



بهبود سیستم کنترل پیش رانش قطار مغناطیسی مگلو با استفاده از کنترلر SMCPID

محمد اسفندیاری^۱

^۱دانشگاه علم و صنعت، Mohammad.Esfandiari@gmail.com

چکیده - در این مقاله دینامیک و سیستم کنترل یک بوژی قطار مگلو ترنسریپید در تعلیق و پیشرانس مورد نظر قرار می گیرد. با استخراج معادلات نیروهای وارد بر بوژی شامل وزن و نیروهای الکترومغناطیسی، مدل سازی دینامیک غیرخطی یک بوژی با ۴ درجه آزادی انجام می شود که شامل دینامیک تعلیق و پیشرانس می باشد. از دینامیک قطار در هدایت به منظور ساده سازی معادلات صرف نظر شده است. در این راستا، با بیان دستگاه های مختصات و روابط سینماتیکی و دینامیکی بین آن ها مدل سازی دینامیکی استخراج می شود. سپس یک مدل دقیق از عملگرهای مغناطیسی بوژی و موتور خطی مورد استفاده ارائه می شود. با استفاده از مدل بوژی، نمودار حلقه باز سیستم بررسی می گردد و یک کنترل کننده ترکیبی PID و مد لغزشی (SMCPID) مناسب جهت ردیابی ورودی مرجع مورد نظر، حذف اغتشاش خارجی و در حالتی که سنسورهای اندازه گیری دارای نویز هستند مطرح می شود. در پروفیل سرعت قطار از صفر در طی ۹۲ ثانیه به سرعت ۵۸۱ کیلومتر بر ساعت می رسد و برای ۵ ثانیه ثابت مانده و سپس در ۱۶۷ ثانیه مجدداً به مقدار صفر کاهش می یابد. در نهایت رفتار سیستم و صحت عملکرد کنترل کننده با شبیه سازی نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: قطار مگلو، مدل سازی وابسته تعلیق و پیشرانس، ردیابی ورودی مرجع، سیستم ناپایدار، حذف اغتشاش خارجی،

کنترل کننده SMCPID

[۶] مطرح شده اند، در تمام تحقیقات انجام شده معمولاً از پیشرانس در مدل سازی صرف نظر می شود و یا از یک دینامیک خطی سازی شده به منظور طراحی کنترل کننده استفاده می گردد. ردیابی یک پروفیل سرعت در راستای مسیر حرکت قطار و در حضور یک اغتشاش خارجی نیز به ندرت در مراجع مذکور مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله مدل یک قطار مگلو در پیشرانس و تعلیق استخراج می شود. در طی مراحل مدل سازی از قوانین فیزیکی و منطق با واقعیت به منظور استخراج دقیق تر معادلات بهره گرفته شده است. با استفاده از کنترل کننده های ترکیبی مد لغزشی و PID به پایدار سازی سیستم مورد نظر پرداخته ایم. ردیابی یک پروفیل سرعت مناسب در راستای مسیر حرکت قطار و البته در حضور یک اغتشاش خارجی نیز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. عملکرد کنترل کننده های مورد نظر از منظر تامین پایداری، ردیابی ورودیهای مرجع، حذف نویز و ورودیهای اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفته و در هر مورد نمودار ورودی های کنترلی به منظور بررسی میزان عملی بودن طراحی ترسیم و تحلیل شده است.

۱- مقدمه

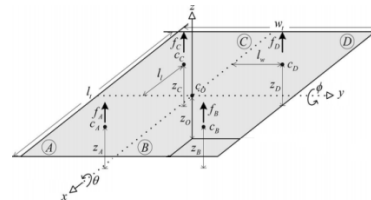
سیستم مگلو با بهره گیری از میدان مغناطیسی که میان قطار و خط ایجاد می گردد، در فاصله اندکی از خط معلق مانده و با نیروی محرکه ای که می تواند یک موتور جت یا همین میدان مغناطیسی ایجاد شده باشد، در طول خط به پرواز درمی آید. در قطارهای مغناطیسی به دلیل عدم تماس فیزیکی میان قطار و خط، اصطکاک تماسی وجود ندارد و فناوری مگلو نقطه ای اشتراکی با خطوط ریلی معمولی نداشته و تأسیسات آن کاملاً باید به طور مجزا طراحی و ساخته شوند. این قطارها با شکل خاص آیرودینامیک خود دارای سرعت بسیار بالایی می باشند.

