کاهش ریپل گشتاور و سرعت موتورهای پله‌ای با روش ریزپله و کنترل مد لغزشی

عزتعلی فیض [۱]، سیدرضا موسوی‌اقدم [۲]، مجید حسین پور [۲]
[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی برق و مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده - در موتورهای پله‌ای می‌توان موقعیت روتور را با دقت بسیار خوبی تعیین کرد. به همین دلیل به صورت حلقه‌باز استفاده می‌شوند. در این حالت، ریپل گشتاور و سرعت موتور پله‌ای دارای مقدار قابل توجه است. ریپل سرعت و گشتاور در سرعت‌های بالا می‌تواند باعث گم شدن پله گردد. لذا کاهش ریپل از اهمیت به سزایی برخوردار است. در این مقاله، با کنترل مستقیم جریان به کمک روش هیسترزیس و تغییر سیگنال ورودی از پالس مربعی به سینوسی و اجرای ساختار حلقه‌بسته مدلغزشی، ریپل گشتاور و سرعت به حداقل مقدار ممکن کاهش می‌یابد. از طرفی با اجرای ساختار حلقه بسته امکان نظارت دقیق بر موقعیت روتور به منظور ممانعت از گم شدن پله وجود دارد.

کلید واژه- موتور پله‌ای؛ ریپل گشتاور؛ ریزپله؛ کنترل کننده مد لغزشی؛ کنترل حلقه بسته

۱- مقدمه

موتور پله‌ای یکی از پرکاربردترین نوع موتور در صنایع مربوط به ابزار دقیق می‌باشد. دلیل این امر کنترل دقیق زاویه و سرعت به صورت دیجیتالی می‌باشد. و این امر باعث شده به راحتی بتوان این نوع موتور را به صورت حلقه باز و بدون نیاز به فیدبک راه‌اندازی نمود. [۱]

روش کنترل به این صورت است که دو سیگنال (اغلب به صورت پالس مربعی) با اختلاف فاز ۹۰ درجه به دو فاز موتور اعمال می‌گردد. روش‌های متعددی برای راه‌اندازی موتور پله‌ای وجود دارد که ۴ روش برای راه‌اندازی این نوع موتور بیشتر مطرح است. از جمله: راه‌اندازی موجی، تمام پله، نیم‌پله و ریزپله. از میان این روش‌ها، روش ریز پله به علت دشواری در راه‌اندازی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.[۳] [۴] امروزه با گسترش امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری انواع میکروکنترلرها می‌توان به راحتی از این روش استفاده نمود. از مزایای مهم این روش، کاهش ریپل سرعت و گشتاور می‌باشد. این امر باعث می‌شود تا بتوان موتورپله‌ای را در سرعت‌های بالاتر از سرعت نامی راه‌اندازی نمود. لازم به ذکر است که در روش‌های کلاسیک به علت ریپل بالای گشتاور و سرعت، امکان استفاده از موتور پله‌ای در سرعت‌های بالاتر میسر نبود چون امکان گم کردن پله وجود داشت. یعنی قبل از این که موتور یک پله‌ی کامل را طی کند فرمان پله‌ی بعدی صادر می‌شد و باعث حرکت موتور به عقب می‌شد و عملاً حرکتی رخ نمی‌داد. در روش ریز پله به علت کاهش ریپل سرعت و گشتاور امکان راه‌اندازی موتور در سرعت‌های بالاتر از سرعت نامی موتور فراهم است. [۵] [۶]

یکی از روش‌های مرسوم ایجاد پالس‌های چند سطحی شبه‌سینوسی می‌باشد. در این جالت هر پله می‌تواند به پله‌هایی با ضرایب ۲، ۴، ۸ و... تقسیم گردد.[۲] ایجاد این پله‌ها در فرکانس‌های بالاتر (با جریان و ولتاژ بالا) می‌تواند کمی چالش برانگیز باشد.

