

تنظیم برخط ضرایب کنترل کننده PID به روش جدول بندی بهره فازی

برای سیستم پانتوگراف قطارهای برقی پرسرعت

سالار حسن زاده، دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
امید خان فرخانی، دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
بهمن قربانی واقعی*، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمدعلی صنیدزاده، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: bahman_gh@iust.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۶/۲۷ - پذیرش: ۹۷/۰۱۱/۰۵

صفحه ۳۶۳-۳۷۳

چکیده

پانتوگراف یکی از مهم‌ترین اجزای انتقال برق به قطار می‌باشد که توسط آن می‌توان برق را از شبکه بالاسری به قطار منتقل نمود. ارتباط دائم پانتوگراف با شبکه برق تحت هر شرایطی لازم است. از طرفی، پارامترهای شبکه بالاسری دارای عدم قطعیت بوده و در طول یک دهانه متغیر هستند. این مساله کنترل پانتوگراف را بخصوص در سرعت‌های بالا با چالش روبرو می‌سازد. در این مقاله هدف تکه‌داشتن نیروی تماسی بین پانتوگراف و سیم‌های برق در یک سطح مطلوب با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای شبکه بالاسری است. برای دستیابی به این هدف ابتدا معادلات دینامیکی یک سیستم پانتوگراف با دو درجه آزادی استخراج شده و یک کنترل کننده PID برای سیستم طراحی گردیده است. در گام بعد به منظور بهبود پاسخ کنترلر در حضور عدم قطعیت در شبکه بالاسری، ضرایب کنترل کننده PID را از روش جدول بندی بهره تنظیم کرده و سپس برای کاهش نوسانات، این پارامترها از روش جدول بندی بهره فازی به صورت برخط به روز می‌شوند. در نهایت عملکرد سه کنترل کننده بر روی سیستم پانتوگراف با ملاحظات عملی شبیه‌سازی و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهند که ترکیب منطق فازی با روش جدول بندی بهره، منجر به عملکرد بهتر کنترلر PID می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پانتوگراف قطار برقی، کنترل کننده PID، روش جدول بندی بهره، منطق فازی

۱- مقدمه

کرد و در نتیجه توان مورد نیاز محرک‌های الکتریکی قطار تامین نشده و نمی‌توان به سرعت مطلوب دست پیدا کرد که این موضوع بخصوص در قطارهای پرسرعت بسیار اثرگذار است (Bucca et al., 2011). از سوی دیگر، افزایش نیروی تماسی باعث افزایش کیفیت جریان می‌شود (O'Connor et al., 1997; Garg, Mahajan and Kumar, 2013). اما در اکثر پانتوگراف‌ها، در محل تماس پانتوگراف با شبکه بالاسری از یک نوار گرافیتی جهت جمع‌آوری جریان استفاده می‌شود. بخاطر خاصیت شکنندگی گرافیت، وارد آوردن فشار زیاد به آن منجر به سایش بیشتر و حتی شکستن می‌شود (Bucca and Collina, 2009).

در قطارهای برقی پرسرعت، جریان از شبکه بالاسری به وسیله یک بازوی مکانیکی به نام پانتوگراف به قطار فرستاده می‌شود. پانتوگراف باید نیرویی را در حد کافی به سیم‌های برق اعمال نماید تا در تمامی زمان‌ها با شبکه برق ارتباط داشته باشد. وقتی ارتباط ضعیف باشد و یا قطع شود، قوس الکتریکی ایجاد شده و باعث صدمه به پانتوگراف می‌گردد (O'Connor et al., 1997; Shudong, Jingbo and Guosheng, 2008; Teixeira, 2007). همچنین کیفیت جریان گرفته شده از شبکه به وسیله پانتوگراف، به نیروی تماسی بین پانتوگراف و شبکه بستگی دارد. در صورت کم بودن نیروی تماسی، کیفیت جریان افت خواهد

کننده‌های بهینه علاوه بر پیچیدگی محاسبات زیاد، انطباق پذیر نیستند و برای تطبیق پذیریشان نیاز به محاسبات دو چندان می‌باشد. کنترل کننده PID پیچیدگی محاسبات ندارد و از طرفی انطباق پذیری زیادی ندارد. کنترل کننده‌های فازی دارای پیچیدگی محاسبات متوسط بوده و همچنین دارای انطباق پذیری خوبی هستند. در این مقاله با ترکیب کنترل کننده PID با روش جدول بندی بهره و منطق فازی، علاوه بر حل مشکل پیچیدگی محاسبات زیاد در طراحی کنترل کننده، می‌توان به انطباق پذیری خوبی نیز دست پیدا کرد. برای این منظور، ابتدا معادلات دینامیکی سیستم پانتوگراف استخراج شده و یک کنترل کننده PID برای سیستم طراحی گردیده است. در گام بعد با استفاده از روش جدول بندی بهره، ضرایب کنترل کننده PID را تنظیم کرده و سپس با روش جدول بندی بهره فازی پارامترهای PID به صورت برخط به روز می‌شوند. در نهایت با انجام شبیه‌سازی، عملکرد کنترل کننده‌ها بر روی سیستم پانتوگراف با ملاحظات عملی بررسی شده است.

