

شبیه‌سازی و طراحی بهینه کنترل‌کننده سرعت و کشش در خطوط نورد سرد

محمدحسین کریم^۱، علیرضا والی، امید دلاوری

شرکت فولاد امیرکبیر کاشان

چکیده

در این مقاله، کنترل ترکیبی سرعت و کشش در خطوط نورد سرد بررسی و شبیه‌سازی می‌شود. این روش ابتکاری، کشش ورق و سرعت خط را به طور مستقل در دو فضای حالت کنترل می‌کند: ۱- حالت دیفرانسیل ۲- حالت مشترک. در سیستم پیشنهادی، در صورت تغییر سرعت توسط اپراتور، کشش خط در مقدار ثابت از پیش تنظیم شده حفظ می‌گردد. در نتیجه، کیفیت محصول و ثبات فرآیند نورد سرد بهبود می‌یابد. این مدل شبیه‌سازی دینامیکی به منظور ایجاد یک محیط واقعی برای طراحی، تجزیه تحلیل و بهینه‌سازی کیفی خطوط نورد سرد ارائه می‌گردد. در مقاله پیش رو از مدل‌های جامع مبتنی بر روابط فیزیکی پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار MATLAB، به منظور مدل‌سازی سرعت خط، کشش و سایر پارامترهای کنترلی خط تک قفسه‌ای رفت و برگشتی شرکت فولاد امیرکبیر کاشان استفاده شده است.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی نورد سرد، کنترل ترکیبی، سرعت خط، کشش ورق، مدل فیزیکی، نورد رفت و برگشتی

¹ Mohammadhsk1991@gmail.com

مقدمه

صنعت فولاد یک نقش کلیدی در اقتصاد ملی را داراست و سطح تولید آن تا حد زیادی نشان دهنده سطح توسعه صنعتی یک کشور است. ورق های فولادی که به عنوان محصولی با تقاضای بالا شناخته می شود نیازمند دقت بالای ابعادی و کیفی است. این محصول در ساخت ماشین آلات، خودرو، صنایع سبک، صنایع نظامی، بسته بندی مواد غذایی و ... کاربردهای متنوع و فراوانی دارد. لذا چگونگی بهبود کیفیت در تولید این محصول همواره در موسسات تحقیقاتی و علمی یک مساله اساسی بوده است. نورد سرد یک فرآیند صنعتی است که طی آن خصوصیات ماده که معمولاً بصورت ورق های فلزی می باشد تحت تاثیر قرار می گیرد. در این فرآیند با اعمال کشش^۱ از یک طرف و اعمال فشار عمودی توسط غلتک های نورد سرد به فلز نیروهای مختلفی وارد می گردد که نتیجه آن خرد شدن ریزساختار و تغییر شکل خواهد بود. بسته به میزان این نیروها رفتار ماده نیز تغییر خواهد نمود. امروزه شبیه سازی به عنوان مهمترین بخش های طراحی و راه اندازی مجموعه های پیچیده شناخته می شود. لذا از این طریق خطاهای مفهومی در مراحل طراحی اولیه شناسایی و عملکرد سیستم چک می گردد. بنابراین هرگونه خطای ناشی از طراحی ناصحیح در این مرحله حذف و مجموعه به صورت کامل و دقیق تحلیل می شود. دقت در ضخامت و صافی سطح ورق برای مصرف کنندگان ورق های فولادی از اهمیت بالایی برخوردار است لذا تحقیقات زیادی در راستای کنترل اتوماتیک ضخامت^۲ و کنترل اتوماتیک صافی سطح^۳ در سال های گذشته ارائه شده است [۱]، [۲]. برای دستیابی به این دو پارامتر با کیفیت و دقت بالا، ضروری است کشش خط بطور دقیق کنترل گردد. در خطوط نورد سرد، اغلب تغییرات سرعت توسط اپراتور تولیدی منجر به نوسانات شدید کشش ورق خواهد شد [۳]. لذا برای جلوگیری از این نوسانات یک کنترل ترکیبی^۴ به منظور جداسازی ارتباط سرعت و کشش طراحی و شبیه سازی شده است. روش پیشنهادی سرعت و کشش خط را بصورت مستقل در دو فضای حالت دیفرانسیل و مشترک کنترل می نماید بطوریکه در حالت دیفرانسیل، کشش و در حالت مشترک، سرعت بعنوان مرجع در نظر گرفته شده است. این مقاله خط نورد تک قفسه ای رفت و برگشتی چهار غلتکه شرکت فولاد امیرکبیر کاشان را مورد بررسی و پژوهش قرار داده است و کلیه نتایج برای سایر خطوط پیچیده تر قابل تعمیم می باشد.

