

Modeling and Compensation of Charge Leakage in Self-Sensing Position Estimation for Piezoelectric Actuators

ARTICLE INFO

Article Type Original Research

Authors Sadri Koupaei A.¹ *BSc,* Soleymanzadeh D.¹ *MSc,* Ghafarirad H.^{*1} *PhD*

How to cite this article Sadri Koupaei A, Soleymanz

D, Ghafarirad H. Modeling and Compensation of Charge Leakage in Self-Sensing Position Estimation for Piezoelectric Actuators. Modares Mechanical Engineering. 2020-;20(6):1501-1510.

A B S T R A C T

Today, piezoelectric actuators are widely used in micro-positioning applications due to unique features such as high precision, fast response and high natural frequency. Despite the aforementioned characteristics, nonlinear characteristics such as hysteresis deteriorate the precision of piezoelectric actuators. In order to reduce the effect of hysteresis in control applications, external sensors are used for feedback control schemes. But, high costs and space limitations are prohibitive factors which limit the application of external sensors. Hence, an alternative is using self-sensing methods that is based on electromechanical characteristics of piezoelectric materials which eventually eliminate external sensors. In this research, self-sensing method is applied for position estimation in piezoelectric actuators. The most conventional method is based on the linear relation of electrical charge and actuator position which the position can be estimated by measuring the actuator charge. But this method is faced with serious challenges due to charge drift, especially at low frequencies. For this purpose, a method for modeling and compensating of charge drift is proposed. Then, by linearization of the electric charge-position relation, the self-sensing method is implemented based on the compensated electric charge measurement. Experiments have confirmed that this method can effectively estimate the actuator position with 1.5% estimation error in the presence of charge leakage.

Keywords Piezoelectric Actuator, Self-Sensing, Position Estimation, Charge Leakage

CITATION LINKS

[1] Piezoelectric actuator for machining on macro-to-micro cylindrical components by a precision rotary motion control [2] A novel inchworm type piezoelectric rotary actuator with large output torque: Design, analysis and experimental performance [3] Experimental characterizations of bimorph piezoelectric actuator for robotic assembly [4] Self-sensing method considering the dynamic impedance of piezoelectric based actuators for ultralow frequency [5] Quasistatic displacement self-sensing method for cantilevered piezoelectric actuators [6] Sensorless position control for piezoelectric actuators using a hybrid position observer [7] A self-sensing piezoelectric actuator for collocated control [8] Application of self-sensing technique for position control considering vibration suppression in piezodriven stage [9] Simultaneous quasi-static displacement and force self-sensing of piezoelectric actuators by detecting impedance [10] Current integration force and displacement self-sensing method for cantilevered piezoelectric actuators [11] Combining self-sensing with an Unkown-Input-Observer to estimate the displacement, the force and the state in piezoelectric cantilevered actuators [12] Dynamic displacement self-sensing and robust control of cantilever piezoelectric actuators dedicated for microassembly [13] Simultaneous displacement/force self-sensing in piezoelectric actuators and applications to robust control [14] Charge-based hysteresis compensation in low impedance piezoelectric actuators by a modified Prandtl-Ishlinskii model [15] Leakage current characterization and compensation for piezoelectric actuator with charge drive [16] Charge-based robust position estimation for low impedance piezoelectric actuators [17] Sensorless adaptive sliding mode position control for piezoelectric actuators with charge leakage [18] Hybrid model based on Preisach and support vector machine for novel dual-stack piezoelectric actuator [19] Feedforward controller with inverse rate-dependent model for piezoelectric actuators in trajectory-tracking applications

¹Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Hafez Street, Tehran, Iran. Postal Code: 1591634311 Phone: +98 (21) 64543422 Fax: +98 (21) 66419736 ghafarirad@aut.ac.ir

Article History

Received: August 31, 2019 Accepted: December 30, 2019 ePublished: June 20, 2020

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مدلسازی و جبران نشت بار در تخمین موقعیت به کمک خودحسگری برای عملگرهای پیزوالکتریک

امیرمحمد صدریکوپائی BSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلیتکنیک تهران)، تهران، ایران

داود سليمانزاده MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلیتکنیک تهران)، تهران، ایران

حامد غفاریراد^{*} PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلیتکنیک تهران)، تهران، ایران

چکیدہ

امروزه عملگرهای پیزوالکتریک بهدلیل داشتن ویژگیهای منحصربهفردی همچون دقت بسیار زیاد، پاسخ سریع و فرکانس طبیعی بالا، بهصورت گستردهای در کاربردهای موقعیتدهی میکرونی مورد استفاده قرار میگیرند. علیرغم ویژگیهای مطلوب عملگرهای پیزوالکتریک، وجود رفتار غیرخطی همانند هیسترزیس، میتواند دقت این نوع عملگرها را کاهش دهد. به همین دلیل بهمنظور کاهش اثر رفتار هیسترزیس در کاربردهای کنترلی، از بازخورد موقعیت با استفاده از حسگرهای خارجی استفاده میشود. اما استفاده از این حسگرها در بسیاری از کاربردها بهدلیل محدودیت فضا و همچنین هزینه بالا، امکانپذیر نیست. از این رو، با توجه به وابستگی خواص الکتریکی و مکانیکی در مواد پیزوالکتریک، میتوان از روش خودحسگری بهعنوان راهحلی جایگزین استفاده نمود. در این پژوهش، از روش خودحسگری بهمنظور تخمین موقعیت در عملگرهای پیزوالکتریک استفاده شده است. متداولترین روش برای پیادهسازی سیستم خودحسگری برای عملگرهای پیزوالکتریک، بر مبنای رابطه خطی بار الکتریکی و موقعیتِ عملگرهای پیزو است؛ به این صورت که با اندازهگیری بار الكتريكي عملگر، موقعيت آن تخمين زده مي شود. اما اين روش، به علت نشتي بار الکتریکی به خصوص در فرکانسهای پایین با چالش جدی همراه است که دقت تخمین موقعیت را از بین میبرد. به همین منظور، ابتدا روشی جهت مدلسازی و جبران نشتی بار در خروجی عملگر پیزوالکتریک، پیشنهاد میشود. پس از خطیسازی رابطه بار الکتریکی و موقعیت، سیستم خودحسگری بر مبنای اندازهگیری بار الکتریکی عملگر، پیادهسازی میشود. نتایج نشان میدهد که این روش، با خطای اندک ۱/۵% میتواند موقعیت عملگر را در حضور نشتی بار تخمین ىزند.

