

پایدار سازی رفتار سیستم تعلیق الکترومغناطیسی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

عباس نجار خدابخش^(۱) - محمدرضا مرادیان^(۱) - لیلا نجار خدابخش^(۲) - نوید رضا ابجدی^(۳)

(۱) مربی - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجفآباد

(۲) کارشناس ارشد - دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یزد

(۳) استادیار - دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: زمستان ۱۳۹۰ تاریخ پذیرش: تابستان ۱۳۹۱

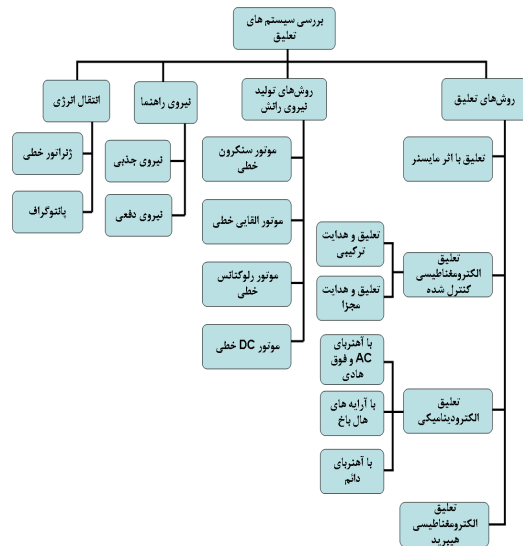
خلاصه: سیستم تعلیق الکترومغناطیسی که یکی از روش‌های مورد استفاده در قطارهای معلق مغناطیسی است دارای رفتاری ناپایدار و غیرخطی است. در این مقاله ابتدا مدل ریاضی سیستم تعلیق الکترومغناطیسی را به دست آورده و سپس آن را خطی کرده‌ایم. پس از آن جهت پایدار کردن رفتار سیستم از روش فیدبک حالت استفاده شده است که ضرایب کنترلی آن با روش ریکاتی به دست آمده است. همچنین جهت ایجاد رفتاری بهتر در سیستم تعلیق از روش هوشمند الگوریتم ژنتیک برای محاسبه ضرایب بهینه سیستم کمک گرفته‌ایم. شبیه‌سازی‌های انجام شده به کمک نرم‌افزار MATLAB نشان می‌دهد که استفاده از روش الگوریتم ژنتیک نسبت به حالتی که ضرایب فیدبک حالت با روش ریکاتی به دست آمده‌اند کارآمدتر بوده و سیستم به ازای تغییر مرجع فاصله هوایی و اعمال نیروی خارجی رفتار بهتری دارد و نوسانات شدیدی که موجب عدم رضایت مسافری به خاطر تکان‌های شدید در قسمت معلق می‌شود را حذف می‌کند.

کلمات کلیدی: قطار معلق مغناطیسی، تعلیق الکترومغناطیسی، الگوریتم ژنتیک.

۱- مقدمه

نمودار شکل (۱) دسته‌بندی نمود [۱].
تعلیق الکترومغناطیسی بر اساس نیروی جاذبه بین یک ریل فرومغناطیس ثابت و یک آهنربای الکتریکی ایجاد می‌شود. ریل فلزی در مسیر حرکت قرار داده شده و آهنرباهای الکتریکی بر روی وسیله نقلیه سوار است. این سیستم ذاتاً ناپایدار می‌باشد، اما با کنترل دینامیکی جریان و در نتیجه شار، وسیله می‌تواند به طور پایدار معلق شود [۲]. برای ایجاد فاصله هوایی یکنواخت لازم است فاصله هوایی کنترل شود. تعلیق الکترومغناطیسی به طور تکنیکی ساده‌تر از روش‌های دیگر می‌باشد و قادر است که در سرعت‌های کم یا صفر تعلیق ایجاد کند [۱]. روش‌های کنترلی مختلفی برای بهبود رفتار تعلیق الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش کنترل مد لغزشی [۳]، تعیین ضرایب PID به کمک روش PSO [۴]، کنترل غیرخطی [۵]، تکنیک‌های محاسبه حساسیت نظیر شبکه‌های عصبی [۶] و کنترل منطق فازی [۷] اشاره کرد. در [۴] برای محاسبه ضرایب کنترلی PID سه تابع Fitness لحاظ شده است که هر کدام به

سیستم معلق مغناطیسی ناشی از نیروی عکس‌العمل متقابل دو میدان مغناطیسی است که براساس خاصیت جذبی یا دفعی تولید شده و باعث ایجاد تعلیق می‌شود. سیستم حمل و نقل معلق مغناطیسی از میدان‌های مغناطیسی جهت تولید نیروهای بالابرنده (تعلیق)، پیشران و راهنما استفاده می‌کند. در این تکنولوژی چون نیروها بدون تماس فیزیکی تولید می‌شوند، سرعت‌های تا 500 کیلومتر بر ساعت قابل دستیابی است. با توجه به توانایی این سیستم در سرعت‌های زیاد، شتاب زیاد و گذر از شیب‌های تند، قابلیت رقابت با سیستم حمل و نقل با مسیر کوتاه و حتی سیستم حمل و نقل هوایی را دارد. عدم وجود تماس در این سیستم هزینه نگهداری مسیر را به حداقل می‌رساند. مصرف انرژی وسایل معلق مغناطیسی نسبتاً کم بوده و آلودگی کمتری در مقایسه با دیگر وسائل حمل و نقل دارند. براساس مرور کلیه مطالعات صورت گرفته در خصوص سیستم‌های معلق مغناطیسی به نظر می‌رسد می‌توان مطالعات این سیستم‌ها را به صورت



شکل (۱): دسته بندی سیستم های معلق مغناطیسی [۱].

