شکل ۳ و رابطه $\hat{v}=G_d\,\hat{d}$ می‌توان رابطه زیر را بدست آورد.

$$y_i(k)=\frac{N(q^{-1})N_i(q^{-1})}{D(q^{-1})D_i(q^{-1})+N(q^{-1})N_i(q^{-1})}r(k)+\frac{D(q^{-1})}{D(q^{-1})D_i(q^{-1})+N(q^{-1})N_i(q^{-1})}\hat{v}(k) \quad (۱۹)$$

با جایگذاری (۱۸) در (۱۹) رابطه زیر حاصل می‌شود.

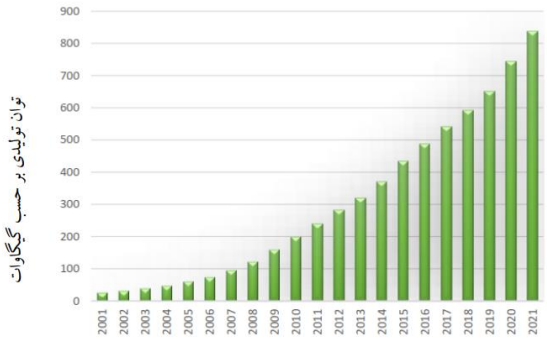
$$y_i(k)=\frac{N(q^{-1})N_i(q^{-1})}{D(q^{-1})D_i(q^{-1})+N(q^{-1})N_i(q^{-1})}r(k)+\frac{D(q^{-1})D_i(q^{-1})}{D(q^{-1})D_i(q^{-1})+N(q^{-1})N_i(q^{-1})}y(k)-\frac{N(q^{-1})D_i(q^{-1})}{D(q^{-1})D_i(q^{-1})+N(q)N_i(q^{-1})}u(k) \quad (۲۰)$$

■

٤- شبیه‌سازی

باد یکی از مهمترین منابع انرژی پاک برای تولید برق است. مطابق شکل ۴ طبق گزارش کنسول جهانی انرژی باد، ظرفیت تولید برق از باد تا سال ۲۰۲۱ بیش از ۸۳۷ گیگاوات گزارش شده است [۲۵].

توربین بادی سرعت متغیر[1] توانایی جذب انرژی از باد در بازه وسیعی از سرعت‌های باد مختلف را دارد [۲۶]. در این مقاله، برای شبیه‌سازی از یک توربین باد سرعت متغیر سه پره مطابق مرجع [۲۷] استفاده می‌شود. روش پیشنهادی بر روی سیستم کنترل زاویه پره[2] پیاده‌سازی شده است. در ادامه، در ابتدا بطور خلاصه توضیحاتی پیرامون توربین باد ارایه شده و سپس معادلات غیرخطی دینامیکی یک توربین باد تشریح است. پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی و بررسی عملکرد در قسمت آخر انجام می‌شود.



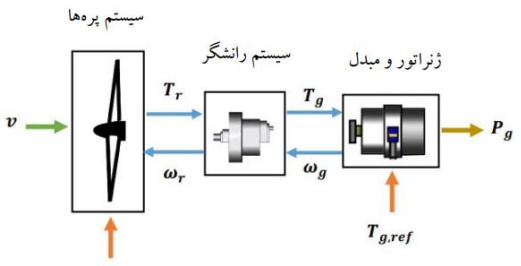
شکل ۴- آمار تولید انرژی از باد [۲۵]

بر حسب ساختار مکانیکی و همچنین نوع ژنراتور استفاده شده در توربین‌های بادی، آنها به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند. بطور کلی، یک توربین باد شامل قسمت‌های آیرودینامیکی (پره‌ها و سیستم کنترل زاویه پره)، سیستم رانشگر[3]، ژنراتور و مبدل[4] مطابق شکل ۵ است.

برای توربین بادی سرعت متغیر ۴ ناحیه مطابق شکل ۶ تعریف می‌شود:

- ناحیه۱: سرعت باد کمتر از مقدار قطع پایین است و توربین حرکت نمی‌کند.
- ناحیه ۲ (بار جزئی[5]): سرعت باد میان سرعت باد نامی و قطع پایین بوده و هدف در این ناحیه جذب حداکثر مقدار ممکن انرژی از باد است.
- ناحیه ۳ (بار کامل[6]): سرعت باد از مقداری که توان نامی را تولید کند بیشتر بوده و سرعت باد کمتر از قطع بالا است. هدف در این ناحیه تنظیم زاویه پره‌ها است بطوریکه توان نامی تولید شود.
- ناحیه ۴: سرعت باد از قطع بالا بیشتر بوده و بدلیل سرعت باد زیاد برای جلوگیری از آسیب، توربین بادی متوقف می‌شود.

