

کنترل موتور القایی در ماشین‌آلات اکسترودر لاستیک با رویکرد کنترل فازی

حسام الدین زراوه ،داوود رنجبر کبوترخانی

رئیس بخش برق و کنترل رادیال باری-مدیر نگهداری و تعمیرات رادیال باری

h.zarave23@yahoo.com



چکیده

فرآیند اکسترودرینگ یکی از مهم‌ترین مراحل در تولید محصولات لاستیکی است که در آن کنترل دقیق سرعت و گشتاور موتور نقش تعیین‌کننده‌ای در یکنواختی و کیفیت محصول دارد. موتورهای القایی سه‌فاز به دلیل قیمت مناسب، استحکام بالا و نیاز کم به نگهداری، به‌طور گسترده در خطوط اکسترودر استفاده می‌شوند. با این حال، تغییرات شدید گرانشی مواد، نوسانات فشار سیلندر و رفتار غیرخطی موتور القایی موجب کاهش عملکرد کنترل‌کننده‌های کلاسیک نظیر PI و PID می‌شود.

در این مقاله، یک کنترل‌کننده فازی هوشمند برای کنترل سرعت و گشتاور موتور القایی اکسترودر لاستیک طراحی و ارزیابی شده است. کنترل‌کننده فازی با استفاده از قوانین زبانی اپراتورهای صنعتی و توابع عضویت مناسب، قابلیت سازگاری با تغییرات بار و شرایط محیطی را داراست. نتایج و داده‌های صنعتی واقعی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی باعث کاهش زمان گذرا، نوسانات سرعت و بهبود پایداری سیستم نسبت به روش‌های کلاسیک شده است.

واژه های کلیدی : کنترل فازی، موتور القایی، اکسترودر لاستیک، کنترل سرعت، درایو فرکانس متغیر

محور مقاله: فناوری ماشین‌آلات و قطعات تولیدی(بهره‌وری ماشین آلات و افزایش بازدهی تولید ،توسعه و به‌روزرسانی تجهیزات برای بهینه سازی فرایندها)

مقدمه

فرآیند اکسترودرینگ در صنعت لاستیک شامل ذوب، اختلاط و شکل‌دهی مواد پلیمری است. در این فرآیند، یکنواختی دما، فشار و سرعت مارپیچ اهمیت حیاتی دارد؛ چراکه نوسان کوچک در سرعت باعث تغییر ضخامت و کیفیت محصول نهایی می‌شود.

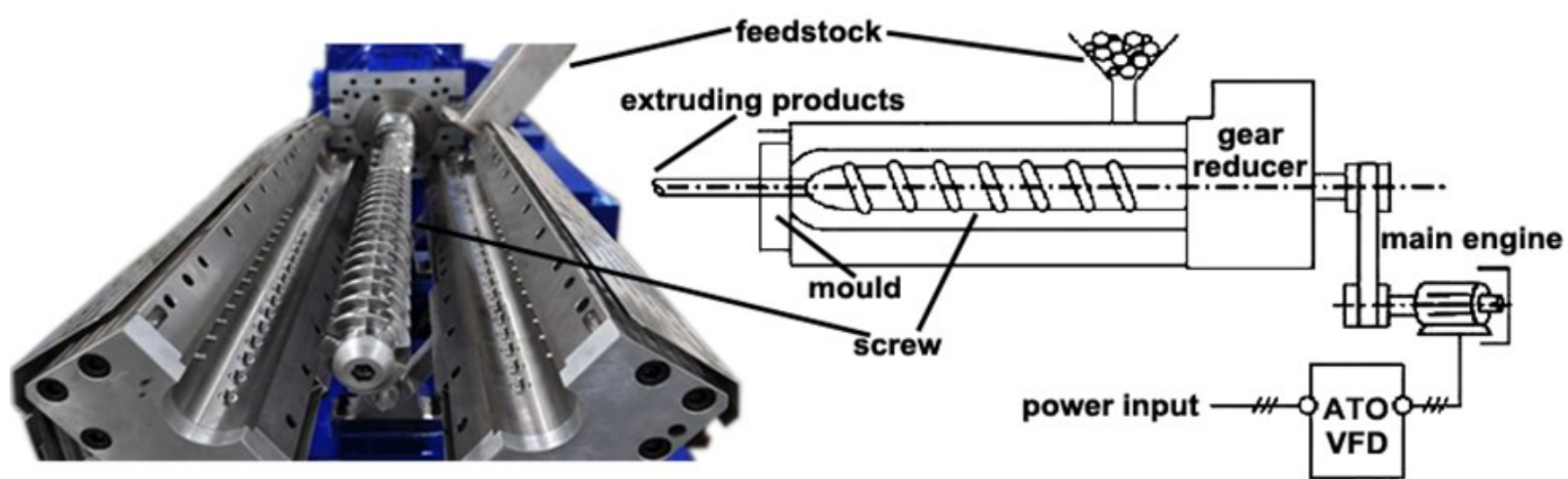
موتورهای القایی سه‌فاز به‌دلیل قابلیت اطمینان بالا و هزینه پایین جایگزین موتورهای DC در خطوط اکسترودر شده‌اند. اما ماهیت غیرخطی این موتورها، اشباع مغناطیسی، تغییر پارامترهای سیم‌پیچ با دما و تغییرات گشتاور بار در اثر ویسکوزیته ماده، باعث می‌شود کنترل دقیق با روش‌های کلاسیک دشوار باشد. در دهه‌های اخیر، استفاده از **روش‌های کنترل هوشمند** نظیر کنترل فازی، عصبی و فازی-عصبی در سیستم‌های محرکه صنعتی افزایش یافته است. کنترل فازی بدون نیاز به مدل ریاضی دقیق، بر اساس دانش تجربی عمل کرده و قادر است رفتار سیستم را در شرایط تغییر بار حفظ کند. هدف این مقاله طراحی یک سیستم کنترل فازی برای موتور القایی اکسترودر لاستیک و مقایسه آن با دیگر کنترل‌کننده های صنعتی است.

