ICEMG 2023-XXXXX

طراحي ريزالور خطى لولهاي با هدف حذف اثر انتهايي عرضي

فاطمه زارع'، فريد توتونچيان'

^۱ فارغ التحصیل دکتری ، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، f.zare.1373@gmail.com ۲دانشیار ، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۲هران، tootoonchian@iust.ac.ir

چکیدہ

ریزالوها از جمله مهمترین حسگرهای تعیین موقعیت هستند که به منظور تعیین موقعیت در حرکت چرخشی و خطی مورد استفاده قرار می گیرند. در ریزالورهای خطی وجود اثر انتهایی طولی و عرضی منجر به کاهش دقت در اندازه گیری موقعیت میشود. از این رو استفاده از روش های جبران این اثرات ناخواسته به منظور کاهش خطا، از اهمیت زیادی برخوردار است. استفاده از ساختار لولهای در مقایسه با ساختار مسطح، منجر به حذف اثر انتهایی عرضی یا اثر لبه میشود و در نتیجه دقت حسگر بهبود مییابد. لذا در این مقاله ساختار لولهای برای ریزالور با بخش متحرک سیم پیچی شده، معرفی شدهاست. نتایج شبیه سازی اجزای محدود و تست عملی نشاندهنده صحت عملکرد ریزالور پیشنهادی است.

واژه های کلیدی

ریزالور با بخش متحرک سیمپیچی شده، ریزالور خطی، ریزالور لولهای، اثر انتهایی عرضی، اثر لبه

مقدمه

حسگرهای موقعیت بخش جدانشدنی سیستمهای کنترلی هستند. ریزالور ها از جمله مهمترین حسگر های موقعیت هستند که در سالهای اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفتهاند. هرچند ریزالورها در مقایسه با رقیب اصلی شان یعنی انکدرها، هزینه اولیه بیشتری دارند، لیکن در محیطهای صنعتی و دارای نویز عملکرد مناسبی داشته و نسبت به تغییرات دمایی مقاوم هستند [۱]. از این رو در صنایع بسیاری، مورد توجه هستند. ریزالورها بر اساس ساختار رتورشان به دو گروه اصلی رتور سیمپیچی شده و رلوکتانس متغیر تقسیم می شوند. در ساختارهای رتور سیمپیچی شده و رلوکتانس متغیر تقسیم می شوند. هستند و سیمپیچهای تحریک و سیگنال به ترتیب بر روی آنها قرار می گیر ند. در ریزالور های رلوکتانس متغیر، رتور دارای سیمپیچی نیست و شکل رتور منجر به تغییر رلوکتانس می گردد. با توجه به نیست و شنیر سطح مقطع انجام شود [۲].

بر ا ساس نوع حرکت نیز ریزالورها به دو د سته ا صلی ریزالورهای چرخشیی و خطی تقسیم می شوند که به ترتیب به منظور تعیین موقعیت در حرکت چرخشیی و خطی مورد استفاده قرار می گیرد. مسائل مربوط به طراحي ريزالور خطى با بخش متحرك سيم پيچي شده در [۳] ارائه شده است. این ساختار به صورت مسطح و با بخش متحرک کوتاه ساخته شده است. مدلسازی این ریزالور به روش تحلیلی، بهینهسازی ساختار و بررسی عملکرد آن در شرایط وقوع انواع خطاهای مکانیکی در [۴] - [۶] ارائه شده است. پس از آن ریزالورهای خطی رلوکتانس متغیر معرفی شدند. در [۸] ریزالور خطی رلوکتانس متغیر با سطح مقطع معرفی گردید و عملکرد آن با استدفاده از شبیه سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. در [۹] عملکرد این ریزالور با استفاده از روش تابع سیم پیچی مورد برر سی قرار گرفت. با توجه به اینکه زمان لازم برای این روش بسیار کمتر از زمان لازم جهت شبیه سازی اجزای محدود است، از این روش به منظور ارائه راهکاری جهت جبران اثر انتهایی استفاده شدهاست. در [۱۰] ریزالور خطی م سطح رلوكتانس متغير با طول فا صله هوايي معرفي شده و عملكرد آن با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفتهاست. سپس در [۱۱]-[۱۳] مدلسازی ریزالور مسطح خطی ر لوکتانس متغیر با طول فا صله هوایی به روش تابع سیم پیچی یا مدار معادل مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفتهاست. نظیر سایر ماشینهای خطی، در کلیه ریزالورهای خطی معرفی شــده، اثر انتهایی منجر به افزایش خطا و کاهش دقت ریزالور می گردد. از این رو ارائه روشیی به منظور افزایش دقت در ریزالور های خطی از اهمیت زیادی برخوردار است. اثر انتهایی در ماشینهای خطی مسطح شامل اثر انتهایی طولی و عرضی است که منشاء آن عدم تقارن در مدار معادل مغناطیسی است. در این مقاله ساختار لولهای برای ریزالور خطی با بخش متحرک سیم پیچی شده، معرفی شده است. با استفاده از این ساختار اثر انتهایی عرضی در این ریزالور حذف شده و در نتیجه دقت آن افزایش می یابد. نتایج شبیه سازی های انجام شده نشان دهنده صحت عملکرد ریزالور طراحی شده است. ساخت نمونه عملی و نتایج حاصل از آن نیز صحت مطالعات انجام شده را تائيد مي كند.