در این مقاله ناحیه ۳ مورد مطالعه و شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. مدل‌سازی معمولاً بصورت تفکیک اجزای مختلف و مدل‌سازی اجزا انجام می‌شود. یک مدل فضای حالت غیرخطی از توربین باد بصورت رابطه (۲۱) است [۲۷].

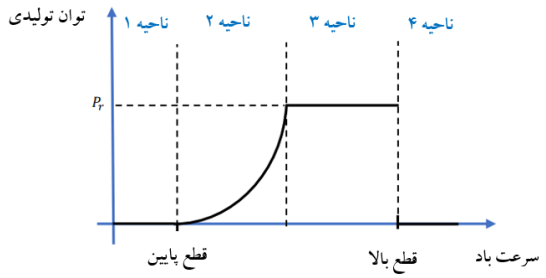


شکل ۵- شماتیک زیرسیستم‌های یک توربین بادی

[1] Variable speed wind turbine
[2] Pitch control
[3] Drive train
[4] Converter
[5] Partial load
[6] Full load

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.6.4]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.75]

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta}_s(t) \\ \dot{\omega}_r(t) \\ \dot{\omega}_g(t) \\ \dot{T}_g(t) \\ \ddot{\beta} \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -\frac{1}{N_g} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{dt}}{J_r} & -\frac{B_{dt}+B_r}{J_r} & \frac{B_{dt}}{J_r N_g} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\eta_{dt}K_{dt}}{N_g J_g} & -\frac{\eta_{dt}B_{dt}}{N_g J_g} & -\frac{\eta_{dt}B_{dt}}{N_g^2 J_g} & -\frac{B_g}{J_g} & -\frac{1}{J_g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_g} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2\zeta\omega_n & \omega_n^{\,2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \theta_s \\ \omega_r \\ \omega_g \\ T_g \\ \dot{\beta} \\ \beta \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T_r}{J_r} \\ 0 \\ \frac{1}{\tau_g} T_{gref} \\ \omega_n^2 \beta_{ref} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (۲۱)$$



شکل ۶- نواحی کاری مختلف توربین بادی سرعت متغیر

در رابطه (۲۱) θ_s، ω_r، ω_g، T_g و β به ترتیب زاویه پیچش[1]، سرعت روتور، سرعت ژنراتور، گشتاور ژنراتور و زاویه پره است. ورودی‌های سیستم T_{gref} سیگنال مرجع گشتاور ژنراتور و β_{ref} سیگنال مرجع زاویه پره است. با تعریف نسبت سرعت نوک پره[2] بصورت $\lambda = R\frac{\omega_r}{v}$، گشتاور آیرودینامیکی T_r بصورت رابطه (۲۲) تعریف می‌شود.

$$T_r(t) = \frac{1}{2\lambda}\rho\pi R^3 C_P\left(\lambda(t),\beta(t)\right)v^2(t) \qquad (۲۲)$$

که در آن v سرعت باد بوده و ضریب توان C_P بر اساس یک درونیابی جدولی[3] انجام می‌شود. شبیه‌سازی از توربین باد ۴/۸ مگاوات مرجع [۲۷] استفاده شده که پارامترها و مقادیر عددی آنها در جدول ۱ مشخص شده است. خروجی سیستم ω_g در نظر گرفته شده که در واقعیت نیز اندازه‌گیری می‌شود. مقدار نامی سرعت ژنراتور برای این توربین ۱۶۲ رادیان برثانیه است [۲۷]. توان تولید شده توسط ژنراتور P_g عبارتست از

$$P_g(t) = \eta_g\omega_g(t)T_g(t) \qquad (۲۱)$$

که در این رابطه η_g بازده ژنراتور است.