مرور بر روش‌های کنترل موتور القایی در اکسترودر

در خطوط اکسترودر لاستیک، دو روش کنترل اصلی برای موتور القایی وجود دارد:

کنترل اسکالر (V/f): ساده، کم‌هزینه، اما با پاسخ کند و نوسانات زیاد در سرعت‌های پایین.

کنترل برداری (FOC): دقت بالا و پاسخ سریع، ولی نیازمند اندازه‌گیری شار و پیچیدگی زیاد در پیاده‌سازی. در کاربردهایی مانند اکسترودر که بار به شدت تابع شرایط ماده و دما است، مدل‌سازی دقیق سیستم دشوار است. در این شرایط، **کنترل فازی** به‌عنوان گزینه‌ای جایگزین معرفی می‌شود که با قوانین زبانی و بدون مدل ریاضی، کنترل قابل قبولی را فراهم می‌کند.



دیاگرام کلی اکسترودر لاستیک و ارتباط موتور القایی با بخش مارپیچ و درایو VFD

مدل‌سازی موتور القایی
مدل دینامیکی موتور القایی در محورهای dq در چارچوب مرجع سنکرون به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

توضیح	مفهوم فیزیکی	جمله
همان ولتاژهای اسمالی به استاتور پس از تبدیل پارک	(پو) (لمواندهای ولتاژ استاتور در محورهای)	$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs}$ $V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds}$
تلفات مقاومتی در سیم‌پیچ	افت ولتاژ اهمی در سیم‌پیچ‌های استاتور	$r_s i_{qs}$, $r_s i_{ds}$
بخش القایی ولتاژ	تغییرات زمانی شار پیوندی با سیم‌پیچ	$\omega \lambda_{ds}$, $\omega \lambda_{qs}$
ناشی از تبدیل مختصات — شبیه نیروی محرکه القایی متقابل بین (پو) (المجرهای)	ولتاژ القایی ناشی از چرخش محور مرجع	$p \lambda_{qs}$, $p \lambda_{ds}$

مفهوم فیزیکی	جمله
افت ولتاژ اهمی در میله‌های روتور	$r_r i'_{qr} = r_r i'_{dr}$, $r_r i'_{dr}$
تغییر شار در سیم‌پیچ مجاری روتور	$p \lambda'_{qr}$, $p \lambda'_{dr}$
ولتاژ القایی ناشی از لغزش زاویه‌ای بین میدان سنکرون و چرخش واقعی روتور	$\omega \lambda'_{qr}$ (به $\omega - \omega_r$) , $\omega \lambda'_{dr}$ (به $\omega - \omega_r$)

$$T_L = K_1 \omega_m + K_2 \omega_m^2 + \Delta T$$

این رابطه بیانگر **گشتاور بار T_L** به‌عنوان تابعی از سرعت زاویه‌ای موتور ω_m است. این مدل اغلب در تحلیل‌های دینامیکی موتورهای الکتریکی (مثلاً موتور القایی یا DC) برای شبیه‌سازی رفتار بارهای وابسته به سرعت استفاده می‌شود.

