

عنوان طراحی کنترل کننده برای سیستم هدایت موتور محرک یک آسانسور خطی بدون کابل با استفاده از روش کنترل مد لغزشی

زهرا سرافرازی^۱، حسن علیپور^{*۲}

۱- گروه برق- قدرت، دانشکده فنی، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران

۲- دانشیار گروه رشته برق - قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شبستر، ایران

*نویسنده مسئول:

خلاصه

در این مقاله سه دستگاه مختلف برای سیستم هدایت آسانسور بررسی شده است کنترل کننده PID که سریع است اما پاسخ آن به طور قابل ملاحظه ای تحت تاثیر اختلالات خارجی است. کنترل کننده مناسب برای هدایت آسانسور باید راحت باشد و ایمنی مسافران را تضمین کند یعنی دارای پاسخ سریع و بدون نوسان باشد که SMC روشی است که می تواند تعادل مناسب را حفظ کند و بسیار قوی و مستحکم است و میتواند در مقابل اختلالات به سرعت پاسخ دهد. معرفی کنترل کننده برای سیستم هدایت ماگلو از طریق شبیه سازی انجام شده در محیط سیمولیتک متلب بررسی شده است.

کلمات کلیدی: آسانسور بدون کابل، کنترلر مد لغزشی

مقدمه

موتورهای خطی نسل جدیدی از ماشینهای الکتریکی هستند که در آنها نیرو و حرکت خطی بدون واسطه مکانیکی و به طور مستقیم توسط میدان الکترومغناطیسی تولید می شود. امروزه در میان محرکه های الکتریکی در صنایع تولیدی دقیق موتور سنکرون خطی مغناطیسی دائم (PMLSM) به طور گسترده استفاده می شود [۱] احتمالاً این موتورها مناسب ترین انتخاب برای کاربردهای کنترل حرکت با سرعت و دقت بالا می باشند. یکی از کاربردهای موتورهای خطی در آسانسورها از جمله آسانسورهای بدون کابل است که امروزه در آسمان خراش های بزرگ کاربرد دارند به دلیل تعمیر و نگه داری آسانتر و سر و صدای ایجاد شده کمتر (به دلیل نداشتن تماس مکانیکی بین کابین و ریل) و همچنین امکان استفاده از چندین کابین در داخل یک تونل بسیار مورد توجه قرار گرفته اند [۲].

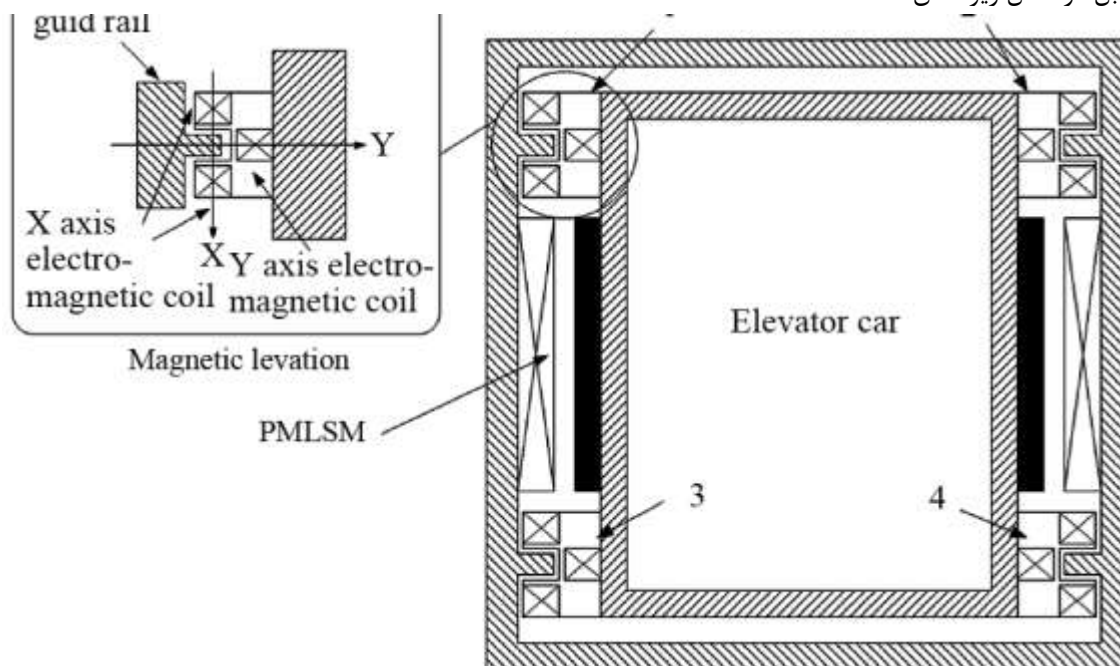
هدایت کابین با استفاده از ریل برای هدایت کابین و وزنه تعادل در حرکت عمودی و حداقل کردن حرکات افقی جلوگیری از نوسانات کابین بعلاوه نیروهای خارج از مرکز توقف و نگه داشتن کابین در هنگام عملکرد مکانیزم ایمنی است.

* Corresponding author: حسن علیپور

Email: Hasan.alipour2006@gmail.com

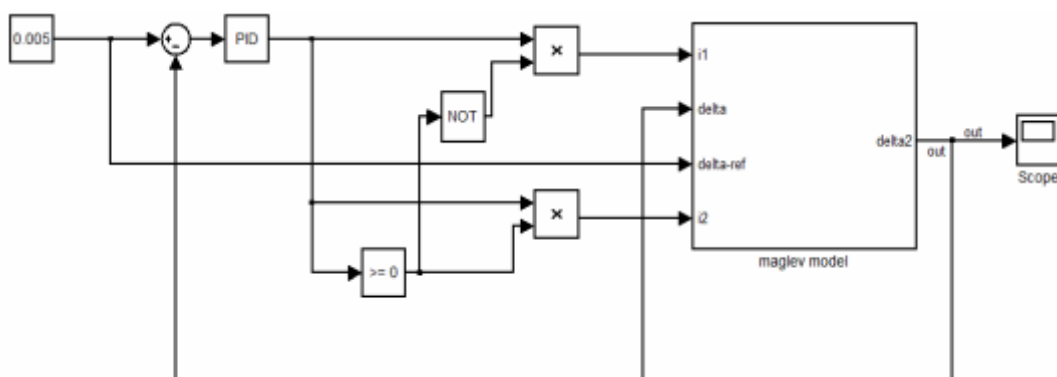
در آسانسورها معمولاً برای کنترل و هدایت از "Sliding MODE" PID و PID Sliding mode استفاده می شود که هر کدام مزایا و معایبی دارند.

کنترلر PID سریع است اما تحت تأثیر اختلالات خارجی است و برعکس آن، اسلاید مود قوی و مستحکم است. اما در شرایط نامناسب به صورت زودگذر عمل می کند چون کنترل قابل قبول برای سیستم هدایت آسانسور باید براساس تضمین ایمنی و راحتی مسافران است در نتیجه پاسخگویی سیستم باید سریع و مستحکم و بدون خطا و نوسان باشد که اینها باعث شد از کنترلر PID Sliding mode استفاده شود که شکل سیستم هدایت پیشنهادی برای آسانسور خطی بدون کابل در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۱: شماتیک آسانسور خطی

معرفی سیستم PID



شکل ۲: شماتیک سیستم PID

کلی روش کنترلی مد لغزشی یک روش کنترلی غیرخطی است که قادر به به کنترل سیستم حتی زمانی که مدل دقیقی از سیستم در دست نباشد است. ایده اساسی در این روش این است که کنترل یک سیستم درجه یک خیلی ساده تر از کنترل سیستم با درجات بالاتر است. در این روش سعی بر آن است که سیستم درجه n را به یک سیستم درجه یک تبدیل کرد به شرط آن که با پایدار سازی این سیستم درجه یک پایداری اصلی تضمین گردد. تبدیل یک سیستم درجه n به سیستم درجه یک از طریق تعریف سطح لغزش ممکن می شود.