¹ Tension

² Automatic Gauge Control

³ Automatic Flatness Control

⁴ Hybrid Control

روش تحقیق

۱- ساختار مکانیکی

خط نورد سرد تک قفسه ای مطابق شکل-۱ از سه بخش اصلی Stand، TR^1 و POR^2 تشکیل شده است. قسمت Stand ورق را به حرکت در آورده و فشار لازم به منظور ریداکشن اعمال می گردد. باتوجه به شکل-۲ قسمت POR تحت عنوان کلاف باز کن و قسمت TR بعنوان کلاف جمع کن شناخته می شود. کلیه پارامترها در جدول-۱ لیست شده اند.

۲- مدل سازی و معادلات کشش

کشش ورق در جهت های Forward و Backward از اختلاف سرعت بین Roll و Reel به ترتیب مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه می گردد [۴].

$$T_{out}^{res} = \int \frac{E}{L} (v_{tr}^{res} - (1+f)v_{mill}^{res}) dt = \int \frac{E}{L} (R_{tr}w_{tr}^{res} - (1+f)R_{mill}w_{mill}^{res}) dt \quad (1)$$

$$T_{in}^{res} = \int \frac{E}{L} (v_{mill}^{res}(1-b) - v_{por}^{res}) dt = \int \frac{E}{L} (R_{mill}w_{mill}^{res}(1-b) - R_{por}w_{por}^{res}) dt \quad (2)$$

۳- کنترل ترکیبی سرعت و کشش

در این بخش مطابق شکل-۳ کاربرد کنترل ترکیبی سرعت و کشش در خط نورد سرد ارائه شده است. روش پیشنهادی مجموع و اختلاف سرعت خطی Mill و Tension Reel را بصورت مستقل کنترل می کند. سرعت خط در جهت Forward مطابق رابطه (۳) محاسبه می گردد.

$$v_{tr}^{res} = \frac{v_{tr}^{res} + v_{mill}^{res}}{2} \quad (3)$$

کنترل ترکیبی جدا شده^۳ کشش و سرعت، بصورت عمود بر دو فضای مجازی بدست آمده است. الف) حالت مشترک و ب) حالت دیفرانسیلی. این دو فضای مدال، فضاهای برداری مستقل را بصورت عمود برهم متصل می کنند لذا می توان هر مقدار را بطور جداگانه کنترل کرد [۵]. با محاسبه مقدار مرجع شتاب زاویه ای و ضرب کردن اینرسی ماشین در آن، مقدار مرجع گشتاور طبق رابطه (۴) محاسبه و همچنین با استفاده از این رابطه، بلوک دیاگرام آن مطابق شکل های (۴) و (۵) استخراج می گردد.

¹ Tension Reel

² Payoff Reel

³ Decoupled Hybrid Control

$$\begin{bmatrix} T_{tr}^{ref} \\ T_{mill}^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{J_{tr}}{R_{tr}} \{C_v(v_{out}^{cmd} - v_{out}^{res}) + C_T(T_{out}^{cmd} - T_{out}^{res})\} \\ \frac{J_{mill}}{R_{mill}} \{C_v(v_{out}^{cmd} - v_{out}^{res}) - C_T(T_{out}^{cmd} - T_{out}^{res})\} \end{bmatrix} \quad (4)$$

شتاب خطی در حالت مشترک طبق رابطه (۵) بدست می‌آید. از روابط (۳) و (۵) بلوک دیاگرام کنترل سرعت در این حالت مطابق شکل ۶- نشان داده شده است.