Fig. (1): Classification of magnetic suspension system [1]

۲- معرفی مدل سیستم تعلیق مورد بررسی

شکل (۲) شماتیک قطار معلق مغناطیسی را نشان می‌دهد. ما از این ساختار به عنوان مدل اصلی جهت بررسی رفتار سیستم معلق مغناطیسی استفاده می‌کنیم. بخشی از سیستم که باعث ایجاد تعلیق الکترومغناطیسی می‌شود در شکل (۳) نشان داده شده است.

در این سیستم:

Z_g طول فاصله هوایی بین ریل و بدنه معلق شده قطار است.

Z_s فاصله بین ریل و محلی است که ریل روی آن نصب شده است.

Z_m فاصله بین قسمت معلق شده قطار و محلی است که ریل روی آن نصب شده است.

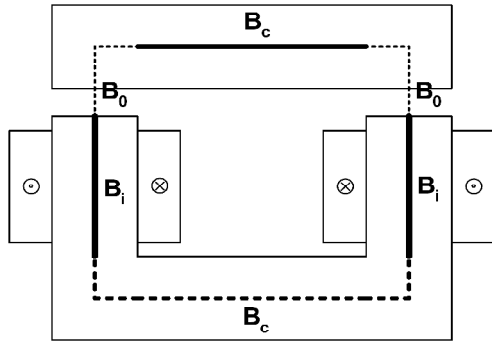
mg وزن کل قسمت معلق شده می‌باشد که برابر مجموع کل باری و مسافر است که باید معلق شود.

F_n معادل نیرویی است که بایستی با استفاده از سیم پیچ تولید شود تا تعلیق به وجود آید.

V ولتاژ خروجی چاپر است که باید سیم پیچ اصلی را تغذیه کند.

مطابق شکل (۳) در این سیستم ابتدا فاصله هوایی مرجع با فاصله هوایی سیستم مقایسه شده و از طریق بلوک کنترلی، مرجع ولتاژ تعیین می‌شود و با استفاده از یک چاپر ولتاژ مورد نیاز جهت تغذیه سیم پیچ تامین می‌گردد. سیستم شامل یک اولیه (سیم پیچی و هسته آهنی)، یک ثانویه، منبع تغذیه DC و بلوک کنترلی و سنسورها می‌باشد. سنسورها برای اندازه‌گیری شتاب عمودی اولیه و طول فاصله هوایی استفاده می‌شوند.

یک PSO احتیاج دارند که ضرایب مورد نیاز برای اجرای PSO بسیار زیاد می‌باشد. همچنین سیستم کنترلی به یک پردازشگر لحظه‌ای با سرعت بالا احتیاج دارد تا بتواند به صورت زمان واقعی ضرایب کنترلی را تعیین کند و در نهایت با توجه به اینکه سیستم تعلیق مورد بررسی ابعاد کوچکی دارد، سیستم کنترلی دارای دینامیک کندیمی بوده و زمان زیادی را برای پایدار کردن سیستم لازم دارد. در [۵] از یک رویکرد استفاده شده استفاده شده است که بار معلق را در روش خطی سازی با فیدبک اعمال کند تا بتواند عملکرد منسجمی را به وجود آورد در غیر این صورت نمی‌تواند یک کنترل جامعی را با روش خطی سازی با فیدبک ایجاد کند. همچنین جهت تولید ولتاژ مورد نیاز در سیستم به پارامترهای سیستم نیاز است. تاکنون از روش الگوریتم ژنتیک برای تعیین ضرایب کنترلی استفاده نشده است. در این مقاله ابتدا مدل ریاضی سیستم تعلیق الکترومغناطیسی را به دست آورده و سپس آن را حول نقطه کار خطی کرده‌ایم. پس از آن جهت پایدار کردن رفتار سیستم از روش فیدبک حالت استفاده شده است که ضرایب کنترلی آن با روش ریکاتی به دست آمده است. همچنین جهت ایجاد رفتاری بهتر در سیستم تعلیق از روش هوشمند الگوریتم ژنتیک برای محاسبه ضرایب بهینه روش فیدبک حالت کمک گرفته‌ایم که در این روش مدل خطی شده سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌های انجام شده به کمک نرم‌افزار MATLAB نشان می‌دهد که استفاده از روش الگوریتم ژنتیک نسبت به حالتی که ضرایب فیدبک حالت با روش ریکاتی به دست آمده‌اند کارآمدتر بوده و سیستم به ازای تغییر مرجع فاصله هوایی و اعمال نیروی خارجی رفتار بهتری دارد و نوسانات شدیدی که موجب عدم رضایت مسافری به خاطر تکان‌های شدید در قسمت معلق می‌شود را حذف می‌کند. در صورتی که بخواهیم سیستم را به صورت عملی پیاده کنیم ابتدا باید ضرایب سیستم کنترلی محاسبه شوند که این ضرایب بایستی به کمک روش ریکاتی و نیز الگوریتم ژنتیک به صورت *offline* از روی شبیه‌سازی‌ها محاسبه شده و در سیستم کنترلی واقعی مورد استفاده قرار گیرند.



