



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,
Ghafariarad H.*¹ PhD

How to cite this article

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

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
ghafariarad@aut.ac.ir

Article History

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

ABSTRACT

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 piezo-driven 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 Unknown-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

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

امیرمحمد صدقی کوپائی BSc

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

داود سلیمان‌زاده MSc

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

حامد غفاری‌راد* PhD

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

چکیده

امروزه عملگرهای پیژوالکتریک به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصربه‌فردی همچون دقت بسیار زیاد، پاسخ سریع و فرکانس طبیعی بالا، به صورت گسترده‌ای در کاربردهای موقعیت‌دهی میکرونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. علی‌رغم ویژگی‌های مطلوب عملگرهای پیژوالکتریک، وجود رفتار غیرخطی همانند هیستریزیس، می‌تواند دقت این نوع عملگرها را کاهش دهد. به همین دلیل به منظور کاهش اثر رفتار هیستریزیس در کاربردهای کنترلی، از بازخورد موقعیت با استفاده از حسگرهای خارجی استفاده می‌شود. اما استفاده از این حسگرها در بسیاری از کاربردها به دلیل محدودیت فضا و همچنین هزینه بالا، امکان‌پذیر نیست. از این رو، با توجه به وابستگی خواص الکتریکی و مکانیکی در مواد پیژوالکتریک، می‌توان از روش خودحسگری به‌عنوان راه‌حلی جایگزین استفاده نمود. در این پژوهش، از روش خودحسگری به‌منظور تخمین موقعیت در عملگرهای پیژوالکتریک استفاده شده است. متداول‌ترین روش برای پیاده‌سازی سیستم خودحسگری برای عملگرهای پیژوالکتریک، بر مبنای رابطه خطی بار الکتریکی و موقعیت عملگرهای پیژو است؛ به این صورت که با اندازه‌گیری بار الکتریکی عملگر، موقعیت آن تخمین زده می‌شود. اما این روش، به علت نشتی 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 پیژوالکتریک، 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 بزند.

کلیدواژه‌ها: عملگر پیژوالکتریک، خودحسگری، تخمین موقعیت، نشت بار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۹

*نویسنده مسئول: ghafarirad@aut.ac.ir

مقدمه

امروزه استفاده از عملگرهای پیژوالکتریک در گستره وسیعی، از کاربردهای شبه‌استاتیکی همچون میکروگریپرها و موقعیت‌دهی با دقت نانو تا کاربردهای فوق سریعی همچون تزریق سوخت شایع شده است [1-3]. عملگرهای پیژوالکتریک به علت دارا بودن 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 پیژوالکتریک 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 خودحسگری در عملگرهای پیژوالکتریک شناخته می‌شود. خودحسگری به معنای حذف حسگر خارجی است. در این حالت وابستگی خواص مکانیکی و الکتریکی این امکان را فراهم می‌سازد که با داشتن اطلاعات از خواص الکتریکی ماده، بتوان خواص مکانیکی را اندازه‌گیری نمود. عملگرهای پیژوالکتریک 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 سیستم‌های میکروالکترومکانیکی حایز اهمیت است. نکته بعدی، پایین‌آمدن هزینه‌ها است؛ زیرا در این حالت یک سنسور نسبتاً گران با یک مدار ارزان‌قیمت خودحسگری جایگزین می‌شود [5]. ضمن اینکه در برخی سازه‌ها، اساساً امکان نصب حسگر خارجی وجود ندارد [6]. همچنین علاوه بر 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) گشته و ناحیه پایداری سیستم را افزایش می‌دهد [6, 7].

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 اندازه‌گیری 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 پیژوالکتریک 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 پیژوالکتریک، استفاده از بار الکتریکی پیژوالکتریک است [5]. در حالت ایده‌آل، در فرکانس‌های دور از فرکانس طبیعی سیستم، رابطه بار- جابجایی با دقت بالایی خطی 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. /یوان و همکاران [5]، از روش اندازه‌گیری بار و با استفاده از معادلات اساسی عملگر پیژوالکتریک، 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 به صورت خطی در نظر گرفته شده است. /یوان و همکاران [10] و /اکوتندریب [11] از خودحسگری به

دارد.

بنابراین در این پژوهش، هدف، ارایه یک راه کار کارآمد برای شناسایی و جبران نشتی بار و در ادامه، تخمین صحیح موقعیت است. برای این منظور، به بررسی اثر نشتی بار در رفتار هیستریزیس ولتاژ-بار الکتریکی در عملگر پیزوالکتریک پرداخته شده است. در ادامه با ارایه روش پرنتل ایشلینسکی اصلاح شده، اثر نشتی شناسایی و در ادامه جبران سازی شده است. در نهایت، تخمین موقعیت عملگر با دقت بالا در حضور نشتی صورت گرفته است. مزیت روش ارایه شده این است که نیازی به مدلسازی دینامیک سیستم نداشته و همچنین پیاده سازی آن آسان بوده و نیاز به طراحی های پیچیده کنترلی را از بین می برد. همچنین با اصلاحاتی که در مدل پرنتل ایشلینسکی انجام گرفت، روش ارایه شده قادر به شبیه سازی حلقه های هیستریزیس 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. به طور 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 اندازه گیری 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