$$\frac{d}{dt}(v_{tr} + v_{mill})^{ref} = 2C_v(v_{out}^{cmd} - v_{out}^{res}) \quad (5)$$

از طرف دیگر، شتاب خطی در حالت دیفرانسیل به شرح رابطه (۶) می‌باشد.

$$\frac{d}{dt}(v_{tr} - v_{mill})^{ref} = 2C_T(T_{out}^{cmd} - T_{out}^{res}) \quad (6)$$

علاوه بر این، کشش ورق در جهت Forward ایجاد شده از اختلاف سرعت بین Roll mill و Tension reel مطابق رابطه (۷) بدست می‌آید که در آن مقدار K_f طبق رابطه (۸) تعریف شده است.

$$T_{out}^{res} = \frac{E}{L} \int \{2C_T(T_{out}^{cmd} - T_{out}^{res})dt - K_f T_{out}^{res}\} dt \quad (7)$$

$$K_f = (1 + f)v_{mill} \frac{\partial f}{\partial T_{out}^{res}} \quad (8)$$

بلوک دیاگرام رابطه (۷) در شکل ۷- نشان می‌دهد که کشش ورق در جهت Forward با مقدار مرجع در حالت دیفرانسیل کنترل می‌گردد. افزایش T_{out}^{res} مقدار f را افزایش داده و باعث افزایش کشش در جهت Forward می‌گردد. این توضیحات نشان دهنده این است که کنترل سرعت و کشش در دو فضای متقاطع قائم^۱ بطور مستقل کار می‌کند.

شبیه‌سازی، نتایج و بحث

اعتبار روش ارائه شده توسط نرم افزار شبیه‌سازی MATLAB تأیید می‌گردد. در این بخش دو نوع شبیه‌سازی بررسی شده است. (۱) سیستم تک جرمی و (۲) سیستم چند جرمی. در سیستم تک جرمی مدل- سازی بر اساس یک اینرسی شامل مجموع اینرسی موتور و Reel یا Stand می‌باشد.

¹ Orthogonally-crossed two model spaces

۱- سيستم تک جرمى^۱

پارامترهاى تجزيه و تحليل پايدارى و عملکرد در جدول-۲ نشان داده شده است. برخى از اين پارامترها با آزمون سعى و خطا تعيين مى شوند. شكل ۸-الف) سرعت خط و شكل ۸-ب) پاسخ Tension در سمت Forward را نشان مى دهد. در زمان صفر تا ۳ ثانيه سرعت خط در مقدار صفر كنترل مى گردد و كشتش ورق به مقدار مرجع به تدريج افزايش مى يابد. در بازه زمانى ۳ تا ۵ ثانيه، سرعت خط افزايش و كشتش ورق در مقدار مرجع حفظ شده است. در روش هاى مرسوم و سنتى با افزايش سرعت مقدار كشتش ورق تا حد زيادى كاهش پيدا مى كند كه اثرات نامطلوب كيفى بر محصول را در پى دارد.

۲- سيستم چند جرمى^۲

نتيجه شبيه سازى سيستم چند جرمى در شكل ۹- نشان داده شده است. لذا روش پيشنهاده، نوسانات كشتش ورق را در سيستم هاى چند جرمى نيز مهار خواهد كرد. با اين حال به دليل اثرپذيرى بالاي سيستم هاى چند جرمى، تنظيم دقيق پارامترهاى مانند G_T ، G_v و g_{dis} ضرورى و حساس مى باشد كه روش محاسبه و تنظيم آن مى تواند به عنوان موضوع تحقيقات آينده لحاظ گردد.

نتيجه گيرى

در اين مقاله يك كنترل كننده تركيبى دكوپله شده سرعت و كشتش به كار گرفته شد. اين روش كشتش ورق و سرعت خط را به طور مستقل از يكديگر در دو فضاى مدال كنترل مى كند. نتايج شبيه سازى نشان مى دهد كه روش پيشنهاده، هنگام تغيير سرعت خط به دلايل مختلف، كشتش ورق را نسبت به روش هاى مرسوم بهتر كنترل مى كند كه در نتيجه آن كيفيت محصول و ثبات فرآيند ارتقا و بهبود مى يابد. براى سيستم هاى چند جرمى برخى مسايل براى حل وجود دارد كه در آينده به آن پرداخته خواهد شد.