شکل (۵): مسیر میدان مغناطیسی در سیستم تعلیق الکترومغناطیسی.
Fig. (5): Path of magnetic field

با استفاده از $[\lambda]$ می‌توان میدان مغناطیسی در فاصله هوایی را به صورت زیر بیان نمود:

$$B_y = \begin{cases} B_0, & 0 \leq y \leq \frac{b_i}{2} \\ B_0 e^{-2(y-\frac{b_i}{2})/g_0}, & y > \frac{b_i}{2} \end{cases} \quad (1)$$

و نیز چگالی شار در هسته می‌شود:

$$B_{cm} = B_0 \left[1 + \frac{1}{b_i/2} \int_{\frac{b_i}{2}}^{\infty} e^{-2(y-\frac{b_i}{2})/g_0} dy \right] \quad (2)$$

که حاصل آن برابر است با:

$$B_{cm} = B_0 \left[1 + \frac{g_0}{2} \right] \quad (3)$$

به کمک قانون آمپر برای مسیر شامل شار نشتی حداکثر چگالی شار نشتی عبارتست از:

$$B_{max1} = \frac{\mu_0 NI}{b} \quad (4)$$

اگر فرض شود که با دور شدن از هسته میدان صفر می‌شود در این صورت میانگین شار هسته اولیه در قسمت افقی می‌شود:

$$B_i = B_{cm} + \frac{B_{max1}}{2} \quad (5)$$

با نوشتن قانون آمپر در مسیر اصلی هسته اولیه، فاصله‌های هوایی و هسته ثانویه خواهیم داشت:

$$\frac{B_i}{\mu} b + \frac{B_{cm}}{\mu} (b + 2h + 2b_i) + \frac{B_0}{\mu_0} 2g_0 + \frac{B_0}{\mu} 2b_i = NI_f \quad (6)$$

در رابطه فوق B_0 و μ مجهولند که می‌توان μ را برحسب B_i جایگزین کنیم و پس از حل آن محاسبه شود. با جایگذاری روابط قبل در معادله بالا و پس از ساده سازی داریم:

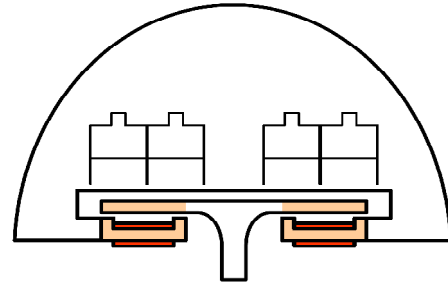
$$B_0 = \frac{\mu_0 NI_f}{1 + \frac{b+h+2b_i}{g_0} \frac{\mu_0}{\mu(B_i)}} \quad (7)$$

اگر هسته مغناطیسی ایده‌آل فرض شود در این صورت $\mu = \infty$

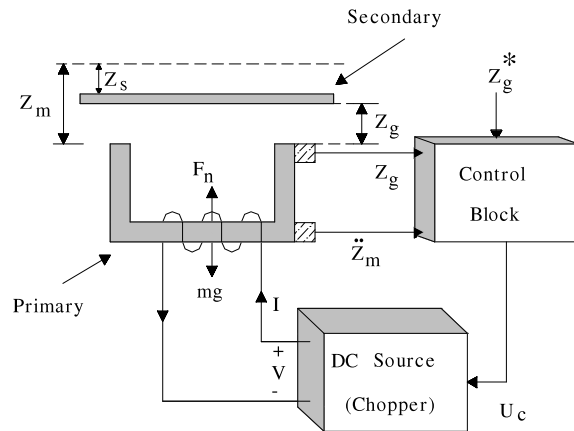
$$I_f = \frac{2g}{\mu_0 N} B_y \quad (8)$$

$$d\lambda = NB_y L dy \quad (9)$$

(۵۷)



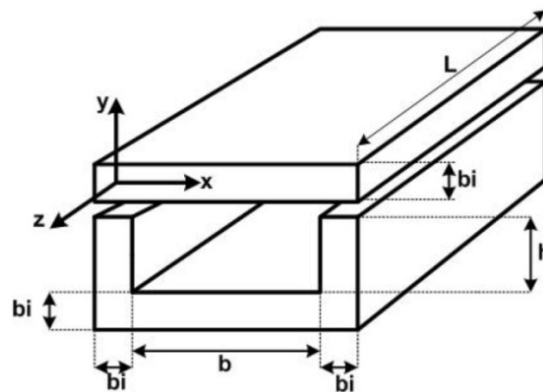
شکل (۲): شماتیک قطار معلق مغناطیسی.
Fig. (2): Schematic of magnetic suspension train



شکل (۳): شماتیک سیستم تعلیق الکترومغناطیسی.
Fig. (3): Schematic of Electromagnetic levitation system

۲-۱- معادلات حاکم بر رفتار سیستم

سطح مقطع و ابعاد قسمتهای مختلف هسته مورد استفاده در سیستم تعلیق الکترومغناطیسی مطابق شکل (۴) می‌باشد. با توجه به این شکل می‌توان مقدار میدان مغناطیسی که در نقاط مختلف مطابق شکل (۵) به وجود می‌آید را به دست آورد.