كليدواژهها: عملگر پيزوالكتريك، خودحسگرى، تخمين موقعيت، نشت بار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۹ ^{*}نویسنده مسئول: ghafarirad@aut.ac.ir

مقدمه

امروزه استفاده از عملگرهای پیزوالکتریک در گستره وسیعی، از کاربردهای شبهاستاتیکی همچون میکروگریپرها و موقعیتدهی با دقت نانو تا کاربردهای فوق سریعی همچون تزریق سوخت شایع شده است^[3-1]. عملگرهای پیزوالکتریک بهعلت دارابودن خواص منحصربهفردی همچون تفکیکپذیری بالا، سختی بسیار زیاد، سرعت پاسخ مناسب، قابلیت اعمال نیروی زیاد در مقایسه با ابعاد عملگر

و غیره جایگاه ویژهای در کاربردهای کنترل نیرو و موقعیت، بهویژه در ابعاد میکرو و نانو، پیدا کردهاند.

در حالت کلی، مواد پیزوالکتریک به علت ساختار الکترومکانیکی خود، در کاربردهای گوناگون عملگری و حسگری مورد استفاده قرار میگیرند. یکی از قابلیتهای بسیار قابل توجه این مواد، استفاده همزمان آنها به صورت عملگر و حسگر است، که با عنوان خود حسگری در عملگرهای پیزوالکتریک شناخته می شود. خود حسگری به معنای حذف حسگر خارجی است. در این حالت وابستگی خواص مکانیکی و الکتریکی این امکان را فراهم می سازد که با داشتن اطلاعات از خواص الکتریکی ماده، بتوان خواص مکانیکی را اندازه گیری نمود. عملگرهای پیزوالکتریک با توجه به

ساختار الکترومکانیکی خود چنین امکانی را فراهم میسازند^[4]. این قابلیت مزایای فراوانی دارد. مهمترین مزیت چنین کاری، کاهش فضای مورد نیاز و حجم سازه و در نتیجه سادگی طراحی و ساخت است. این امر در بسیاری از سازهها، مخصوصاً در پایینآمدن هزینهها است؛ زیرا در این حالت یک سنسور نسبتاً گران پا یک مدار ارزانقیمت خودحسگری جایگزین میشود^[5]. ضمن اینکه در برخی سازهها، اساساً امکان نصب حسگر خارجی وجود ندارد^[6]. همچنین علاوهبر کاهش حجم و هزینه، چون در این ساختارها عملیات تحریک و پسخوراند در یک نقطه صورت میپذیرد، بنابراین منجر به ایجاد ساختار کنترلی مجاورتی (Collocated).

تاکنون روشهای متنوعی برای پیادهسازی خودحسگری پیشنهاد شده است که در طول زمان توسعه یافتهاند. از جمله روشهای خودحسگری میتوان به روش پل خازنی^[8]، اندازهگیری ظرفیت خازنی^[9] و اندازه گیری بار اشاره کرد. از روش پل خازنی بیشتر برای کنترل ارتعاشات و کاربردهای فرکانس بالا استفاده میشود. در روش اندازهگیری ظرفیت خازنی، از رابطه خطی ظرفیت خازنی- موقعیت پیزوالکتریک برای تخمین موقعیت عملگر در کاربردهای موقعیتدهی استفاده میشود. این روش نیازمند تجهیزات بسیار دقیق و حساس به نویز است. اما یکی از متداولترین روشهای تخمین موقعیت در مواد پیزوالکتریک، استفاده از بار الکتریکی پیزوالکتریک است^[5]. در حالت ایدهآل، در فرکانسهای دور از فركانس طبيعى سيستم، رابطه بار- جابجايي با دقت بالايي خطى خواهد بود. در واقع با اندازهگیری بار الکتریکی عملگر، میتوان به اطلاعات مکانی آن دست یافت. روش خودحسگری بر مبنای اندازهگیری بار بصورت گسترده در پژوهشهای پیشین استفاده شده است. *ایوان* و همکاران^[5]، از روش اندازهگیری بار و با استفاده از معادلات اساسی عملگر پیزوالکتریک، موقعیت عملگر را در فرکانس پایین تخمین زدهاند. در این روش از یک خازن ثانویه برای حذف اثر دیالکتریک در مدار اندازهگیری بار استفاده شده است و برای جبران اثر بار نشتی، مقاومت داخلی بهصورت خطی در نظر گرفته شده است. *ایوان* و همکاران^[10] و *راکوتندریب*^[11] از خودحسگری به

کمک بار الکتریکی برای تخمین همزمان موقعیت و نیرو در عملگرهای پیزوالکتریک در عملیاتهای فرکانس پایین استفاده کردهاند. در روش آنها نیروی اعمالی به عملگر پیزوالکتریک، با استفاده از ولتاژ اعمالی و بار اندازهگیریشده و بازنویسی معادلات از خازن ثانویه برای حذف اثر دیالکتریک استفاده شده است. *راکوتندریب* و همکاران، از اندازهگیری بار برای تخمین موقعیت در عملیاتهای فرکانس بالا نیز استفاده کرده است^[11]. وی در این پژوهش با در نظرگرفتن دینامیک برای روش خودحسگری و شناسایی آن، موقعیت عملگر را در کاربردهای فرکانس بالا تخمین زده است. *راکوتندریب* و همکاران، همچنین با در نظرگرفتن دینامیک عملگر، نیرو و موقعیت را در فرکانسهای بالا بهصورت همزمان تخمین زده است^[11].