در سال های اخیر نیز مطالعات فراوانی در این زمینه صورت پذیرفته و محققان به دنبال روش های مختلف مدل سازی دقیق تر مگلو هستند ([۳-۱]). در هیچ یک از مراجع مطرح شده به بررسی و کنترل سیستم پیشرانس و تعلیق به صورت همزمان پرداخته نشده است. تحقیقات گسترده ای به منظور ارائه ی یک کنترل کننده مناسب برای سیستم مگلو ارائه شده است. در سال های اخیر هم کنترل کننده های مختلفی از قبیل کنترل مد لغزشی [۴]، کنترل تطبیقی [۵]، PID تنظیم شده با شبکه عصبی



۲- تشریح مدل مساله

در این بخش دینامیک قطار مگلو را استخراج خواهیم پرداخت که شامل دینامیک قطار در تعلیق و پیشرانش می شود. شکل زیر پلتفرم کلی بوژی را نشان می دهد. در این شکل Z_0 جابجایی مرکز جرم است. f_A, f_B, f_C, f_D نیروهایی هستند که توسط عملگرهای تعلیق به بوژی وارد می شوند. ترم های C_A, C_B, C_C, C_D بیانگر مرکز جرم چهار بخش از یک بوژی هستند و نیروهای کنترلی به این نقاط وارد می شوند. هر کدام از این نقاط به ترتیب دارای جابجایی Z_A, Z_B, Z_C, Z_D خواهند بود. زاویه های رول θ و پیچ ϕ نیز مربوط به حرکت دورانی سیستم هستند. همچنین حرکت خطی سیستم در راستای محور X توسط یک موتور سنکرون ایجاد می شود. معمولاً منابع موجود بخش تعلیق و پیشرانش و یا تعلیق و هدایت را جهت ساده سازی کنترل باهم در نظر میگیرند بنابراین جهت ساده سازی معادلات تمرکز این رساله بر دینامیک وابسته پیشرانش و تعلیق و البته کنترل همزمان آن ها استوار است و از دینامیک بوژی در راستای محور Y صرف نظر شده است. به منظور کاهش هزینه ی سخت افزار، مگنت جانبی در راستای Y را با یک چرخ جایگزین کرده اند [۷].



شکل ۱ پلتفرم کلی بوژی و درجات آزادی آن

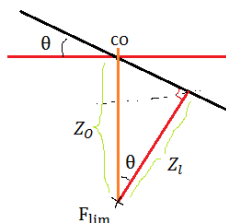
با استفاده از روابط لاگرانژ و براساس مرجع [۷] و پس از نوشتن معادلات حرکت دورانی حول محور ϕ ، محاسبات فرم نهایی معادلات دینامیکی مگلو به صورت زیر استخراج می شود.

$$m_t \ddot{z}_0 + m_t g = F_z; I_x \ddot{\theta} = T_\theta; I_y \ddot{\phi} = T_\phi \quad 1$$

در رابطه ی فوق F_z نیروی خارجی در جهت محور Z است. ترم $\frac{\partial L}{\partial z_0}$ به معنای مشتق ترم لاگرانژ نسبت به Z_0 و ترم $\frac{\partial L}{\partial z_0}$ به معنای مشتق ترم لاگرانژ نسبت به \dot{z}_0 می باشد. همچنین m_t جرم کل سیستم قطار و مسافران است و در حالت کلی متغیر با زمان می باشد. I_x و I_y لختی های دورانی حول محورهای X و Y هستند و آن ها نیز متغیر با زمان اند. فرم کلی این معادلات حرکت سیستم به صورت زیر است.

$$m_t F_{lim} = M_{lim} \ddot{x}_m + D_{lim} \dot{x}_m + F_l \quad (2)$$

در این روابط، M_{lim} جرم متحرک، D_{lim} ضریب ویسکوزیته و F_l نیروی بار خارجی بر سیستم بوده و مقادیر نیروی F_{lim} به همراه مدل موتور سنکرون در ادامه تشریح می شود. فرض می کنیم که 1 موتور خطی در راستای محور ϕ و در زیر مرکز جرم نصب شده است