۲- معادلات دینامیکی سیستم پانتوگراف

پانتوگراف‌ها به دو دسته غیرفعال و فعال تقسیم‌بندی می‌شوند. پانتوگراف‌های غیرفعال دارای یک مجموعه فنر-دمپر می‌باشند و از هیچ عنصری جهت کنترل ارتفاع و نیروی تماسی استفاده نمی‌کنند. به این ترتیب ثابت نگه داشتن نیروی تماسی در این نوع از پانتوگراف‌ها ممکن نیست. پانتوگراف‌های فعال، علاوه بر دارا بودن مجموعه فنر-دمپر، دارای محرکی هستند که می‌توان به وسیله آن نیروی تماسی را کنترل نمود. اکثر پانتوگراف‌ها از سیلندرها یا پنوماتیکی برای تامین نیرو استفاده می‌کنند. این سیلندرها دارای ساختار ساده‌ای هستند و استفاده از آن‌ها راحت می‌باشد. همچنین، قابلیت خراب ایمن بودن آن‌ها باعث می‌شود که در موارد بروز خطا و افزایش بیش از حد نیرو، نیرو آزاد شود و به شبکه و سیستم آسیب وارد نشود (Shudong et al., 2015; YOKOYAMA et al., 2008). شکل (۱) یک سیستم پانتوگراف با شبکه بالاسری، شکل (۲) مدل یک سیستم پانتوگراف فعال و شکل (۳) یک پانتوگراف واقعی را نشان می‌دهد.

همچنین وجود بیش از حد نیروی تماس باعث پارگی سیم‌های برق می‌گردد و به این ترتیب نمی‌توان نیروی تماس را از یک حد مجاز افزایش داد (Bucca and Collina, 2015; YOKOYAMA et al., 2009). از طرفی، تغییرات نیروی تماسی منجر به تغییرات مقاومت تماس الکتریکی شده و به تبع آن منجر به تغییر شدت جریان الکتریکی جذب شده توسط پانتوگراف می‌گردد که در نهایت منجر به تغییر سرعت قطار می‌شود (Bucca and Collina, 2009). به این ترتیب، نگه داشتن نیروی تماسی بین پانتوگراف و شبکه برق در یک حد مطلوب و جلوگیری از نوسان زیاد آن بسیار مهم و حائز اهمیت می‌باشد.

در زمینه کنترل وضعیت و نیروی تماسی پانتوگراف کارهای زیادی صورت گرفته است. لین و همکاران در دو پژوهش متفاوت از روش‌های کنترل بهره با استفاده از تنظیم کننده خطی مرتبه دوم و کنترل بهره مقاوم استفاده کرده‌اند (Lin, Lin and Yang, 2007; Lin, Shieh and Liu, 2015). تکزرا به بررسی کنترل کننده‌های PID، H_2 و H_∞ برای سیستم پانتوگراف پرداخته است (Teixeira, 2007). گارگ و همکاران برای کنترل نیروی تماسی از کنترل کننده PID استفاده کرده و به وسیله توابع حساسیت، اثر پارامترهای کنترل کننده بر روی سیستم را مورد بررسی قرار داده‌اند (Garg et al., 2013). مکرانی و رشید با هدف طراحی کنترل مقاوم برای نیروی تماس بین پانتوگراف و شبکه بالاسری، ترکیبی از کنترل کننده‌های PID و مد لغزشی فازی را بکار گرفته‌اند (Mokrani and Rachid, 2013). هوانگ در سال ۲۰۰۴ و والترز در ۲۰۱۰ به طراحی کنترل کننده فازی با سیستم سوگنو پرداخته‌اند (Huang, 2010; Walters, 2004). آیدین و همکاران، با استفاده از تصاویر دریافتی از طریق دوربین نصب شده بر روی سقف قطار به صورت بلادرنگ و انجام پردازش تصویر، ارتفاع پانتوگراف را تشخیص داده و سپس برای کنترل ارتفاع از یک کنترل کننده PI استفاده کرده‌اند (Aydin-(et al.), 2013).

با توجه به متغیر بودن پارامترهای شبکه بالاسری، سیستم پانتوگراف دارای عدم قطعیت می‌باشد. بنابراین برای طراحی کنترل کننده، سه فاکتور سادگی، تطبیق‌پذیری و عملکرد مناسب مد نظر می‌باشند. کنترل کننده‌های مد لغزشی، H_2 و H_∞ دارای پیچیدگی محاسبات زیاد هستند. کنترل

رابطه‌ی (۱) نوشته می‌شوند (Huang, 2004). با در نظر گرفتن متغیرهای حالت به صورت $x_1 = x_h, x_2 = x_f, x_3 = \dot{x}_h, x_4 = \dot{x}_f$ مدل فضای حالت سیستم مطابق معادلات (۲) بدست خواهد آمد.

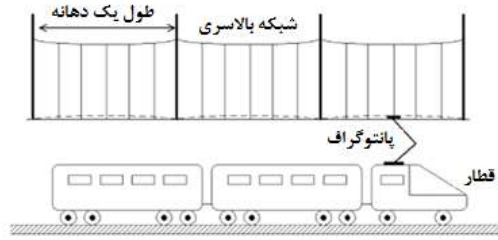
در معادلات (۱ و ۲)، b_{vf} دمپر سیستم تعلیق بین بدنه با کف، M_f وزن بدنه پانتوگراف و u_{up} سیلندر پنوماتیکی است که نیروی مورد نیاز را تولید می‌کند. b_{vh} و k_h دمپر و فنر سیستم تعلیق بین بدنه و راس پانتوگراف و M_h وزن راس پانتوگراف هستند. همچنین، x_h و x_f به ترتیب جابجایی‌های بدنه و راس پانتوگراف می‌باشند. k_s سختی فنر کفشک پانتوگراف و $k(t)$ سختی فنری است که شبکه بالاسری با آن مدل شده است (O'Connor et al., 1997; Huang, 2004). این سختی فنر ثابت نبوده و مقدار آن در طول یک دهانه (نشان داده شده در شکل (۱)) طبق رابطه (۳) تغییر می‌کند.

در معادله (۳)، k_{ave} ضریب سختی متوسط، v ثابت تغییر سختی در طول یک دهانه، V سرعت قطار، L طول یک دهانه و t زمان می‌باشند (Rachid, 2011; Ide et al., 2013). مقادیر عددی پارامترهای استفاده شده در معادلات (۱-۳) در جدول (۱) آمده است (O'Connor et al., 1997; Huang, 2004, Ide et al., 2013).