در ناحیه ۳، سیستم کنترل زاویه پره فعال بوده و هدف ثابت نگه داشتن سرعت ژنراتور است. این کار بوسیله تغییر مرجع زاویه پره β_{ref} انجام می‌شود. گشتاور مرجع ژنراتور نیز طوری تعیین می‌شود که توان نامی تولید شود. ورودی سرعت باد بعنوان اغتشاش غیرقابل اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود. تغییرات سرعت باد در زمان بصورت مجموعه‌ای از سینوسی‌ها مدل می‌شود [۲۸]. شبیه‌سازی با زمان نمونه‌برداری ۰/۱ ثانیه انجام می‌شود. بانک کنترلی بصورت رابطه (۲۴) طراحی شده است.

برای این بانک کنترلی، شکل ۷ نمودار بود تابع تبدیل از ورودی اغتشاش به خروجی را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است هر کدام از این کنترل‌کننده‌ها در یک بازه فرکانسی بیشترین تضعیف را دارند. کنترل‌کننده C_1 در بازه $[0.62, 0.93]$ هرتز، کنترل‌کننده C_2 در بازه $[0.93,1.24]$ هرتز و کنترل‌کننده C_3 در بازه $[1.24,1.55]$ هرتز مناسب بوده و بیشترین تضعیف اغتشاش را دارند.

شبیه‌سازی در ناحیه ۳ توربین بادی با باد $v(t) = 15 + \sin(\omega t)$ انجام می‌شود. شبیه‌سازی برای ۶۰۰ ثانیه انجام می‌شود. در ۲۰۰ ثانیه اول $\omega = 0.8$، در ۲۰۰ ثانیه دوم $\omega = 1.1$ و در ۲۰۰ ثانیه آخر $\omega = 1.5$ مطابق شکل ۸ است. بنابراین بهترین کنترل‌کننده‌ها برای ۲۰۰ ثانیه اول C_1، برای ۲۰۰ ثانیه دوم C_2 و برای ۲۰۰ ثانیه سوم C_3 است.

پارامتر هیسترزیس $h = 1$ در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی با کنترل‌کننده C_2 شروع می‌شود. این کنترل‌کننده بیشترین تضعیف اغتشاش را نداشته و ناظر بدرستی بعد از چند ثانیه کنترل‌کننده با بیشترین تضعیف اغتشاش را که C_1 است، انتخاب کند.

در زمان ۲۰۰ ثانیه اغتشاش تغییر کرده و دیگر C_1 بیشترین تضعیف اغتشاش را ندارد. ناظر بعد از چند ثانیه بدرستی کنترل‌کننده با حداکثر تضعیف اغتشاش C_2. را انتخاب می‌کند. در زمان ۴۰۰ ثانیه نیز اغتشاش تغییر کرده و بدرستی ناظر کنترل‌کننده C_3. را برای ۲۰۰ ثانیه آخرین اغتشاش انتخاب می‌کند. خروجی سیستم سرعت ژنراتور است که در شکل ۹ نشان داده شده است. اثر تضعیف اغتشاش در هر بازه مشخص است. سیگنال کنترل نیز در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

[1] Torsion angle
[2] Tip speed ratio
[3] Lookup table

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.6.4]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.75]

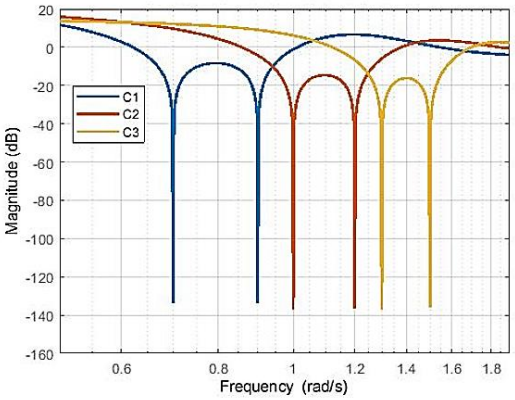
$$N_1 = 10^{-4}(-0.0004q^{-1} - 0.0021q^{-2} + 0.0344q^{-3} + 0.004q^{-4} - 0.1067q^{-5} + 0.012q^{-6} + 0.1121q^{-7} - 0.0301q^{-8} - 0.0419q^{-9} + 0.0232q^{-10} - 0.0012q^{-11} - 0.0032q^{-12} - 0.0001q^{-13})$$
$$N_2 = 10^{-4}(-0.0013q^{-1} - 0.0272q^{-2} - 0.0134q^{-3} - 0.1239q^{-4} + 0.096q^{-5} + 0.1352q^{-6} - 0.1325q^{-7} - 0.0454q^{-8} - 0.0773q^{-9} + 0.0191q^{-10} - 0.0073q^{-11} + 0.0043q^{-12} - 0.0002q^{-13})$$
$$N_3 = 10^{-4}(0.0021q^{-1} + 0.0444q^{-2} - 0.0203q^{-3} - 0.2119q^{-4} + 0.1619q^{-5} + 0.2419q^{-6} - 0.2327q^{-7} - 0.09q^{-8} + 0.1438q^{-9} - 0.0335q^{-10} - 0.0145q^{-11} + 0.0084q^{-12} + 0.0004q^{-13})$$