شکل ۲ نمای شماتیک از روبروی قطار جهت استخراج

گشتاور حول محور Y

با محاسبه میزان جابجایی هر کدام از تعلیق ها به شکل مشابه و به دست آوردن مقادیر نیروی خارجی در راستای محور Z و همچنین مقادیر گشتاور خارجی حول محور X و Y ، فرم نهایی معادلات حرکت سیستم به شکل زیر خواهد شد:

$$m_t \ddot{z}_0 + m_t g = F_z; I_x \ddot{\theta} = T_\theta; I_y \ddot{\phi} = T_\phi - F_{lim} \cdot Z_0 \cos(\theta) \quad (3)$$

در این رابطه $T_{\theta 0}$ همان گشتاور حاصل از نیروهای تعلیق است و F_{lim} نیروی مربوط به موتور است. Z_1 فاصله ی عمودی محل اعمال نیروی افقی در راستای محور X تا محور Y هستند

۲-۲ نیروی الکترومغناطیسی تعلیق و هدایت

اندازه نیروهای هدایت در هر نقطه از ریل وابسته به فاصله هوایی بین ریل و سطح هر مگنت d_g ، میزان جریان سیم پیچ های هر مگنت I_g و زاویه سطح مگنت با سطح ریل α_g است [۸].

$${}^B \vec{f}_{Guid} = |f(\alpha_g, d_g, I_g)| {}^B \vec{y} \quad \alpha_g = \cos(\vec{y} \cdot \vec{r} \cdot \vec{y})$$

که در آن ${}^B R$ ماتریس تبدیل از ریل به بوژی و α_g زاویه بین محور پیچ دستگاه بوژی ${}^B \vec{y} = [0 \ 1 \ 0]^T$ (که عمود بر سطح مگنت هدایت است) و محور پیچ ریل ${}^r \vec{y}$ در دستگاه بوژی، می باشد (${}^r \vec{y}$ عمود بر سطح جانبی است). البته جهت این نیروها از مرکز مگنت به مرکز تصویر سطح مگنت بر روی سطح ریل در هر نقطه از ریل است. برای مگنت های تعلیق نیز همانند مگنت های هدایت اندازه نیروها برابر است با:



مقاومت $R_{gap} = z / (A g \mu_0) = 2819900 z$ است. بنابراین نسبت مقاومت شکاف هوایی به مجموع مقاومت مگنت تعلیق بوژی و ریل برابر است با:

$$\frac{R_{gap}}{R_m} = 3265 z \rightarrow \text{if } z > 0.003 \Rightarrow R_{gap} \approx 10 R_m$$

برای z های بیشتر از سه میلی متر مقدار این نسبت حدوداً $R_{gap} \approx 10 R_m$ خواهد بود. بنابراین می توان با تقریب مناسب از مجموع مقدار مقاومت مغناطیسی ریل و بوژی R_m در برابر مقاومت مغناطیسی هوا R_{gap} صرف نظر نمود.

مشخصات مغناطیسی عملگر تعلیق ترنسپرید به شرح زیر می باشد: $\mu_b = 5026 \times 10^{-6}$; $N_g = 300$; $R_b = 5503.8$; $R_r = 3131.6$; $A_{gap} = 0.02822 \text{ m}^2$; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

رابطه تقریبی نیروی هر کدام از عملگرها را تنها بر حسب جریان و فاصله هوایی خود آن عملگر می توان به صورت زیر نوشت:

$$F_{si} = k \frac{I_i^2}{z_i^2} \quad k = \frac{180000 A_m \mu_0}{4} = 15.958 \times 10^{-4} \quad i = 1:12$$

F_{si} نیروی تعلیق i امین عملگر تعلیق است.