روش دیگری که در منبع [۷] معرفی شده است استفاده از دو اینورتر H و کلیدزنی SPWM می‌باشد. با این روش می‌توان جریانی سینوسی‌تر بدست آورد. این روش ساده‌ترین (از نظر پیاده‌سازی) و کارآمدترین روش ریزپله در سرعت‌های پایین می‌باشد. اما باید توجه داشت به علت کنترل حلقه باز، ثابت زمانی و پاسخ فرکانسی سیم‌پیچی موتور، امکان استفاده از این روش در سرعت‌های بالاتر میسر نمی‌باشد. در واقع با افزایش فرکانس (و به طبع آن سرعت موتور) دامنه‌ی جریان هر فاز کاهش می‌یابد و در نتیجه در سرعت‌های بالاتر موتور برخی از پله‌ها را گم می‌کند. چون با افزایش فرکانس باید موقعیت شفت به صورت نمایی افزایش می‌یافت که که به علت افت جریان و گم شدن پله‌ها این اتفاق رخ نمی‌دهد. [۸]

۲- معرفی سیستم مورد نظر

به منظور راه‌اندازی سیستم‌های حساس و کنترل دقیق در سیستم‌هایی نظیر CNCهای جواهر سازی، ابزار دقیق و... باید حرکتی صاف و نرم به وسیله‌ی موتور ایجاد شود. بهترین نوع موتور

برای این دسته از کاربردها موتورهای پله‌ای می‌باشد دلیل این امر امکان کنترل دقیق موقعیت شفت موتور است. از طرفی باید به خاطر داشت که موتورهای پله‌ای حرکتی ضربانی دارند برای مقابله با این امر می‌توان با کمک گیربکس میزان این ضربان‌ها را با نسبت‌های معینی کاهش داد. از طرفی استفاده از گیربکس سبب کاهش سرعت موتور نیز می‌گردد. با توجه با سرعت پایین موتورهای پله‌ای استفاده از این روش جذابیت چندانی نخواهد داشت. لذا در سیستم مورد نظر باید موتور به صورت مستقیم و با کمک روش‌های کنترلی مدرن بتواند ضربان‌های سرعتی و گشتاوری خود را کنترل نماید. برای این منظور از سه حلقه فیدبک (دو حلقه کنترل جریان و یک حلقه کنترل سرعت لحظه‌ای) استفاده می‌گردد. که در ادامه با جزئیات بحث می‌گردد.

۳- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی جریان هر فاز مستقیماً کنترل می‌گردد. در نتیجه با افزایش فرکانس دامنه‌ی جریان فازها افت نکرده و امکان کار موتور در فرکانس‌های بالاتر فراهم می‌گردد. و جریان مرجع با کمک مودلاسیون فرکانس FM تولید می‌گردد. تا بتوان علاوه بر موقعیت، مستقیما سرعت موتور را نیز کنترل نمود. [۷] به منظور کنترل دقیق بر ریپل سرعت و گشتاور از روش حلقه بسته‌ی مدلغزشی استفاده شده که در ادامه مفصلاً بحث خواهد شد[۳]