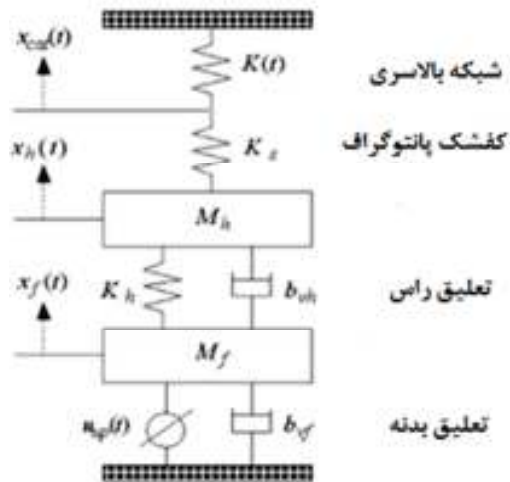
سیستم پانتوگراف باید به گونه‌ای عمل نماید که نیروی تماسی بین پانتوگراف و شبکه بالاسری تا حد امکان ثابت نگه داشته شود و از محدوده مجاز تجاوز نکند. در این مقاله، نیروی تماسی مطلوب بین پانتوگراف و خطوط شبکه ۱۰۰ نیوتون و حداکثر نیروی مجاز در سرعت ۱۷۰ کیلومتر بر ساعت ۱۴۰ نیوتون در نظر گرفته شده است (O'Connor, 1997). برای بررسی رفتار سیستم پانتوگراف، سیستم‌های حلقه باز و حلقه بسته در دو حالت شبیه سازی شده‌اند:

- ۱- سختی فنر شبکه بالاسری ثابت بوده و مقدار آن برابر k_{ave} می‌باشد.
- ۲- سختی فنر شبکه بالاسری با رابطه (۳) تغییر می‌کند.

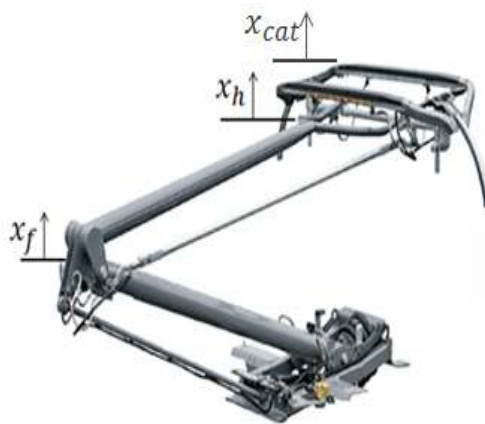
برای حالت اول، شکل (۴) نشان می‌دهد که در سیستم حلقه باز علی‌رغم ثابت شدن نیرو در ۱۰۰ نیوتون، نوسان زیاد بوده



شکل ۱. موقعیت پانتوگراف در سیستم تغذیه قطار (Huang, 2004)



شکل ۲. مدل یک پانتوگراف فعال (Huang, 2004)



شکل ۳. شکل واقعی یک پانتوگراف

با توجه به شکل (۳) معادلات دینامیکی پانتوگراف مطابق

$$\begin{cases} M_f \ddot{x}_f + b_{vh}(\dot{x}_f - \dot{x}_h) + k_h(x_f - x_h) = u_{up} - b_{vf} \dot{x}_f \\ M_h \ddot{x}_h + b_{vh}(\dot{x}_h - \dot{x}_f) + k_h(x_h - x_f) + k_s(x_h - x_{cat}) = 0 \\ -k_s x_h + (k_s + k(t))x_{cat} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M_h} \left(\frac{k_s^2}{k_s + k_{ave}} - (k_h + k_s) \right) & -\frac{b_{vh}}{M_h} & \frac{k_h}{M_h} & \frac{b_{vh}}{M_h} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{0}{M_f} & \frac{k_h}{M_f} & -\frac{k_h}{M_f} & -\frac{(b_{vh} + b_{vf})}{M_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{M_f} \end{bmatrix} u_{up} \quad (2)$$

$$y = \begin{bmatrix} \frac{k(t)}{(k_s + k(t))} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

برای حالت دوم، شکل (۵) نشان می‌دهد که در صورت وجود عدم قطعیت در سختی فنر شبکه بالاسری مطابق با شکل (۶)، سیستم حلقه باز دارای نوسان بسیار زیاد بوده و نیرو از حد مجاز فراتر رفته است. همچنین، سیستم حلقه بسته دارای نوسان و خطای زیاد در خروجی می‌باشد.

و همچنین نیرو از حد مجاز که ۱۴۰ نیوتون می‌باشد فراتر رفته است. در سیستم حلقه بسته هم در خروجی خطای بسیار زیادی وجود دارد و نوسانات نیز شدید می‌باشند.

$$k(t) = k_{ave} \left[1 + v \cos \left(\frac{2\pi V}{L} t \right) \right] \quad (3)$$

جدول ۱. پارامترهای معادلات (۳-۱) (O'connor (et al.), 1997; Huang, 2004; Ide (et al.), 2013)