(۲۴)

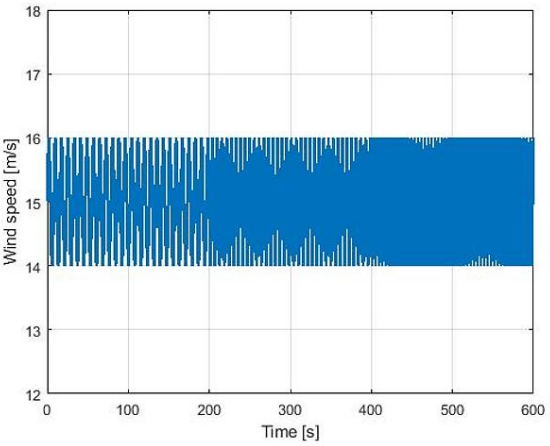
$$D_1 = 1 - 7.3707q^{-1} + 22.8025q^{-2} - 36.6543q^{-3} + 27.5441q^{-4} + 3.7885q^{-5} - 25.8344q^{-6} + 18.3980q^{-7} + 2.1985q^{-8} - 12.4043q^{-9} + 9.6905q^{-10} - 3.9649q^{-11} + 0.8965q^{-12} - 0.0898q^{-13}$$
$$D_2 = 1 - 7.4632q^{-1} + 23.4475q^{-2} - 38.4901q^{-3} + 30.1088q^{-4} + 2.4671q^{-5} - 26.8920q^{-6} + 20.3406q^{-7} + 1.4477q^{-8} - 13.0104q^{-9} + 10.5487q^{-10} - 4.4224q^{-11} + 1.0226q^{-12} - 0.1049q^{-13}$$
$$D_3 = 1 - 7.3684q^{-1} + 22.6349q^{-2} - 35.4039q^{-3} + 23.4511q^{-4} + 10.9548q^{-5} - 32.1857q^{-6} + 18.8120q^{-7} + 8.0203q^{-8} - 19.7723q^{-9} + 14.5499q^{-10} - 5.9014q^{-11} + 1.3462q^{-12} - 0.1376q^{-13}$$

جدول ۱:پارامترهای توربین باد ۴/۸ مگاوات [۲۷]

نماد	توضیحات	مقدار	دیمانسیون
J_r	اینرسی روتور	55×10^6	$kg\,m^2$
J_g	اینرسی ژنراتور	390	$kg\,m^2$
η_{dt}	بازده رانشگر	0.97	
B_r	ضریب اصطکاک روتور	27.8×10^3	$Nm/(rad/s)$
B_g	ضریب اصطکاک ژنراتور	3.034×10^3	$Nm/(rad/s)$
B_{dt}	ضریب میرایی پیچشی	945×10^3	$Nm/(rad/s)$
K_{dt}	سختی پیچشی	2.7×10^9	Nm/rad
N_g	ضریب گیربکس	95	
ω_n	فرکانس طبیعی سیستم زاویه پره	11.11	rad/s
ζ	ضریب میرایی سیستم پره	0.6	rad/s
ρ	چگالی هوا	1.225	kg/m^3
R	شعاع روتور	57.5	m
η_g	بازده ژنراتور	0.98	
τ_g	ثابت زمانی ژنراتور	50	s



شکل ۷- نمودار بود تابع تبدیل از اغتشاش به خروجی



شکل ۸- پروفایل سرعت باد

در شکل ۱۱ نیز توابع هزینه، سیگنال کلیدزنی و سیگنال کلیدزنی ایده‌آل نشان داده شده است. با مقایسه سیگنال کلیدزنی و سیگنال کلیدزنی ایده‌آل مشخص است که ناظر پس از لحظاتی کنترل‌کننده مناسب را شناسایی می‌کند.