شکل (۴): ابعاد قسمتهای مختلف هسته در سیستم تعلیق الکترومغناطیسی.
Fig. (4): The core size of the electromagnetic suspension system

و با جایگذاری در معادله کوانترژی داریم:

$$W'_m = \frac{2gL}{\mu_0} \int_0^{\infty} B_y^2 dy \quad (10)$$

مشتق گیری از رابطه کوانترژی بر حسب جابجایی فاصله هوایی داریم:

$$F = \frac{\delta W'_m}{\delta g} = \frac{2L}{\mu_0} \int_0^{\infty} B_y^2 dy \quad (11)$$

با جایگذاری B_y از رابطه (۱) داریم:

$$F = \frac{LB_0^2 b_i}{\mu_0} \left(1 + \frac{g_0}{2b_i} \right) \quad (12)$$

در مقایسه با نیروی جاذبه به دست آمده از مدل ساده، مقدار خطای مدل ساده قابل محاسبه است که برابر $\frac{g_0}{2b_i}$ می باشد. با جایگذاری رابطه ساده شده (۷) در (۱۲) مقدار نیروی عمودی با استفاده از مدل ساده با در نظر گرفتن مقدار خطای جزئی با توجه به شرایط مسئله قابل محاسبه می باشد. در این صورت مقدار نیروی عمودی در این سیستم به صورت زیر محاسبه می شود.

$$F_n = \alpha \left(\frac{i}{Z_g} \right)^2 \quad (13)$$

که α' به مشخصات سیستم وابسته می باشد و برابر است با:

$$\alpha' = \mu_0 N^2 b_i L \quad (14)$$

و i جریان عبوری از سیم پیچ می باشد.

۲-۲- خطی سازی و بلوک دیاگرام مدل

سیستم تعلیق الکترومغناطیسی مانند بسیاری دیگر از فرآیندهای صنعتی رفتار غیرخطی دارد. خطی سازی یک سیستم حول نقطه کار موجب ایجاد رفتار خطی برای یک سیستم در حول نقطه کارش می شود. در این صورت می توان به کمک کنترل کننده های خطی فرآیندهای پیچیده غیرخطی را در نقاط کار با موفقیت کنترل کرد. با استفاده از خطی سازی رابطه نیروی تولیدی در سیستم تعلیق الکترومغناطیسی حول نقطه کار داریم [۹]:

$$\Delta F_n = \frac{\partial F_n}{\partial i} \Big|_{I_n, Z_{g0}} \Delta i + \frac{\partial F_n}{\partial Z_g} \Big|_{I_n, Z_{g0}} \Delta Z_g \quad (15)$$

که در نهایت خواهیم داشت:

$$F_n = \alpha (i - \beta Z_g) \quad (16)$$

در این رابطه تعاریف زیر وجود دارد:

$$\alpha = \frac{2\alpha' I_n}{Z_{g0}^2} \dots \beta = \frac{I_n}{Z_{g0}} \dots L_\sigma = L_0 - \frac{L_p}{Z_g}$$

که L_σ و L_p به ترتیب اندوکتانس نشتی و ثابت سیم پیچی است.

همچنین معادله الکتریکی با توجه به مدار سیم پیچی به صورت زیر است:

$$\begin{cases} V = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \\ \lambda = L_0 i \end{cases} \quad (17)$$

در این معادله R مقاومت سیم پیچ و λ شار دور می باشد و

$$\lambda = L_0 i = \left(L_\sigma + \frac{L_p}{Z_g} \right) i \quad (18)$$

$$\Delta \lambda = \frac{\partial \lambda}{\partial i} \Big|_{I_n, Z_{g0}} \Delta i + \frac{\partial \lambda}{\partial Z_g} \Big|_{I_n, Z_{g0}} \Delta Z_g \quad (19)$$

لذا تبدیل لاپلاس معادله الکتریکی خطی شده برابر است با:

$$V = (R + L_\sigma s) i + \frac{L_p}{Z_{g0}} (i - \beta Z_g) s \quad (20)$$

معادله مکانیکی که دینامیک مدل را بیان می کند عبارتست از:

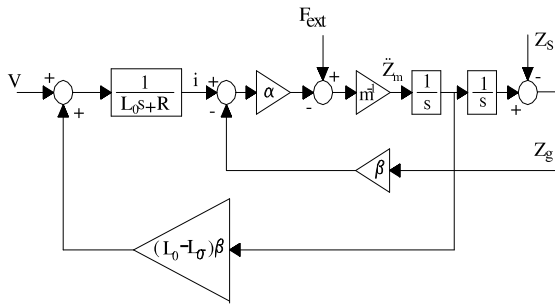
$$m \frac{d^2 Z_m}{dt^2} mg + F_{ext} + F_n \quad (21)$$

که در آن m جرم جسم معلق، g شتاب جاذبه، F_{ext} نیروی خارجی اعمالی به قسمت معلق شده بوده و F_n نیروی تعلیق تولیدی است.

معادلات خطی شده سیستم در حوزه لاپلاس [۱۰] به صورت زیر می باشد:

$$ms^2 Z_m = F_{ext} - F_n \quad (22)$$

با سه معادله خطی شده (۱۶)، (۲۰) و (۲۲) می توان بلوک دیاگرام سیستم را مطابق شکل (۶) رسم نمود.



شکل (۶): بلوک دیاگرام مدل خطی شده سیستم تعلیق الکترومغناطیسی.
Fig. (6): Block diagram of linear electromagnetic suspension system

۳-۲- معادلات حالت سیستم

معادلات حالت سیستم حلقه باز به صورت زیر می باشد:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (23)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (24)$$

که در آن:

$$x(t) = [Z_g(t) \quad \dot{Z}_m(t) \quad \ddot{Z}_m(t)]^T \quad (25)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{\alpha\beta}{m} & \frac{\alpha\beta - \alpha/L_0}{m} & \frac{L_0}{R} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (۳۲)$$