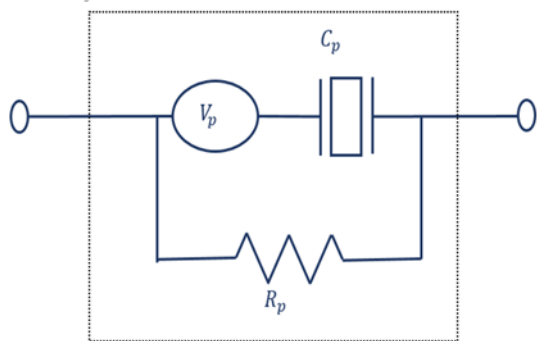
در بعضی از عملگرهای پیزوالکتریک، به خصوص عملگرهای کوچک از نظر ابعادی، رابطه بار-جابجایی در فرکانس های پایین (کاربرد شبه استاتیکی) خطی نبوده و دارای یک نرخ افزایشی است. رابطه بار-جابجایی را برای یک نوع عملگر پیزوالکتریک عرضی، که در قسمت نتایج تجربی معرفی شده است، نمودار ۲ نشان می دهد. علت این پدیده، به مدل الکتریکی عملگرهای پیزوالکتریک مربوط می شود. پیزوالکتریک ها 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 المان های الکتریکی آن است. پیزوالکتریک ها 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 انتگرال گیر برای اندازه گیری بار الکتریکی خواهد بود که منجر به افزایش بار الکتریکی پیزو در طول زمان و انباشت بار می شود. در بسیاری از کاربردها، مقدار این مقاومت نسبت به سایر المان های سیستم، آنچنان زیاد بوده که تقریباً تأثیری در رفتار الکتریکی پیزوالکتریک نخواهد داشت. اما در عملگرهای با امپدانس پایین، وضعیت متفاوت است و این اثر قابل

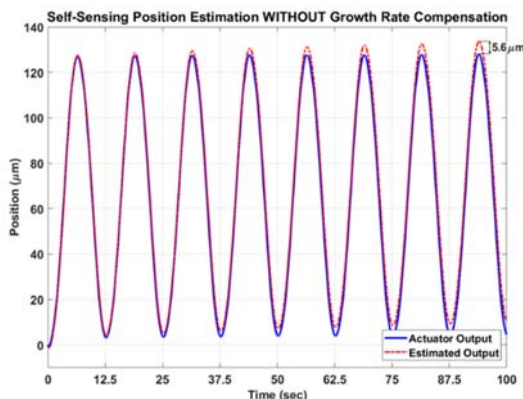
کمک بار الکتریکی برای تخمین همزمان موقعیت و نیرو در عملگرهای پیزوالکتریک در عملیات های فرکانس پایین استفاده کرده اند. در روش آنها نیروی اعمالی به عملگر پیزوالکتریک، با استفاده از ولتاژ اعمالی و بار اندازه گیری شده و بازنویسی معادلات مشخصه پیزوالکتریک، تخمین زده شده است. در این پژوهش نیز از خازن ثانویه برای حذف اثر دی الکتریک استفاده شده است. راکوتندریب و همکاران، از اندازه گیری بار برای تخمین موقعیت در عملیات های فرکانس بالا نیز استفاده کرده است [12]. وی در این پژوهش با در نظر گرفتن دینامیک برای روش خودحسگری و شناسایی آن، موقعیت عملگر را در کاربردهای فرکانس بالا تخمین زده است. راکوتندریب و همکاران، همچنین با در نظر گرفتن دینامیک عملگر، نیرو و موقعیت را در فرکانس های بالا به صورت همزمان تخمین زده است [13].

اما نتایج تجربی نشان می دهد که استفاده از روش اندازه گیری بار، به خصوص در کاربردهای شبه استاتیکی 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 می شود، که منجر به خطای تخمین برای موقعیت عملگر می شود. علت این امر را می توان در پدیده نشتی بار ناشی از مقاومت داخلی در عملگرهای پیزوالکتریک جستجو نمود [14, 15]. در واقع، اگر نمودار بار الکتریکی عملگر رسم شود، ملاحظه می شود که بار الکتریکی عملگر به مرور زمان افزایش می یابد. بنابراین خروجی خودحسگری به شدت تحت تأثیر نشتی بار خواهد بود. نکته حایز اهمیت آن است که بار نشتی توسط روش هایی همچون استفاده از فیلترهای بالاگذر قابل حذف نیست. زیرا حوزه عملکرد عملگرهای پیزو در بسیاری از موارد، فرکانس های پایین بوده، و استفاده از فیلتر بالاگذر، خود منجر به تخریب سیگنال اصلی عملگر می شود.