۲-۴ مدل سازی مغناطیسی نیروی پیشران

موتور استاتور خطی طویل در سیستم مگلو ترنسپرید برای هر دو سیستم فشار به سمت جلو و ترمز گیری به طور هم زمان مورد استفاده قرار می گیرد. در حین حرکت آهنربا در طول ریل، قطب اصلی سیم پیچی مولد خطی به شار متغیر مغناطیسی اتصال یافته که این امر سبب القای ولتاژ و شارژ باتری ها می گردد. این فرآیند از سرعت ۱۵ کیلومتر بر ساعت شروع شده و تا زمانی که اتلاف انرژی در سیستم های شناور مغناطیسی در سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت جبران شود، ادامه پیدا می کند یک موتور القایی سه فاز به کمک متغیرهای حالت مختلف مدل می شود که در آن ها ولتاژهای استاتور و بار خارجی (تورک مقاوم) ورودی های سیستم و گشتاور مغناطیسی و سرعت زاویه ای روتور، خروجی هستند. بردار فضای حالت بدین صورت است: $[x] = [i_s \ i_r \ i_m \ \lambda_s \ \lambda_r \ \lambda_m]^T$ که X بردار فضای حالت سیستم است و درایه های آن به ترتیب عبارتند از: جریان استاتور، جریان رتور، جریان شکاف هوایی، شار استاتور، شار رتور و شار شکاف هوایی. در یک موتور القایی از یک منبع تغذیه

$$|{}^B \vec{f}_{Susp}| = |f(\alpha_m, d_m, I_m)| \quad \alpha_m = \cos^{-1}({}^B \vec{z} \cdot {}^r \kappa \vec{z})$$

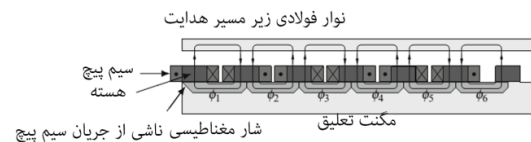
که در آن α_m زاویه بین محور یابو دستگاه بوژی ${}^B \vec{z} = [u \ u \ 1]^T$ (که عمود بر سطح مگنت تعلیق است) و محور یابو ریل ${}^r \vec{z}$ در دستگاه بوژی، می باشد (${}^r \vec{z}$ عمود بر سطح تحتانی ریل است). همچنین داریم:

$${}^s P_{rORG_x} = {}^s P_{rORG_x}, \quad {}^s P_{rORG_y} = 0, \quad {}^s P_{rORG_z} = 0$$

$$\phi_r = 0, \quad \theta_r = 0, \quad \psi_r = 0$$

۲-۳ مدل سازی مغناطیسی بخش تعلیق بوژی

در قطار مگلو ترنسپرید از نیروهای جاذبه برای شناوری (تعلیق) بوژی استفاده می شود. هر بوژی دارای ۲۰ عملگر مغناطیسی (هر طرف ۱۰ عدد) جهت انجام تعلیق هوایی می باشد؛ که از این ۲۰ عدد، از ۶ جفت (۱۲ عدد) برای تعلیق و از بقیه به عنوان پشتیبان و ذخیره استفاده می شود. با اعمال جریان به مگنت ها (II تا I6)، یک نیروی الکترومغناطیسی بین مگنت تعلیق بوژی و قسمت تحتانی ریل که شامل یک نوار فولادی در دو طرف ریل است، تولید خواهد شد (شکل زیر).



شکل ۳- نحوه توزیع شار مغناطیسی با اعمال جریان به عملگرهای بوژی

اعمال جریان I به سیم پیچ دارای هسته باعث ایجاد شار مغناطیسی حلقه بسته Φ در طول هسته خواهد نمود. این شار مغناطیسی به نوبه ی خود نیروی الکترومغناطیسی را تولید خواهد نمود که باعث جذب صفحه فلزی مقابل خود خواهد شد. از روابط الکترومغناطیس و مبتنی بر مدار معادل مغناطیسی مقدار نیروی هر لبه عملگر هدایت F_g به دست می آید.

$$F_g = \frac{1}{2\mu_0} \int B_i^2 dA_{gap} = \frac{-(IN)^2 \left(\frac{y_1 + y_2}{\mu_0 A_{gap}}\right)^2}{6R_g \mu_0 A_{gap} \left(\frac{y_1 + y_2}{\mu_0 A_{gap}} + R_r + R_b\right)^3}$$

مجموع مقدار مقاومت مغناطیسی ریل و بوژی برابر $R_m = R_r + R_b = 8635.4$ است و مقاومت مغناطیسی فاصله هوایی تعلیق با فرض ثابت بودن $A_{gap} = 0.02822 \text{ m}^2$ برابر



در $\frac{h}{\pi}$ ضرب می شود به سرعت خطی تبدیل شده و جهت نوشتن معادله حرکت خطی مورد استفاده قرار می گیرد. با جایگذاری روابط عبارت نهایی زیر برای نیروی پیشران به دست می آید:

$$F_{lim} = \frac{3\pi P}{2\tau_p} (\lambda_{as} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds})$$