Q و R را به صورت زیر در نظر می‌گیریم که ماتریسها به صورت قطری می‌باشند:

$$Q = [c^2] \quad (۳۳)$$

$$R^T = [a^2 \ 0 \ b^2] \quad (۳۴)$$

رابطه بهینه ما به صورت زیر خواهد بود:

$$\tau = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (a^2 Z_g^2(t) + b^2 \dot{Z}_m^2(t)) dt \quad (۳۵)$$

a, b و c با توجه به اهمیت هر قسمت مشخص می‌شود [۹]. با توجه به مقادیر داده شده در قسمت ضمیمه و با استفاده از جعبه ابزارهای نرم-افزار متلب بردار K به صورت زیر خواهد بود:

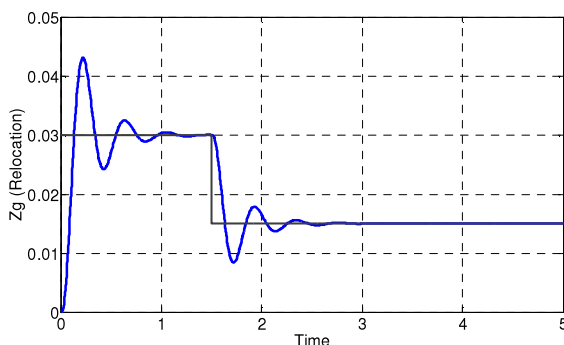
$$k = [-59615 \ -4080 \ -52]$$

که در این صورت ریشه‌های معادله مشخص برابر خواهد شد با: $\{-79.3887, -39.3083 + 26.3823i, -39.3083 - 26.3823i\}$ که همه این مقادیر در سمت چپ محور قرار می‌گیرند و پایداری سیستم در این صورت تضمین می‌شود.

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی فیدبک حالت

از روی شکل (۸) می‌توان دریافت که فاصله هوایی سیستم، فاصله هوایی مرجع را دنبال می‌کند. در این شکل مرجع فاصله هوایی در لحظه ۱.۵ ثانیه از مقدار مرجع سه سانتیمتر به یک و نیم سانتیمتر کاهش می‌یابد و سیستم کنترلی با عبور از حالت گذرا خود را با مقدار مرجع تطبیق می‌دهد.

در صورتی که مقادیر Q و R در تابع بهینه تغییر داده شوند رفتار سیستم مطابق شکل‌های (۹) و (۱۰) خواهد بود. افزایش ضریب Q معرف بهتر عمل کردن مسئله تعقیب در شبیه‌سازی است و کاهش ضریب R نیز عملکرد بهتری روی کنترل فاصله هوایی دارد. اما تغییر این مقادیر به طور نامناسب موجب نوسانی شدن و در نهایت ناپایدار شدن سیستم می‌شود.



شکل (۸): تغییرات فاصله هوایی به همراه مقدار مرجع
Fig. (8): Air gap changes with reference value

$$B^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\alpha \\ & & mL_0 \end{bmatrix} \quad (۲۷)$$

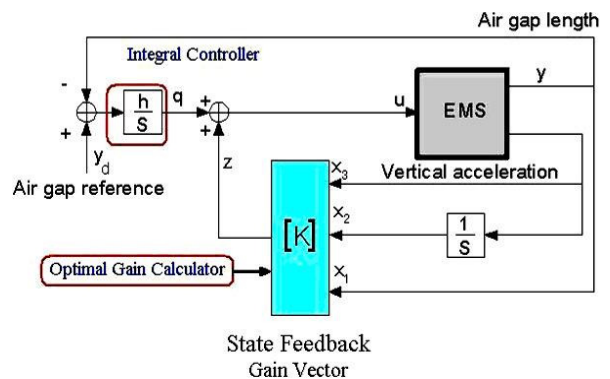
$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۲۸)$$

۲-۴- بررسی رفتار سیستم حلقه باز

با استفاده از معادلات حالت و محاسبه مقادیر ویژه ماتریس A می‌توان رفتار سیستم حلقه باز فوق را مورد بررسی قرار داد. در صورتی که مقادیر پارامتری با اعداد جدول (۱) جایگذاری شوند در این صورت مقادیر ویژه ماتریس A برابر خواهند بود با: 63.5179, -1.0010 و -62.4180. با توجه به مقادیر ویژه، مشخص می‌شود که سیستم حلقه باز دارای یک قطب در سمت راست می‌باشد که باعث ناپایداری سیستم می‌شود.

۳- استفاده از روش فیدبک حالت

برای ایجاد پایداری در این سیستم و داشتن پاسخ حالت دائم بهینه از کنترل بهینه بر اساس فیدبک حالت استفاده می‌کنیم. سیستم کنترل پیشنهادی در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷): سیستم کنترل پیشنهادی
Fig. (7): The proposed control system

این سیستم شامل سه بهره فیدبک حالت و یک ضریب برای کنترلر انتگرال گیر برای حذف خطای حالت دائم می‌باشد. فیدبک حالت مورد نظر به صورت زیر انتخاب می‌شود:

$$z(t) = -Kx(t) \quad (۲۹)$$

این سیگنال باید به گونه‌ای عمل کند که عملکرد تابع زیر را حداقل نماید:

$$\tau = \int_0^{\infty} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)) dt \quad (۳۰)$$

