هشتمین کنفرانس بین‌المللی
پیشرفت های اخیر در مهندسی راه‌آهن
دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲ و۳ خردا ماه ۱۴۰۲

کنترل بهینه نیروی ترمز قطار جهت حداقل سازی فاصله توقف و پد مصرفی با درنظر گیری راحتی مسافر

پدرام هوائی، محمدعلی صندیدزاده

دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشیار، گروه مهندسی کنترل و علائم، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

در این پژوهش کنترل بهینه بر اساس سرعت قطار و فاصله قطار تا نقطه توقف طراحی شده است، تا ضمن افزایش ایمنی، با دقت مناسب قطار متوقف شود. یک رویکرد مناسب جهت کاهش فاصله ترمز این است که حداکثر نیروی چسبندگی بین چرخ و ریل فراهم گردد. این بحث نیازمند توجه بدین اصل است که ضریب چسبندگی به ازای نرخ های متفاوت لغزش مقادیر متفاوتی به خود می گیرد. در کنار این موضوع میزان پد مصرفی ترمز نیز یکی از هزینه های ملموس مربوط به ناوگان ریلی می باشد که کاهش آن تاثیر چشم گیری در هزینه های نگه داری خواهد داشت. از طرفی راحتی مسافر در قطار های مسافری از پارامتر های مهم در بحث چگونگی انجام عملیات ترمز می باشد. در این مقاله برای اولین بار کنترل بهینه ای جهت کاهش فاصله توقف در کنار کاهش تابعی تحت عنوان پد ترمز مصرفی و میزان شک وارد به مسافر ارائه می گردد. مسئله کنترل بهینه در ابتدا با توابع مرتبط ارائه می گردد و در نهایت توسط اصل مینیمم سازی پونتریاگین حل می گردد. کنترل بهینه ی محاسبه شده در بخش شبیه سازی مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج شبیه سازی نشان دهنده توانمندی عملکرد کنترل بهینه ی ارائه شده می باشد.

مقدمه

مدل اصطکاکی چرخ و محور یکی از مهمترین پارامتر ها برای انجام محاسبات و شبیه سازی ها جهت درک رفتار ترمز گیری یک وسیله ی حمل و نقل ریلی می باشد. پیشرفت های اخیر در سیستم های جلوگیری از لغزش چرخ و محورنیز با استفاده از بکارگیری مشخصه های اصطکاکی پدیدار گردیده اند. لغزش چرخ بر روی ریل زمانی رخ می دهد که سرعت زاویه ای چرخ در حالت نرمال شده کوچکتر و یا بزرگتر از سرعت متحرک ریلی باشد. در مراجع [۱– ۳] مطالعاتی بر روی نیرو های اصطکاکی موثر بر روی چرخ و محور صورت گرفته است. بر طبق نتایج آنها در هنگام ترمز گیری همواره لغزش چرخ و محور در یک نرخ متغیر صورت می پذیرد و نیروی اصطکاک چسبندگی متناظر، با این نرخ لغزش دچار تغییرات میگردد. در [۴]، مقایسه‌ای بین دو استراتژی کنترل چسبندگی مجدد، که یکی از آن‌ها تطبیقی مقاوم است و دیگری حالت لغزشی فوق پیچشی اصلاح شده، ارائه شده‌است. این الگوریتم های کنترل، لغزش چرخ را متوقف می‌کنند و عملکرد کشش بهینه را تحت خواص غیر خطی سیستم کشش و عدم قطعیت سطح چسبندگی در سطح مشترک ریل چرخ حفظ می‌کنند و ضریب چسبندگی و سرعت زاویه‌ای لغزش با استفاده از یک مشاهده گر تمام حالت تخمین زده شده است. همچنین سرعت‌های لغزش بهینه در شرایط مختلف تماس ریل چرخ با دقت بالاتری از طریق الگوریتم جستجوی سرعت لغزش بهینه به دست آمده‌اند.

کنترل بهینه

در حالت کلی یکی از استراتژی های کاهش فاصله ی توقف ، انجام ترمز گیری با حداکثر نیروی اصطکاکی می باشد. در این مقاله یک اثبات ریاضی برای محاسبه ی حداکثر نیروی ترمزی با حل یک مسئله ی کنترل بهینه با استفاده از اصل مینیمم سازی پنتریاگین ارائه می گردد. نشان داده خواهد شد که در اکثر شرایط با حالات کلی جواب بهینه شامل زیر مجموعه هایی از کنترل های منفرد و بنگ بنگ می باشد. به صورت مشخص تر ، با یک رویکرد کاملا تئوری نشان می دهیم که تحت شرایط عادی ، کنترل منفرد نرخ لغزش را در حالتی که ضریب اصطکلاک حداکثر باشد نگه میدارد. همچنین برای ارضای شرایط اولیه و مرزی از کنترل بنگ بنگ استفاده می کنیم. قابل ذکر است که در این مقاله برای اولین بار یک رژیم ترمزی بهینه برای کاهش فاصله ترمزی با حداقل سازی مصرف پد های ترمزی و شک وارده بر مسافر ارائه می گردد. در ابتدا مدل دینامیک چرخ و محور ارائه می گردد و سپس مسئله در قالب یک مسئله کنترل بهینه با اهداف نام برده ارائه می شود. سپس با ارائه ی تحلیل، کنترل بهینه استنباط می گردد. در نهایت در بخش شبیه سازی عملکرد ورودی کنترل مورد بررسی قرار می گیرد.