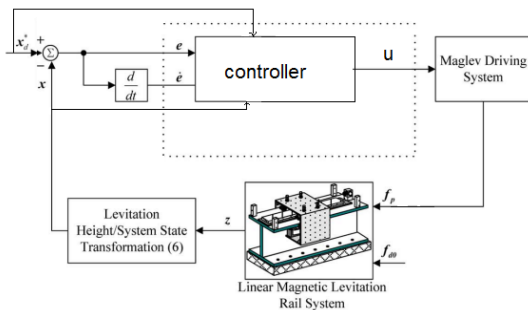
با داشتن این نیرو و طبق قانون دوم نیوتون معادله‌ی دینامیکی حاکم بر سیستم را می نویسم:

$$F_{lim} = k_f (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) = M_{lim} \ddot{x}_m + D_{lim} \dot{x}_m + F_L$$

در این روابط، M_{lim} جرم متحرک، D_{lim} ضریب ویسکوزیته و k_f ثابت نیرویی می باشد. جریان ورودی و کنترلی سیستم است.

۳- پیاده سازی کنترل کننده SMCPID

شکل زیر ساختار کنترلی را در کنار مدل استخراجی برای قطار مگلو نشان می دهد. در استراتژی طراحی کنترلی پیشنهادی به سنسورهای جهت اندازه گیری پارامترهای فضای حالت نیاز داریم که خود دارای نویز در اندازه گیری هستند. شایان ذکر است برای تولید خطای اندازه گیری حسگرها می توان از نویز سفید گوسی استفاده نمود.



شکل ۴: نموداری از ارتباط اجزا و کنترل کننده [۷]

ملزومات سیستم کنترل شده می بایست به شرح زیر باشد: پروفیل سرعت مورد نظر با کمترین میزان خطا دنبال شود؛ ارتفاع واگن از سطح ریل به مقدار مطلوب ۸ میلی متر برسد؛ زمانی که واگن به ارتفاع مناسب از سطح ریل می رسد کمتر از یک ثانیه باشد؛ سطح جریان سیم پیچ های تعلیق و پیشران قابل قبول و دسترس باشند؛ میزان نیروی عمودی که به واگن وارد می شود نسبت به وزن واگن منطقی بوده و بتوان آن را در عمل تولید کرد؛ سیستم نسبت به ورودی اغتشاشی مقاوم باشد. به این معنی که ورودی اغتشاشی کمترین تاثیر منفی را بر روی سایر ملزومات کنترلی بگذارد. سیستم موردنظر حرکت بوژی غیرخطی و ناپایدار است و کنترل کننده موردنظر باید شرایط لازم

با ولتاژ مشخص استفاده می شود تا جریان در سیم پیچهای موتور ایجاد شده و در نتیجه به واسطه خاصیت آهنربایی ایجاد شده، روتور دوران کند. مبتنی بر مدار معادل مغناطیسی موتور و پس از نوشتن روابط KVL مداری خواهیم داشت

$$i_{qs} = -\left(\frac{r_s}{\sigma l_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma t_r}\right) i_{qs} - \frac{n_p l_m \pi}{\sigma l_s l_r h} v_e \lambda_{dr} + \frac{l_m}{\sigma l_s l_r t_r} \lambda_{qr} + \frac{v_{qs}}{\sigma l_s} i_{ds}$$

$$= -\left(\frac{r_s}{\sigma l_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma t_r}\right) i_{ds} + \frac{l_m}{\sigma l_s l_r t_r} \lambda_{dr} + \frac{n_p l_m \pi}{\sigma l_s l_r h} v_e \lambda_{qr} + \frac{v_{ds}}{\sigma l_s} \lambda_{qr}$$

$$\lambda_{qr} = (l_m/t_r) i_{qs} + n_p (\pi/h) v_e \lambda_{dr} - (1/t_r) \lambda_{qr}$$

$$\lambda_{dr} = (l_m/t_r) i_{ds} - (1/t_r) \lambda_{dr} - n_p (\pi/h) v_e \lambda_{qr}$$

اکنون معادله‌ی حرکت در راستای X را استخراج خواهیم کرد. برای این منظور ترم میزان توان ورودی به موتور P_{in} به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$P_{in} = 1.5(v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} + v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs})$$