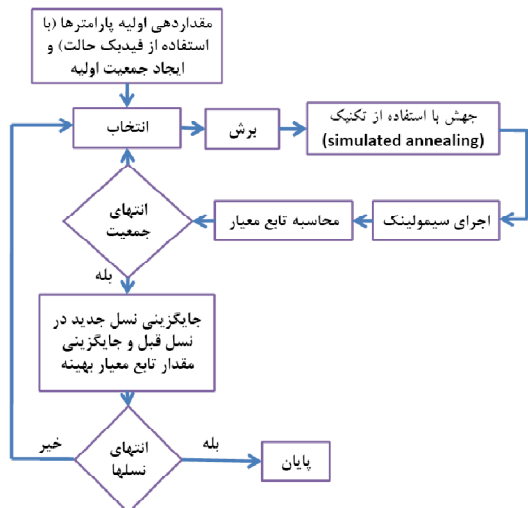
Q و R ماتریسهای معین مثبت یا نیمه معین مثبت می‌باشند. در صورتی که پایداری سیستم حلقه بسته حاصل شود و با مینیمم‌سازی رابطه (۳۰) بردار بهره بهینه به صورت زیر می‌باشد:

$$K = R^{-1}B^T P \quad (۳۱)$$

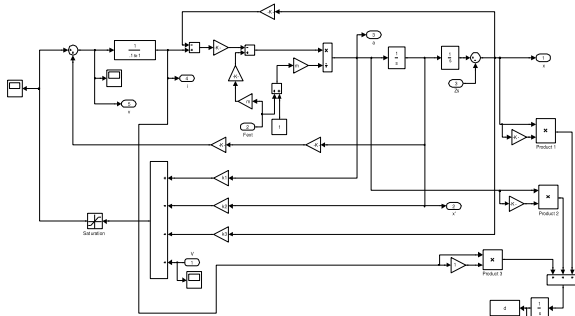
ماتریس P با حل معادله ریکاتی زیر به دست می‌آید:

۴- بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از روشهای بهینه‌سازی است که در آن از تکامل و توارث موجودات زنده الهام گرفته شده است و به کمک روشهای ریاضی و کامپیوتری بر قدرت آن افزوده می‌شود. این الگوریتم که از الگوریتمهای جستجوی تصادفی تلقی می‌شود، دارای این مزیت است که به جای اینکه از یک نقطه اولیه شروع به جستجو نماید، یک جمعیت از نقاط فضای جستجو را به عنوان فرض اولیه برای شروع در نظر می‌گیرد و با عملگرهای ژنتیکی سعی در بهبود نسلهای بعدی دارد. به هر متغیر مستقل یک ژن می‌گویند که به طور مستقیم استفاده می‌شود یا اینکه از مقدار رمزگذاری شده‌ای که مبین آن متغیر مستقل باشد استفاده می‌شود. در اینجا هر ژن بیانگر یکی از پارامترهای کنترلی است. فلوجارت الگوریتم ژنتیک استفاده شده برای به دست آوردن ضرایب بهینه سیستم کنترلی با فیدبک حالت در شکل (۱۲) دیده می‌شود. بلوک دیاگرام شبیه‌سازی سیستم به صورت شکل (۱۳) است.

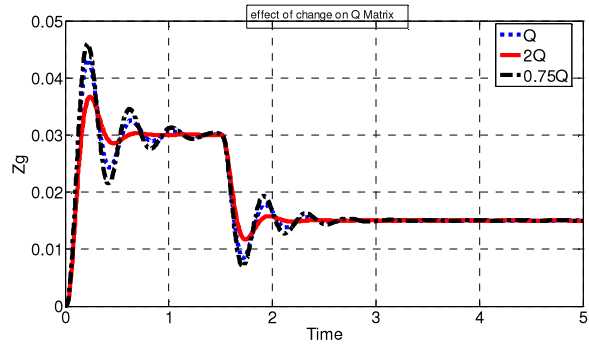


شکل (۱۲): فلوجارت الگوریتم ژنتیک استفاده شده.
Fig. (12): Flowchart of genetic algorithm

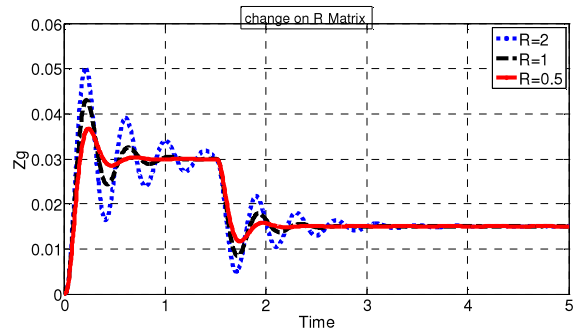


شکل (۱۳): شماتیک داخلی سیستم کنترل مورد استفاده در روش الگوریتم ژنتیک

Fig. (13): Schematic of internal control systems used in genetic algorithms

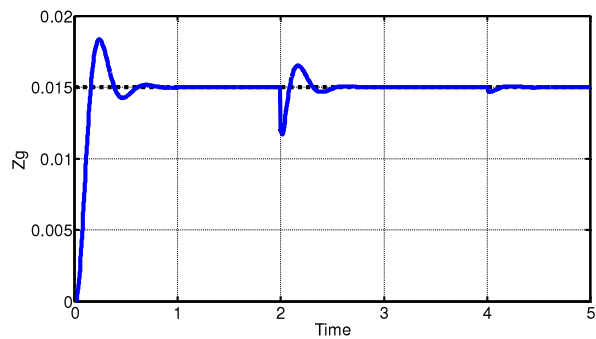


شکل (۹): تغییرات فاصله هوایی در اثر تغییر ضریب Q
Fig. (9): Air gap changes due to changes in Q factor



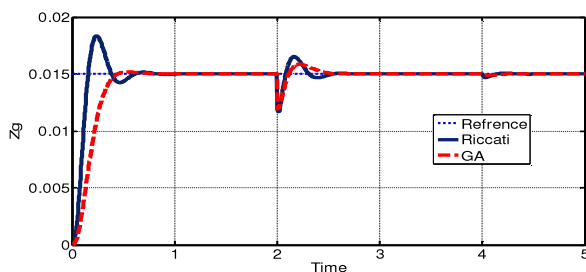
شکل (۱۰): تغییرات فاصله هوایی در اثر تغییر ضریب R
Fig. (10): Air gap changes due to changes in R factor