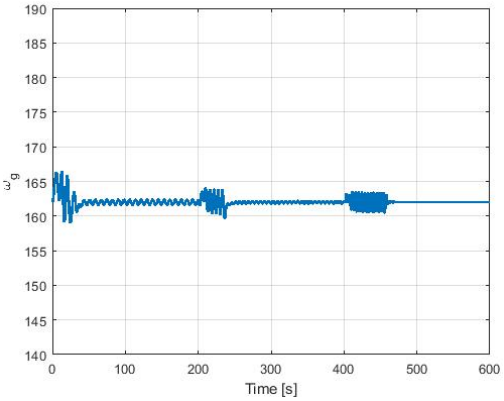
برای مقایسه نیز عملکرد روش پیشنهادی حالت‌هایی که کنترل‌کننده C_i ثابت در حلقه باشد در نظر گرفته می‌شود. با سناریو دقیقاً مشابه قبل شکل ۱۲ خروجی سیستم برای کنترل‌کننده C_1 ثابت، شکل ۱۳ خروجی سیستم برای کنترل‌کننده C_2 ثابت و شکل ۱۴ خروجی سیستم برای کنترل‌کننده C_3 ثابت را نشان می‌دهد. مطابق شکل‌ها، خروجی در شکل ۱۲ در ۲۰۰ ثانیه اول، شکل ۱۳ در ۲۰۰ ثانیه دوم، و در شکل ۱۴ در ۲۰۰ ثانیه سوم بهینه است در حالیکه با روش پیشنهادی در همه بازه‌ها کنترل‌کننده بهینه انتخاب می‌شود.

۵-نتیجه‌گیری و پیشنهادات

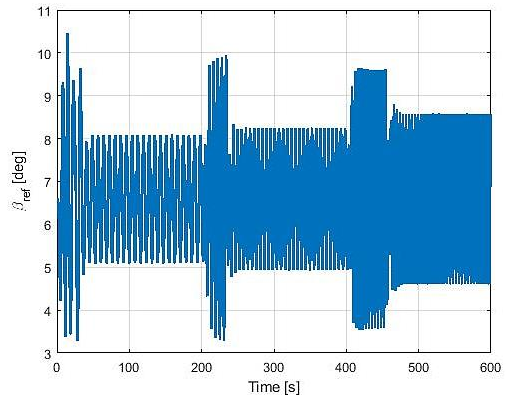
در این مقاله به کمک داده‌های ورودی خروجی سیستم و بدون اندازه‌گیری اغتشاش، ناظر کنترل‌کننده با بیشترین تضعیف اغتشاش در خروجی را انتخاب می‌کند. فرض شده است که یک بانک کنترلی در

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.6.4]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.75]

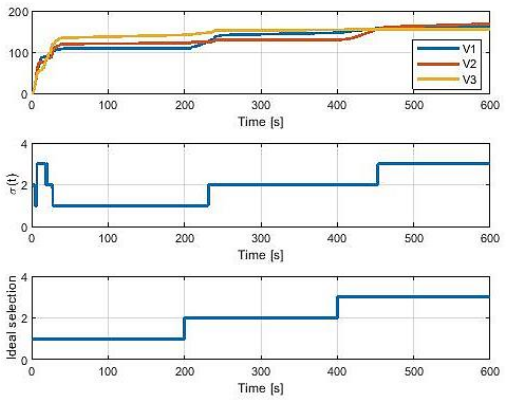
دسترس بوده و ناظر بدون فعال کردن آن‌ها به کمک مفهوم جدیدی به نام اغتشاش مجازی بر اساس یک تابع هزینه، عملکرد هر کنترل‌کننده را ارزیابی می‌کند. تضمین توقف کلیدزنی و میزان تضعیف اغتشاش نیز انجام شده است. در انتها با یک مثال کاربردی در زمینه تضعیف اغتشاش در توربین‌های بادی، عملکرد مناسب روش پیشنهادی نشان داده شده است. وجود عدم قطعیت در مدل بعنوان زمینه تحقیقاتی آینده معرفی می‌شود.