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 جبران سازی رفتار هیستریزیس عملگرهای پیزوالکتریک، بدون استفاده از سنسور موقعیت، ارایه کردند. برای این منظور از مدلسازی رفتار هیستریزیس متغیر با زمان بار الکتریکی-جابجایی، در حضور نشتی بار الکتریکی استفاده نمودند. اما روش ارایه شده، جهت جبران سازی رفتار هیستریزیس عملگرهای پیزوالکتریک و خطی سازی رابطه ولتاژ-جابجایی عملگر، و نه تخمین موقعیت، ارایه شده است. همچنین روش مذکور، توانایی مدلسازی حلقه های هیستریزیس نامتقارن را ندارد. البته شناسایی و حذف اثر مقاومت داخلی عملگر به دلیل رفتار غیرخطی آن، در برخی موارد کارآمد نخواهد بود. به همین دلیل، سلیمان زاده و همکاران [16, 17]، با در نظر گرفتن اثر مقاومت داخلی به صورت غیرخطی، اثر افزایش بار الکتریکی را به صورت اغتشاش در خروجی عملگر در نظر گرفتند و با طراحی روی تگر مقاومت، به جبران سازی این اثر پرداختند. اما این کار نیازمند مدلسازی دقیق دینامیک سیستم و همچنین طراحی روی تگرهای تخمین موقعیت با ساختار پیچیده

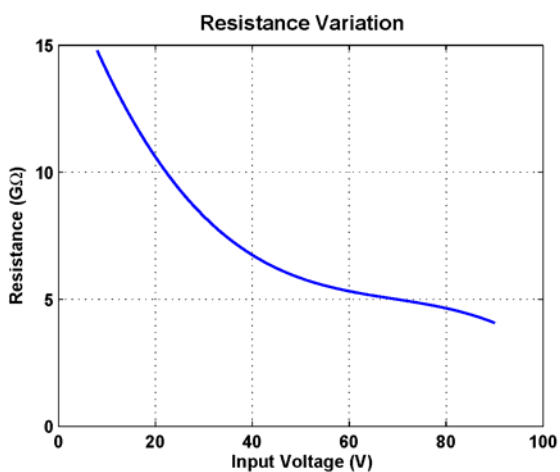


شکل ۲) مدل الکتریکی واقعی الکتریکی پیزوالکتریک



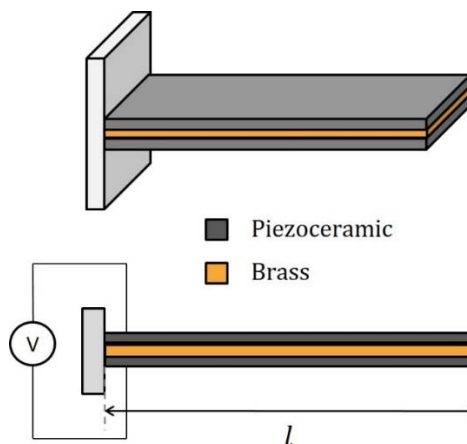
نمودار ۳) تخمین موقعیت عملگر پیزوالکتریک بدون در نظر گرفتن اثر نشتی بار الکتریکی

همان‌گونه که اشاره شد تاثیر نشتی، به دلیل 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. به طور مثال، رفتار غیرخطی مقاومت داخلی برای این نوع عملگر پیزوالکتریک عرضی برحسب ولتاژ اعمالی در نمودار ۴ نشان داده شده است.

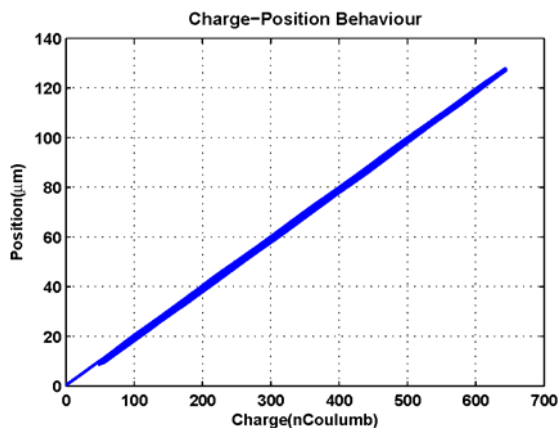


نمودار ۴) تغییرات مقاومت با ولتاژ اعمالی

صرف نظر کردن 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 ۱۲۰ ولت و فرکانس ۰/۸ هرتز تحریک شده را، با استفاده از رابطه خطی بار الکتریکی- جابجایی این عملگر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود موقعیت تخمین‌زده شده به مرور نسبت به موقعیت واقعی عملگر منحرف شده و در طول زمان دچار خطای قابل توجهی می‌شود.



شکل ۱) شماتیک عملگر پیزوالکتریک دولایه سری

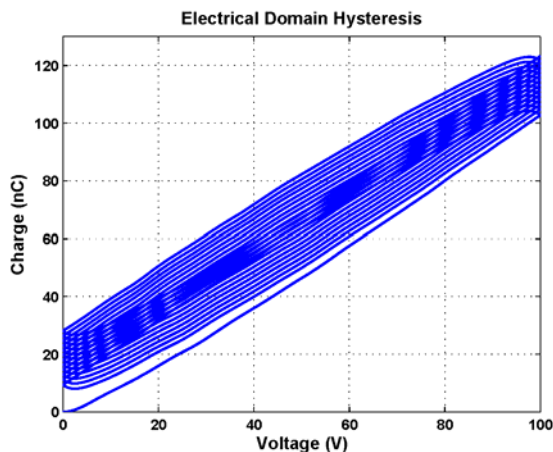


نمودار ۱) رابطه خطی عمومی بار- جابجایی در عملگرهای پیزوالکتریک



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

ایشلینسکی معرفی شده و سپس جهت شناسایی هیستریزس وابسته به زمان، مدلی ارائه می‌شود.