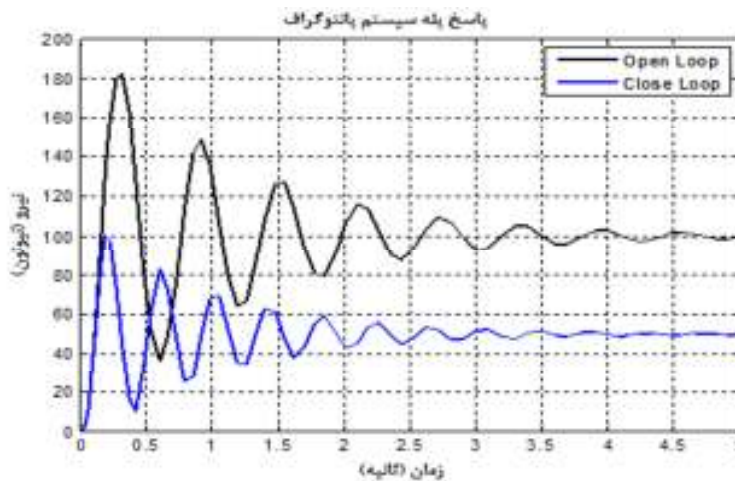
پارامتر	مقدار	واحد
M_h	9.1	kg
M_f	17.2	kg
k_h	7×10^3	N/m
b_{vh}	130	N.s/m
b_{vf}	30	N.s/m
k_s	82.3×10^3	N/m
k_{ave}	3.6×10^3	N/m
v	0.5	-
V	170	km/h
L	65	m

۳- طراحی کنترل کننده

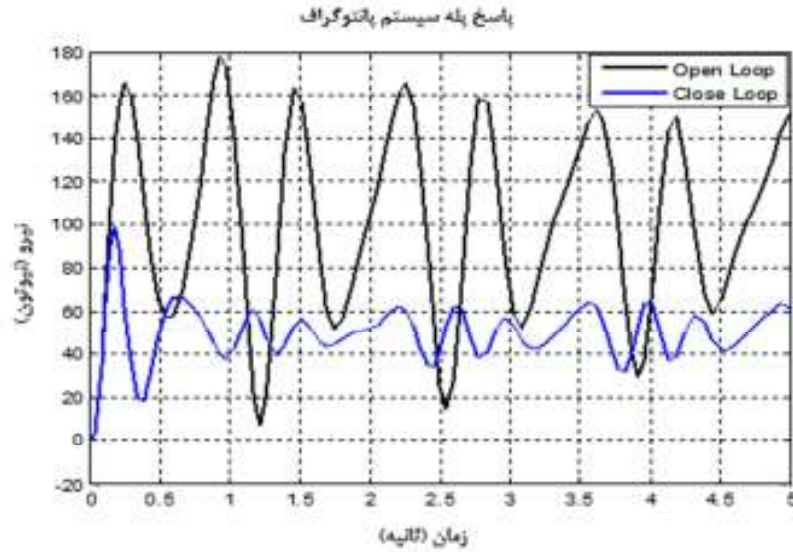
برای دستیابی به خروجی مطلوب، کاهش نوسانات و محدود کردن نیرو در حد مجاز در سیستم پانتوگراف، طراحی کنترل کننده الزامی می‌باشد. برای این منظور، ابتدا یک کنترل کننده PID طراحی شده و برای افزایش تطبیق‌پذیری سیستم به عدم قطعیت از روش جدول بندی بهره و سیستم فازی برای تنظیم ضرایب PID استفاده می‌گردد.

۳-۱- طراحی کنترل کننده PID

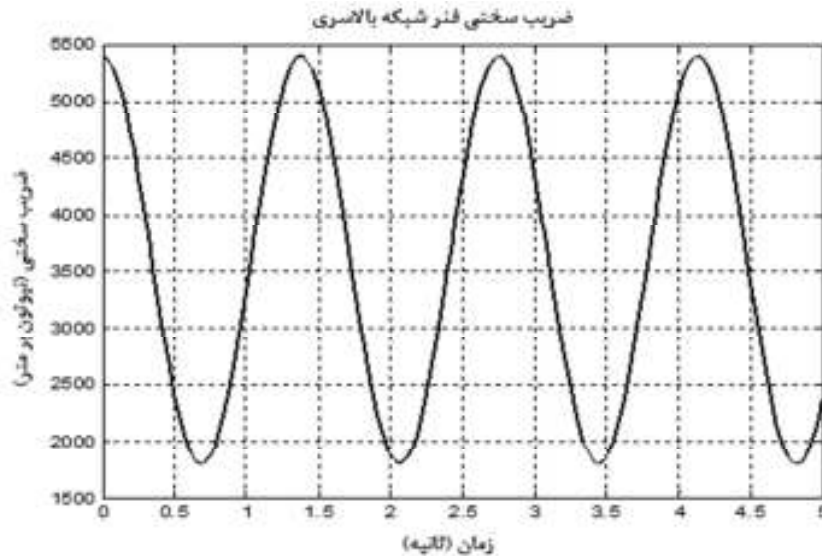
ساختار کنترل کننده PID به نحوی است که می‌توان با تنظیم مناسب پارامترهای آن به نوع و شکل پاسخ موردنظر دست



شکل ۴. پاسخ پله سیستم پانتوگراف حلقه باز و حلقه بسته بدون عدم قطعیت



شکل ۵. پاسخ پله سیستم پانتوگراف حلقه باز و حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت



شکل ۶. منحنی سختی فنر شبکه بالاسری

صورت رابطه‌ی (۴) است. با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادله (۴)، تابع تبدیل کنترل کننده PID به صورت معادله (۵) به دست می‌آید:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4)$$

$$G_c(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (5)$$

که در آن:

پیدا کرد. علاوه بر این، وجود روش‌های مختلف برای تنظیم پارامترهای این کنترل کننده و سادگی طراحی آن، باعث می‌شود که این کنترل کننده در فرآیندهای صنعتی مختلف مورد توجه قرار گیرد. یک کنترل کننده PID شامل سه بهره تناسبی، انتگرالی و مشتقی است. از بهره تناسبی برای ایجاد پایداری و تعیین سرعت پاسخ دهی، از بهره انتگرالی برای کاهش خطای حالت ماندگار و از بهره مشتقی برای جابه‌جایی مکان هندسی و آمادگی سیستم در برابر اغتشاشات استفاده می‌شود. معادله یک کنترل کننده PID معمولی به