اما نتایج تجربی نشان میدهد که استفاده از روش اندازهگیری بار، بهخصوص در کاربردهای شبهاستاتیکی و فرکانس پایین، برای عملگرهای پیزوالکتریک با امپدانس پایین با چالش جدی همراه است. در حقیقت یک رفتار افزایشی در موقعیت تخمین زده شده مشاهده میشود، که منجر به خطای تخمین برای موقعیت عملگر میشود. علت این امر را میتوان در پدیده نشتی بار ناشی از مقاومت میشود. علت این امر را میتوان در پدیده نشتی بار ناشی از مقاومت نمودار بار الکتریکی عملگر رسم شود، ملاحظه میشود که بار الکتریکی عملگر به مرور زمان افزایش مییابد. بنابراین خروجی المیت آن است که بار نشتی توسط روشهایی همچون استفاده از فیلترهای بالاگذر قابل حذف نیست. زیرا حوزه عملکرد عملگرهای پیزو در بسیاری از موارد، فرکانسهای پایین بوده، و استفاده از فیلتر بالاگذر، خود منجر به تخریب سیگنال اصلی عملگر میشود.

یک روش پیشنهادی، تخمین مقدار موثر مقاومت داخلی عملگر و جبران سازی آن است. در همین راستا، *غفاری راد* و همکاران^[14]، روشی جهت شناسایی و جبرانسازی رفتار هیسترزیس عملگرهای پیزوالکتریک، بدون استفاده از سنسور موقعیت، ارایه کردند. برای این منظور از مدلسازی رفتار هیسترزیس متغیر با زمان بار الكتريكى- جابجايى، در حضور نشتى بار الكتريكى استفاده نمودند. اما روش ارایهشده، جهت جبرانسازی رفتار هیسترزیس عملگرهای پیزوالکتریک و خطیسازی رابطه ولتاژ- جابجایی عملگر، و نه تخمین موقعیت، ارایه شده است. همچنین روش مذکور، توانایی مدلسازی حلقههای هیسترزیس نامتقارن را ندارد. البته شناسایی و حذف اثر مقاومت داخلی عملگر بهدلیل رفتار غیرخطی آن، در برخی موارد کارآمد نخواهد بود. به همین دلیل، *سلیمانزاده* و همکاران^[16, 17]، با در نظرگرفتن اثر مقاومت داخلی بهصورت غیرخطی، اثر افزاینده بار الکتریکی را بهصورت اغتشاش در خروجی عملگر در نظر گرفتند و با طراحی رویتگر مقاوم، به جبرانسازی این اثر يرداختند. اما اين كار نيازمند مدلسازي دقيق ديناميك سيستم و همچنین طراحی رویتگرهای تخمین موقعیت با ساختار پیچیده

دارد.

بنابراین در این پژوهش، هدف، ارایه یک راه کار کارآمد برای شناسایی و جبران نشتی بار و در ادامه، تخمینِ صحیح موقعیت است. برای این منظور، به بررسی اثر نشتی بار در رفتار هیسترزیس ولتاژ- بار روش پرنتل ایشلینسکی اصلاحشده، اثر نشتی شناسایی و در ادامه جبرانسازی شده است. در نهایت، تخمین موقعیت عملگر با دقت بالا در حضور نشتی صورت گرفته است. مزیت روش ارایهشده این است که نیازی به مدلسازی دینامیک سیستم نداشته و همچنین پیادهسازی آن آسان بوده و نیاز به طراحیهای پیچیده کنترلی را از بین میبرد. همچنین با اصلاحاتی که در مدل پرنتل ایشلینسکی انجام گرفت، روش ارایهشده قادر به شبیهسازی حلقههای هیسترزیس نامتقارن خواهد بود.

تحلیل تخمین موقعیت به کمک بار الکتریکی در عملگرهای پیزوالکتریک

نمایی شماتیک از یک عملگر پیزوالکتریک دو لایه در شکل ۱ نشان داده شده است. این عملگر از یک لایه فلز پایه مانند برنج در وسط و دو لایه عملگر پیزوالکتریک در بالا و پایین تشکیل شده است. بهطور معمول و در اکثر عملگرهای پیزوالکتریک رابطه بار- جابجایی خطی است. رابطه متداول بار- جابجایی در عملگرهای پیزوالکتریک در نمودار ۱ نشان داده شده است.

در فرآیند خودحسگری، با اندازهگیری بار الکتریکی و با استفاده از رابطه خطی مذکور، می توان موقعیت عملگر را تخمین زد.

بررسی اثر نشتی بار در رفتار بار الکتریکی- موقعیت

در بعضی از عملگرهای پیزوالکتریک، بهخصوص عملگرهای کوچک از نظر ابعادی، رابطه بار- جابجایی در فرکانسهای پایین (کاربرد شبهاستاتیکی) خطی نبوده و دارای یک نرخ افزایشی است. رابطه بار- جابجایی را برای یک نوع عملگر پیزوالکتریک عرضی، که در قسمت نتایج تجربی معرفی شده است، نمودار ۲ نشان میدهد.