اگر دینامیک سیستم را به صورت زیر بتوان نوشت

$$\dot{x}^{(n)} = f(x) + b(x)u \quad (1)$$

که x متغیرهای حالت و u ورودی کنترلی است. اگر بردار خطا را به صورت زیر تعریف کنیم

$$\tilde{x} = x - x_d \quad (2)$$

که x_d مقدار مطلوب برای متغیرهای حالت سیستم است.

حال اگر سطح متغیر با زمان $s(t)$ به این صورت تعریف کنیم

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{x} \quad (3)$$

اگر بتوان این سطح لغزش را در 0 پایدار کرد در این صورت خطا و مشتقات خطا به سمت صفر همگرا خواهند شد و اگر خطا در لحظه اول صفر باشد در بقیه لحظات نیز روی 0 تثبیت خواهد شد. اگر نتوان سطح لغزش را به صفر رساند ولی بتوان مقدار آن را محدود کرد در این صورت مقدار خطا نیز محدود خواهد بود یعنی اگر

$$\forall t \geq 0, |s(t)| \leq \phi \Rightarrow \forall t \geq 0, |\tilde{x}^{(i)}(t)| \leq (2\lambda)^i \epsilon \quad (4)$$

که

$$\epsilon = \frac{\phi}{\lambda^{n-1}} \quad (5)$$

برای اینکه تضمین شود سطح لغزش به سمت صفر همگرا خواهد شد باید شرط لغزش زیر برقرار گردد

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad (6)$$

این نامعادله نشان می دهد که مجذور فاصله نسبت به سطح لغزش پیوسته در حال کاهش خواهد بود و این تضمین می کند تا سطح در نهایت به صفر برسد و در سطح صفر باقی بماند.

زمان رسیدن به سطح صفر را از طریق رابطه زیر می توان محاسبه کرد

$$t_{reach} \leq \frac{s(t=0)}{\eta} \quad (7)$$

بنابراین مسئله کنترل یک سیستم درجه n تبدیل به کنترل سطح لغزش شده است. اما در معادله این سطح لغزش اثری از ورودی u وجود ندارد برای ظاهر شدن u در معادله از سطح لغزش یک بار مشتق می گیریم و سیگنال کنترلی را طوری انتخاب می کنیم تا مشتق s برابر صفر گردد زیرا که تا زمانی که روی سطح لغزش $s=0$ هستیم مقدار s تغییر نمی کند بنابراین باید یا استفاده از سیگنال ورودی مانع از تغییرات سطح لغزش شد. و با برآورده شدن شرط لغزش این اطمینان وجود دارد که $s(t)$ به سطح صفر خواهد رسید و روی این سطح باقی خواهد ماند. این مراحل را برای یک سیستم درجه ۲ می توان به ترتیب زیر اجرا کرد.

اگر سیستم درجه ۲ به صورت معادله دینامیکی زیر باشد

$$\ddot{x} = f + u \quad (8)$$

و دینامیک f به صورت دقیق مشخص نباشد ولی بتوان آن را با \hat{f} تقریب زد به طوری که خطای حاصل از این تقریب از تابع معلوم F کوچکتر باشد به عبارت دیگر

$$|\hat{f} - f| \leq F \quad (9)$$

سطح لغزش را به صورت زیر تعریف می کنیم

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)\tilde{x} = \dot{\tilde{x}} + \lambda\tilde{x} \quad (10)$$

اگر از این رابطه مشتق بگیریم تا u در معادله سطح ظاهر شود بدست خواهد آمد:

$$\dot{s} = \ddot{x} - \ddot{x}_d + \lambda\dot{\tilde{x}} = f + u - \ddot{x}_d + \lambda\dot{\tilde{x}} \quad (11)$$

بهترین تقریب برای ورودی که بتواند مشتق S را به صفر برساند به صورت زیر است

$$\hat{u} = -\hat{f} + \ddot{x}_d - \lambda\dot{\tilde{x}} \quad (12)$$

حال برای این که شرط لغزش نیز برآورده شود یک ترم گسسته نیز به ورودی \hat{u} اضافه می شود

$$u = \hat{u} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (13)$$

که تابع sgn به صورت زیر تعریف می شود

$$\operatorname{sgn}(s) = +1 \quad \operatorname{sgn}(s) = -1 \quad (14)$$

$$\operatorname{sgn}(s) = -1 \quad \operatorname{sgn}(s) = -1$$

$$s > 0 \text{ if}$$

$$s < 0 \text{ if}$$

حال برای اینکه شرط لغزش برآورده بشود می توان نوشت

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 = \dot{s} \cdot s = [f - \hat{f} - k \operatorname{sgn}(s)]s = (f - \hat{f})s - k|s| \quad (15)$$

بنابراین با انتخاب $k \geq F + \eta$ شرط لغزش برآورده خواهد شد.

نتایج مشابه بالا برای حالتی که از کنترلر انتگرالی استفاده شود بدست خواهد آمد.

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^2 \left(\int_0^t \tilde{x} dr\right) = \dot{\tilde{x}} + 2\lambda\tilde{x} + \lambda^2 \int_0^t \tilde{x} dr \quad (16)$$

در این صورت سیگنال کنترلی به صورت زیر بدست می آید

$$\hat{u} = -\hat{f} + \ddot{x}_d - 2\lambda\dot{\tilde{x}} - \lambda^2 \tilde{x} \quad (17)$$

برای اینکه $s(t=0)=0$ شود می توان S را چنین تعریف کرد

$$s = \dot{\tilde{x}} + 2\lambda\tilde{x} + \lambda^2 \int_0^t \tilde{x} dr - \dot{\tilde{x}}(0) - 2\lambda\tilde{x}(0) \quad (18)$$

شبیه‌سازی و نتایج PID

با افزایش روزافزون ساختمان‌ها نیاز به ساخت سیستم آسانسور با سرعت بالا و کمترین نوسان عمودی و افقی و سر و صدا و محدودیت طول کابل و بهره‌وری پایین مطرح است که ما در این پایان‌نامه آسانسور بدون کابل با نیروی محرکه موتور خطی و الکترومغناطیسی سیستم هدایت را در نظر گرفته‌ایم و فاصله هوایی موتور خطی آسانسور را با دستکاری سیستم هدایت می‌توان تنظیم کرد [۳].

در ابتدا به بررسی، کنترل کننده PID که روش پیشنهادی نیرومند و گذرا است و بسیار ساده است و نیاز به ریاضیات پیچیده ندارد به همین علت به راحتی در کاربردهای واقعی استفاده می‌شود. معادله دینامیکی آن را مشاهده می‌کنید.

قانون دوم نیوتن $m\ddot{\delta}(t) = f_k(\delta) - f(i, \delta) + f_D(t)$ که δ طول شکاف هوا و $\ddot{\delta}$ دیرانسایل دوم فاصله

هوایی و f_k نیروی الکترومغناطیسی و f_D نیروی محرک مخالف است.