مراجع

- [1] Teng Zi, Meng Xin, and Yue GuangXue "The Development of Robust Control to AGC Systems of Cold Rolling Mill," Proceedings of IEEE international Symposium on Commerce and Security, pp. 556- 560, vol.1, 2009
- [2] Hyun-Shin Park, Kern-Joong Kim "A study on AGC scheme based on real time frequency characteristics," Proceedings of IEEE international Conference on Universities Power Engineering, pp. 1-5, 2008.
- [3] Xiaofeng Zhang, Qingdong Zhang, Chaoyang Sun "Gauge and tension control in unsteady state of cold rolling using mixed H2/H ∞ control," Proceedings of IEEE international Conference on Control and Automation, pp. 2072-2076, 2009

¹ Single-mass System

² Multi-mass System

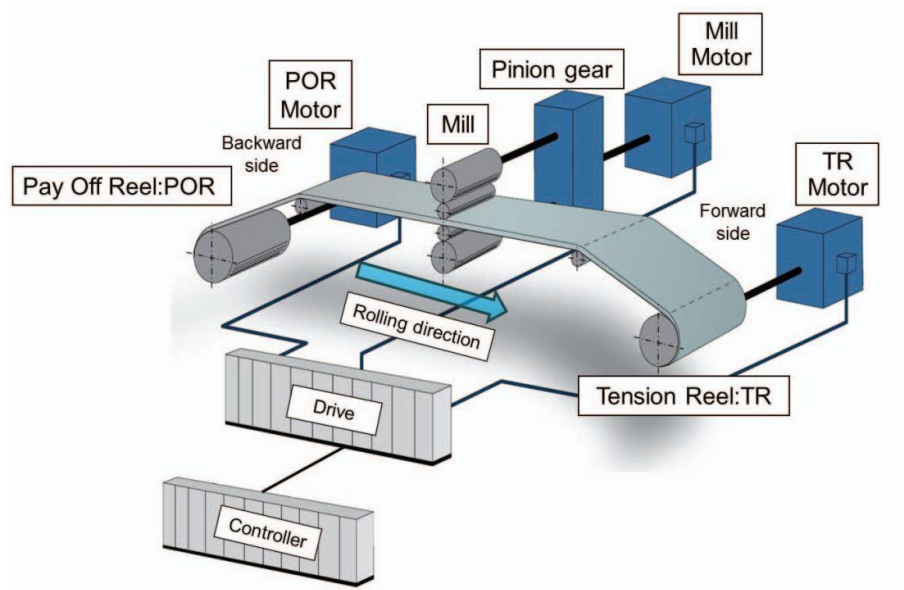
- [4] Wang, J.S. ; Jiang, Z.Y. ; Tieu, A.K. ; Liu, X.H. ; Wang, G.D. "A Method to Improve Model Calculation Accuracy of Process Control in Tandem Cold Mills," Proceedings of IEEE international Conference on Industrial Electronics and Applications, pp. 2787-2790, 2007.
- [5] Seung-Ho Song, Seung-Ki Sul, "A new tension controller for continuous strip processing line," IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 36, No. 2, pp. 633-639, 2000.