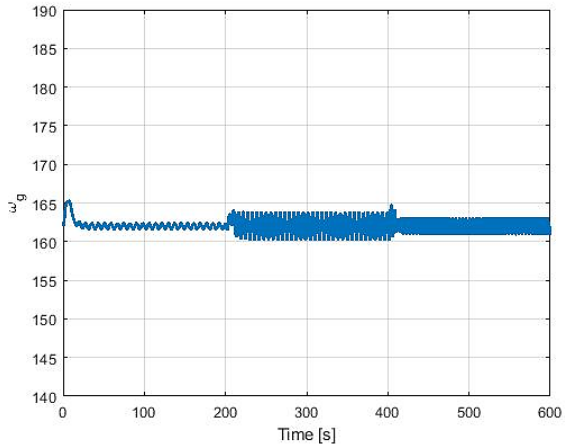
شکل ۹- سرعت ژنراتور با ورودی باد مختلف



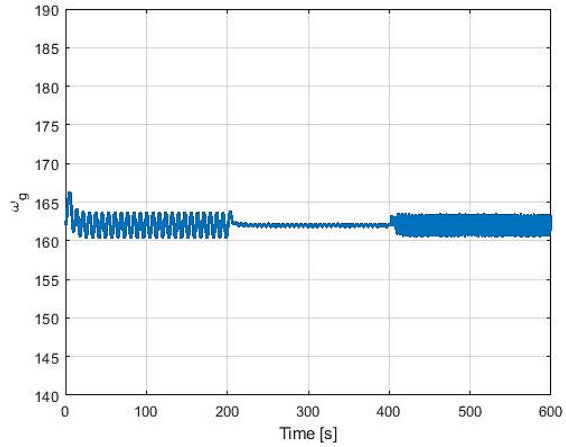
شکل ۱۰- سیگنال کنترل β_{ref}



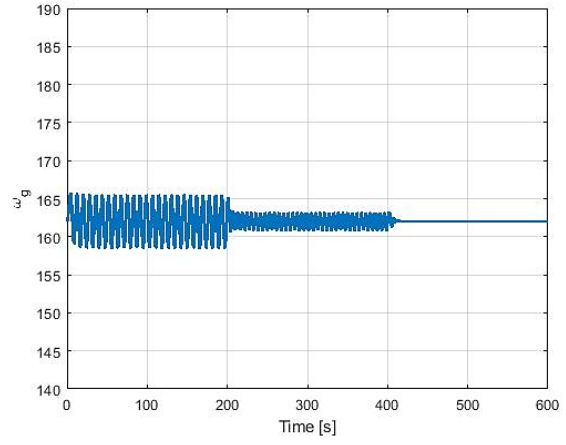
شکل ۱۱- توابع هزینه، سیگنال کلیدزنی کنترل‌کننده و سیگنال کلیدزنی کنترل‌کننده ایده‌آل



شکل ۱۲- سرعت ژنراتور با ورودی باد مختلف برای C_1 ثابت



شکل ۱۳- سرعت ژنراتور با ورودی باد مختلف برای C_2 ثابت



شکل ۱۴- سرعت ژنراتور با ورودی باد مختلف برای C_3 ثابت

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.6.4]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.75]

مراجع

[1] I. Petersen, “Disturbance attenuation and H∞ optimization: A design method based on the algebraic Riccati equation,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 32, no. 5, pp. 427–429, 1987.

[2] W. H. Chen, “Disturbance observer based control for nonlinear systems,” *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 9, no. 4, pp. 706–710, 2004.

[3] L. Guo and W.-H. Chen, “Disturbance attenuation and rejection for systems with nonlinearity via DOBC approach,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 109–125, 2005.

[4] Z. J. Yang, H. Tsubakihara, S. Kanae, K. Wada, and C.-Y. Su, “A novel robust nonlinear motion controller with disturbance observer,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 137–147, 2007.

[5] X. Wei and L. Guo, “Composite disturbance-observer-based control and H∞ control for complex continuous models,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 106–118, 2010.

[6] X. Wei and L. Guo, “Composite disturbance-observer-based control and terminal sliding mode control for non-linear systems with disturbances,” *International Journal of Control*, vol. 82, no. 6, pp. 1082–1098, 2009.

[7] L. Guo and X. Y. Wen, “Hierarchical anti-disturbance adaptive control for non-linear systems with composite disturbances and applications to missile systems,” *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 33, no. 8, pp. 942–956, 2011.