از آنجا که مقاومت مغناطیسی آهنربای الکتریکی و هدایت راه آهن ناچیز است. مدار قطب‌های الکترومغناطیسی و هدایت راه آهن در فاصله هوایی بین آن‌ها متمرکز شده است.

$$R = \frac{\delta}{\mu_0 A}$$

که μ_0 نفوذپذیری خلاء و A فاصله مقطع هوایی مؤثر

$$F(i, \delta) = \frac{\mu_0 AN^2 i^2(t)}{4\delta^2(t)} \quad (19)$$

نیروی کشیدن که N تعداد نوبت سیم‌پیچی‌ها و $i(t)$ جریان

$$u(t) = ri(t) + \frac{\mu_0 AN^2}{2\delta(t)} \frac{di(t)}{df} - \frac{\mu_0 AN^2 i(t)}{2\delta^2(t)} \frac{d\delta(t)}{dt} \quad (20)$$

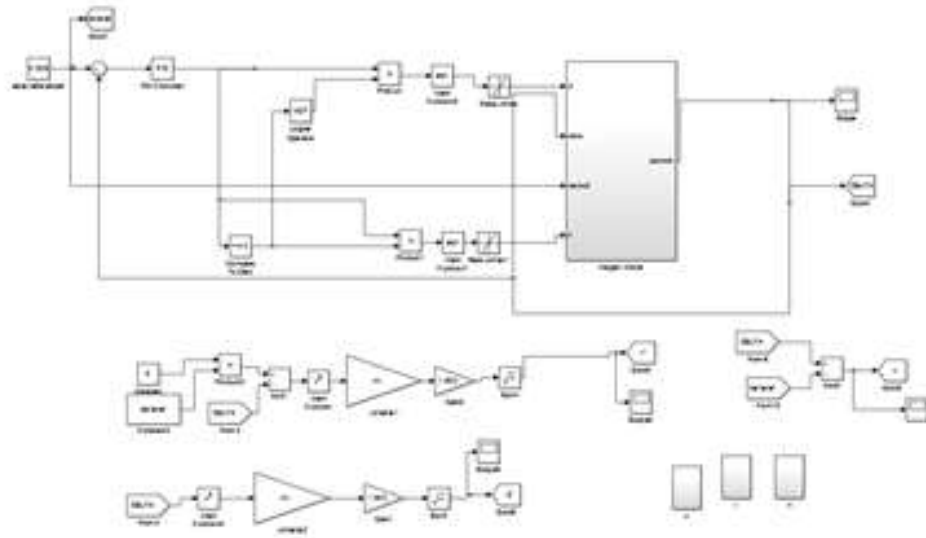
ولتاژ تجهیزات در نتیجه مدل ریاضی سیستم تجهیزات الکترومغناطیسی به شرح زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{\delta}(t) = F_k(\delta) - F(i, \delta) + F_D(t) \\ F(i, \delta) = \frac{ki^2(t)}{\delta^2(t)}, F_k(\delta) = \frac{k'}{4(2\delta_{ref} - \delta(t))^2} \\ u(t) = ri(t) + \frac{\mu_0 AN^2 di(t)}{2\delta(t)} - \frac{\mu_0 AN^2 i(t)d\delta(t)}{2\delta^2(t)} \frac{d\delta(t)}{dt} \end{array} \right. \quad (21)$$

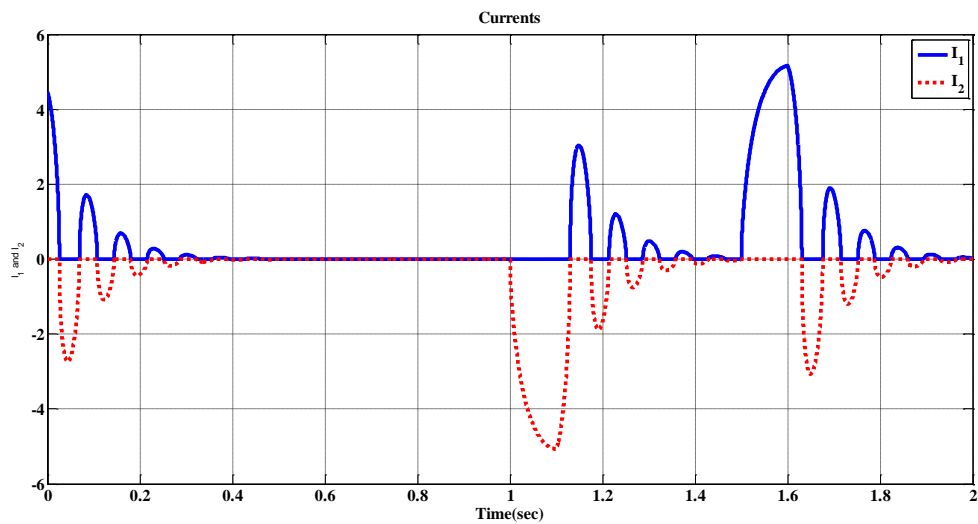
$$k = \frac{(\mu_0 AN^2)}{4}$$

که مقدار است.

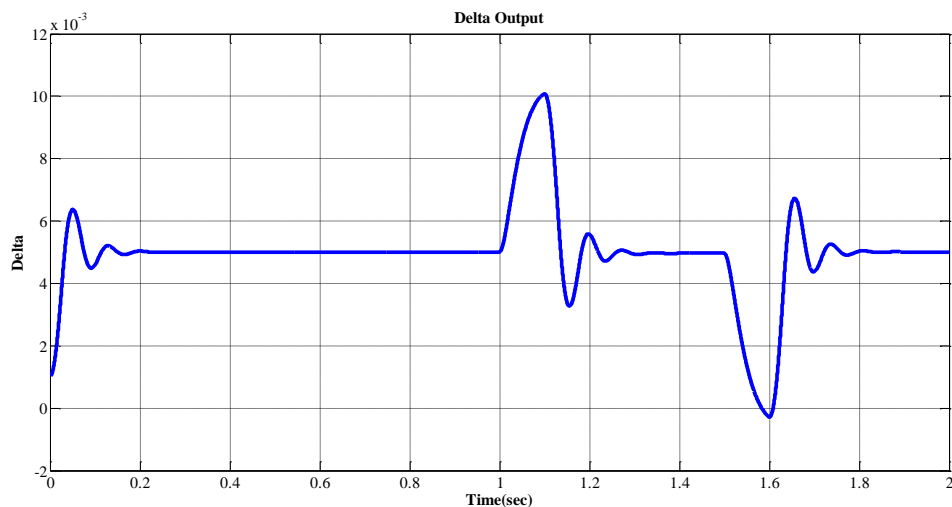
که شکل کنترلر PID را مشاهده می‌کنید و نتایج خروجی PID که شامل Delta out و Delta in و Delta ref و جریان i_1 و i_2 در زیر مشاهده می‌شود.



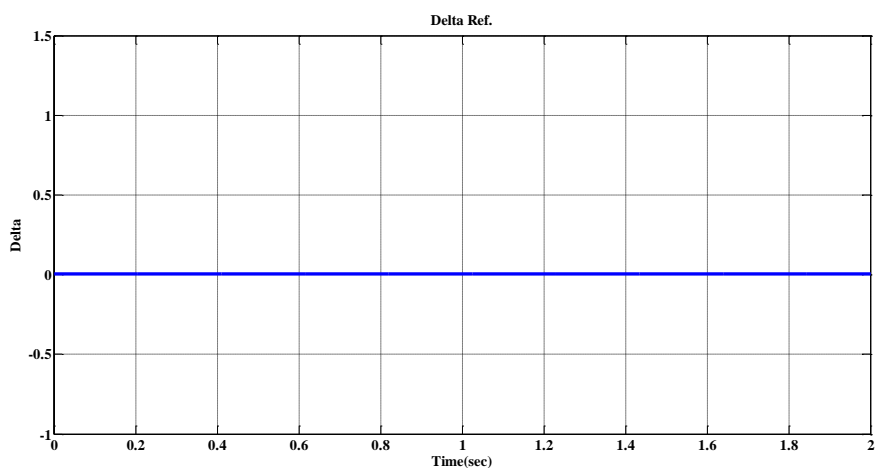
شکل ۳. شبیه سازی PID در نرم افزار متلب



شکل ۴: جریان i_1 و i_2



شکل ۵: دلتای خروجی



شکل ۶: دلتای رفرنس

که در این مقاله به جای درخواست دارای ولتاژ سیگنال به عنوان مرجع مقدار کنترل به سیستم هدایت اعمال می‌شود. جریان‌های i_1 و i_2 به عنوان ورودی اعمال می‌شوند و نتیجه می‌گیریم که PID به طور قابل توجهی تحت تأثیر اختلال و نیروی خارجی است که با اعمال مقادیر موجود در جدول و پارامترهای مختلف سیستم قوی‌تر می‌شود زمان نمونه‌برداری در شبیه‌سازی ۲ ثانیه قرار داده شده است.