نمودار (1) رفتار هیستریزس بار- ولتاژ در حضور نشتی

مدل پرنتل- ایشلینسکی (PI)

تابع اولیه در مدل PI، یک تابع لقی مستقل از هیستریزس است و معمولاً برای مدلسازی لقی بین چرخندها استفاده می‌شود.

یک تابع لقی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$z(t) = w_h H_r[x, z_0](t) \quad (1)$$

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

که در رابطه فوق، x ورودی کنترلی، z خروجی سیستم، r دامنه لقی و T_s دوره تناوب نمونه‌برداری است. همچنین مقدار اولیه به صورت زیر در نظر گرفته شده و معمولاً صفر قرار داده می‌شود:

$$z_0 = \max\{x(0) - r, \min\{x(0) + r, z_0\}\} \quad (2)$$

تابع وزن w_h بهره تابع لقی را تعیین می‌کند؛ به عنوان مثال $w_h=1$ نشان‌دهنده شیب ۴۵ درجه است. در مقایسه با سیستم مکانیکی چرخنده، می‌توان w_h را به عنوان نسبت تبدیل چرخندها در نظر گرفت.

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

$$z(t) = \sum_{i=1}^n w_{h_i} H_{r_i}[x, z_{0_i}](t) = \vec{w}_h^T \vec{H}_r[x, \vec{z}_0](t) \quad (3)$$

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

$$\vec{w}_h^T = [w_{h_1} \dots w_{h_n}]$$

$$\vec{H}_r[x, \vec{z}_0] = [H_{r_1}[x, z_{0_1}] \dots H_{r_n}[x, z_{0_n}]] \quad (4)$$

$$\vec{r} = [r_1 \dots r_n]$$

$$\vec{z}_0 = [z_{0_1} \dots z_{0_n}]$$

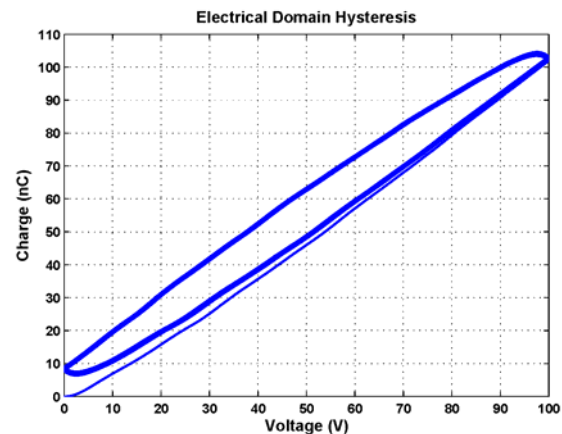
مدل پرنتل- ایشلینسکی اصلاح شده

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

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

تأثیر نشتی بر رفتار هیستریزس بار الکتریکی- ولتاژ

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



نمودار (5) رفتار هیستریزس متداول بار- ولتاژ

این رفتار معمولاً با روش‌هایی نظیر پریساج (Preisach)، پرنتل- ایشلینسکی (Prandtl-Ishlinskii) و غیره مدلسازی می‌شود، [18، 19].

در عملگرهای پیزوالکتریک با ابعاد هندسی کوچک، رابطه هیستریزس در حوزه الکتریکی (ولتاژ- بار) به دلیل حضور نشتی (اثر مقاومت داخلی) حلقه هیستریزس ساده نبوده و دارای یک رفتار افزایشی است. رفتار هیستریزس 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 هیستریزس نمی‌توان برای شناسایی و حذف اثر بار نشتی در حوزه الکتریکی استفاده کرد. در این پژوهش مدل پرنتل- ایشلینسکی اصلاح شده معرفی شده است که به وسیله آن می‌توان اثر بار نشتی را تخمین و جبران کرد.

تئوری تخمین هیستریزس متغیر با زمان

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

$$y_2(t - T) \} = \vec{w}_h^T \vec{H}_r [x, \vec{z}_{10}](t) + G_R \{x(t)T + z_2(t - T)\}$$

به دلیل رفتار نامتقارن پدیده هیستریزیس در عملگرهای پیزوالکتریک، مدل PI وابسته به زمان اصلاح شده به صورت زیر بیان می شود:

$$y(t) = y_1(t) + z_2(t) = \vec{w}_s^T \vec{S}_d [\vec{w}_h^T \vec{H}_r [x, \vec{z}_{10}](t)] + G_R [x(t)T_s + z_2(t - T_s)] \quad (10)$$