سیستم را برعهده می‌گیرد. برای این منظور، ابتدا باید متغیرهای جدول بندی را بدست آورد. متغیر جدول بندی متغیری است که در اثر تغییر شرایط سیستم تغییر می‌کند و می‌تواند شامل سیگنال اندازه‌گیری، سیگنال کنترلی و یا یک سیگنال خارجی باشد (Åström and Hägglund, 1995). پس از تعیین متغیرهای جدول بندی مراحل زیر باید اجرا شوند (Wang and Crusca, 2002):

- تقسیم بندی متغیرهای جدولی به بازه‌های محدود در حوزه کاری سیستم
- انتخاب روش طراحی کنترل کننده
- طراحی کنترل کننده در نقطه میانگین هر بازه
- تشکیل جدول بهره

در این مقاله ضریب سختی فنر شبکه بالاسری $k(t)$ به عنوان متغیر جدولی انتخاب شده و به ورودی جدول بهره فرستاده می‌شود. سپس $k(t)$ را بازه بندی کرده و برای نقطه میانگین هر بازه یک کنترل کننده PID به روش زیگلر-نیکولز و روابط SO-OV طراحی می‌گردد. $k(t)$ با استفاده از رابطه (۲) و قانون هوک برای فنرها به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f(t) = k_{eq}(t) \cdot x_1(t) \quad (8)$$

$$k_{eq}(t) = \frac{k_s k(t)}{k_s + k(t)}$$

$$k(t) = \frac{f(t) \cdot k_s}{k_s x_1(t) - f(t)} \quad (9)$$

۳-۳- تنظیم ضرایب PID به روش جدول بندی بهره

فازی

با اجرای روش جدول بندی بهره برای تنظیم ضرایب PID می‌توان تا حد مطلوبی سیستم را تطبیق پذیر نمود، اما همانطور که در رابطه (۹) مشخص است، برای اندازه‌گیری $k(t)$ لازم است نیروی خروجی و جابجایی راس پانتوگراف (x_1) مشخص باشند. بنابراین لازم است علاوه بر سنسور نیرو، یک سنسور دیگر به سیستم اضافه نمود و یا یک تخمین گر حالت طراحی کرد. همچنین ممکن است شرایطی برای سیستم پیش آید که در جدول بهره‌ها در نظر گرفته نشده باشند. این شرایط ناخواسته می‌تواند تطبیق پذیری سیستم را کاهش دهند. این معایب را می‌توان با استفاده از یک سیستم فازی رفع نمود (Åström and Hägglund, 1995).

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}, \quad K_d = K_p T_d \quad (6)$$

در معادلات فوق، K_p بهره تناسبی، T_i ثابت زمانی انتگرالی، K_i بهره انتگرالی، T_d ثابت زمانی مشتقی، K_d بهره مشتقی، $e(t)$ سیگنال خطا و $u(t)$ سیگنال کنترلی هستند.

برای تنظیم پارمترهای کنترل کننده PID روش‌های متفاوتی وجود دارد که از جمله آن‌ها، روش زیگلر-نیکولز، کوهن-کن، جایدهی قطب و ... می‌باشند. در این مقاله از روش زیگلر-نیکولز برای تنظیم اولیه پارامترها استفاده شده است. این روش در سال ۱۹۴۲ توسط زیگلر و نیکولز پیشنهاد گردید و هنوز هم به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت اصلی این روش، عدم نیاز آن به داشتن مدل ریاضی سیستم می‌باشد. در این روش ابتدا فیدبک سیستم را بسته و به جای کنترل کننده از یک بهره استفاده می‌گردد. سپس به سیستم ورودی پله داده (در اینجا با دامنه ۱۰۰) و مقدار بهره را آن قدر تغییر داده تا پاسخ به صورت نوسانی کامل درآید. مقدار بهره‌ای را که پاسخ به صورت نوسانی کامل در می‌آید K_u و دوره تناوب نوسان را T_u می‌نامند (Åström and Hägglund, 1995). با مشخص شدن این دو پارامتر، می‌توان ضرایب کنترل کننده PID را از روابط پیشنهادی مختلف بدست آورد. در این مقاله از روابط SO-OV استفاده می‌شود، چرا که لازم است علاوه بر سرعت پاسخ بالا، فراجش کمی در پاسخ وجود داشته باشد (McCormack and Godfrey, 1998). ضرایب کنترل کننده PID از روش زیگلر-نیکولز و روابط SO-OV به صورت رابطه (۷) می‌باشد.

$$K_p = 0.33K_u, \quad T_i = 0.5T_u, \quad T_d = 0.33T_u \quad (7)$$

۳-۲- تنظیم ضرایب PID به روش جدول بندی بهره

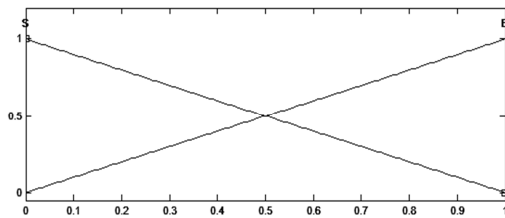
یکی از روش‌های کنترل تطبیقی، روش جدول بندی بهره می‌باشد. این روش برای سیستم‌های غیرخطی، متغیر با زمان و تحت شرایط کاری متغیر مناسب است. با توجه به وجود عدم قطعیت در سیستم پانتوگراف، جهت افزایش تطبیق پذیری سیستم و دستیابی به پاسخ مناسب‌تر، از روش جدول بندی بهره استفاده می‌شود. در این روش با توجه به شرایط کاری ممکن برای سیستم، چند کنترل کننده طراحی می‌گردد و براساس شرایط پیش آمده یک کنترل کننده وظیفه کنترل

جدول (۲) آورده شده است.