ریزالور لولهای با بخش متحرک سیم پیچی شده

در ماشینهای خطی لولهای، اسیتاتور و بخش متحرک دارای ساختار استوانه هستند و بسته به ساختار ماشین، سیمپیچ یا آهنربا بر روی آنها قرار میگیرد. ساختار ریزالور لولهای با استاتور بلند بیرونی و بخش متحرک سیم پیچیشده داخلی، در شکل ۱ مشاهده می شود.

همان گونه که در شـکل ۱-الف مشـاهده می گردد؛ اسـتاتور این ریزالور یک استوانه تو خالی است که سطح داخلی آن دارای شیارهای افقی است و سیمپیچهای سیگنال سینوسی و کسینوسی، به صورت دیسکهای افقی، درون این شیارها قرار می گیرند. بخش متحرک نیز که در شـکل ۱-ب، به صـورت کوتاه و در بخش داخلی قرار گرفته، ساختار استوانهای دارد و سطح خارجی آن دارای شیارهای دیسکی برای قرار گیری سـیمپیچی تحریک است. در ریزالور پیشـنهادی، هر بخش استاتور دارای ۶ شیار است که در مقابل ۸ شیار بخش متحرک قرار گرفتهاند. در ساختار با استاتور بلند، این ۶ شیار می توانند چند بار ساختار با بخش متحرک بلند طراحی شد، طول اسـتاتور به همان ۶ شیار محدود می شود و ۸ شیار بخش متحرک تکرار می شوند. لازم به شیار محدود می شود و ۸ شیار بخش متحرک تکرار می شوند. دارم به طراحی شود.

شکل ۲-الف، نحوه سیم پیچی استاتور را نمایش میدهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می گردد، سیم پیچهای کسینو سی در کلیه شیارها وجود دارند و تعداد دور آنها متفاوت است. سیم پیچهای سیگنال سینوسی دارای تعداد دور یکسان هستند و در شیارهای دوم و سوم دارای جهت مثبت و در شیارهای پنجم و ششم دارای جهت منفی است. شکل ۲-ب، نحوه سیم پیچی تحریک را نمایش میدهد. همان گونه که در شکل فوق مشاهده می گردد، سیم پیچ تحریک نیز به صورت دور دندانه با تعداد دور متغیر، طراحی شده است.



شکل ۱- ریزالور لوله ای خطی الف) استاتور بلند ب) بخش متحرک کوتاه



شکل ۲ – سیم پیچی ریزالور لوله ای خطی الف) استاتور ب) بخش متحرک

در این ریزالور هسته استاتور و بخش متحرک نیز از جنس ورق فرومغناطیس ساخته شده است. جدول ۱ ابعاد ریزالور طراحی شده را نمایش میدهد.

در طراحی ریزالور به عنوان حسگر موقعیت، تلاش می شود ابعاد تا حد ممکن کوچک باشد. لیکن لازم است ملاحظات ساخت نیز در نظر گرفته شود. شایان توجه است که حداقل ابعاد فیزیکی حسگر، برخلاف ماشینهای الکتریکی، معمولا بر اساس ملاحظات اشاع بخشهای فرومغناطیسی تعیین نمی شود. زیرا اتمال وقوع اشاع در ریزالورها، بسیار کم است. آنچه ابعاد کمینه را تعیین می کند، معمولا ملاحظات استحکام مکانیکی و ملاحظات مونتاژ و سیم پیچی حسگر است.