شناسایی مدل PI وابسته به زمان

برای شناسایی مدل PI فعال اصلاح شده، ابتدا تعداد اپراتورهای لقی n ، تعداد اپراتورهای اشباع m ، بردارهای آستانه \vec{r}_h و \vec{d} باید به طور مناسبی انتخاب شوند. بنابراین پارامترهای \vec{w}_h ، \vec{w}_s و G_R با کمینه کردن تابع خطا ۱۱ و با روش بهینه سازی مناسب به دست می آیند.

$$Er(\vec{w}_h, \vec{w}_s, G_R) = y_{exp}(t) - [\vec{w}_s^T \vec{S}_d [\vec{w}_h^T \vec{H}_r [x, \vec{z}_{10}](t)] - G_R \{x(t)T_s + z_2(t - T_s)\}] \quad (11)$$

بنابراین با اندازه گیری بار الکتریکی خروجی، می توان اثر بار نشستی را شناسایی و جبران نمود و موقعیت عملگر را به درستی تخمین زد.

نتایج تجربی تخمین موقعیت به کمک خودحسگر در حضور بار نشستی

مدل پرتدل- ایشلینسکی متغیر با زمان معرفی شده در قسمت قبل، جهت تخمین رفتار خروجی بار الکتریکی عملگر و سپس استخراج موقعیت آن، به صورت تجربی مورد استفاده قرار گرفت.

تجهیزات آزمایشگاهی

عملگر استفاده شده در این پژوهش، عملگر بایمورف T215-A4-103X (شرکت Piezo Systems Inc؛ آمریکا) است. علامت X در نام این عملگر، نشان دهنده اتصال سری دو لایه پیزوالکتریک است. ابعاد این عملگر ۳۸*۳۰/۲۸*۳۰/۳۸ میلی متر بوده است و دامنه حرکتی مدل یک سرگردار آن ۲۰۰ میکرومتر است. جنس سرامیک استفاده شده 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 Piezo Systems Inc؛ آمریکا) جهت تقویت ولتاژ اعمالی به عملگر استفاده شده است. داده برداری با فرکانس ۱ کیلوهرتز صورت گرفته و جابجایی نقطه انتهایی عملگر توسط حسگر لیزری مدل optoNCDT 2300 (شرکت Micro-Epsilon؛ آلمان) ثبت شد. از کارت داده برداری PCI-1710 جهت دریافت داده ورودی، و از کارت PCI-1716 (شرکت Advantech؛ تایوان) برای ارسال داده خروجی استفاده شده است. نحوه قرارگیری تجهیزات آزمایشگاهی به صورت نمادین در شکل ۳ نشان داده شده است.

در عملگرهای پیزوالکتریک همیشه متقارن نیست. بنابراین با مدل اولیه PI نمی توان رابطه هیستریزیس را به درستی شناسایی کرد. برای حل این مشکل یک اپراتور اشباع به صورت سری به مدل PI اضافه می شود که یک اپراتور غیرمتقارن بوده و به صورت زیر تعریف می شود:

$$S_d[z](t) = \begin{cases} \max\{z(t) - d, 0\} & d > 0 \\ z(t) & d = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$y(t) = \vec{w}_s^T \vec{S}_d[z](t) \quad (6)$$

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

$$y(t) = \vec{w}_s^T \vec{S}_d [\vec{w}_h^T \vec{H}_r [x, \vec{z}_0](t)] \quad (7)$$

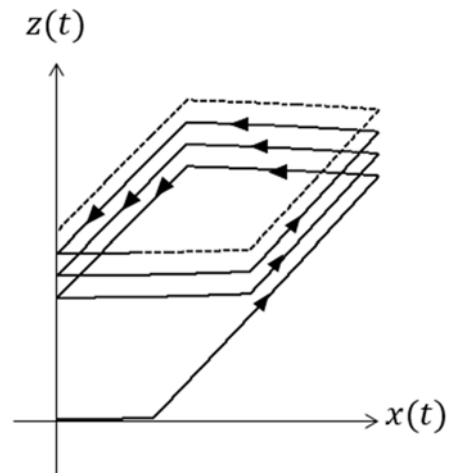
مدل پرتدل- ایشلینسکی متغیر با زمان

در این مدل، تابع لقی اولیه به صورت زیر اصلاح می شود تا بتواند اثر افزایشی ناشی از زمان را هم در مدل سازی موثر کند:

$$z(t) = z_1(t) + G_R z_2(t) \\ z_1(t) = w_h H_r [x, z_{10}](t) = w_h \max\{x(t) - r, \min\{x(t) + r, z_1(t - T_s)\}\} \quad (8)$$