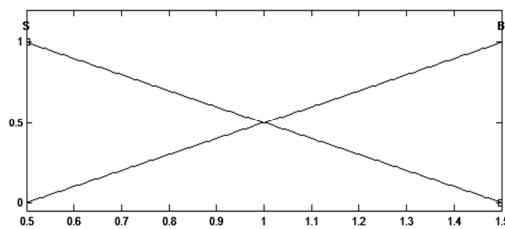
در مورد سیستم فازی، مقادیر حداقل و حداکثر ضرایب تناسبی و مشتقی با توجه به حداکثر و حداقل این دو پارامتر در جدول (۲) انتخاب شده‌اند:

$$\begin{cases} K_p^{min} = 0.5, & K_p^{max} = 1.3 \\ K_d^{min} = 0.065, & K_d^{max} = 0.17 \end{cases} \quad (12)$$

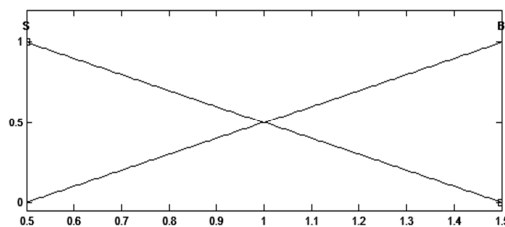
مجموعه‌های فازی ورودی و خروجی به صورت شکل‌های (۸-۱۰) تعریف شده‌اند. همچنین جداول بهره برای تشکیل پایگاه قواعد در جدول (۳) آورده شده است.



شکل ۸. توابع عضویت e و \dot{e} بعنوان ورودی سیستم فازی

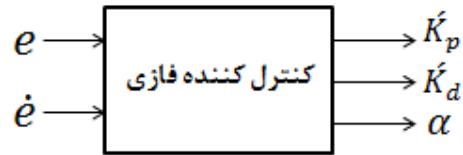


شکل ۹. توابع عضویت K_p و K_d بعنوان خروجی سیستم فازی



شکل ۱۰. توابع عضویت α بعنوان خروجی سیستم فازی

(1995). جهت کاهش محاسبات، سیستم فازی در نظر گرفته شده دارای موتور ممدانی حداقل، فازی‌گر تکین و فازی زدای میانگین مرکز می‌باشد (Wang, 1999). ورودی‌های کنترل کننده فازی، خطا (e) و مشتق خطا (\dot{e}) و خروجی‌ها K_p ، K_d و α می‌باشند که در شکل (۷) نشان داده شده است. لازم است برای ورودی‌ها و خروجی‌ها به تعداد مناسب مجموعه‌ی فازی تعیین شود و سپس با تعریف یک سری قواعد بین ورودی‌ها و خروجی ارتباط برقرار کرد.



شکل ۷. کنترل کننده فازی

در شکل (۷)، K_p نرمال شده، K_d نرمال شده، K_i از ضریبی که مطابق رابطه‌ی (۱۰) تعریف شده‌اند (Zhao, Tomixuka, and Isaka, 1992).

$$\begin{cases} \hat{K}_p = \frac{K_p - K_p^{min}}{K_p^{max} - K_p^{min}} \in [0,1] \\ \hat{K}_d = \frac{K_d - K_d^{min}}{K_d^{max} - K_d^{min}} \in [0,1] \\ \alpha = \frac{K_p^2}{K_i K_d} \end{cases} \quad (10)$$

۴- شبیه‌سازی و نتایج

برای انجام شبیه سازی، کنترل کننده‌های عنوان شده در بخش سه باید بر روی سیستم پانتوگراف اعمال شوند. ضرایب کنترل کننده PID به صورت زیر به دست آمده‌اند:

$$K_p = 0.85, \quad K_i = 6.54, \quad K_d = 0.073 \quad (11)$$

بهره‌های کنترل کننده PID در روش جدول بندی بهره در

جدول ۲. بهره‌های کنترل کننده PID در روش جدول بندی بهره

بازه‌ها	K_p	K_i	K_d
$k(t) \geq 4050$	0.5	6.05	0.065
$3900 \leq k(t) < 4050$	0.785	6.26	0.0714
$3300 \leq k(t) < 3900$	0.85	6.54	0.073
$2100 \leq k(t) < 3300$	1.07	7	0.107
$k(t) < 2100$	1.3	7.3	0.17

در شکل های (۱۱) و (۱۳) تفاوت هایی در نحوه عملکرد کنترل کننده ها دیده می شود که در جدول (۴) مشخص شده اند.

از جدول (۴) می توان نتیجه گرفت که در حالت کلی کنترل کننده PID با جدول بهره از PID معمولی و کنترل کننده PID با جدول بهره فازی از هر دوی آنها عملکرد بهتری داشته اند.

جدول ۳. جدول بهره های K_p ، K_d و α

$e \setminus \dot{e}$	NB	N	Z	P	PB
NB	S	S	S	S	S
N	S	S	B	S	S
Z	S	B	B	B	S
P	S	S	B	S	S
PB	S	S	S	S	S