با کمک معادلات ولتاژها عبارت فوق را بازنویسی می کنیم و نتایج را به صورت سه عبارت مجزا می نویسیم:

$$P_{in} = 1.5(v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} + v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \\ = 1.5(r_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + p \left[\frac{L_r}{2} (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) + \frac{L_s}{2} (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + L_m \left\{ (i_{dr} + i_{ds})^2 + (i_{qr} + i_{qs})^2 \right\} \right] + [w_r L_m (i_{qr} i_{ds} - i_{dr} i_{qs})])$$

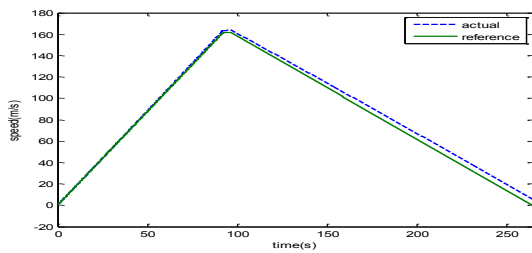
مطابق فوق میزان توان ورودی به موتور به سه گروه تقسیم شد. در گروه اول $r_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2)$ توان اتلافی در مقاومتها

استخراج شده است. گروه دوم $p \left[\frac{L_r}{2} (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) + \frac{L_s}{2} (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + L_m \left\{ (i_{dr} + i_{ds})^2 + (i_{qr} + i_{qs})^2 \right\} \right]$ می باشد. گروه سوم $[w_r L_m (i_{qr} i_{ds} - i_{dr} i_{qs})]$ توان الکترومکانیکی در خروجی است که همان تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی می باشد. این ترم برابر خواهد بود با: $pm = 1.5[w_r L_m (i_{qr} i_{ds} - i_{dr} i_{qs})]$

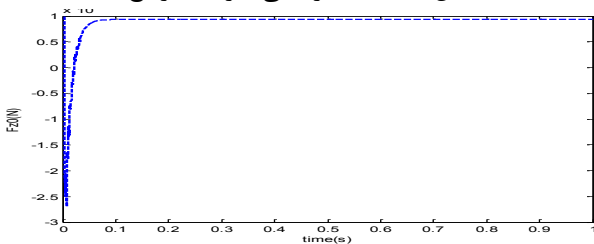
در حالت کلی نیروی پیشران مستقیماً از pm و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$pm = F_{lim} \cdot \frac{2w_r h}{\pi p} = F_{lim} \cdot \frac{w_m}{\pi} h$$

در این رابطه، w_m سرعت زاویه‌ای مکانیکی است و وقتی

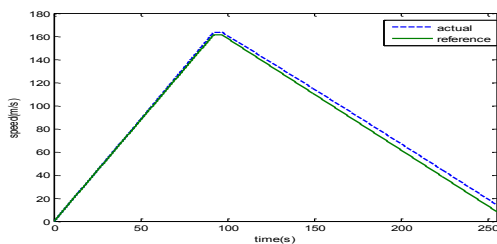


شکل ۶: مقایسه ردیابی سرعت مرجع



شکل ۷: تغییرات نیروی عمودی تعلیق

سوار و پیاده شدن مسافران را می توان با یک اغتشاش پله با دامنه ای حدوداً به اندازه تغییر ۱۰ درصد نیروی وزن بوژی (معادل ۹۳۳ نیوتون) مدل سازی نمود. این امر تداعی کننده این است که یک فرد ۹۳ کیلوگرمی سوار بوژی می شود و یا از آن پیاده می گردد. برای این موضوع ورودی نیروی اغتشاش در راستای محور عمودی Z اعمال می گردد. فرض بر این است که تغییرات وزن در زمانی که واگن بیشترین سرعت (۵۸۱ km/h) را دارد صورت می گیرد. شکل ۸ ورودی سرعت خطی مطلوب را در کنار نمودار سرعت خروجی سیستم نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود اغتشاش در نیروی وزن سبب ایجاد تغییرات ملموسی در ردیابی سرعت خطی مطلوب نشده است.



شکل ۸: مقایسه ردیابی سرعت به هنگام تغییرات نیروی وزن.