$$z_2(t) = x(t)T + z_2(t - T)$$

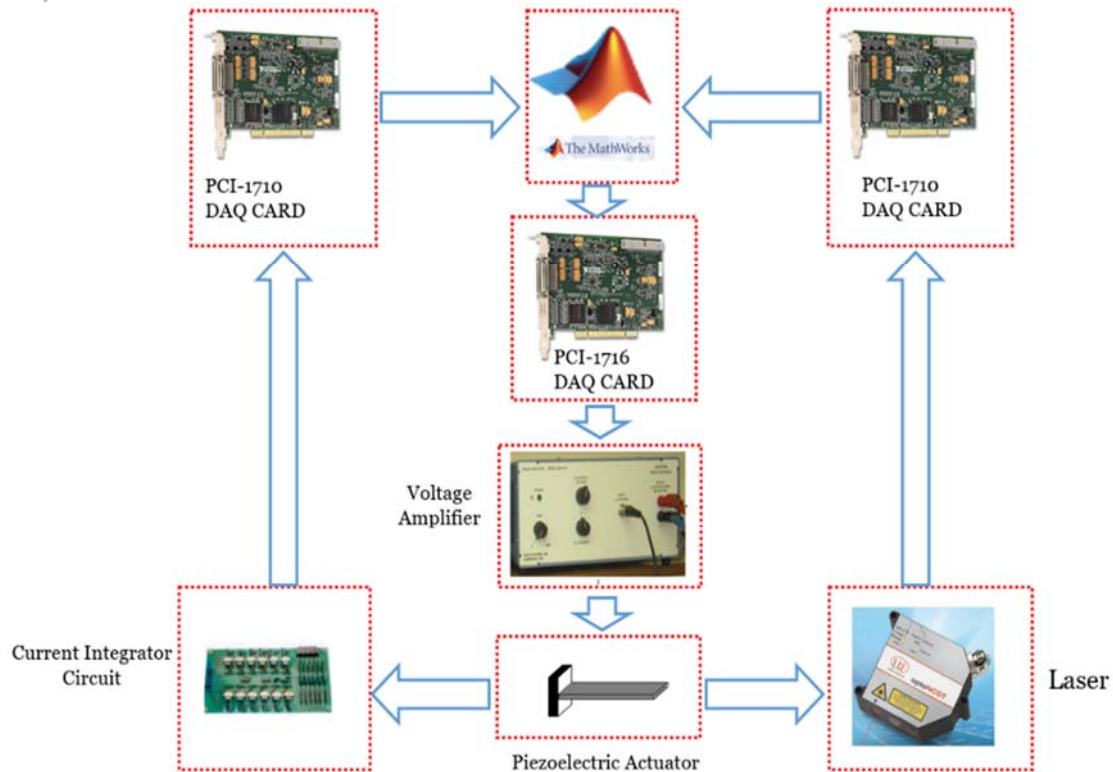
که $z_1(t)$ همان تابع لقی اولیه با تعاریف قبلی، $z_2(t)$ یک تابع انتگرال گیر جهت مدل سازی ترم افزایشی و G_R نرخ رشد است که با توجه به میزان افزایش مشخص می شود. نمودار ۷ مدل پرتدل- ایشلینسکی وابسته به زمان را نشان می دهد.



نمودار (۷) پرتدل- ایشلینسکی وابسته به زمان

در نتیجه یک حلقه هیستریزیس وابسته به زمان می تواند به وسیله برهم نهی خطی چند تابع لقی اولیه $z_1(t)$ با دامنه و وزن متفاوت و فقط یک تابع انتگرال گیر $z_2(t)$ با یک نرخ رشد مدل شود.

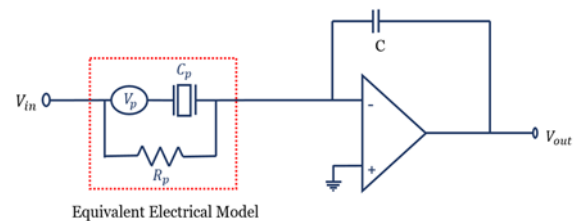
$$z(t) = \sum_{i=0}^n z_{1i}(t) + G_R z_2(t) = \sum_{i=0}^n \{w_{h_i} H_{r_i} [x, y_{10_i}](t)\} + G_R \{x(t)T + \quad (9)$$



شکل ۳) تجهیزات آزمایشگاهی

اندازه‌گیری بار الکتریکی

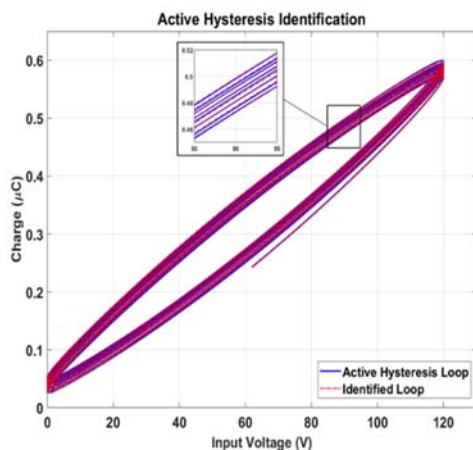
برای اندازه‌گیری بار الکتریکی خروجی عملگر پیزوالکتریک، از یک مدار ساده اندازه‌گیری بار (انتگرال‌گیر جریان) استفاده شده است. در نوع رایج این مدارها، ورودی ولتاژ میان عملگر پیزوالکتریک و یک خازن ثانویه C تقسیم می‌شود. این مساله سبب می‌شود تا یک ولتاژ با دامنه ورودی زیادی جهت تحریک عملگر نیاز باشد. برای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