$$J = g(t_f) + \int_0^{t_f} v(t) + j(t)\,dt$$

$$\dot{P}_1^* = -[1 + \frac{\partial j}{\partial x_1} + P_1(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial f_2}{\partial x_1}) + P_2(\rho \frac{\partial f_1}{\partial x_1})]$$

$$\dot{P}_2^* = -[\frac{\partial j}{\partial x_2} + P_1(\frac{\partial f_1}{\partial x_2} + \frac{\partial f_2}{\partial x_2}) + P_2(\frac{\partial f_3}{\partial x_2} + \rho \frac{\partial f_1}{\partial x_2})]$$

$$u_{opt} = \arg\{min\, H(x, u, p, t)\}$$

کنترل منفرد

جهت محاسبه کنترل منفرد در رابطه نیازمند محاسبه ی مشتقات پاره ای هستیم. بدین منظور باید در نظر گرفت که توابع **f**به صورت جزئی وابسته به متغیر های حالت و تابع نرخ لغزش می باشند. مستقات جزئی به صورت زیر تعریف می شوند :

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_1} = \frac{\partial f_i}{\partial s}\frac{\partial s}{\partial x_1}\ ,\ \frac{\partial f_i}{\partial x_2} = \frac{\partial f_i}{\partial s}\frac{\partial s}{\partial x_2}\quad (for\ i = 1,2)$$

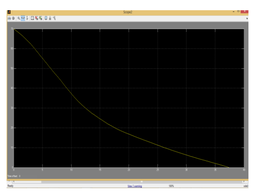
نهایتا کنترا منفرد با توجه به تغییرات نرخ لغزش به صورت زیر حاصل می گردد:

$$u_{\sin} = \frac{[(Tor2(x) + P_1\frac{\partial^2 f_1}{\partial^2 x_2} + P_1\frac{\partial^2 f_2}{\partial^2 x_2})(f_3(x_2) + \rho f_1(x) + f_4(x)) + (Sum(x) + P_1\frac{\partial^2 f_1}{\partial x_2 \partial x_1} + P_1\frac{\partial^2 f_2}{\partial x_2 \partial x_1})(f_1(x) + f_2(x))}{-[(Tor2(x) + P_1\frac{\partial^2 f_1}{\partial^2 x_2} + P_1\frac{\partial^2 f_2}{\partial^2 x_2})]}$$

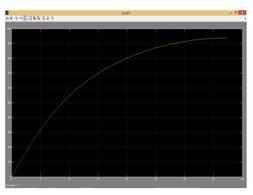
نتایج و بحث

در نهایت راهبری توسط کنترل منفرد پیشنهادی در زیر نمایش داده شده است:

تغییرات سرعت:



موقعیت:



در این مقاله برای اولین بار کنترل بهینه ای جهت کاهش فاصله توقف در کنار کاهش تابعی تحت عنوان پد ترمز مصرفی و میزان شک وارد به مسافر ارائه می گردد. مسئله کنترل بهینه در ابتدا با توابع مرتبط ارائه می گردد و در نهایت توسط اصل مینیمم سازی پونتریاگین حل می گردد. کنترل بهینه ی محاسبه شده در بخش شبیه سازی مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج شبیه سازی نشاندهنده توانمندی عملکرد کنترل بهینه ی ارائه شده می باشد

مراجع

[1] Kadowaki, Satoshi, Kiyoshi Ohishi, Shinobu Yasukawa, and Takashi Sano. "Anti-skid re-adhesion control based on disturbance observer considering air brake for electric commuter train." In The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2004. AMC'04., pp. 607-612. IEEE, 2004.

[2] Shirai, S. "Adhesion Phenomena at High-Speed Range and Performance of an Improved Slip-dectector." Quarterly Reports, Railway Technical Research Institute 18, no. 4 (1977): 189-190.

[3] Isaev, I. P., and A. L. Golubenko. "Improving experimental research into the adhesion of the locomotive wheel with the rail." Rail International 20, no. 8/9 (1989).

[4] Uyulan, Caglar, Metin Gokasan, and Seta Bogosyan. "Comparison of the re-adhesion control strategies in high-speed train." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering 232, no. 1 (2018): 92-105.