علت این پدیده، به مدل الکتریکی عملگرهای پیزوالکتریک مربوط میشود. پیزوالکتریکها به طور معمول و در حالت ایده آل، به صورت یک خازن سری با یک منبع ولتاژ مدل سازی می شوند. یک روش جهت تحلیل مساله انباشت بار، مدل سازی دقیق تر عملگر پیزو و بررسی المانهای الکتریکی آن است. پیزوالکتریکها همواره به صورت یک خازن خالص رفتار نمی کنند؛ بلکه در حقیقت دارای یک مقاومت داخلی بوده که به صورت موازی با خازن مطابق شکل ۲ خواهند بود.

این مقاومت داخلی همچون یک ترم انتگرالگیر برای اندازهگیری بار الکتریکی خواهد بود که منجر به افزایش بار الکتریکی پیزو در طول زمان و انباشت بار میشود. در بسیاری از کاربردها، مقدار این مقاومت نسبت به سایر المانهای سیستم، آنچنان زیاد بوده که تقریباً تاثیری در رفتار الکتریکی پیزوالکتریک نخواهد داشت. اما در عملگرهای با امپدانس پایین، وضعیت متفاوت است و این اثر قابل

۱۵۰۴ امیرمحمد صدریکوپائی و همکاران ــ

صرفنظرکردن نیست و در نتیجه، روشهای متداول خودحسگری قابل استفاده نخواهد بود. نمودار ۳ نتیجه تخمین موقعیت آن عملگر پیزوالکتریک، که با ورودی ولتاژ شبهاستاتیک به شکل تابع سینوسی با دامنه ۱۹۰ولت و فرکانس ۸۰/۰هرتز تحریکشده را، با استفاده از رابطه خطی بار الکتریکی- جابجایی این عملگر نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود موقعیت تخمین زده شده به مرور نسبت به موقعیت واقعی عملگر منحرف شده و در طول زمان دچار خطای قابل توجهی می شود.



شکل ۱) شماتیک عملگر پیزوالکتریک دولایه سری



نمودار ۱) رابطه خطی عمومی بار- جابجایی در عملگرهای پیزوالکتریک



نمودار ۲) رابطه بار- جابجایی در عملگرهای پیزوالکتریک در حضور نشتی بار



شکل ۲) مدل الکتریکی واقعی الکتریکی پیزوالکتریک



نمودار ۳) تخمین موقعیت عملگر پیزوالکتریک بدون در نظرگرفتن اثر نشتی بار الکتریکی

همانگونه که اشاره شد تاثیر نشتی، بهدلیل فرکانس عملکرد پایین عملگرهای پیزوالکتریک، توسط فیلترهای بالاگذر قابل حذف نخواهد بود. همچنین حذف بار نشتی، با شناسایی مقدار مقاومت داخلی به آسانی میسر نیست. چون این مقاومت در عملگرهای کوچک، بسیار غیرخطی و تابع اندازه ولتاژ اعمالی به پیزوالکتریک است. بهطور مثال، رفتار غیرخطی مقاومت داخلی برای این نوع عملگر پیزوالکتریک عرضی برحسب ولتاژ اعمالی در نمودار ۴ نشان داده شده است.



نمودار ٤) تغییرات مقاومت با ولتاژ اعمالی

به همین دلیل برای رفع مشکل انباشت بار، باید مقدار موثر امپدانس مقاومتی با استفاده از روش مناسبی شناسایی، و سپس بهصورت آنلاین از بار خروجی کاسته و جبرانسازی شود. در نتیجه، بار خالص خازنی بهدستآمده و موقعیت عملگر قابل استخراج خواهد بود.

تاثیر نشتی بر رفتار هیسترزیس بار الکتریکی- ولتاژ

رفتار هیسترزیس در سرامیکهای پیزوالکتریک در دو حوزه مکانیکی (موقعیت- ولتاژ) و الکتریکی (بار الکتریکی- ولتاژ) وجود دارد. رفتار هیسترزیس در عملگرهای پیزوالکتریک در حوزه الکتریکی عموماً مشابه حوزه مکانیکی است. نمودار ۵ رفتار متداول هیسترزیس بین بار- ولتاژ را در عملگرهای پیزوالکتریک نمایش میدهد.



نمودار ٥) رفتار هیسترزیس متداول بار- ولتاژ

این رفتار معمولاً با روشهایی نظیر پریساچ (Preisach)، پرنتل-ایشلینسکی (Prandtl-Ishlinskii) و غیرہ مدلسازی میشود ^{(۱8}۔ [19_.

در عملگرهای پیزوالکتریک با ابعاد هندسی کوچک، رابطه هیسترزیس در حوزه الکتریکی (ولتاژ- بار) بهدلیل حضور نشتی (اثر مقاومت داخلی) حلقه هیسترزیس ساده نبوده و دارای یک رفتار افزایشی است. رفتار هیسترزیس در حوزه الکتریکی را برای عملگرهای پیزوالکتریک با ابعاد هندسی کوچک در نمودار ۶ نشان داده میشود.

بنابراین و با توجه به نمودار ۶، از روشهای متداول شناسایی هیسترزیس نمیتوان برای شناسایی و حذف اثر بار نشتی در حوزه الکتریکی استفاده کرد. در این پژوهش مدل پرنتل- ایشلینسکی اصلاحشده معرفی شده است که بهوسیله آن میتوان اثر بار نشتی را تخمین و جبران کرد.

تئوری تخمین هیسترزیس متغیر با زمان

شناسایی رفتار هیسترزیس فزاینده، توسط روشهای رایج مدلسازی و شناسایی هیسترزیس، امکانپذیر نخواهد بود. شناسایی این اثر نیازمند پیادهسازی یک روش تخمین بر مبنای زمان است. به همین منظور، از یک مدل پرنتدل ایشلینسکی وابسته به زمان استفاده میشود. در ادامه، ابتدا مدل رایج پرنتدل-

Volume 20, Issue 6, June 2020

ایشلینسکی معرفی شده و سپس جهت شناسایی هیسترزیس وابسته به زمان، مدلی ارایه میشود.



