

سیستم سازی تلفیقی کنترل امپدانس و ادمیتانس و بررسی پایداری سیستم

حسن قاسم زاده^۱، سید مجتبی زمانی پور اصل^۲، دکتر جهانبخش حامدی^۳

۱ و ۳- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران

۲- دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران

Hassan.gh91@gmail.com

خلاصه

کنترل امپدانس و ادمیتانس دو روش پیاده سازی متفاوت برای رسیدن به عملیات کنترلی یکسان برای تولید یک رابطه مطلوب بین نیروی اعمالی و جابجایی سیستم ربات در حال تعامل با محیط می باشند. به علت تفاوت روش های پیاده سازی این دو روش مشخصات پایداری و اجرایی مکمل یکدیگر دارند. کنترل امپدانس و ادمیتانس بترتیب در محیط های سخت و نرم دارای عملکرد، پایداری و دقت بالا می باشند اما با ایجاد یک تغییر شدید در سختی محیط نتایج به ناپایداری یا عدم دقت سیستم منجر می گردد. در این مقاله یک سیستم تلفیقی ایده آل از کنترل امپدانس و ادمیتانس را ارائه می دهیم که تلاش می کند ویژگی های پایداری و اجرایی کنترل امپدانس و ادمیتانس را درون یابی کند. مزیت این روش ایجاد یک تلفیق از دو روش برای رسیدن به ثبات و دقت کافی در هر محیطی می باشد که برای یک سیستم یک درجه آزادی مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: سیستم تلفیقی، امپدانس، ادمیتانس، ربات.

1. مقدمه

در بسیاری از فرآیندهای صنعتی که در معرض اتوماسیون با استفاده از فناوری رباتیک قرار دارند، یک بازو مکانیکی نیز آمده است که در آن محیط واقع بوده و با اشیا و تجهیزات اطراف در تماس است. اساسا برای کنترل یک کمیت نیاز به یک کنترل کننده داریم که به صورت مکانیکی با شی تحت کنترل در ارتباط باشد. تاکنون چندین بررسی سطح بالا در خصوص روش های مختلف کنترل ربات و مبحث کنترل توسط ویتنی [1]، پل [2] هوگان و کلگیت [3] منتشر شده است اما معمولا بر یک مبحث خاص نظیر ثبات یا دقت و ... متمرکز شده اند.

الگوریتم های کنترل ربات که نیروهای خارجی را به عنوان اختلالات در نظر نمی گیرند، کنترل نیرو نامیده می شوند. این روش را می توان به دو روش کنترل نیروی ساده و کنترل امپدانس گروه بندی کرد.

در روش کنترل نیروی ساده، نیروی متعامل مطلوب با محیط فرمان داده می شود. روش کنترل نیروی ساده ای که از هیچ فیدبک نیرویی برای تنظیم نیروی فرمان داده شده استفاده نکند کنترل نیروی ساده حلقه باز نام دارد. روش های اجرایی دیگر نیروی فرمان داده شده را با نیروی اندازه گیری شده ی داده شده به کنترل کننده خطا مقایسه می کند. کنترل خطا یا به وسیله قانون کنترل که به طور مستقیم یک سیگنال تحریک به تجهیزات مهیا می کند (کنترل نیروی ساده بر پایه- نیرو) و یا ابتدا به یک حرکت مرجع از طریق ادمیتانس و در صورت امکان انتگرال گیر یا مشتق گیر که پس از ورودی یک کنترل کننده حرکت (کنترل نیروی ساده بر پایه - حرکت) وجود دارد صورت می گیرد. این روش با نام کنترل ادمیتانس در مکتوبات شناخته شده است.

¹دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک

²دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک

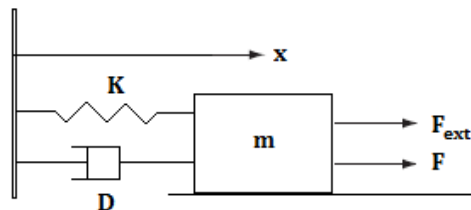
³استادیار و عضو هیئت علمی

روش کنترل امپدانس توسط هوگان [4] مطرح شد. کنترل امپدانس به منظور ایجاد یک رابطه دینامیکی بین انحراف فعلی ربات از حرکت فرمان داده شده و نیروی متعامل با محیط مطرح گردید. این کار با انتقال خطای حرکت از طریق یک مشتق گیر یا انتگرال گیر و یک امپدانس در درون یک سیگنال نیروی منبع تحقق یافت. به بیان دیگر کنترل امپدانس یک رابطه دینامیکی بین موقعیت عنصر نهایی و نیرو ایجاد می کند. دو راه برای پیاده سازی کنترل امپدانس وجود دارد که بسته به علیت کنترل کننده می باشد. این دو راه اغلب با نام «کنترل امپدانس» و «کنترل ادیمیتانس» در مقالات ذکر می شوند. اگر چه هر دو روش به عنوان کنترل امپدانس توسط هوگان معرفی شد، ما یک تمایز بین این دو روش ایجاد می کنیم.