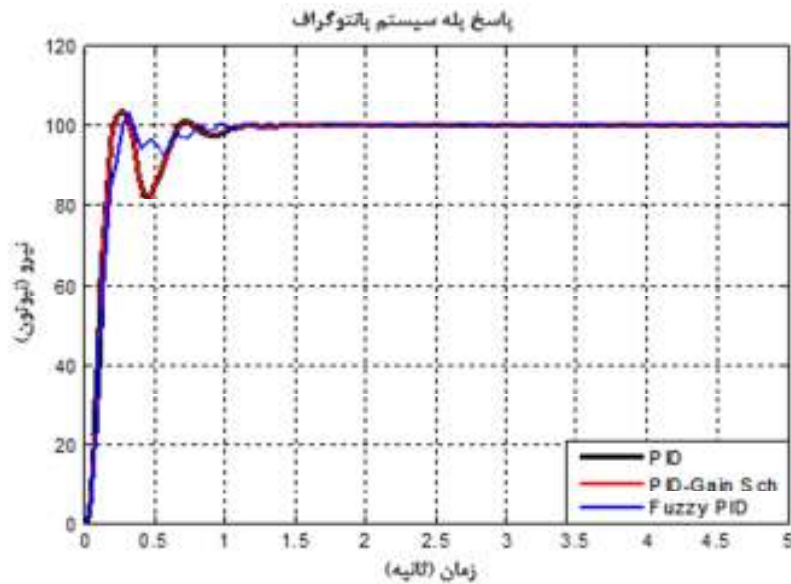
از بهره های های ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱۲۵ برای نرمالیزه کردن خطا و مشتق خطا استفاده شده است تا این سیگنال ها در بازه (۱۰-۱) قرار گیرند.

شبیه سازی ها به ازای ورودی پله با دامنه ۱۰۰ (نیروی مطلوب) و در دو حالت بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت برای فنر شبکه بالاسری و با در نظر گرفتن آن، انجام شده است.

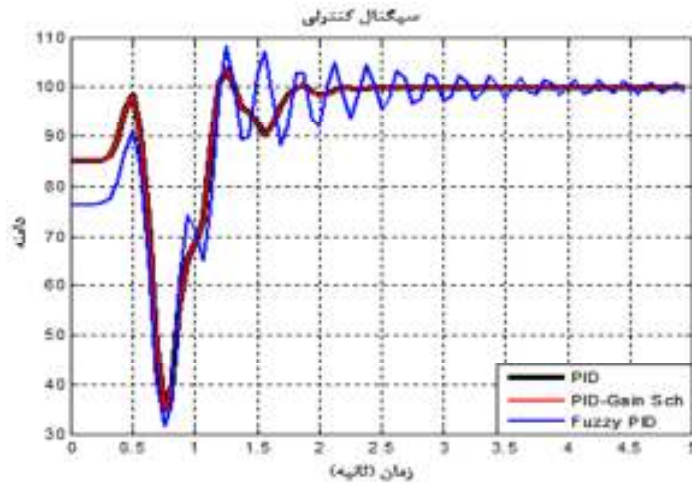
شکل (۱۱) نشان می دهد که هر سه کنترل کننده توانسته اند به خوبی نیرو را در ۱۰۰ نیوتون تنظیم کرده و حداکثر نیرو از ۱۴۰ نیوتون فراتر نرفته است. همچنین باتوجه به شکل (۱۲)، سیگنال کنترلی دارای تغییرات ناگهانی نمی باشد. در شکل (۱۳) ملاحظه می شود که عدم قطعیت در ضریب سختی شبکه بالاسری باعث شده که نیرو در حضور هر سه کنترل کننده حول ۱۰۰ نیوتون نوسان داشته باشد، اما این نوسانات از حداکثر مقدار مجاز فراتر نرفته است. شکل (۱۴) نیز نشان می دهد که سیگنال کنترلی دارای تغییرات ناگهانی نمی باشد.

۵- نتیجه گیری

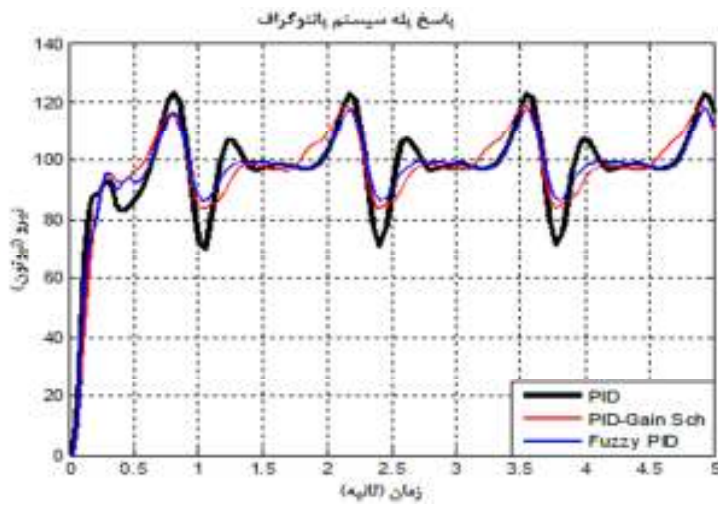
در این مقاله، ابتدا معادلات دینامیکی سیستم پانتوگراف بیان شد و یک کنترل کننده PID برای سیستم طراحی گردید. سپس با استفاده از روش جدول بندی بهره، ضرایب کنترل کننده PID را تنظیم و در نهایت با روش جدول بندی بهره فازی پارامترهای PID به صورت برخط به روز شدند. عملکرد کنترل کننده ها بر روی سیستم پانتوگراف با در نظر گرفتن ملاحظات عملی مورد شبیه سازی قرار گرفت. مطابق نتایج بدست آمده، هر سه کنترل کننده توانستند نیرو را در محدوده مجاز کنترل نمایند. با مقایسه بین کنترل کننده ها ملاحظه گردید که کنترل کننده PID با روش جدول بندی بهره فازی با کاهش زمان نشست و نوسانات و افزایش ثبات تقریبی در نیروی خروجی، نسبت به دو کنترل کننده دیگر عملکرد بهتری دارد.