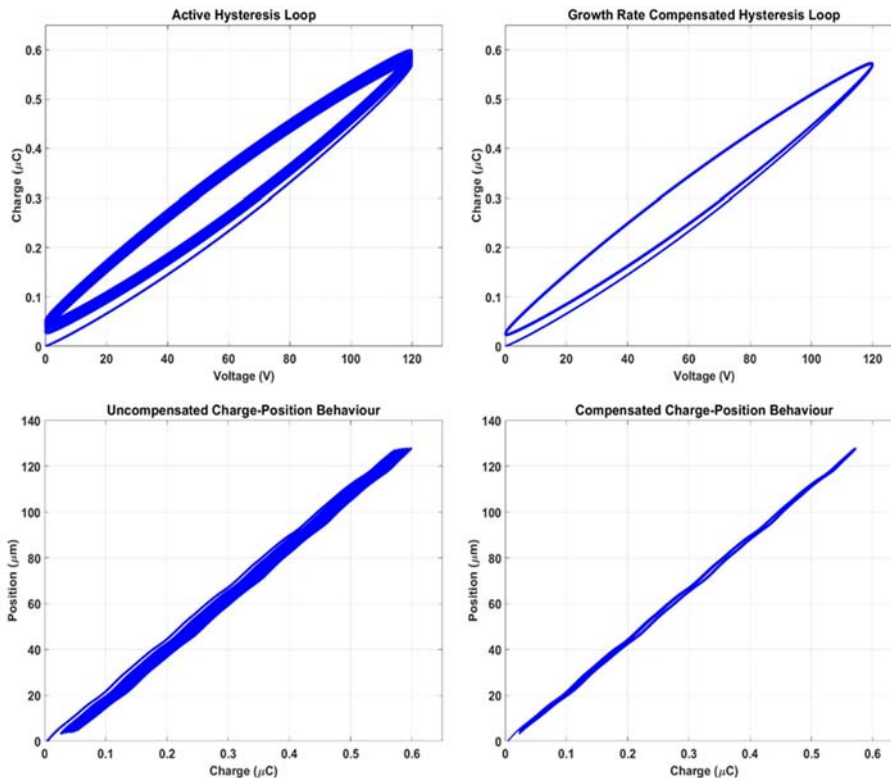
شکل ۴) مدار اندازه‌گیری بار الکتریکی

شناسایی هیستریزیس متغیر با زمان و نرخ رشد

در ابتدا، عملگر توسط یک ورودی ولتاژ سینوسی، با دامنه ۱۲ ولت و فرکانس ۸/۰٪ هرتز تحریک و خروجی بار توسط مدار طراحی شده ثبت شد. با به‌دست‌آوردن رفتار هیستریزیس متغیر با زمان تجربی، روش PI پیشنهادی، جهت شناسایی هیستریزیس مورد استفاده قرار



نمودار ۸) شناسایی رابطه هیستریزیس در حضور نشتی



نمودار ۹) رفتار هیستریزیس و خروجی بار الکتریکی عملگر قبل و بعد از جبران سازی اثر نشتی

معادله خط برازش شده به صورت زیر است:

$$X = 225.5260Q - 1.5758 \quad (۱۲)$$

تخمین موقعیت به کمک خودحسگری

تخمین موقعیت عملگر بایمورف T215-A4-103X و میزان خطای آن که توسط یک ورودی ولتاژ سینوسی، با دامنه ۱۲ ولت و فرکانس ۰/۸ هرتز تحریک شده 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 جبران سازی 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.

$$V(t) = 60 - 20[\cos(0.5t) + \cos(1.5t) + \cos(2.5t)] \quad (۱۳)$$

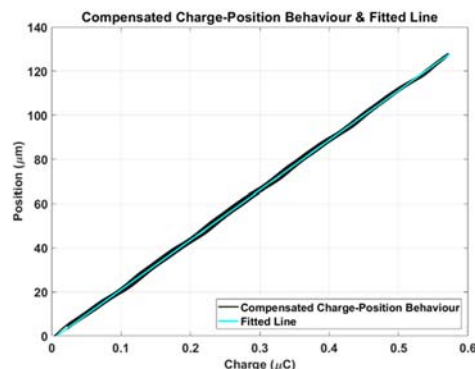
رفتار خروجی حقیقی، تخمین آن و خطای تخمین را به ازای ورودی ولتاژ چندفرکانسی در نمودار ۱۳ نشان داده شده است.

همچنین برای نشان‌دادن میزان بهبود تخمین موقعیت بعد از جبران سازی 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.

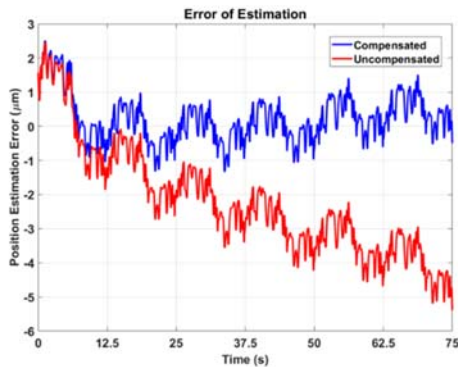
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اثر نشتی با دقت بالایی شناسایی و جبران سازی شده است.