جهت مقایسه رفتار سیستم به ازای جابجایی عمودی ریل و نوسانات نیرو با روش کنترلی فیدبک و تعیین ضرایب به کمک رابطه ریکاتی شکل (۱۱) ارائه شده است. در این شکل بعد از اینکه فاصله هوایی سیستم معلق با مقدار مرجع مورد نظر برابر شد و سیستم حالت گذرا را پشت سر گذاشت در ثانیه دوم ریل قطار به اندازه ۳ میلیمتر دچار نوسان شده و فاصله هوایی بین ریل و قسمت معلق به ۱۲ میلیمتر رسیده است و نیز در ثانیه چهارم یک نیروی خارجی به سیستم اعمال شده که در هر دو حالت سیستم بعد از عبور از حالت گذرا توانسته است فاصله هوایی را به مقدار مرجع برگرداند و فاصله هوایی را کنترل کند.

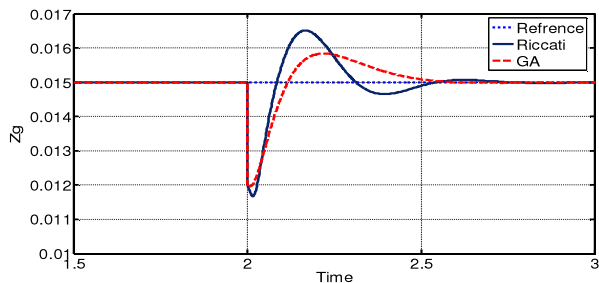


شکل (۱۱): تغییرات فاصله هوایی در اثر تغییر Z_m و اعمال نیروی خارجی
Fig. (11): Air gap changes due to changes in Z_m and the external force

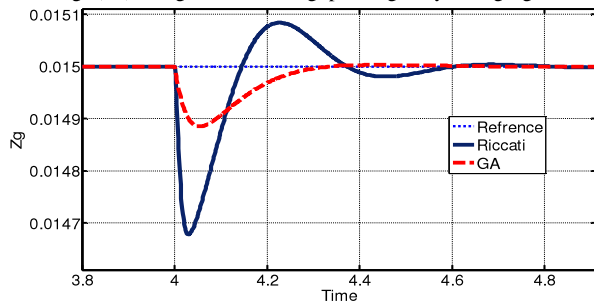
جهت مقایسه رفتار سیستم به ازای جابجایی عمودی ریل و نوسانات نیرو در این حالت نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۶) ارائه شده است. در این شکل بعد از اینکه فاصله هوایی سیستم معلق با مقدار مرجع مورد نظر برابر شد و سیستم حالت گذرا را پشت سر گذاشت در ثانیه دوم ریل قطار به اندازه ۳ میلی‌متر دچار نوسان شده و فاصله هوایی بین ریل و قسمت معلق به ۱۲ میلی‌متر رسیده است و در ثانیه چهارم یک نیروی خارجی به قسمت معلق شده اعمال شده است که در هر دو حالت طول فاصله هوایی را به مقدار بسیار کم کاهش یافته اما بلافاصله سیستم کنترلی فاصله هوایی را به مقدار مرجع برمی‌گرداند و سیستم با روش الگوریتم ژنتیک نوسان کمتری داشته و سریعتر میرا می‌شود. جهت مقایسه بهتر رفتار سیستم در دو حالت، شکل‌های بزرگنمایی شده (۱۷) و (۱۸) ارائه شده است.



شکل (۱۶): تغییرات فاصله هوایی با تغییر Z و اعمال نیروی خروجی.
Fig. (16): Air gap changes due to changes in Z_m and the external force.



شکل (۱۷): شکل بزرگنمایی شده تغییرات فاصله هوایی با تغییر Z .
Fig. (17): Magnified the air gap changes by changing Z .

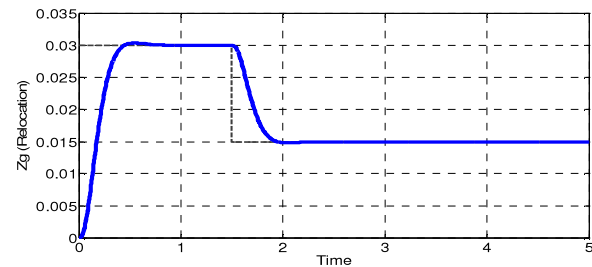


شکل (۱۸): شکل بزرگنمایی شده تغییرات فاصله هوایی با اعمال نیروی خروجی
Fig. (18): Magnified the air gap changes by external force

با اجرای الگوریتم ژنتیک با تابع هدف مطابق رابطه (۳۰) و حداقل کردن آن ضرایب کنترلی بهینه مربوط به فیدبک حالت عبارتند از:
 $k = [-2.0201E5 \quad -1.3399E4 \quad -277.7]$

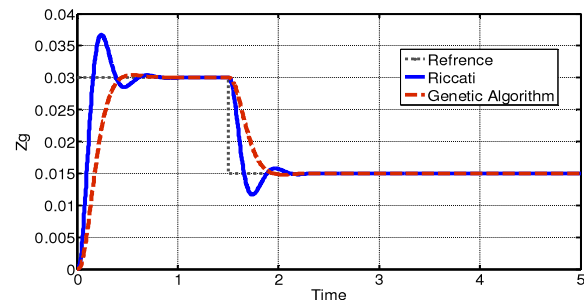
۱-۴- نتایج شبیه‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک

در شکل (۱۴) رفتار سیستم تعلیق الکترومغناطیسی با استفاده از ضرایب به دست آمده از الگوریتم ژنتیک نمایش داده شده است که نشان دهنده عملکرد مناسب سیستم کنترلی است. در این حالت ابتدا مرجع فاصله هوایی برابر ۳ سانتیمتر بوده و در زمان ۱.۵ ثانیه این مقدار به ۱.۵ سانتیمتر کاهش یافته است.