جدول (۱): پارامترهای لازم برای سیستم هدایت آسانسور بدون کابل

| پارامتر | اسم | مقدار |
|-------------|-----|------------------------|
| جرم آسانسور | M | ۵۰۰ kg |
| شماره ترن | N | ۴۰۰ turns |
| مساحت | A | $0.65 \times 0.65 m^2$ |

| | | |
|------|----------------|--------------------|
| 0 mm | δ_0 | مقدار اولیه دلتا |
| 5 mm | δ_{ref} | دلتای رفرنس |
| 50 N | F_D | نیروی اختلال خارجی |

معرفی سیستم SMC [۴]

SMC: روش کنترل غیرخطی است که سیستم کنترل می تواند حتی زمانی که مدل دقیق ریاضی وجود ندارد کارآمد باشد. بدیهی است که کنترل سیستم با یک رشته ساده تر از سیستم با درجه n است از این رو روش SMC تلاش می کند تا به درجه n سیستم کنترل برسد.

$$x^{(n)} = f(x) + b(x)u \quad (22)$$

که در آن x حالت متغیر و کنترل ورودی است.

$$s(x, t) = \left[\frac{d}{dt} + \lambda \right]^{n-1} \bar{x} \quad (23)$$

که λ پارامتر ثابت محدود است.

$$\bar{x} = x - x_{ref} \quad (24)$$

اثر SMC شامل دو بخش است یک قسمت اثر کنترل معادل و دیگری قادر به تغییر کنترل اثر است. عدم اطمینان از سیستمها با تعویض اثر کنترل می شود که این سیستم قوی و نیرومند است. دیفرانسیل $\delta(t)$ در صفر مناسب سیگنال ورودی حفظ می شود.

$$u = \hat{u} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (25)$$

که در آن u ورودی کنترل سیستم \hat{u} سیگنال کنترل برای سیستم است.

k ضریب متغیر و sgn تابع علامت است.

در این روش سیگنال ورودی شامل دو بخش است قسمت اول اطمینان سیستم کنترلی و یکی دیگر سیگنال سوئیچینگ است که به عدم اطمینان از سیستم تنظیم شده است.

$$\frac{ds}{dt} = \frac{k}{m} \left[\frac{u_1(t)}{(2\delta_{ref} - \delta(t))^2} - \frac{u_2(t)}{\delta^2} + F_D \right] + 2\lambda \frac{d\delta_{error}}{dt} + \lambda^2 \delta_{error} = 0 \quad (26)$$

با حل معادله به رابطه $f(\delta)u_1 + g(s)u_2 = -2\lambda\tilde{x} - \lambda^2\tilde{x} - \frac{k}{m}fD$ می رسیم

$$fu_1 + gu_2 = -\lambda^2\tilde{x} - 2\lambda\tilde{x} \quad (27)$$

$$f(\delta) = \frac{k}{m} \frac{1}{(2\delta_{ref} - \delta)^2} \quad (28)$$

$$g(\delta) = -\frac{k}{m\delta^2} \quad (29)$$

برای اینکه قدر مطلق و دامنهها را به دست آوریم اسم تابع را J می گذاریم و به توان ۲ می رسانیم و چون معادله ی نهایت جواب دارد و ما می خواهیم جوابهای محدود به دست آوریم J_{min} را با شرط $u_1, u_2 > 0$ می گذاریم و هر کدام که مقدارش منفی شد به جایش صفر اعمال می شود

$$J_{min} = u_1^2 + u_2^2 \quad u_1, u_2 > 0 \quad (30)$$

$$u_1 = \frac{fy}{f^2 + g^2} \quad u_2 = \frac{gy}{f_2 + g^2} \quad (31)$$

$$\hat{i}_1 = \sqrt{\hat{u}_1} \quad \hat{i}_2 = \sqrt{\hat{u}_2} \quad (32)$$

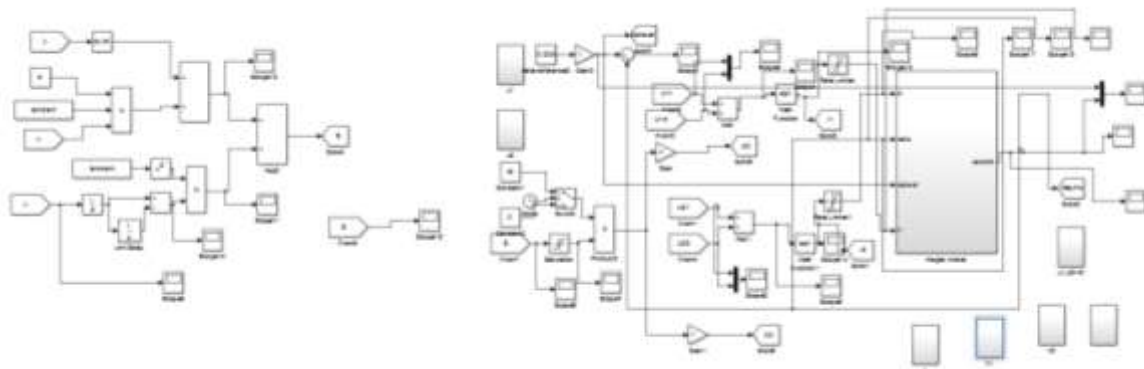
مقدار \hat{u}_1 و \hat{u}_2 باید در نهایت به یک تابع ساین ضرب شوند و چون چیزهایی که به دست آمده است \hat{u}_1 و \hat{u}_2 حدی است.

$$u_1 = \hat{u}_1 \pm k \operatorname{sgn}(s) \quad (33)$$

$$u_2 = \hat{u}_2 \pm k' \operatorname{sgn}(s) \quad (34)$$

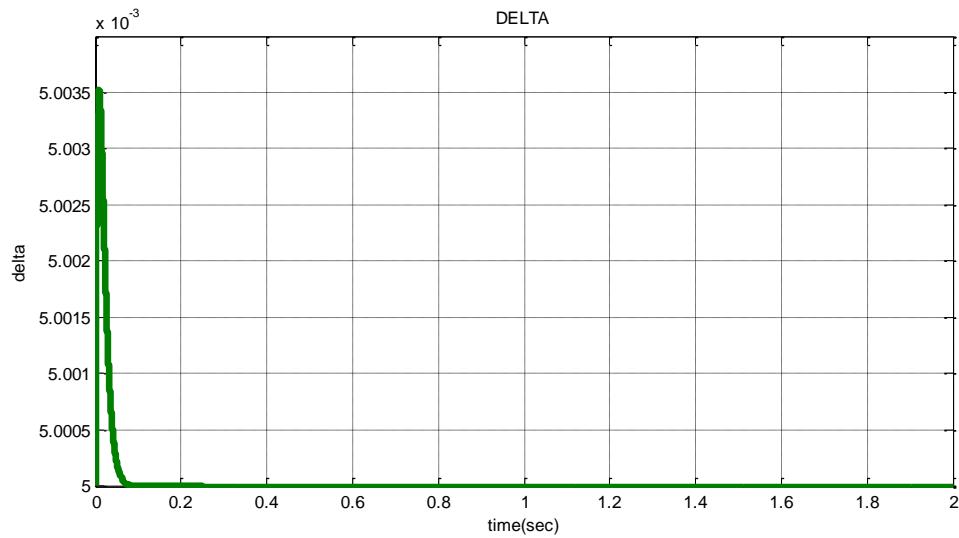
همان طور که در شکل مشاهده می شود نتایج خروجی برای SMC در ۴ حالت مختلف با اعمال اغتشاش خارجی (پالس) و بدون اعمال اغتشاش (بدون پالس) و با مقدار $kk = 100$ و مقدار $kk = 500$ به دست آمده است.

که نتایج حاکی از آن است که کنترل کننده قوی و در صورت بروز اختلال می تواند به سرعت آن را پاسخ دهد و به همین علت نقش مهمی در ایمنی و راحتی مسافران دارد.