جدول ۱- متغیرها و اندیس‌های استفاده شده در معادلات

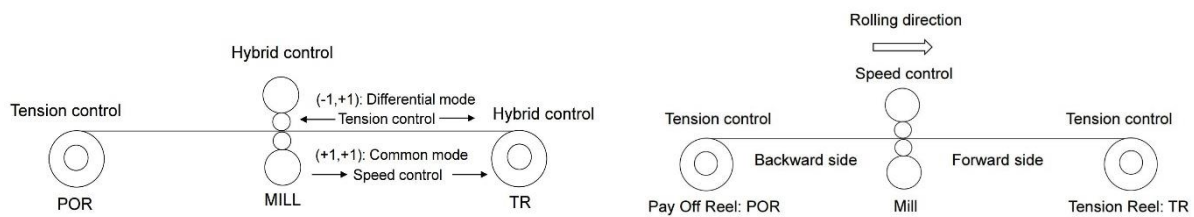
Parameter	Meaning
T	Tension [MPa]
ϕ_d	Flux in d axis [T]
v	Circumferential velocity (Roll speed) [mm/s]
E	Young modulus [MPa]
τ	Torque [N m]
J	Inertia moment [$kgmm^2$]
R	Radius of reel and mill [mm]
L	Distance between reel and mill [mm]
ACR	Current control
C_v	Velocity (Speed) PI controller
C_T	Tension PI controller
K_f	Influential coefficient from tension to velocity
ω	Angular velocity [rad/s]
f	Forward slip coefficient
b	Backward slip coefficient
$\hat{}$	Estimated value
$(^{superscript})cmd$	Command value
$(^{superscript})ref$	Reference value
$(^{superscript})res$	Response value
$(^{superscript})cmp$	Compensation value
$(_{subscript})n$	Nominal value
$(_{subscript})out$	Forward side of the mill
$(_{subscript})in$	Backward side of the mill
$(_{subscript})mill$	Mill system
$(_{subscript})tr$	Tension reel system
$(_{subscript})por$	Payoff reel system

جدول ۲- پارامترهای تجزیه و تحلیل پایداری و عملکرد.

Parameter	Meaning	Value
T_{out}^{cmd}	Command tension in forward side	100[MPa]
J_{mill}	Inertia moment of mill	23000[kgm^2]
J_{tr}	Inertia moment of tension reel	3200[kgm^2]
E	Young modulus	210000[MPa]
L	Distance between mill and reel	5000[mm]
C_T	Tension gain	8000
C_v	Velocity gain	200
g_{dis}	Cutoff frequency of DOB	100[rad/s]

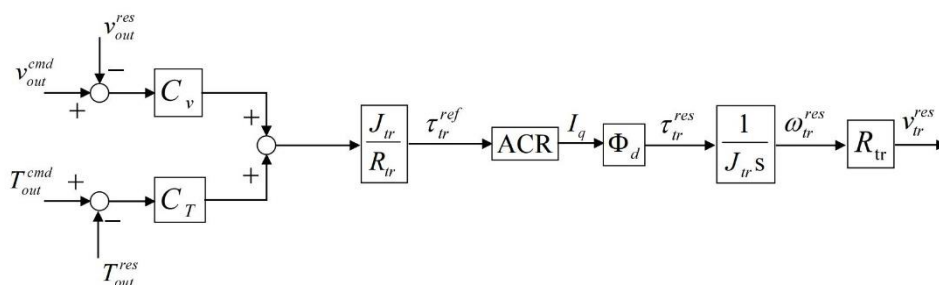


شکل ۱- ساختار خط نورد سرد (CRM)