جبران سازی آنلاین نرخ رشد و حصول رابطه خطی بار- جابجایی

روش پیشنهادی می‌تواند رفتار هیستریزیس اصلی و نرخ رشد را تخمین بزند. بنابراین می‌توان از آن برای جبران سازی آنلاین بار نشتی استفاده کرد. با به دست آوردن امپدانس مقاومتی موثر (به وسیله GR)، اثر افزایشی بار می‌تواند به صورت آنلاین جبران شود. بنابراین می‌توان از نمودار بار الکتریکی جبران شده، جهت تخمین موقعیت عملگر استفاده نمود. به همین منظور لازم است تا رابطه جبران شده بار الکتریکی- موقعیت، به وسیله یک خط برازش شود تا بتوان از آن در کاربردهای خودحسگری استفاده نمود. نمودار خط برازش شده روی نمودار بار الکتریکی- موقعیت در نمودار ۱۰ نشان داده می‌شود.



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



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

نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های تخمین موقعیت به روش خودحسگری در عملگرهای پیزوالکتریک استفاده از رابطه خطی جایجایی-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 می‌شود. در این مقاله، به منظور شناسایی و جبران اثر مقاومت، از منحنی هیستریزیس متغیر با زمان بارالکتریک-ولتاژ عملگر استفاده شد. با توجه به مساله نشتی بار، مدل‌های رایج شناسایی هیستریزیس 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 افزایشنده مشاهده‌شده در رفتار بارالکتریک را به‌طور همزمان شناسایی و جبران کند. در نتیجه با خطی‌سازی رابطه بار الکتریک-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 کارایی بالای آن است.

تشکر و قدردانی: موردی یافت نشد.

تاییدیه اخلاقی: موردی یافت نشد.

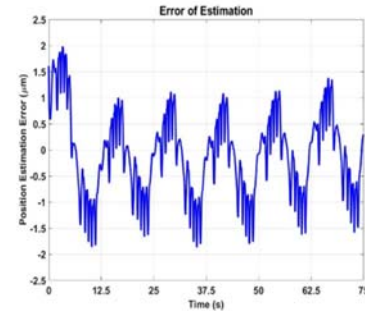
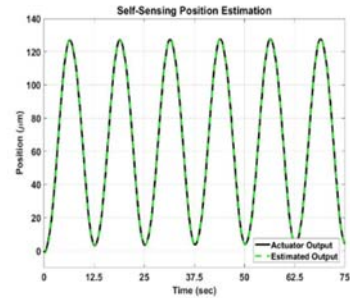
تعارض منافع: موردی یافت نشد.

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

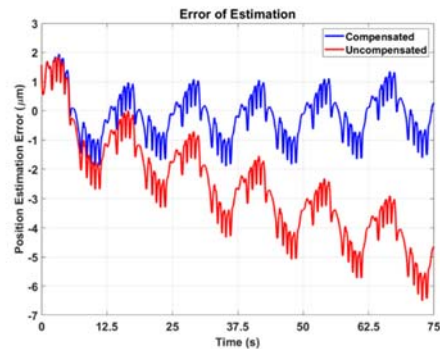
منابع مالی: موردی یافت نشد.

فهرست علائم

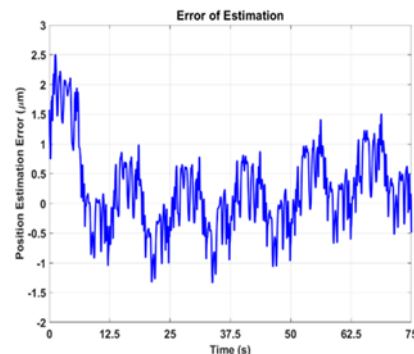
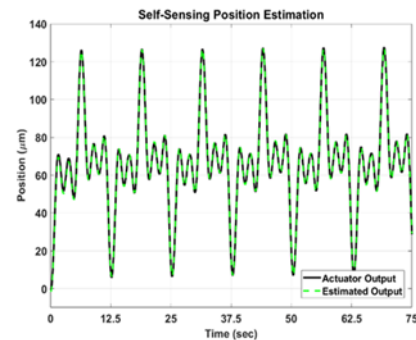
عملگر هیستریزیس	H_r
وزن تابع هیستریزیس	w_h
آستانه تابع بک‌لش	r
تناوب نمونه‌برداری	T_s
تابع اشباع	S_d



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

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 Unknown-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.

آستانه تابع اشباع	d
وزن تابع اشباع	w_s
امپدانس مقاومتی موثر عملگر پیزوالکتریک	G_R
خازن ثانویه	C
ظرفیت خازنی عملگر پیزوالکتریک	C_p
مقاومت داخلی عملگر پیزوالکتریک	R_p
بار الکتریکی عملگر پیزوالکتریک	Q
ولتاژ ورودی	V_a
موقعیت عملگر پیزوالکتریک	X
	بالانویس ها
ترانهاده ماتریس	T

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.*