مدل یرنتل- ایشلینسکی (PI)

تابع اولیه در مدل PI، یک تابع لقی مستقل از هیسترزیس است و معمولاً برای مدلسازی لقی بین چرخدندهها استفاده میشود. یک تابع لقی بهصورت زیر تعریف میشود:

$$z(t) = w_h H_r[x, z_0](t) H_r[x, z_0](t) = max\{x(t) - r, min\{x(t) + (v) r, z(t - T_s)\}\}$$

که در رابطه فوق، x ورودی کنترلی، z خروجی سیستم، r دامنه لقی و $T_{\rm s}$ دوره تناوب نمونهبرداری است. همچنین مقدار اولیه بهصورت زیر در نظر گرفته شده و معمولاً صفر قرار داده میشود:

 $z_0 = max\{x(0) - r, min\{x(0) + r, z_0\}\}$ (۲) $W_h = 0$ تابع وزن W_h بهره تابع لقی را تعیین میکند؛ بهعنوان مثال $W_h = 0$ نشاندهنده شیب ۴۵ درجه است. در مقایسه با سیستم مکانیکی چرخدنده، میتوان W_h را بهعنوان نسبت تبدیل چرخدندهها در نظر \overline{Z}_0

حال با توجه به عملگر لقی معرفی شده، میتوان رفتار غیرخطی هیسترزیس را به صورت جمع چندین عملگر لقی با وزن و دامنه متفاوت در نظر گرفت. در نتیجه تابع PI به صورت زیر تعریف می شود:

$$z(t) = \sum_{i=0}^{n} w_{h_i} H_{r_i} [x, z_{0_i}](t) =$$

$$\vec{w}_h^T \vec{H}_r [x, \vec{z}_0](t)$$
(\varphi)

که n تعداد توابع لقی استفادهشده بوده و پارامترهای برداری به صورت زیر خواهند بود:

$$\vec{w}_{h}^{T} = \begin{bmatrix} w_{h_{1}} & \dots & w_{h_{n}} \end{bmatrix} \\ \vec{H}_{r}[x, \vec{z}_{0}] = \begin{bmatrix} H_{r_{1}}[x, z_{0_{1}}] & \dots & H_{r_{n}}[x, z_{0_{n}}] \end{bmatrix} \\ \vec{r} = \begin{bmatrix} r_{1} & \dots & r_{n} \end{bmatrix} \\ \vec{z}_{0} = \begin{bmatrix} z_{0_{1}} & \dots & z_{0_{n}} \end{bmatrix}$$
(*)

مدل پرنتل- ایشلینسکی اصلاحشدہ

در مدل اولیه پرنتل- ایشلینسکی، حلقه بین ورودی و خروجی نسبت به مرکز حلقه متقارن است. ولی در عمل رابطه هیسترزیس واقعی

۱۵۰۶ امیرمحمد صدریکوپائی و همکاران ــ

در عملگرهای پیزوالکتریک همیشه متقارن نیست. بنابراین با مدل اولیه PI نمیتوان رابطه هیسترزیس را به درستی شناسایی کرد. برای حل این مشکل یک اپراتور اشباع بهصورت سری به مدل PI اضافه میشود که یک اپراتور غیرمتقارن بوده و بهصورت زیر تعریف میشود:

$$S_d[z](t) = \begin{cases} \max\{z(t) - d, 0\} & d > 0\\ z(t) & d = 0 \end{cases}$$
(a)

$$y(t) = \vec{w}_s^T \vec{S}_d[z](t) \tag{8}$$

که z و y خروجی تابع PI و خروجی عملگر پیزوالکتریک هستند. $\vec{S}_d[z](t) = \vec{w}_s^T = [w_{s0}, ..., w_{sm}]$ است و $\vec{d} = \vec{d}$ است $\vec{d} = [S_{d0}[z](t), ..., S_{dm}[z](t)]^T$ PI با بردار آستانه $\vec{d} = 0 = d_0 < \cdots < d_m$ PI و اپراتور اصلاح شده PI به صورت زیر بیان می شود:

$$y(t) = \vec{w}_s^T \vec{S}_d [\vec{w}_h^T \vec{H}_r[x, \vec{z}_0](t)]$$
 (Y)
مدل پرنتل- ایشلینسکی متغیر با زمان

در این مدل، تابع لقی اولیه بهصورت زیر اصلاح میشود تا بتواند اثر افزایشی ناشی از زمان را هم در مدلسازی موثر کند:

$$z(t) = z_{1}(t) + G_{R}z_{2}(t)$$

$$z_{1}(t) = w_{h}H_{r}[x, z_{1_{0}}](t) =$$

$$w_{h}max\{x(t) - r, min\{x(t) + r, z_{1}(t - (\Lambda) + T_{s})\}\}$$

$$z_{2}(t) = x(t)T + z_{2}(t - T)$$

که (z₁(t) همان تابع لقی اولیه با تعاریف قبلی، z₂(t) یک تابع انتگرالگیر جهت مدلسازی ترم افزاینده و G_R نرخ رشد است که با توجه به میزان افزایش مشخص میشود. نمودار ۷ مدل پرنتل-ایشلینسکی وابسته به زمان را نشان میدهد.