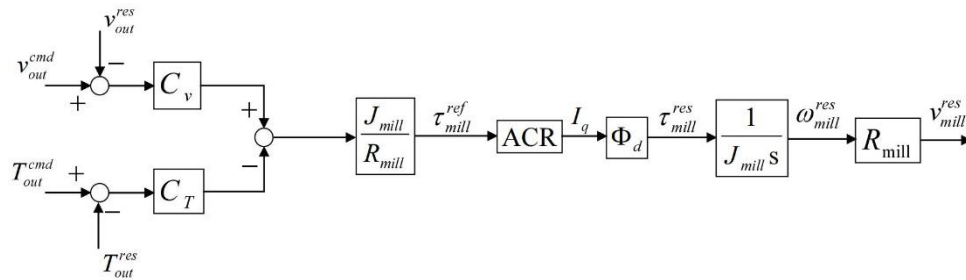


شکل ۳- سیستم پیشنهادی خط نورد سرد

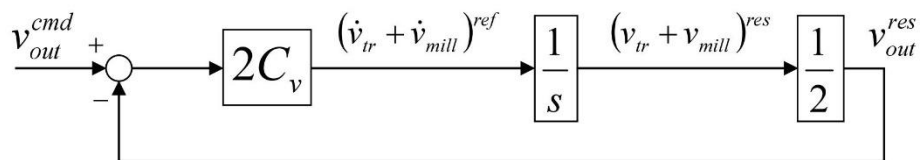
شکل ۲- سیستم مرسوم خط نورد سرد



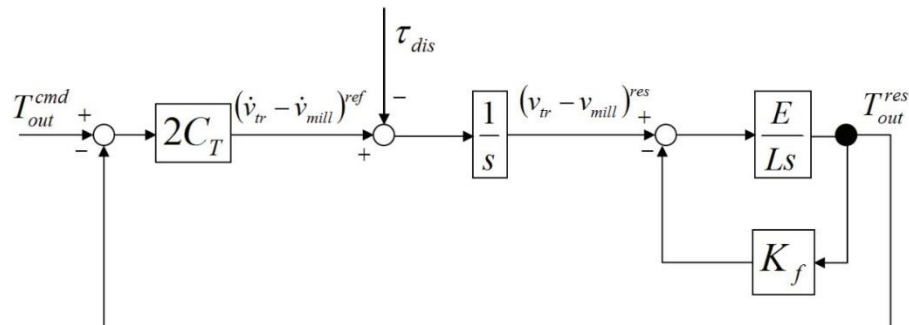
شکل ۴- بلوک دیاگرام کنترل ترکیبی در TR



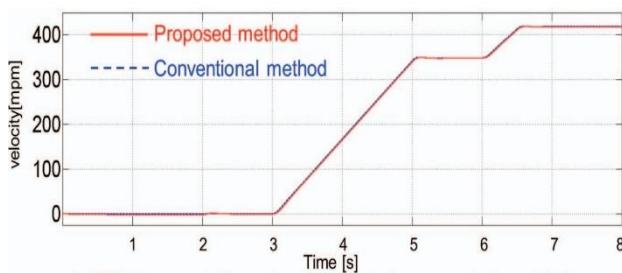
شکل ۵- بلوک دیاگرام کنترل ترکیبی در Mill



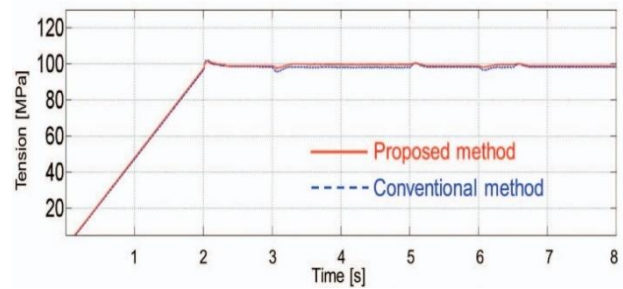
شکل ۶- کنترل سرعت در حالت مشترک



شکل ۷- کنترل کشش در حالت دیفرانسیل

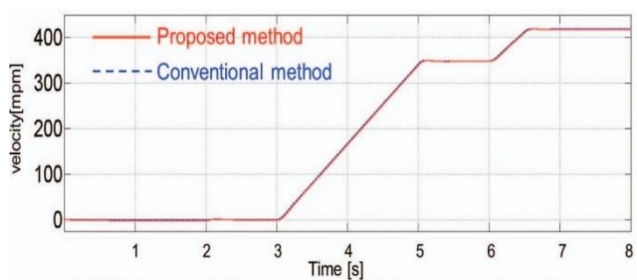


الف) پاسخ سرعت خط در سمت Forward

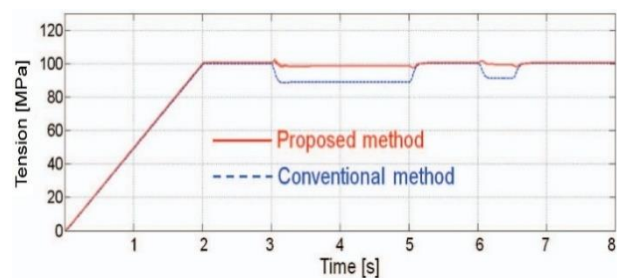


ب) پاسخ تنش ورق در سمت Forward

شکل ۸- نتایج شبیه سازی سیستم تک جرمی



الف) پاسخ سرعت خط در سمت Forward



ب) پاسخ تنش ورق در سمت Forward

شکل-۹- نتایج شبهه سازی سیستم چند جرمی.