شکل (۱۴): تغییرات فاصله هوایی با روش الگوریتم ژنتیک.
Fig. (14): Air gap changes by genetic algorithms method

شکل (۱۵) جهت مقایسه دو حالت (روش ریکاتی و الگوریتم ژنتیک) ارائه شده است. مطابق شکل بیشترین نوسان مربوط به حالتی است که از روش ریکاتی برای تعیین ضرایب کنترلی فیدبک حالت استفاده شده و در آن فراجش نیز زیاد است. با توجه به اینکه نوسانات شدید باعث کاهش میزان راحتی مسافران در قطار می‌شود استفاده از روش کنترلی با ضرایب به دست آمده از معادلات جبری ریکاتی نتوانسته است تا از میزان لرزشهای شدیدی که در قسمت معلق به وجود می‌آید بکاهد اما به کمک الگوریتم ژنتیک نتوانسته‌ایم رفتار بهتری را در سیستم ایجاد کنیم و میزان فراجش و زمان نشست سیستم را به طور چشمگیری کاهش دهیم.



شکل (۱۵): مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک و روش حل معادله ریکاتی
Fig. (15): Comparing the results of the genetic algorithms and Riccati equation.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله از مدل ریاضی سیستم تعلیق الکترومغناطیسی جهت شبیه سازی رفتار قطار معلق مغناطیسی استفاده شد. سپس برای پایدار کردن سیستم ابتدا از روش فیدبک حالت استفاده شد که ضرایب کنترلی آن با روش ریکاتی به دست آمده بود. در این حالت میزان فراجهش زیاد بوده و در صورت تغییر ضرایب تاثیر گذار R و Q ، سیستم تا مرز ناپایداری پیش می رود به همین دلیل جهت ایجاد رفتاری بهتر در سیستم تعلیق از روش هوشمند الگوریتم ژنتیک برای محاسبه ضرایب بهینه سیستم کمک گرفته ایم. شبیه سازی های انجام شده به کمک نرم افزار MATLAB نشان می دهد که استفاده از روش الگوریتم ژنتیک نسبت به حالتی که ضرایب فیدبک حالت با روش ریکاتی به دست آمده اند کارآمدتر بوده و سیستم به ازای تغییر مرجع فاصله هوایی، نوسانات ریل و اعمال نیروی خارجی رفتار بهتری دارد و نوسانات شدیدی که موجب عدم رضایت مسافری به خاطر تکان های شدید در قسمت معلق می شود را به خوبی حذف می کند و رفتار هموارتری از خود به نمایش می گذارد.

سپاسگزاری

از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد به خاطر حمایت های مالی تشکر می نمایم.

ضمائم

Table (1): Characteristics of electromagnetic suspension system.

جدول (۱). مشخصات سیستم تعلیق الکترومغناطیسی.

PARAMETER	UNIT	Value
L_{σ}	mH	2.497
L_p	mH	1.143
R	Ohm	1
m	Kg	5000
I_n	A	200
V_n	V	200
α	N/A	1492
β	A/m	13300
Z_{g0}	Cm	1.5

References

- [1] A. Najjar-Khodabakhsh, M. Moradian, B. Moaveni, "Overview of magnetic levitation systems with emphasis on electrodynamic suspension", J. of Trans. on Elec. Tech., Vol.2, No.5, pp.35-51, Winter 2010. (in persian)
- [2] H.W. Lee, K. Kim, J. Lee, "Review of maglev train technologies", IEEE Trans. Magn., Vol.42, No.7, pp.1917-1925, July 2006.
- [3] N.F. Al-Muthairi, M. Zribi, "Sliding mode control of a magnetic levitation system", Mathematical Problems in Engineering, Vol.2, pp.93-107, 2004.
- [4] R.J. Wai, J.-D. Lee, K.-L. Chuang, "Real-time PID control strategy for maglev transportation system via particle swarm optimization", IEEE Trans. Indus. Elec., Vol.58, No.2, pp.629-646, Feb. 2011.
- [5] H. Liu, X. Zhang, "Nonlinear control of a hybrid maglev system", Presented at the 2nd Int. Conf. Inte. Con. Inf. Proc., pp.514-517, July 2011.
- [6] Faa-Jeng, L., et al., "Hybrid controller with recurrent neural network for magnetic levitation system", IEEE Trans. Magn., Vol.41, No.7, pp.2260-2269, 2005.
- [7] O. Taghavi-Zargar, "Fuzzy logic control of a magnetically levitated system with hardware implementation", In Mechanical Engineering, University of Texas at Arlington: Arlington, 2001.
- [8] H. Imaneini, S. Vaez-Zadeh, "Design and optimization of electromagnetic suspension system for traction applications", In Proc. 3th Ira. Conf. Elec. Engi., Zanjan, Iran, 2005. (in persian)
- [9] A. Khaki Sedigh, "Modern control system", University of Tehran Press, 2003.
- [10] I. Boldea, S. Nasar, "Linear electromagnetic systems", John Wiley & Sons, 198..