۳-۱- کنترل جریان فازها

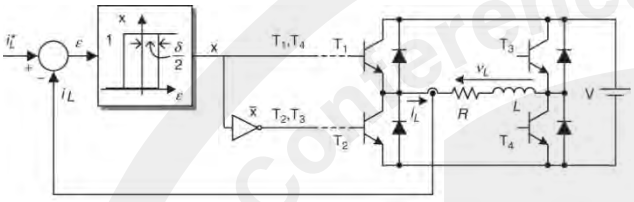
برای کنترل جریان از دو اینورتر نوع H با روش کلیدزنی هسترزیس استفاده شده است.[۶] در این روش سیگنال مرجع (با هر شکل موج دلخواهی) با یک عدد ثابت جمع و تفریق می‌گردد. و در نتیجه دو سیگنال مرجع جدید تولید می‌گردد. جریان خروجی توسط سنسور جریان اندازه‌گیری می‌شود. جریان اندازه‌گیری شده با دو سیگنال مرجع مقایسه می‌گردد. اگر جریان فاز از حد بالای جریان مرجع بزرگ‌تر باشد؛ ولتاژ دو سر فاز معکوس می‌گردد. در نتیجه جریان فاز شروع با کاهش می‌کند. و وقتی جریان فاز از حد پایین جریان فاز کمتر شد؛ ولتاژ دوسر فاز به حالت قبلی باز می‌گردد و جریان شروع با افزایش می‌کند. در نتیجه جریان فاز مطابق سیگنال مرجع (و البته همراه با ریپل‌هایی) کنترل می‌گردد. با کاهش فاصله‌ی حد بالا و پایین جریان فاز بیشتر شبیه سیگنال مرجع می‌گردد. (شکل ۱)

۳-۲- کنترل سرعت

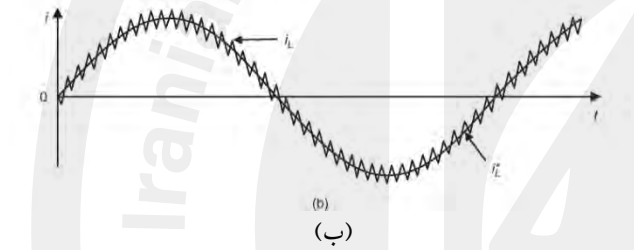
برای راه‌اندازی موتور پله‌ای باید دو سیگنال مرجع با اختلاف فاز ۹۰ درجه به موتور اعمال کرد. با هر سیکل کامل موتور به اندازه‌ی یک پله تغییر موقعیت می‌دهد. در واقع سیگنال مرجع سینوسی باید به صورت زیر باشد.

$$x_c(t) = I_{ref}\cos(2\pi V_s t) \qquad (۱)$$

که Iref جریان مرجع، و Vs سرعت مرجع برای هر پله می‌باشد.



(الف)



(ب)

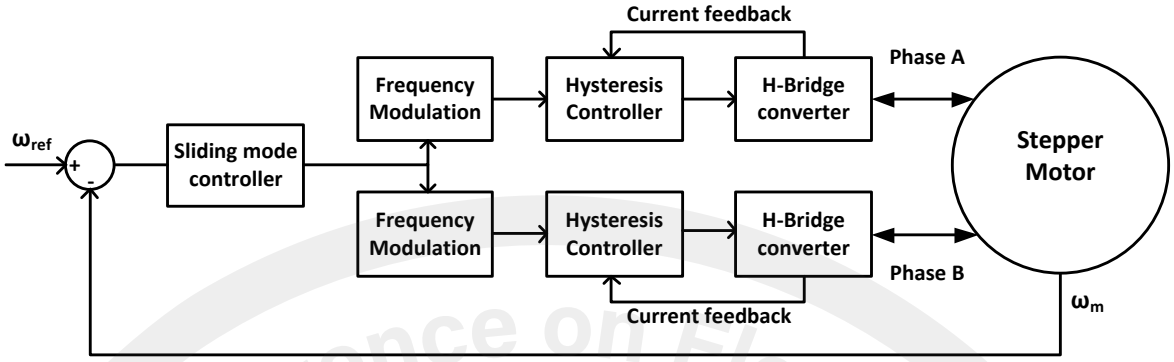
شکل ۱: بالا-اینورتر نوع H، پائین-شکل موج خروجی جریان

همانطور که ملاحظه می‌گردد این رابطه دقیقاً با رابطه مربوط به مودلاسیون فرکانس برابر می‌باشد. و از تئوری مودلاسیون فرکانس داریم [۹]:

$$\begin{aligned} y(t) &= I_{ref}\cos\left(2\pi\int_0^t f(\tau)d\tau\right) \\ &= I_{ref}\cos\left(2\pi\int_0^t\left[Vs_V_\Delta V_{ref}(\tau)\right]d\tau\right) \\ &= I_{ref}\cos\left(2\pi V_s t + 2\pi V_\Delta\int_0^t V_{ref}(\tau)d\tau\right) \end{aligned} \qquad (۲)$$