در شکل زیر تغییرات فاصله ی هوایی بوژی از سطح ریل که باید مقدار مطلوب ۸ میلی متر باشد در حین شبیه سازی نشان داده شده است. مطابق این شکل کنترل کننده SMCPID به خوبی توانسته اغتشاش وراده را حذف کند و سیستم حلقه بسته ناپایدار نشده است ولی باید میزان ورودی های کنترلی که همان سطح جریان سیم پیچها هستند را بررسی کنیم.

برای تعلیق و پیشرانش را به صورت همزمان تنظیم کند. در کنترل کننده SMCPID سطح لغزش را مطابق زیر در نظر می گیریم [۸].

$$S(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

که در نتیجه آن:

$$\dot{S}(t) = K_P \dot{e}(t) + K_I e(t) + K_D \ddot{e}(t)$$

در این روابط $r(t) - \tilde{y}(t) = e(t)$ تعریف شده است و مطابق مرجع [۸] اگر سیگنال کنترلی به صورت U_{SMC} باشد سیستم حلقه بسته پایدار بوده و ردیابی ورودی مرجع به همراه حذف اغتشاش خارجی صورت می گیرد.

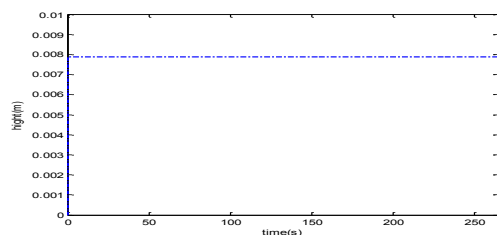
$$U_{SMC}(t)$$

$$= [K_P \dot{e} + K_I e(t) + K_D \ddot{r}(t) + K_D \dot{y}(t) + K_D y(t) + K_d \tanh\left(\frac{S}{\phi}\right)]$$

در این روابط K_P, K_I, K_D, K_d و ϕ ثابت هستند و جهت رسیدن به مشخصات مورد نظر طراح تنظیم می شوند.

۳- تحلیل نتایج

در این بخش به تحلیل نتایج شبیه سازی در نرم افزار سیمولینک متلب پرداخته می شود. به طور خلاصه مشخصات فیزیکی سیستم به صورت زیر می باشد: جرم: 933kg؛ اینرسی حول محور X: ۲۹۰، اینرسی حول محور Y: ۷۰۹، اینرسی حول محور Z: ۵۵، طول واگن ۷ متر و عرض آن ۲٫۳ متر می باشد. میزان ارتفاعی که قطار در آن معلق می ماند برابر ۸ میلی متر در نظر گرفته شده است و برای زوایای ϕ و θ مقدار مطلوب صفر درجه منظور شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم حلقه بسته در ردیابی ورودی های مرجع در شکل ۵ و ۶ به ترتیب برای ارتفاع بوژی از سطح ریل و سرعت حرکت خطی بوژی آورده شده اند. همانطور که نتایج نشان می دهند علی رغم نویز اندازه گیری رفتار سیستم در ردیابی ورودی های مرجع بسیار مناسب می باشد.



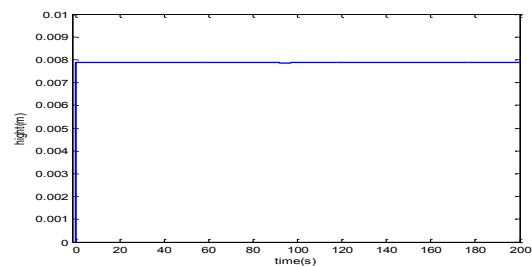
شکل ۵: تغییرات z0 بر حسب زمان



PID (SMCPID) به منظور تأمین مشخصات مطلوب طراحی و در شبیه سازی ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان می دهد که کنترلر SMCPID طراحی شده دارای مقاومت به عدم قطعیت بسیار بالایی است و چنانچه در شبیه سازی ها نشان داده شد می تواند تا +۵۰ درصد اغتشاش در نیروی وزن را بدون تغییر ملموسی در عملکرد سیستم حلقه بسته حذف کند. سرعت ریابی توسط این روش کنترلی بالاتر است و تفاوت چندانی در میزان سیگنال کنترلی مورد نیاز با روش مد لغزشی ندارد. کنترل کننده SMCPID نسبت به کنترل کننده غیرخطی مد لغزشی از حوزه پایداری بیشتری برخوردار است ولی همچنان برای حذف نویز از روی خروجی سیستم به فیلترهای پایین گذر نیاز داریم. فرایند طراحی کنترل کننده SMCPID به سبب تعریف سطح لغزش به صورت یک کنترل کننده PID راحت تر است و همگرایی جوابها، ردیابی ورودی مرجع و همین طور حذف ورودی های اغتشاشی سریع تر صورت می گیرد.