[8] D. Lee, “Nonlinear disturbance observer-based robust control for spacecraft formation flying,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 76, pp. 82–90, 2018.

[9] J. Han, “From PID to active disturbance rejection control,” *IEEE transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 900–906, 2009.

[10] L. Sun, W. Xue, D. Li, H. Zhu, and Z. Su, “Quantitative tuning of active disturbance rejection controller for foptd model with application to power plant control,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 1, pp. 805–815, 2021.

[11] Z. Hao *et al.*, “Linear/nonlinear active disturbance rejection switching control for permanent magnet synchronous motors,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 8, pp. 9334–9347, 2021.

[12] K. Lakomy, W. Giernacki, J. Michalski, and R. Madonski, “Active Disturbance Rejection Control (ADRC) Toolbox for MATLAB/Simulink,” *arXiv preprint arXiv:2112.01614*, 2021.

[13] G. Zhai, B. Hu, K. Yasuda, and A. N. Michel, “Disturbance attenuation properties of time-controlled switched systems,” *Journal of the franklin institute*, vol. 338, no. 7, pp. 765–779, 2001.

[14] H. Lin and P. J. Antsaklis, “Stability and persistent disturbance attenuation properties for a class of networked control systems: switched system approach,” *International Journal of Control*, vol. 78, no. 18, pp. 1447–1458, 2005.

[15] J. L. Chang, “Dynamic output integral sliding-mode control with disturbance attenuation,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 54, no. 11, pp. 2653–2658, 2009.

[16] X. Yao, J. H. Park, L. Wu, and L. Guo, “Disturbance-observer-based composite hierarchical antidisturbance control for singular Markovian jump systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 64, no. 7, pp. 2875–2882, 2018.

[17] M. G. Safonov and T. C. Tsao, "The unfalsified control concept and learning," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 42, no. 6, pp. 843-847, 1997.

[18] R. Wang, A. Paul, M. Stefanovic, and M. Safonov, "Cost detectability and stability of adaptive control systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal*, vol. 17, no. 5-6, pp. 549-561, 2007.

[19] S. Baldi, G. Battistelli, E. Mosca, and P. Tesi, “Multi-model unfalsified adaptive switching supervisory control,” Automatica, vol. 46, no. 2, pp. 249–259, Feb. 2010.

[20] B. Sadeghi Forouz, M. Nouri Manzar, and A. Khaki-Sedigh, “Multiple model unfalsified adaptive generalized predictive control based on the quadratic inverse optimal control concept,” *Optimal Control Applications and Methods*, vol. 42, no. 3, pp. 769–785, 2021.

[21] K. S. Sajjanshetty and M. G. Safonov, "Multi-Objective Cost-Detectability in Unfalsified Adaptive Control," *Asian Journal of Control*, vol. 18, no. 6, pp. 1959-1968, 2016.

[22] G. Battistelli, E. Mosca, M. G. Safonov, and P. Tesi, "Stability of unfalsified adaptive switching control in noisy environments," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 55, no. 10, pp. 2424-2429, 2010.

[23] G. Battistelli, J. P. Hespanha, E. Mosca, and P. Tesi, "Model-free adaptive switching control of time-varying plants," *IEEE Transactions on*

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.6.4]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.75]

Automatic Control, vol. 58, no. 5, pp. 1208-1220, 2013.

[24] S. V. Patil, Y. C. Sung, and M. G. Safonov, "Unfalsified Adaptive Control for Nonlinear Time-Varying Plants," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 67, no. 8, pp. 3892–3904, 2022.

[25] J. Lee, and F. Zhao, GWEC Global Wind Report 2022. *Global Wind Energy* Council, 2022. https://gwec.net/global-wind-report-2022/

[26] R. Sitharthan, M. Karthikeyan, D. S. Sundar, and S. Rajasekaran, "Adaptive hybrid intelligent MPPT controller to approximate effectual wind speed and optimal rotor speed of variable speed wind turbine," *ISA transactions*, vol. 96, pp. 479–489, 2020.

[27] P. F. Odgaard, J. Stoustrup, and M. Kinnaert, "Fault-tolerant control of wind turbines: A benchmark model," *IEEE Transactions on control systems Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 1168–1182, 2013.

[28] C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo, and E. Ceanga, "Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 17, no. 4, pp. 523–529, 2002.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.6.4]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.75]