که در این رابطه VΔ ضریب مودلاسیون (سرعت) می‌باشد. در واقع این ثابت بیانگر میزان تغییرات فرکانس نسبت به سیگنال مرجع سرعت می‌باشد. در کنترل سرعت پله این ضریب ۱ انتخاب می‌گردد و در صورت کنترل سرعت موتور، این ضریب برابر تعداد کل پله‌های موتور می‌باشد.

با توجه به این‌که برای کنترل سرعت چرخش موتور باید فرکانس سیگنال مرجع تغییر یابد. لذا در این روش از دو مودلاتور فرکانس، با اختلاف فاز ۹۰ درجه استفاده شده است. (شکل ۲)



شکل ۲: بلوک دیاگرام سیستم کنترل موتور پله‌ای

۳-۳- ساختار حلقه بسته

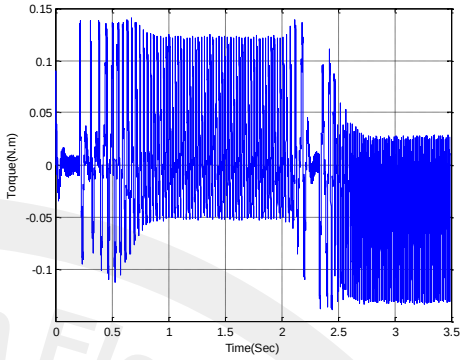
به منظور کاهش ریپل سرعت و گشتاور از ساختار حلقه بسته استفاده گردید. روش کنترل مد لغزشی مرتبه‌ی اول روش پیشنهادی مورد نظر می‌باشد. برای این منظور از سرعت خروجی موتور نمونه‌برداری می‌شود. (در عمل می‌توان با قرار دادن انکودر نوری بر سرعت و موقعیت دقیق موتور نظارت داشت.) سیگنال خطا (اختلاف سرعت مرجع و سرعت خروجی) به کنترل‌کننده مدلغزشی اعمال می‌گردد. [۱۰]

۴- شبیه‌سازی

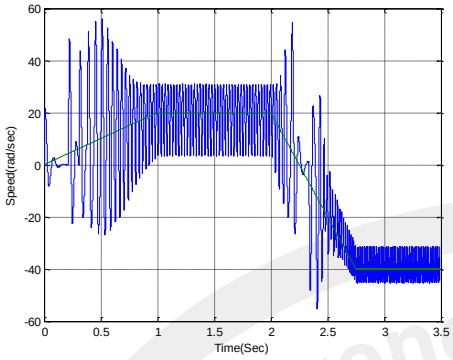
در شکل ۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی با کمک نرم‌افزار متلب/سیمولینک مشاهده می‌شود. در حالت (الف) و (ب) ریپل سرعت و گشتاور حلقه باز با ورودی پالس مربعی مشاهده می‌شود. با این که در حالت حلقه باز امکان کنترل دقیق مختصات و سرعت موتور پله‌ای وجود دارد؛ ولی وجود ریپل زیاد می‌تواند باعث گم شدن پله (از دست دادن یک پله) در تغییرات سرعت ناگهانی و بارهایی با اینرسی زیاد گردد. در بخش (پ) و (ت) سرعت و گشتاور حالت حلقه‌باز با ورودی سینوسی (ریزپله) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود این روش ریپل سرعت و گشتاور بهتری نسبت به ورودی پالس مربعی دارد. در بخش (ث) و (ج) نمودار گشتاور و سرعت حلقه بسته با ورودی پالس مربعی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود؛ ریپل سرعت کاهش چشم‌گیری یافته ولی ریپل گشتاور تغییر چندانی ندارد که این امر مربوط به ماهیت سیگنال ورودی می‌باشد (ضربه‌های ایجاد شده با پالس مربعی) در بخش (چ) و (ح) نمودار گشتاور و سرعت حلقه‌بسته با ورودی سینوسی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد؛ ریپل گشتاور به کمترین مقدار خود رسیده و ریپل سرعت تقریبا حذف شده است در این حال امکان گم شدن پله به حداقل خود می‌رسد.