نمودار ۲) پرنتل- ایشلینسکی وابسته به زمان

در نتیجه یک حلقه هیسترزیس وابسته به زمان میتواند به وسیله برهمنهی خطی چند تابع لقی اولیه (z1(t با دامنه و وزن متفاوت و فقط یک تابع انتگرالگیر (z2(t با یک نرخ رشد مدل شود.

$$z(t) = \sum_{i=0}^{n} z_{1i}(t) + G_R z_2(t) = \sum_{i=0}^{n} \left\{ w_{hi} H_{ri} \left[x, y_{10i} \right](t) \right\} + G_R \{x(t)T +$$
⁽⁹⁾

ماهنامه علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

$$y_{2}(t-T)\} = \vec{w}_{h}^{T} \vec{H}_{r} [x, \vec{z}_{1_{0}}](t) + G_{R} \{x(t)T + z_{2}(t-T)\}$$

بهدلیل رفتار نامتقارن پدیده هیسترزیس در عملگرهای پیزوالکتریک، مدل PI وابسته به زمان اصلاحشده بهصورت زیر بیان میشود:

$$y(t) = y_{1}(t) + z_{2}(t) = \vec{w}_{s}^{T} \vec{S}_{d} [\vec{w}_{h}^{T} \vec{H}_{r} [x, \vec{z}_{1_{0}}](t)] + G_{R} [x(t)T_{s}$$
(*)
+ $z_{2}(t - T_{s})]$

شناسایی مدل PI وابسته به زمان

برای شناسایی مدل PI فعال اصلاحشده، ابتدا تعداد اپراتورهای لقی n برای شناسایی مدل \vec{r}_h فعال اصلاحشده، ابتدا تعداد اپراتورهای الی بهطور n بعداد اپراتورهای اشباع m، بردارهای آستانه \vec{r}_h و \vec{r}_h و G_R با مناسبی انتخاب شوند. بنابراین پارامترهای \vec{w}_h ، \vec{w}_h و G_R با کمینه کردن تابع خطا ۱۱ و با روش بهینه سازی مناسب به دست میآیند.

$$Er(\vec{w}_h, \vec{w}_s, G_R) = y_{exp}(t) - [\vec{w}_s^T \vec{S}_d [\vec{w}_h^T \vec{H}_r [x, \vec{z}_{1_0}](t)] - G_R \{x(t)T_s + z_2(t - T_s)\}]$$
(11)

بنابراین با اندازهگیری بار الکتریکی خروجی، میتوان اثر بار نشتی را شناسایی و جبران نمود و موقعیت عملگر را به درستی تخمین زد.

نتایج تجربی تخمین موقعیت به کمک خودحسگری در حضور بار نشتی

مدل پرنتدل- ایشلینسکیِ متغیر با زمان معرفیشده در قسمت قبل، جهت تخمین رفتار خروجی بار الکتریکی عملگر و سپس استخراج موقعیت آن، بهصورت تجربی مورد استفاده قرار گرفت.

تجهیزات آزمایشگاهی

عملگر استفاده در این پژوهش، عملگر بایمورف -T215-A4 (شرکت -Piezo Systems Inc آمریکا) است. علامت X در نام این عملگر، نشاندهنده اتصال سری دو لایه پیزوالکتریک است. ابعاد این عملگر ۲۸/۲۰۲۰۳/۲۰۸۰میلیمتر بوده است و دامنه حرکتی مدل یک سرگیردار آن ۲۰۰میکرومتر است. جنس سرامیک استفاده در این عملگر از نوع PSI-5A4E که محصول همان شرکت است. این سرامیک، گستره دمایی وسیعی دارد و تقریباً حساسیت آن به دما ناچیز است. برای تقویت عملگر، یک لایه نازک برنج بین دو لایه پیزوالکتریک قرار داده شده است.

از تقویت کننده خطی EPA-104-230 (شرکت EPA-104 مده الا، آمریکا) جهت تقویت ولتاژ اعمالی به عملگر استفاده شده است. دادهبرداری با فرکانس ۱کیلوهرتز صورت گرفته و جابجایی optoNCDT 2300 کیلوهرتز صورت گرفته و جابجایی (شرکت Micro-Epsilon؛ آلمان) ثبت شد. از کارت دادهبرداری PCI-1716 جهت دریافت داده ورودی، و از کارت Morte-1716 (شرکت PCI-1716؛ تایوان) برای ارسال داده خروجی استفاده شده است. نحوه قرارگیری تجهیزات آزمایشگاهی به صورت نمادین در شکل ۳ نشان داده شده است. ــ مدلسازی و جبران نشت بار در تخمین موقعیت به کمک خودحسگری برای عملگرهای پیزوالکتریک ۲۰۵۱



شکل ۳) تجهیزات آزمایشگاهی

اندازهگیری بار الکتریکی

برای اندازه گیری بار الکتریکی خروجی عملگر پیزوالکتریک، از یک مدار ساده اندازه گیری بار (انتگرال گیر جریان) استفاده شده است. در نوع رایج این مدارها، ورودی ولتاژ میان عملگر پیزوالکتریک و یک خازن ثانویه C تقسیم میشود. این مساله سبب میشود تا یک ولتاژ با دامنه ورودی زیادی جهت تحریک عملگر نیاز باشد. برای رفع این مشکل، از نوع فعال این مدار استفاده میشود. ساختار این مدار را در شکل ۴ نشان داده میشود. c_p و R_p خازن و مقاومت داخلی عملگر و C خازن ثانویه جهت اندازه گیری بار الکتریکی عبوری از عملگر است.



شکل ٤) مدار اندازهگیری بار الکتریکی

شناسایی هیسترزیس متغیر با زمان و نرخ رشد

در ابتدا، عملگر توسط یک ورودی ولتاژ سینوسی، با دامنه ۱۲ولت و فرکانس ۸۸/۰هرتز تحریک و خروجی بار توسط مدار طراحی شده ثبت شد. با بهدستآوردن رفتار هیسترزیس متغیر با زمان تجربی، روش PI پیشنهادی، جهت شناسایی هیسترزیس مورد استفاده قرار

گرفت.