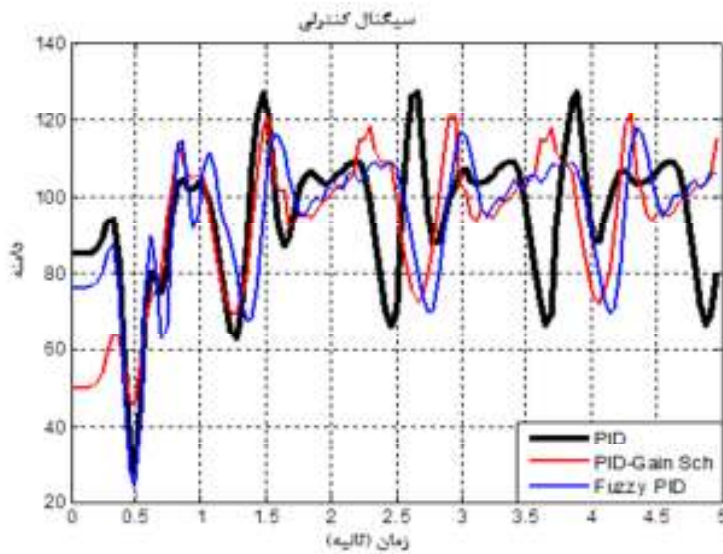
شکل ۱۱. پاسخ پله سیستم پانتوگراف بدون عدم قطعیت



شکل ۱۲. سیگنال‌های کنترلی بدون عدم قطعیت



شکل ۱۳. پاسخ پله سیستم پانتوگراف با در نظر گرفتن عدم قطعیت



شکل ۱۴. سیگنال‌های کنترلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت

جدول ۴. تفاوت‌های عملکرد کنترل کننده‌ها بر روی سیستم پانتوگراف

کنترل کننده	بدون عدم قطعیت		با عدم قطعیت	
	زمان نشست (%)	حداکثر تغییرات نیرو	حداکثر تغییرات نیرو	حداکثر زمان ثبات تقریبی نیرو
PID	1000 ms	21.2 N	52.8 N	390 ms
PID با جدول بهره	1000 ms	21.2 N	34.7 N	430 ms
PID با جدول بهره فازی	750 ms	9.9 N	30.3 N	700 ms

Catenary system”, 17th International Conference In System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, October 11-13, 2013, IEEE, pp. 268-273.

-Lin, Y. C., Lin, C. L., & Yang, C. C. (2007), “Robust active vibration control for rail vehicle pantograph. Vehicular Technology”, Journal of IEEE Transactions on Vehicular Technology, No. 56(4), pp. 1994-2004.

-Lin, Y. C., Shieh, N. C., & Liu, V. T. (2015), “Optimal control for rail vehicle pantograph systems with actuator delays”, Journal of IET Control Theory & Applications, No. 9(13), pp. 1917-1926.

-McCormack, A. S., & Godfrey, K. R. (1998), “Rule-based autotuning based on frequency domain identification”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, No. 6(1), pp. 43-61.

-Mokrani, N., & Rachid, A. (2013), “A robust control of contact force of pantograph-catenary for the high-speed train”, Control Conference (ECC) European, Zurich, July 17-19, 2013, IEEE, pp. 4568-4573.

-O’connor, D. N., Eppinger, S. D., Seering, W. P., & Wormley, D. N. (1997), “Active control of a high-speed pantograph”, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, No. 119(1), pp. 1-4.

-Rachid, A. (2011), “Pantograph catenary control and observation using the lmi approach”, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control (CDC-ECC), Orlando FL, December 12-15, IEEE, pp. 2287-2292.

۶- مراجع

-Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995), “Advanced PID control”, 2nd Edition, USA: Instrument Society of America.

-Aydin, I., Karakose, E., Karakose, M., Gencoglu, M. T., & Akin, E. (2013), “A new computer vision approach for active pantograph control”, IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), Albena, June 19-21, IEEE, pp. 1-5.

-Bucca, G., & Collina, A. (2009), “A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph-catenary system”, An International Journal on the Science and Technology of Friction, Wear, No. 266(1), pp. 46-59.

-Bucca, G., Collina, A., Manigrasso, R., Mapelli, F., & Tarsitano, D. (2011), “Analysis of electrical interferences related to the current collection quality in pantograph-catenary interaction”, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, No. 225(5), pp. 483-500.

-Garg, R., Mahajan, P., & Kumar, P. (2013), “Effect of controller parameters on pantograph-catenary system”, American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics, pp. 233-239.

-Huang, Y. J. (2004), “Discrete fuzzy variable structure control for pantograph position control”, Journal of Electrical Engineering, No. 86(3), pp. 171-177.

-Ide, C. K., Oлару, S., Rodriguez-Ayerbe, P., & Rachid, A. (2013), “A nonlinear state feedback control approach for a Pantograph-

- Wang, L. X. (1999), "A course in fuzzy systems", International Edition, USA: Prentice-Hall press.
- Wang, M., &Crusca, F. (2002), "Design and implementation of a gain scheduling controller for a water level control system", ISA transactions, No. 41(3), pp. 323-331.
- yokoyama, m., yokoyama, s., sakakibara, h., kobayashi, s., usuda, t., &iked, m. (2015), "Modeling and robust control of a high speed train pantograph", Mechanical Engineering Journal, No. 3, Vol. 2.
- Zhao, Z. Y., Tomizuka, M., &Isaka, S. (1992), "Fuzzy gain scheduling of PID controllers", First IEEE Conference on Control Applications, Dayton OH, September 13-16, IEEE, pp. 698-703.
- Shudong, W., Jingbo, G., &Guosheng, G. (2008), "Research of the active control for high-speed train pantograph", IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, Chengdu, September 21-24, IEEE, pp. 749-753.
- Teixeira, T. M. O. V. (2007), "Dynamics and Control of a High Speed Train Pantograph System", Instituto Superior Technico, Universidade Technica de Lisboa.
- Walters, S. (2010), "Simulation of fuzzy control applied to a railway pantograph-catenary system", 14th International Conference In Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems, Cardiff UK, September 8-10, Vol. 6277, Springer Berlin Heidelberg, pp. 322-330.