۵- نتیجه‌گیری

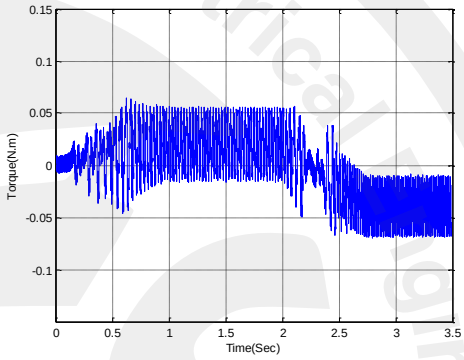
مختصات روتور موتور پله‌ای به راحتی قابل کنترل است در نتیجه در کاربردهای ساده به صورت حلقه‌باز کنترل می‌شوند. در کاربردهای حساس از ساختار حلقه بسته استفاده می‌شود تا بتوان گم شدن پله (عدم حرکت به اندازه‌ی یک پله) در تغییرات سریع سرعت یا در بارهایی با اینرسی بالا را تشخیص داد. هر اندازه که ریپل گشتاور و سرعت کم باشد امکان گم شدن پله کاهش می‌یابد. در این مقاله با تغییر سیگنال ورودی از پالس مربعی به سینوسی علاوه بر کاهش ریپل امکان کنترل مختصات در زوایایی متفاوت از زاویه پله به وجود آمد از طرفی با اجرای ساختار حلقه بسته با روش کنترل مد لغزشی ریپل گشتاور را به حداقل ممکنه کاهش یافت و ریپل سرعت تقریباً حذف گردید و امکان راه اندازی موتور در سرعت‌هایی بالاتر از سرعت نامی فراهم آمد.



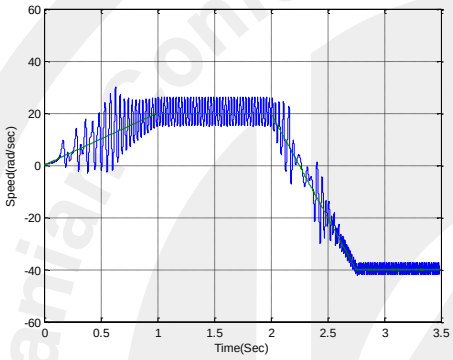
(الف) گشتاور حلقه‌باز با ورودی پالس مربعی