نتایج شبیه سازی ریزالور طراحی شده به روش اجزای محدود، در ادامه مورد بررسی قرار گرفتهاست.

تحليل اجزاى محدود

برای شــبیهســازی اجزای محدود، از نرمافزار تجاری Ansys الا الا Electronics Desktop Maxwell Design

جدول ۱ – ابعاد ریزالور طراحی شدہ	
۳۰ میلیمتر	طول استاتور
۲۳ /۱۳ میلیمتر	قطر خارجی/داخلی استاتور
۱۱/ ۵ میلیمتر	قطر خارجی/ داخلی بخش متحرک
۶/ ۸	تعداد شيار بخش متحرك/استاتور
۲ میلیمتر	ارتفاع شیارهای بخش متحرک
۱٫۳ میلیمتر	عرض شیارهای بخش متحرک
۳ میلیمتر	ارتفاع شيار استاتور
۱٫۵ میلیمتر	عرض شيار استاتور

توضیح است که ملاحظات شبیهسازی اجزای محدود ریزالورها، مطابق آنچه در [۱۴] بیان شده، رعایت شده است.

با اعمال ولتاژ تغذیه سینوسی با فرکانس ۴ کیلوهرتز، به سیمپیچ تحریک، ولتاژهای القا شده در سیمپیچهای سیگنال سینوسی و کسینو سی که دارای مدولا سیون دامنه ه ستند؛ محا سبه می شوند. استخراج پوش ای سیگنالها و استفاده از تانژانت معکوس نسبت این ولتاژها به تعیین موقعیت میانجامد. سپس مقایسه موقعیت محا سبه شده با موقعیت مرجع که با توجه به سرعت تنظیم شده، تعیین میشود؛ به محاسبه خطای تعیین موقعیت میانجامد.

در ادامه شبیهسازی اجزای محدود ریزالور مورد بررسی در سه حالت ارائه می شود. در حالت اول هر دو بخش ساکن و متحرک با طول بی نهایت در نظر گرفته می شوند و شبیه سازی اجزای محدود با اعمال شرایط مرزی Master/Slave انجام می شود. سیگنالهای خروجی ریزالور در این حالت در شاکل ۳- الف ارائه شدهاند. در حالت دوم، اساتتور با طول بلند و رتور با طول کوتاه در نظر گرفته می شود و سیگنالهای خروجی مطابق شاکل ۳- ب خواهد بود. در حالت سوم، اساتتور کوتاه و رتور بلند فرض می شود و ولتاژهای خروجی مطابق شکل ۳-ج خواهند بود. مطابق شکل ۳، پوش سیگنالهای ولتاژ القا شده در سیم پیچهای سیگنال استاتور، متناسب با سینوس و کسینوس مدو موقعیت بخش متحرک است. شکل ۴ پوش سیگنال های ولتاژ شکل ۳-ب را که با اساتفاده از تبدیل هیلبرت و به کمک نرمافزار متلب محاسبه شدهاست، نمایش می دهد.



شکل۳: ولتاژهای القا شده در سیمپیچهای سیگنال ریزالور لولهای خطی: (الف) اســتاتور و بخش متحرک با طول بی نهایت، (ب) اســتاتور بلند و بخش



شــکل۴- پوش ســیکنالهای ولتاژ القا شــده در ســیمپیچ ســینوســی و کسینوسی در حالت استاتور بلند و بخش متحرک کوتاه

به منظور بررسی دقیق تر عملکرد ریزالور طراحی شده، خطای تشخیص موقعیت در این ریزالور مطابق شکل۵ محا سبه شدها ست. برای این منظور با استفاده از پوش سیگنالهای محاسبه شده در شکل۴، مطابق رابطه زیر موقعیت تعیین می شود:

$$x = \frac{\tau_p}{\pi} \times \tan^{-1}(\frac{A}{B}) \tag{1}$$

که در این رابطه A و B به ترتیب مقدار پوش سیگنال سینوس و ک سینوس را نمایش میدهد. τ_p نیز گام قطب است. تفا ضل موقعیت واقعی ریزالور که با در نظر گرفتن زمان و سرعت محاسبه می شود و مقدار به دست آمده از رابطه ۱، خطای تعیین موقعیت را مشخص می کند.