هدف، شناسایی و تخمین نرخ رشد خروجی بار الکتریکی، که همان اثر نشتی است، خواهد بود. رفتار هیسترزیس و تخمین آن در نمودار ۸ نشان داده میشود.

همان گونه که مشاهده می شود، مدل پیشنهادی به طور همزمان رفتار هیسترزیس اصلی (V_a-Q) و همچنین نرخ رشد G_R را به صورت مناسبی تخمین میزند. جهت ارزیابی صحت تخمین نرخ رشد، رفتار افزایشی شناسایی شده به صورت آفلاین از خروجی بار الکتریکی حذف می شود تا بار خالص خازنی به دست آید. نتیجه حذف اثر نرخ رشد از داده های خروجی را نمودار ۹ نشان می دهد.



نمودار ۸) شناسایی رابطه هیسترزیس در حضور نشتی



(1Y)

نمودار ۹) رفتار هیسترزیس و خروجی بار الکتریکی عملگر قبل و بعد از جبرانسازی اثر نشتی

همانگونه که مشاهده میشود، اثر نشتی با دقت بالایی شناسایی و جبرانسازی شده است.

جبرانسازی آنلاین نرخ رشد و حصول رابطه خطی بار- جابجایی

روش پیشنهادی میتواند رفتار هیسترزیس اصلی و نرخ رشد را تخمین بزند. بنابراین میتوان از آن برای جبرانسازی آنلاین بار نشتی استفاده کرد. با بهدستآوردن امپدانس مقاومتی موثر (به وسیله *G*R)، اثر افزایشی بار میتواند بهصورت آنلاین جبران شود. بنابراین میتوان از نمودار بار الکتریکی جبرانشده، جهت تخمین موقعیت عملگر استفاده نمود. به همین منظور لازم است تا رابطه جبرانشده بار الکتریکی- موقعیت، به وسیله یک خط برازش شود تا بتوان از آن در کاربردهای خودحسگری استفاده نمود. نمودار خط برازششده روی نمودار بار الکتریکی- موقعیت در نمودار ۰۰ نشان داده میشود.



نمودار ۱۰) برازش خطی نمودار موقعیت- بار الکتریکی جبران شده

معادله خط برازششده بهصورت زیر است:

X = 225.5260Q - 1.5758

تخمین موقعیت به کمک خودحسگری

تخمین موقعیت عملگر بایمورف T215-A4-103X و میزان خطای آن که توسط یک ورودی ولتاژ سینوسی، با دامنه ۱۲ولت و فرکانس ۰۸/۰هرتز تحریکشده را نمودار ۱۱ نشان میدهد.

همان طور که مشاهده میشود میزان خطای تخمین در حدود ۱/۵% است که نشاندهنده دقت خوب این روش در تخمین موقعیت عملگر است. برای نشاندادن میزان بهبود تخمین موقعیت بعد از جبرانسازی نرخ رشد، خطای تخمین قبل و بعد از اصلاح اثر مقاومت در نمودار ۱۲ نشان داده شده است.

جهت اطمینان از کارایی این روش، موقعیت عملگر برای ورودی تحریک چندفرکانسی (رابطه ۱۳)، تخمین زده شده است. این ورودی کل دامنه تحریک ولتاژ عملگر را به صورت رفتار چندفرکانسی پوشش خواهد داد.

 $V(t) = 60 - 20[\cos(0.5t) + \cos(1.5t) + (1\%) \\ \cos(2.5t)]$

رفتار خروجی حقیقی، تخمین آن و خطای تخمین را بهازای ورودی ولتاژ چندفرکانسی در نمودار ۱۳ نشان داده شده است.

همچنین برای نشاندادن میزان بهبود تخمین موقعیت بعد از جبرانسازی نرخ رشد، خطای تخمین قبل و بعد از اصلاح اثر مقاومت در نمودار ۱۴ نشان داده شده است. نتایج نشان میدهد که روش پیشنهادی، برای ورودیهای با فرکانس متغیر نیز با دقت مناسبی تخمین موقعیت را انجام میدهد.



نمودار ۱۱) تخمین موقعیت عملگر و میزان خطای آن



نمودار ۱۲) مقایسه خطای تخمین موقعیت قبل و بعد از جبرانسازی



نمودار ۱۳) تخمین موقعیت عملگر و میزان خطای آن بهازای ورودی چندفرکانسی

Volume 20, Issue 6, June 2020



نمودار ۱۴) مقایسه خطای تخمین موقعیت قبل و بعد از جبرانسازی بهازای ورودی چندفرکانسی

نتيجهگيرى

یکی از روشهای تخمین موقعیت به روش خودحسگری در عملگرهای پیزوالکتریک استفاده از رابطه خطی جابجایی- بار الکتریکی است. اما مهمترین مساله در این روش، نشتی بار در عملگرهای پیزوالکتریک با امپدانس پایین، بهخصوص برای ورودیهای شبهاستاتیکی و فرکانس پایین، است. علت نشتی بار، وجود مقاومت داخلی عملگر بوده که یک ترم انتگرالی در معادلات سیستم ایجاد کرده و موجب افزایش بار الکتریکی عملگر در طول زمان می شود. در این مقاله، به منظور شناسایی و جبران اثر مقاومت، از منحنی هیسترزیسِ متغیر با زمان بارالکتریکی- ولتاژ عملگر استفاده شد. با توجه به مساله نشتی بار، مدلهای رایج شناسایی هیسترزیس کارآمد نخواهند بود. در این مقاله، روش جدید PI متغیر با زمان، جهت شناسایی و جبران اثر نشتی پیشنهاد شد. نتایج تجربی گواه این است که این مدل میتواند به خوبی اثر افزاینده مشاهدهشده در رفتار بارالکتریکی را بهطور همزمان شناسایی و جبران کند. در نتیجه با خطیسازی رابطه بار الکتریکی- موقعیت عملگر پیزوالکتریک و حذف اثر افزایشی، میتوان از آن در کاربردهای خودحسگری جهت تخمین موقعیت عملگر استفاده نمود. نتایج تجربی نشاندهنده دقت خوب این روش و کارآیی بالای آن است.