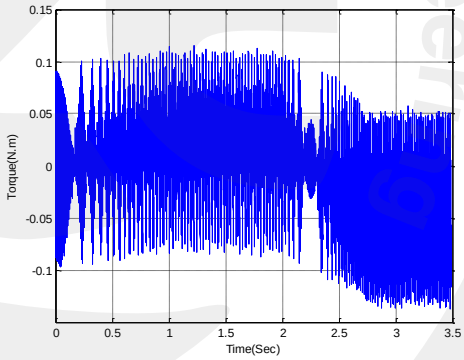
(ب) سرعت حلقه باز با ورودی پالس مربعی



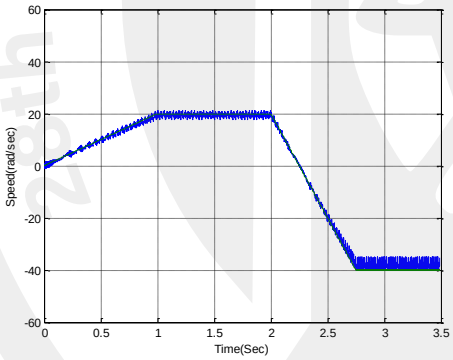
(ج) گشتاور حلقه‌باز با ورودی سینوسی



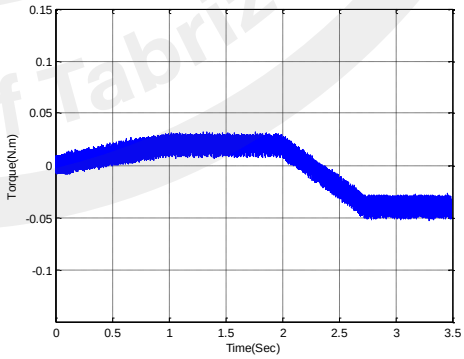
(د) سرعت حلقه‌باز با ورودی سینوسی



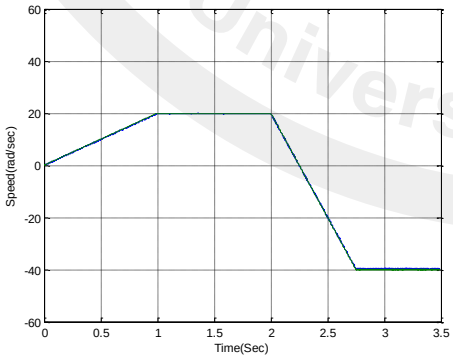
(ه) گشتاور حلقه بسته با ورودی پالس مربعی



(و) سرعت حلقه بسته با ورودی پالس مربعی



(ز) گشتاور حلقه بسته با ورودی سینوسی



(ک) سرعت حلقه بسته با ورودی سینوسی

شکل ۳: نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم کنترلی به ازای ورودی‌های و روش‌های کنترلی مختلف

مراجع

[1] M. Bodson , J.S. Sato and S.R. Silver, “Spontaneous speed reversals in stepper motors”, IEEE Transactions on Control Systems Technology (Volume: 14 , Issue: 2 , March 2006)

[2] Alberto Bellini, Carlo Concari, Giovanni Franceschini, Andrea Toscani, “Mixed-Mode PWM for High-Performance Stepping Motors”, IEEE Transactions on Industrial Electronics (Volume: 54 , Issue: 6 , Dec. 2007)

[3] Stijn Derammelaere, Bram Vervisch, Jasper De Viaene, Kurt Stockman, “Sensorless load angle control for two-phase hybrid stepper motors”, Mechatronics, Volume 43, May 2017, Pages 6-17

[4] Sergey EdwardLyshevski, “Microstepping and high-performance control of permanent-magnet stepper motors” Energy Conversion and Management, Volume 85, September 2014, Pages 245-253

[5] Riccardo Antonello, Angelo Cenedese, Roberto Oboe, “Torque Ripple Minimization in Hybrid Stepper Motors Using Acceleration Measurements”, IFAC Proceedings Volumes, Volume 44, Issue 1, January 2011, Pages 10349-10354

[6] Dhruti Ranjan Gaan, Manoj Kumar and S. Sudhakar, “Real Time Precise Position Tracking with Stepper Motor using Frequency Modulation based Microstepping”, IEEE Transactions on Industry Applications (Volume: 54 , Issue: 1 , Jan.-Feb. 2018)

[7] Tao Zhao, Wei-jian Shen, Ning-yi Ji and Hanz-hong Liu, ” Study and implementation of SPWM microstepping controller for stepper motor”, 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)

[8] Robins Mathew, Somashekhar S. Hiremath, “Control of Velocity-Constrained Stepper Motor-Driven Hilare Robot for Waypoint Navigation”, Engineering, Volume 4, Issue 4, August 2018, Pages 491-499

[9] A. Bruce Carlson, "Communication Systems", McGraw-Hill Education; 5th edition (February 25, 2009)

[10] Fridman L.- in W. Perruquetti, J. P. Barbot, eds. "Sliding Mode Control in Engineering", Marcel Dekker, Inc., 2002