شـکل۵- خطای تعیین موقعیت در ریزالور لوله ای خطی: (الف) اسـتاتور و بخش متحرک با طول بی نهایت، (ب) اسـتاتور بلند و بخش متحرک کوتاه و (ج) اسـتاتور کهتاه ه بخش متح ک بلند

همان گونه که در شکل فوق مشاهده می گردد، بیشترین دقت مربوط به ریزالور با طول استاتور و بخش متحرک بی نهایت است که این ریزالور به لحاظ عملی امکان وجود ندارد و در نظر گرفتن طولهای واقعی برای هسته بخش ساکن و متحرک، به دلیل اضافه شدن اثر انتهایی طولی به افزایش خطای موقعیت میانجامد. در حالتی که طول بخش متحرک که حامل سیمپیچی تحریک است بلند میشود به دلیل پیوند شارهای تحریک بخشهایی که در مقابل سیمپیچی سیگنال نیستند، با این سیمپیچیها، خطای تعیین موقعیت بیشتر از حالتی است که استاتور بلند و بخش حامل سیمپیچی تحریک کوتاه باشد.

محاسبه حداکثر خطای موقعیت (MPE) و مقدار متوسط قدر مطلق خطا (AAPE)، برای ریزالور ایدهال ۲۰/۰ و ۲۰/۰ میلیمتر، برای ریزالور با استاتور بلند و بخش متحرک کوتاه به ترتیب ۲۰٫۰ و ۲۰٫۴ میلیمتر و برای ریزالور با استاتور کوتاه و بخش متحرک بلند به ترتیب ۱/۶۳ و ۲/۲۰ میلیمتر هستند. در ادامه ساختار با استاتور بلند و بخش متحرک کوتاه برای ساخت نمونه عملی انتخاب می شود.

ساخت نمونه عملي

به منظور بررسی دقیق تر عملکرد ریزالور طراحی شده، مراحل ساخت آن انجام شده و نتایج عملی نیز مورد بررسی قرار گرفتهاند. شکل ۶-الف، قرقرههای PVC مورد استفاده برای سیم پیچی استاتور را نشان میدهد. ورقهای فرومغناطیس هسته استاتور همراه با قرقرههای PVC مونتاژ می شوند و هسته استاتور را تشکیل میدهند. شکل ۶-ب استاتور مونتاژ شده داخل بدنه آلومینیومی را نشان میدهد. هسته بخش متحرک حین سیم پیچی پیچکهای تحریک نیز در شکل ۶-ج، نشان داده شده است.

به منظور بررسی عملکرد نمونه عملی ساخته شده، سیستم تستی مطابق شکل ۷ طراحی و ساخته شده است. این سیستم شامل یک فانکشن ژنراتور است که ولتاژ مورد نیاز سیم پیچ تحریک را با فرکانس چهار کیلو هرتز فراهم می کند. برای ایجاد حرکت خطی، از یک موتور DC چرخشی و یک سیستم تبدی حرکت چرخشی به خطی، استفاده شده است. از یک انکدر خطی برای تعیین موقعیت مرجع و از یک ا سیلو سکوپ دیجیتالی برای ذخیره ولتاژهای خروجی ا ستفاده شده



شکل ۶: فرایند ساخت نمونه عملی: (الف) قرقره PVC سیمپیچی-های سیگنال، (ب) استاتور مونتاژ شده و (ج) هسته بخش متحرک حین سیمپیچی پیچکهای تحریک



شکل ۷- سیستم تست ریزالور لولهای خطی



شــکل۸- ولتاژهای القا شــده در ســیمپیچهای ســیگنال ســینوســی و کسینوسی

است. ولتاژهای خروجی اندازه گیری شده در شکل ۸ نشان داده شدهاند. محاسبه خطای موقعیت با استفاده از سیگنالهای عملی نشان میدهد دقت حسگر با مقدار پیش بینی شده با روش اجزای محدود کمتر از ۱۰٪ خطا دارد.

نتيجهگيرى

ریزالورهای خطی از جمله حسگرهای تعیین موقعیت هستند که به منظور تعیین موقعیت در حرکت خطی مورد استفاده قرار می گیرند. محدود بودن مدار مغناطیسی هسته در راستای طول و عرض، به اثرات انتهایی طولی و عرضی (اثر لبه) در ریزالورهای خطی می انجامد. استفاده از ساختار لولهای به دلیل تقارن عرضی، اثر انتهایی عرضی را از بین می برد. در این مقاله یک ریزالور لولهای از نوع سیم پیچی شده پیشنهاد شد و اثر بلند یا کوتاه طول هسته استاتور /بخش متحرک در مقایسه با حالتی که هر دو بخش ساکن و متحرک طول بی نهایت دارند؛ مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه با توجه به دقت بیشتر ساختار استاتور بلند و بخش متحرک کوتاه، این ساختار برای آزمایش عملی انتخاب شد و نمونه عملی حسگر به همراه سیستم تست مورد نیاز آن ساخته شد.