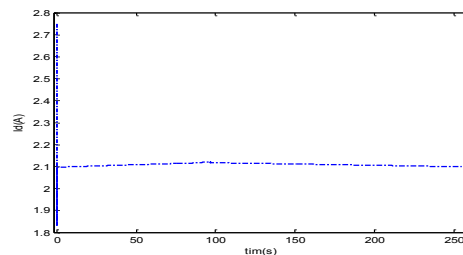
مراجع

- [1] B. H. Yim, H.S. Hana, N.J. Lee and Y.J. Kima, "Prediction of ride quality of a Maglev vehicle using a full vehicle multi-body dynamic model," Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, p. 18, Sep 2009.
- [2] B. H. Yim, H. S. Hana, N. J. Lee, Y. C. Hur and S. S. Kim, "Effects of the guideway's vibrational characteristics on the dynamics of a Maglev vehicle," Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, p. 18, Jan 2009.
- [3] X. Jin, J. Wang, Y. Cao and X. Du, "Numerical Simulation of High-Speed Maglev Vehicle-Guideway-Tunnel-Soil System," International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, p. 16, March 2012.
- [4] W. Rong-Jong, C. Kun-Lun, and L. Jeng-Dao, "On-Line Supervisory Control Design for Maglev Transportation System via Total Sliding-Mode Approach and Particle Swarm Optimization," Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. 55, pp. 1544-1559, 2010.
- [5] L. T. Teng, P. H. Shieh and F. J. Lin, "Intelligent Adaptive Backstepping Control System for Magnetic Levitation Apparatus," IEEE Transaction on Magnetics, vol. 43, p. 10, May 2009.
- [6] X. Y. Xinye and Y. G. Bo, "Study on Suspension Rigidity Control of Electromagnetic Suspension System Based on NN-PID," presented at the World Congress on Intelligent Control and Automation, China, 2008.
- [7] J. H. Lever, "Technical assessment of maglev system concepts," US Army Corps of Engineers, 1998
- [8] HOLKAR, K. S.; WAGHMARE, L. M. Sliding Mode Control with Predictive PID Sliding Surface for Improved Performance. International Journal of Computer Applications, 2013 .

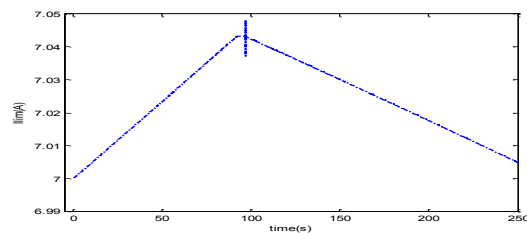


شکل ۹ تغییرات Z_0 بر حسب زمان

نمودار تغییرات سطح جریان برای سیم پیچ های تعلیق و پیشران به ترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ آورده شده اند. دقت داریم که چون در طی شبیه سازی گشتاور اغتشاشی حول محور Z_0 نداریم لذا هر چهار سیم پیچ تعلیق دارای نمودار تغییرات جریان یکسانی هستند. بررسی نمودار تغییرات جریان نشان می دهد که با توجه به وزن سیستم و نویزهای در نظر گرفته شده در خروجی، مقادیر به دست آمده برای جریان ها کاملاً قابل انتظار هستند و عملکرد کنترل کننده مد لغزشی ترکیبی طراحی شده بسیار مناسب است.



شکل ۱۰ تغییرات جریان سیم پیچ های تعلیق



شکل ۱۱ تغییرات جریان سیم پیچ موتور سنکرون

۵- نتیجه گیری

در این مقاله دینامیک و سیستم کنترل یک بوژی قطار مگلو ترنسریپید در تعلیق و پیشرانش مورد نظر قرار می گیرد. با استخراج معادلات نیروهای وارد بر بوژی شامل وزن و نیروهای الکترومغناطیسی، مدل سازی دینامیک غیرخطی یک بوژی با ۴ درجه آزادی انجام می شود که شامل دینامیک تعلیق و پیشرانش می باشد. در این مقاله یک کنترل کننده ترکیبی مد لغزشی و