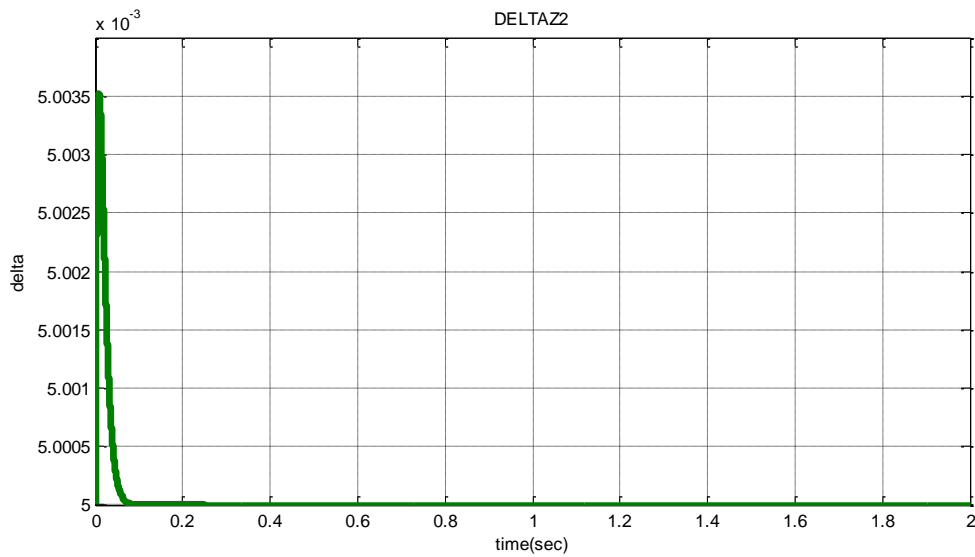


شکل ۷: شبیه سازی SMC در متلب

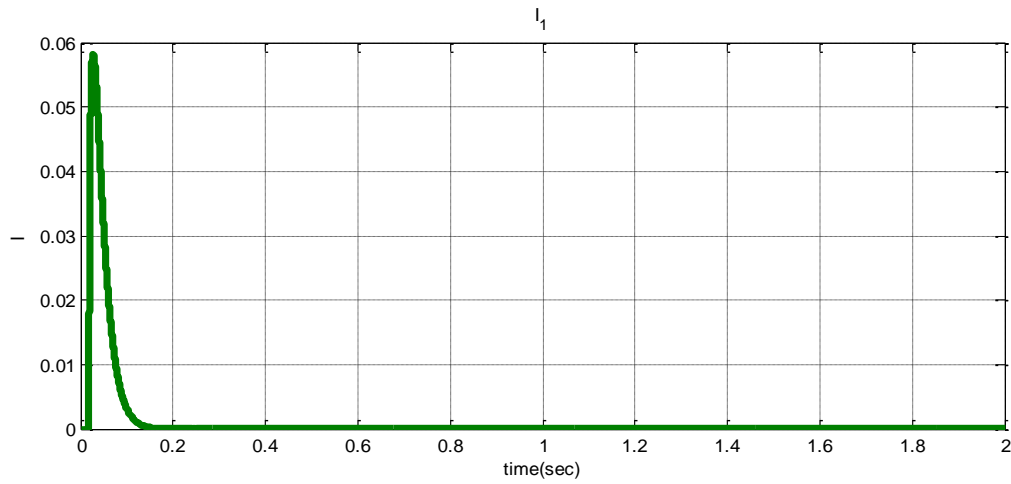
نمودارهای SMC بدون اعمال پالس و $kk=100$:



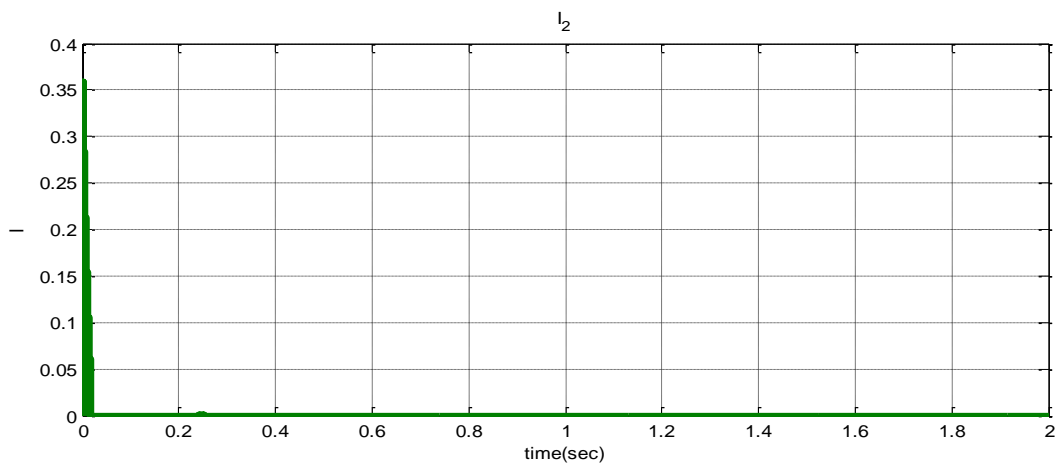
شکل ۸: شکل دلتا



شکل ۹: شکل دلتای خروجی

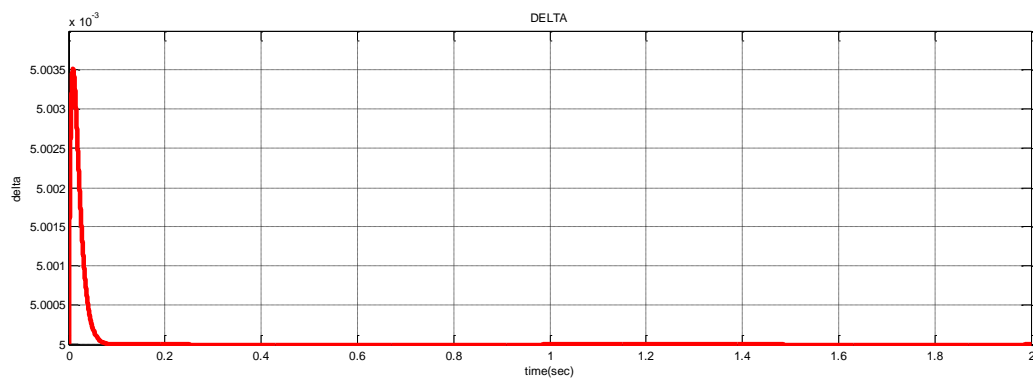


شکل ۱۰: شکل i_1

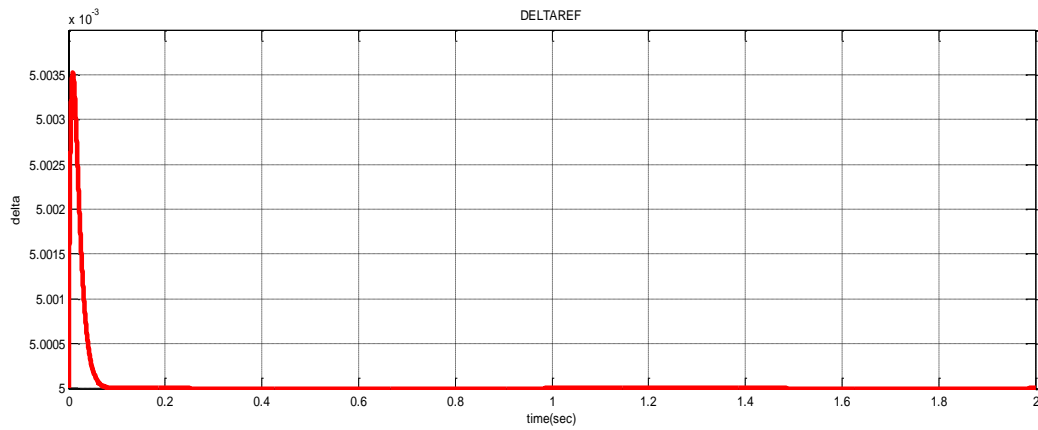


شکل ۱۱: شکل i_2

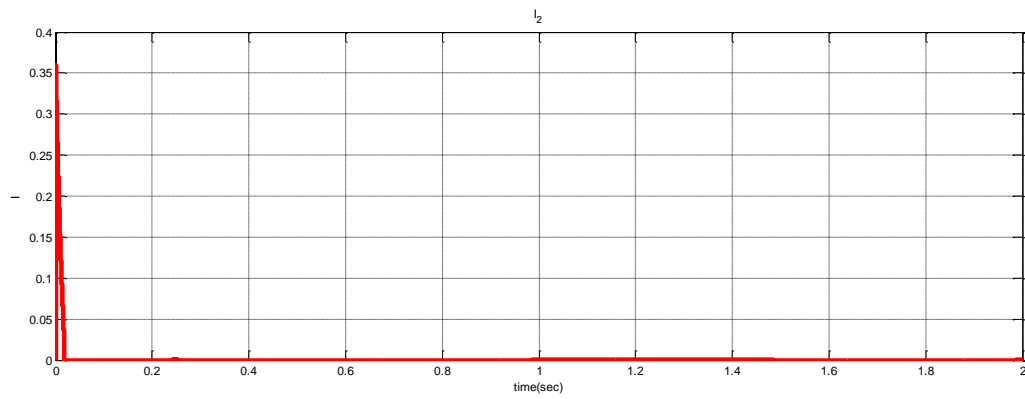
نمودارهای SMC بدون اعمال پالس و $kk=500$:



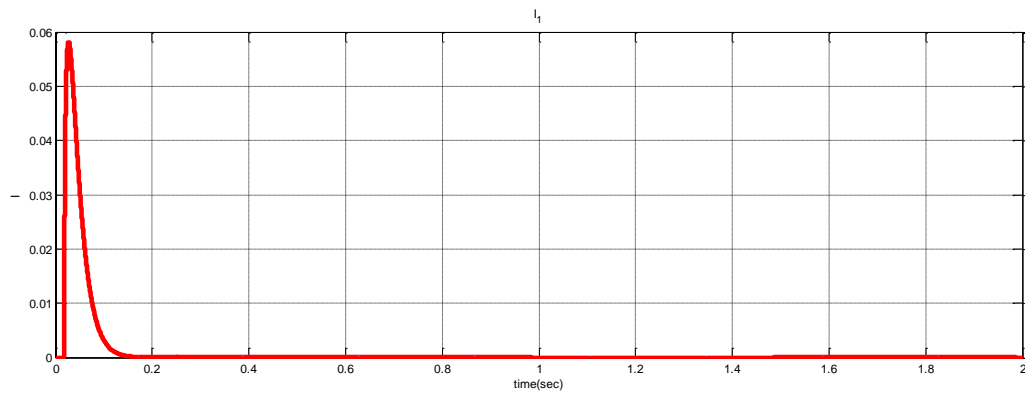
شکل ۱۲: شکل دلتا



شکل ۱۳: شکل دلتای رفرنس

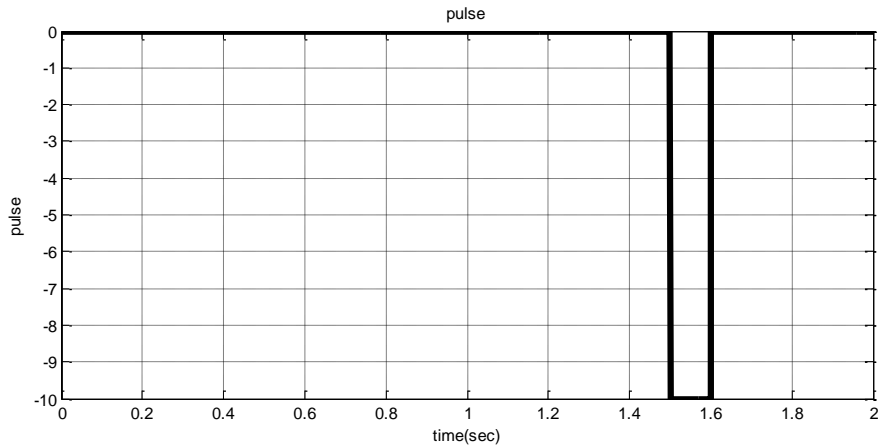


شکل ۱۴: شکل i_2

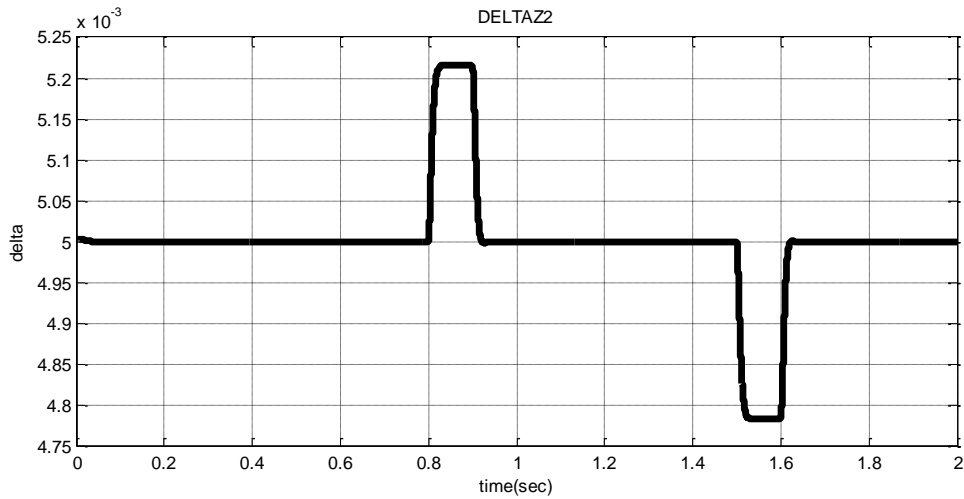


شکل ۱۵: شکل i_1

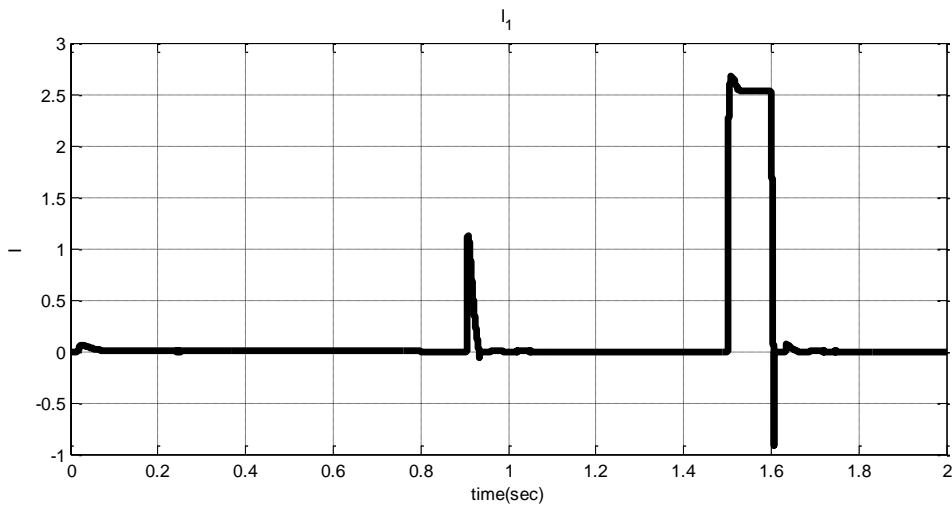
نمودارهای SMC با اعمال پالس و $kk=100$:



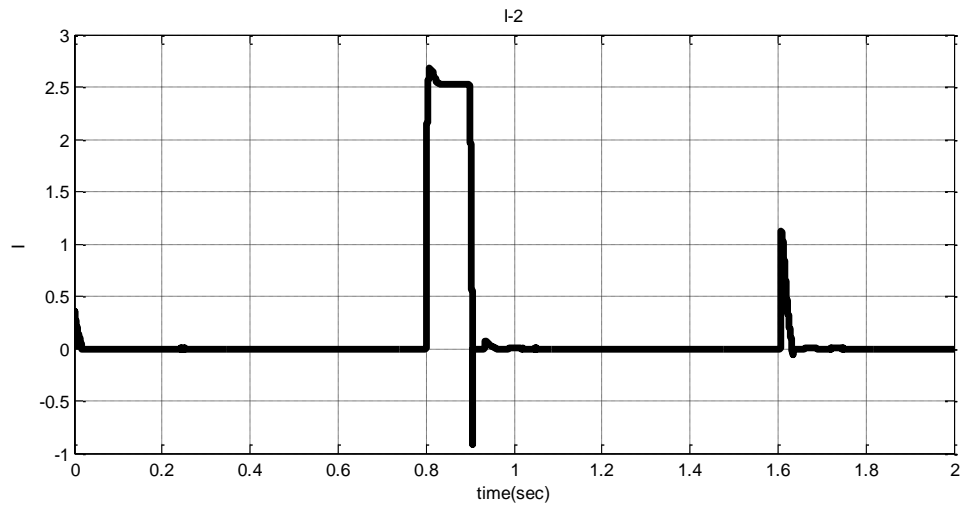
شکل ۱۶: شکل پالس



شکل ۱۷: شکل دلتای خروجی

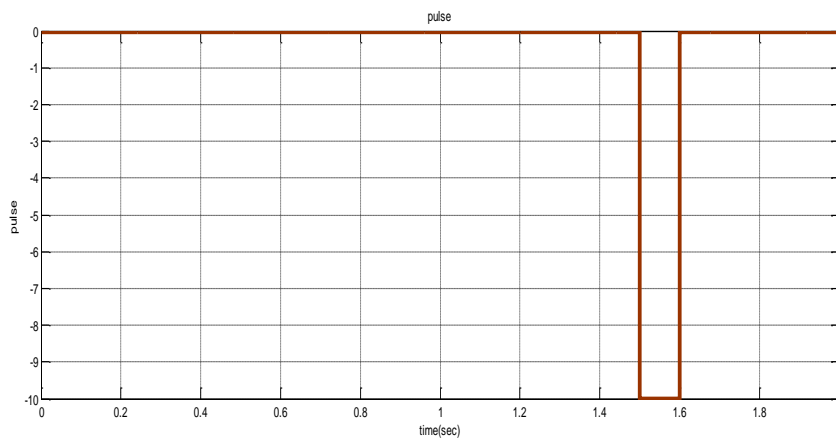


شکل ۱۸: شکل i_1

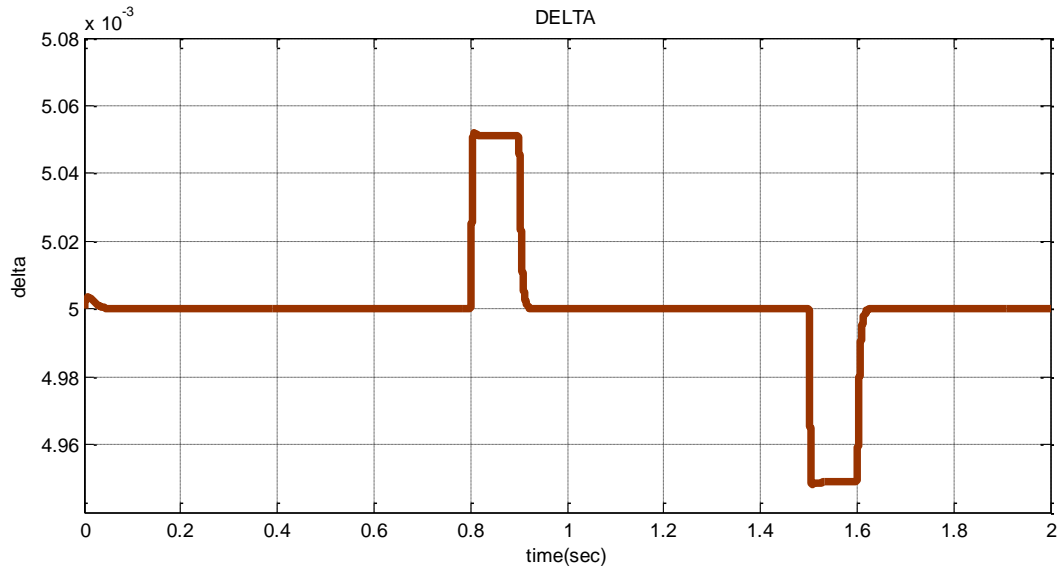


شکل ۱۹: شکل i_2

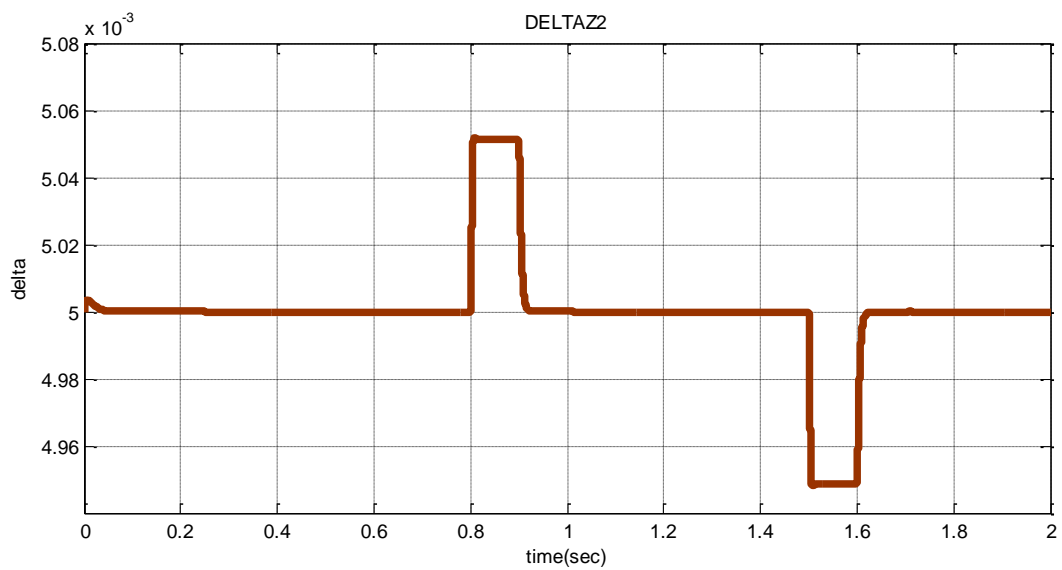
نمودارهای SMC با اعمال پالس و $kk=500$:



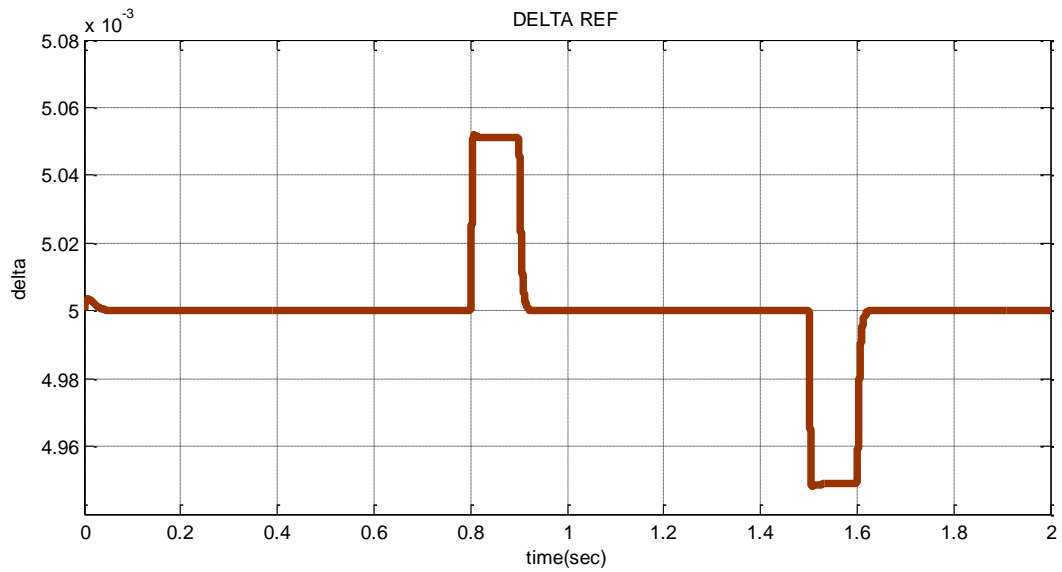
شکل ۲۰: شکل پالس



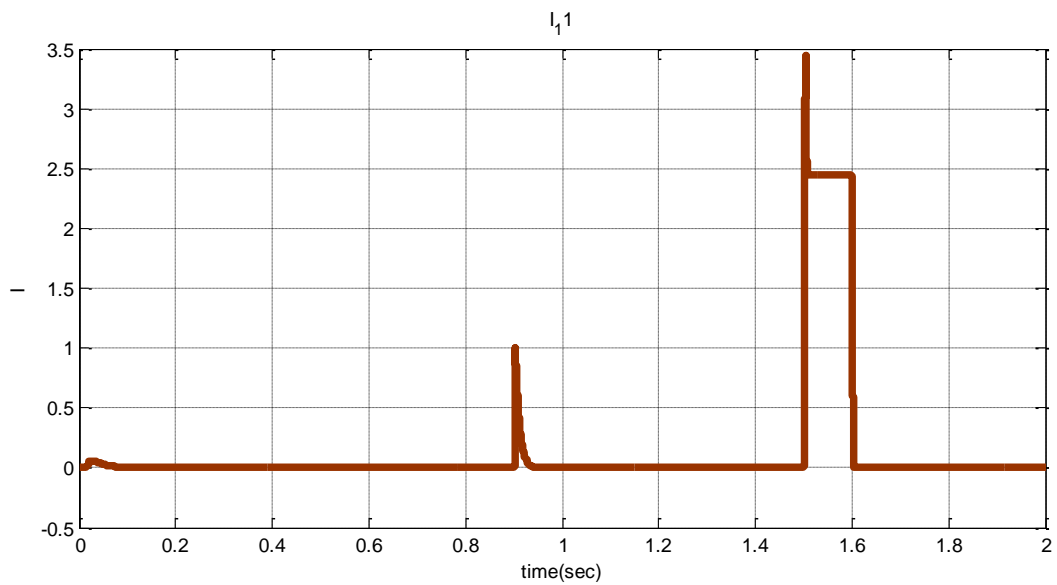
شکل ۲۱: شکل دلتا



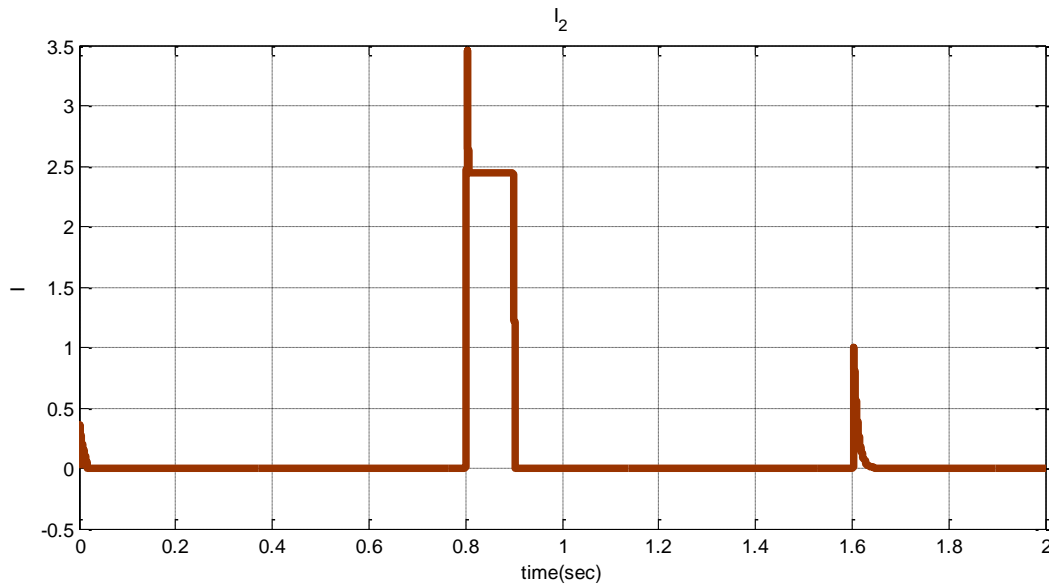
شکل ۲۲: شکل دلتای خروجی



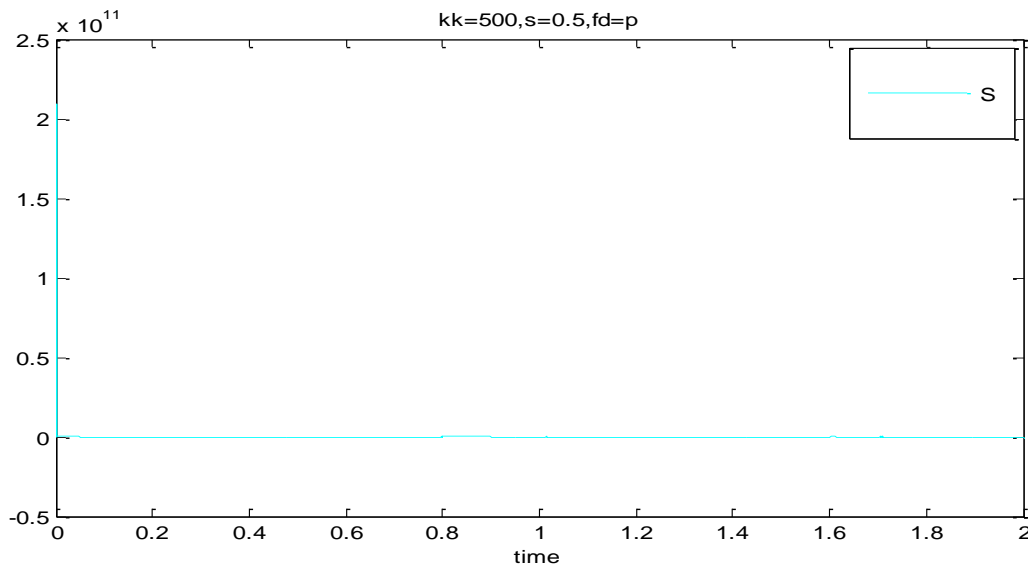
شکل ۲۳: شکل دلتای رفرنس



شکل ۲۴: شکل i_1



شکل ۲۵: i_2



شکل ۲۶: شکل سطح لغزش

نتیجه گیری کلی:

روش های گفته شده بسیار ساده و قابل اجرا هستند PID کنترل کننده قوی ندارد ولی حالت کشویی آن می تواند بسیار قوی باشد کنترل کننده SMC تعادل مناسب را می تواند حفظ کند بسیار قوی و متکلم است و می تواند در مقابل اعمال اغتشاش به سرعت پاسخ دهد. به همین علت در کاربردهایی مانند آسانسورهای بدون کابل بسیار مناسب است.

مراجع

- 1.T. H. Liu, Y. C. Lee, and Y. H. Change, "Adaptive controller design for a linear motor control system, "IEEE Trans, Aerosp. Electron. Syst., vol. 40, no. 2, pp. 601-616, Apr. 2005.
- 2.Oriental Motor, [Online Document]. [Accessed 17 April 2009]. Available at <http://www.orientalmotor.com.my/support/request.php>.
- 3.Y. S. Kung, "Design and implementation of a high- performance PMKSM drives using DSP chip, "IEEE Trans, Ind. Electron., vol. 55, no. 3, pp. 1341-1351, Mar. 2008.
- 4.L. N. Tutelea, M. C. Kim, M. topor, J. Lee, and L. Boldea, (2008). "Linear permanent magnet oscillatory machine: Comprehensive modeling for transients with validation by experiments," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 2, pp.492-500, Feb. 2008.