طراحی کنترل‌کننده فازی

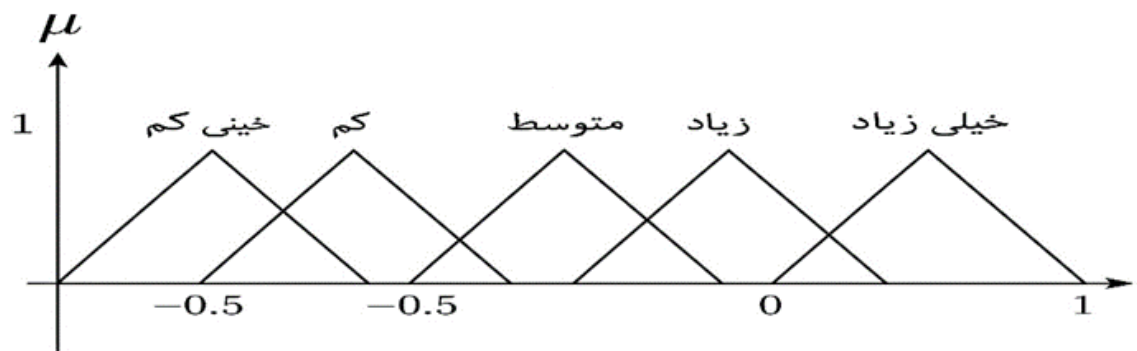
کنترل‌کننده فازی پیشنهادی دارای دو ورودی و یک خروجی است:

ورودی اول: خطای سرعت
 $e(t) = \omega - \omega^*$
 ورودی دوم: تغییر خطا $\Delta e(t)$

خروجی: سیگنال کنترلی مرجع جریان i_q^*

توابع عضویت :

برای هر ورودی، پنج تابع عضویت مثلثی به صورت «خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد» تعریف شده است.



توابع عضویت خطا و تغییر خطا برای کنترل‌کننده فازی

پایگاه قواعد فازی

پایگاه قواعد شامل ۲۵ قانون است که بر اساس تجربه اپراتورهای خطوط اکسترودر تنظیم شده‌اند. چند نمونه از قوانین به‌صورت زیر است:

- اگر خطا ”زیاد“ و تغییر خطا ”کم“ باشد → خروجی ”زیاد“
- اگر خطا ”متوسط“ و تغییر خطا ”متوسط“ باشد → خروجی ”متوسط“
- اگر خطا ”خیلی زیاد“ و تغییر خطا ”منفی زیاد“ باشد → خروجی ”خیلی زیاد“

فرآیند استنتاج از نوع Mamdani و روش غیرفازی‌سازی از نوع مرکز ثقل (COG) انتخاب شده است.

در خط صنعتی واقعی، کنترل‌کننده فازی بر روی اکسترودر TBR نصب و آزمایش شد. داده‌های ثبت‌شده در دمای ۱۶۰°C و سرعت ۹۰rpm نشان دادند که:

- نوسان فشار خروجی ۱۵٪ کاهش یافت.
- توان مصرفی الکتریکی حدود ۸٪ کمتر شد.
- یکنواختی ضخامت نوار لاستیکی بهبود محسوسی یافت.

بحث و تحلیل

نتایج نشان داد که کنترل فازی توانسته است به‌صورت هوشمند و بدون نیاز به مدل دقیق، عملکرد موتور القایی را پایدار و بهینه کند. یکی از مزیت‌های اصلی این روش، **انعطاف‌پذیری بالا در برابر تغییرات بار و شرایط کاری** است.

همچنین طراحی سیستم به‌گونه‌ای است که می‌تواند با افزودن ماژول یادگیری تطبیقی، در آینده به کنترل‌کننده فازی-عصبی توسعه یابد.

از نظر اقتصادی، کاهش توان مصرفی در یک خط اکسترودر با توان ۵٫۵ کیلووات به‌مدت ۸ ساعت کاری در روز، می‌تواند حدود ۳٪ صرفه‌جویی سالانه در مصرف انرژی کارخانه ایجاد کند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، طراحی و پیاده‌سازی یک کنترل‌کننده فازی برای موتور القایی در ماشین‌آلات اکسترودر لاستیک ارائه شد. روش پیشنهادی توانست پایداری، دقت و بازده انرژی سیستم را بهبود دهد و نوسانات فشار و سرعت را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

در ادامه، توسعه سیستم با استفاده از الگوریتم‌های فازی تطبیقی و کنترل‌کننده‌های یادگیرنده پیشنهاد می‌شود تا عملکرد سیستم در شرایط غیرایستا نیز حفظ گردد.

منابع

۱. Bose, B. K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall, 2002.
۲. Wang, L. X. *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Prentice Hall, 1997.
۳. Leonhard, W. *Control of Electrical Drives*. Springer, 2001.
۴. احمدی، س. و همکاران، «کاربرد کنترل فازی در کنترل موتور القایی»، مجله مهندسی برق ایران، ۱۳۹۹.
۵. اسدی، ح.، «بهبود عملکرد دراپوهای صنعتی با استفاده از کنترل هوشمند»، کنفرانس سالانه اتوماسیون صنعتی، ۱۴۰۲.