> **تشکر و قدردانی:** موردی یافت نشد. **تاییدیه اخلاقی:** موردی یافت نشد. **تعارض منافع:** موردی یافت نشد.

سهم ویسندگان: امیرمحمد صدری کوپایی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۳۵%)؛ داوود سلیمان زاده (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۳۵%)؛ حامد غفاری راد (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۳۰%).

منابع مالی: موردی یافت نشد.

فهرست علايم

- عملگر ھيسترزيس H_r
- وزن تابع هیسترزیس **W**_h
 - آستانه تابع بَکلش r
 - تناوب نمونهبرداری T_s
 - تابع اشباع $oldsymbol{S}_d$

۱۵۱۰ امیرمحمد صدریکوپائی و همکاران .

9-Zarif Mansour S, Seethaler R. Simultaneous quasi-static displacement and force self-sensing of piezoelectric actuators by detecting impedance. Sensors and Actuators A: Physical. 2018;274:272-277.

10- Ivan IA, Rakotondrabe M, Lutz P, Chaillet N. Current integration force and displacement self-sensing method for cantilevered piezoelectric actuators. Review of Scientific Instruments. 2009;80(12):126103.

11- Rakotondrabe M. Combining self-sensing with an Unkown-Input-Observer to estimate the displacement, the force and the state in piezoelectric cantilevered actuators. American Control Conference, ACC'2013, Jan 2013, United States. Bengaluru: HAL; 2013.

12- Rakotondrabe M, Ivan IA, Khadraoui S, Clevy C, Lutz P, Chaillet N. Dynamic displacement self-sensing and robust control of cantilever piezoelectric actuators dedicated for microassembly. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 6-9 July 2010, Montreal, ON, Canada. Piscataway: IEEE; 2011.

13- Rakotondrabe M, Ivan IA, Khadraoui S, Lutz P, Chaillet N. Simultaneous displacement/force self-sensing in piezoelectric actuators and applications to robust control. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2014;20(2):519-531.

14- Ghafarirad H, Rezaei SM, Zareinejad M, Mardi NA. Charge-based hysteresis compensation in low impedance piezoelectric actuators by a modified Prandtl–Ishlinskii model. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2019;233(1):83-93.

15- Zhang LS, Liu YB, Pan CL, Feng ZH. Leakage current characterization and compensation for piezoelectric actuator with charge drive. Sensors and Actuators A: Physical. 2013;199:116-122.

16- Soleymanzadeh D, Ghafarirad H, Zareinejad M. Charge-based robust position estimation for low impedance piezoelectric actuators. Measurement. 2019;147:106839.

17- Soleymanzadeh D, Ghafarirad H, Zareinejad M. Sensorless adaptive sliding mode position control for piezoelectric actuators with charge leakage. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2020;31(1):40-52.

18- Ma Y, Zhang X, Xu M, Xie S. Hybrid model based on Preisach and support vector machine for novel dual-stack piezoelectric actuator. Mechanical Systems and Signal Processing. 2013;34(1-2):156-172.

19- Ang WT, Khosla PK, Riviere CN. Feedforward controller with inverse rate-dependent model for piezoelectric actuators in trajectory-tracking applications. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2007;12(2):134-142.

- ط آستانه تابع اشباع وزن تابع اشباع (سیدانس مقاومتی موثر عملگر پیزوالکتریک (سیدانس مقاومتی موثر عملگر پیزوالکتریک (سیدان ثانویه (سیدان خارنی عملگر پیزوالکتریک (سیدان خارین عملگر پیزوالکتریک
 - مقاومت داخلی عملگر پیزوالکتریک R_p
 - بار الکتریکی عملگر پیزوالکتریک $oldsymbol{Q}$
 - ولتاژ ورودى
 - موقعيت عملگر پيزوالكتريک

بالانويسها

 V_a

X

Т

ترانهاده ماتريس

منابع

1- Xu W, Wu Y. Piezoelectric actuator for machining on macro-to-micro cylindrical components by a precision rotary motion control. Mechanical Systems and Signal Processing. 2019;114:439-447.

2- Wang S, Rong W, Wang L, Pei Z, Sun L. A novel inchworm type piezoelectric rotary actuator with large output torque: Design, analysis and experimental performance. Precision Engineering. 2018;51:545-551.

3- Ghosh B, Jain RK, Majumder S, Roy SS, Mukhopadhyay S. Experimental characterizations of bimorph piezoelectric actuator for robotic assembly. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2017;28(15):2095-2109.

4- Liseli JB, Agnus J, Lutz P, Rakotondrabe M. Self-sensing method considering the dynamic impedance of piezoelectric based actuators for ultralow frequency. IEEE Robotics and Automation Letters. 2018;3(2):1049-1055.

5- Ivan IA, Rakotondrabe M, Lutz P, Chaillet N. Quasistatic displacement self-sensing method for cantilevered piezoelectric actuators. Review of Scientific Instruments. 2009;80(6):065102.

6- Islam MN, Seethaler RJ. Sensorless position control for piezoelectric actuators using a hybrid position observer. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2013;19(2):667-675.

7- Dosch JJ, Inman DJ, Garcia E. A self-sensing piezoelectric actuator for collocated control. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1992;3(1):166-185.

8- Seki K, Iwasaki M. Application of self-sensing technique for position control considering vibration suppression in piezo-driven stage. IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 6-8 March 2015, Nagoya, Japan. Piscataway: IEEE; 2015.