- [8] M. Bahari and Z. Nasiri-Gheidari, "Longitudinal End Effect in a Variable Area Linear Resolver and its Compensating Methods," *Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on*, 2018, pp. 1316-1321, doi: 10.1109/ICEE.2018.8472431.
- [9] M. Bahari, R. Alipour-Sarabi, Z. Nasiri-Gheidari and F. Tootoonchian, "Proposal of Winding Function Model for Geometrical Optimization of Linear Sinusoidal Area Resolvers," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 14, pp. 5506-5513, 15 July15, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2908926.
- [10] A. Daniar and Z. Nasiri-Gheidari, "The influence of different configurations on position error of linear variable reluctance resolvers," 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2017, pp. 955-960, doi: 10.1109/IranianCEE.2017.7985177.
- [11] A. Ramezannezhad, P. Naderi and L. Vandevelde, "A Novel Method for Accuracy Improvement of Variable Reluctance Linear Resolvers," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 19, pp. 18409-18417, 1 Oct.1, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3199807.
- [12] P. Naderi, A. Ramezannezhad and L. Vandevelde, "A Novel Linear Resolver Proposal and Its Performance Analysis Under Healthy and Asymmetry Air-Gap Fault," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-9, 2022, Art no. 9504109, doi: 10.1109/TIM.2022.3155747.
- [13] A. Daniar, Z. Nasiri-Gheidari and F. Tootoonchian, "Performance Analysis of Linear Variable Reluctance Resolvers Based on an Improved Winding Function Approach," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 33, no. 3, pp. 1422-1430, Sept. 2018, doi: 10.1109/TEC.2018.2813335.
- [14] H. Saneie, R. Alipour-Sarabi, Z. Nasiri-Gheidari, and F. Tootoonchian, "Challenges of Finite Element Analysis of Resolvers", IEEE Trans. On Energy Conversion, vol. 34, no. 2, pp. 973-983, 2018

تا حد امکان دو ستون موجود در صفحه آخر را تراز کنید. 1

مقایسه نتیجه آزمایش عملی با نتیجه حاصل از شبیهسازی اجزای محدود در حالت گذرا، صحت فرایند طراحی و شبیهسازی را تایید کرد.

مراجع و منابع

- [1] X. Ge, Z. Q. Zhu, R. Ren, J. T. Chen "A Novel variable reluctance resolver for HEV/EV applications", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 52, no. 4, pp. 2872 -2880, July-Aug. 2016
- [2] M. KhajueeZadeh, F. Zare and Z. Nasiri-Gheidari, "Reliability Analysis of Two Resolver Configurations Under Faulty Conditions in 2DOF System," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, doi: 10.1109/TIM.2022.3229711.
- [3] Z. Nasiri-Gheidari, "Design, Analysis, and Prototyping of a New Wound-Rotor Axial Flux Brushless Resolver", IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 32, no. 1, pp. 276 - 283, 2017
- [4] A. Paymozd, H. Saneie, A. Daniar and Z. Nasiri-Gheidari, "Accurate and Fast Subdomain Model for Electromagnetic Design Purpose of Wound-Field Linear Resolver," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-8, 2021, Art no. 9003408, doi: 10.1109/TIM.2021.3080400.
- [5] A. Paymozd, H. Saneie, Z. Nasiri-Gheidari and F. Tootoonchian, "Subdomain Model for Predicting the Performance of Linear Resolver Considering End Effect and Slotting Effect," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 24, pp. 14747-14755, 15 Dec.15, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.3010785.
- [6] A. Daniar, Z. Nasiri-Gheidari and F. Tootoonchian, "Position error calculation of linear resolver under mechanical fault conditions," in *iET Science Measurement*, vol. 11, no. 7, pp. 948-954, 2017, doi.org/10.1049/iet-smt.2017.0063
- [7] A. Keyvannia and Z. Nasiri-Gheidari, "A Comprehensive Winding Method for Linear Variable-Reluctance Resolvers to Compensate for the End Effects," in *IEEE Transactions* on *Industrial Electronics*, 2022, doi: 10.1109/TIE.2022.3210572.

↑