در کنترل امپدانس، کنترلر یک امپدانس و بازوی مکانیکی یک ادیمیتانس و در کنترل ادیمیتانس، کنترلر یک ادیمیتانس و بازوی مکانیکی یک امپدانس است. در کل، سیستم های رباتیک با کنترل امپدانس، تعامل پایدار دینامیکی با محیط ها دارند اما دقت کمی در فضای آزاد به علت اصطکاک و ... دارند. این مشکل را می توان با استفاده از کنترل/سنجش گشتاور حلقه داخلی یا از طریق اصلاحات سخت افزاری همانند مفاصل کم اصطکاک و محرک مستقیم، کم کرد. در مقابل کنترل امپدانس، کنترل ادیمیتانس سطح بالایی از دقت در انجام وظایف بدون تماس ارائه می دهد اما می تواند منجر به بی ثباتی در تعامل دینامیکی با محیط سخت شود. این مشکل را می توان با سازگار کردن عنصر نهایی حل کرد اما این کار باعث کاهش راندمان می گردد. در مقایسه با محرک های مستقیم که پیوسته با کنترل امپدانس مورد استفاده قرار می گیرند، کنترل ادیمیتانس به نسبت انتقال بالایی نیاز دارد؛ مانند محرک های هم ساز برای کنترل دقیق حرکت و سیستم های رباتیک صنعتی. سیستم های رباتیک با کنترل امپدانس و کنترل ادیمیتانس مزایا و معایب مکمل دارند. ممکن است که کارایی هر دو الگوریتم کنترل از طریق اصلاح سخت افزاری خاص بهبود یابد اما چنین اصلاحی سبب ایجاد میل به کنترل امپدانس یا ادیمیتانس می گردد [5].

2. کنترل امپدانس و ادیمیتانس

حال یک سیستم یک درجه آزادی به جرم m و جابجایی x در نظر بگیرید. شکل 1. فرض می کنیم که F نیروی کنترل و F_{ext} نیروی خارجی محیط که بر جسم اثر می کند، باشد.



شکل 1 - سیستم یک درجه آزادی جرم متعامل با محیط

معادله حرکت این جرم به صورت زیر می باشد: $m\ddot{x} = F + F_{ext}$

$$F_{ext} \quad (1)$$

هدف کنترل از کنترل امپدانس و کنترل ادیمیتانس، طراحی کنترل نیروی F است که یک رابطه بین نیروی خارجی F_{ext} و انحراف e از مسیر تعادل مورد نظر x_0 ، ایجاد کند. معادله ارتعاشی این سیستم بصورت زیر می باشد:

$$M_0\ddot{e} + D_0\dot{e} + K_0e = F_{ext} \quad (2)$$

$$e = x - x_0 \quad (3)$$

که در آن M_0 و D_0 و K_0 ثابت های مثبتی هستند که به ترتیب عبارتند از اینرسی، استهلاک و سختی.

تا هنگامیکه مفهوم کلی کنترل امپدانس اجازه می دهد تا بیشتر از رفتار امپدانس کلی استفاده کنیم، در بسیاری از برنامه های کاربردی رباتیک، محدودیت رفتار خطی (2) کافی است.

در کنترل امپدانس، کنترلر یک امپدانس مکانیکی می باشد و در نتیجه دستگاه کنترل شده به عنوان یک ادیمیتانس رفتار می کند. با مقایسه

(1) با رفتار مطلوب (2)، می توانیم قانون کنترل امپدانس را نتیجه بگیریم. از معادلات (1) و (2) داریم:

$$\ddot{x} = m^{-1} (F + F_{ext}) \quad (4)$$

$$\ddot{x} = \ddot{x}_0 + M_\theta^{-1} (F_{ext} - D_\theta \dot{e} - K_\theta e) \quad (5)$$

با حل معادلات (4) و (5) برای F داریم:

$$F = F_i = m\ddot{x}_0 + (mM_\theta^{-1} - 1) F_{ext} - mM_\theta^{-1} (D_\theta \dot{e} + K_\theta e) \quad (6)$$

در کنترل ادمیتانس، دستگاه، موقعیت-کنترل شده است و به عنوان یک امپدانس مکانیکی رفتار می‌کند. از این رو کنترلر به گونه‌ای طراحی شده که یک ادمیتانس مکانیکی باشد. کنترلر موقعیت را می‌توان با استفاده از کنترلر کننده PD (تناسبی- مشتق‌گیر) به فرم

$$F = F_a = K_p(x_d - x) - K_d \dot{x} \quad (7)$$

با بهره مثبت K_p و K_d ، و موقعیت موردنظر x_d تنظیم کرد. با جایگذاری معادله (7) در (1) و بازنویسی معادله (2) پس از جایگذاری x با x_d ، معادله دینامیکی سیستم کلی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$m\ddot{x} + K_d \dot{x} + K_p(x - x_d) = F_{ext} \quad (8)$$

$$M_\theta(\ddot{x}_d - \ddot{x}_0) + D_\theta(\dot{x}_d - \dot{x}_0) + K_\theta(x_d - x_0) = F_{ext} \quad (9)$$

که

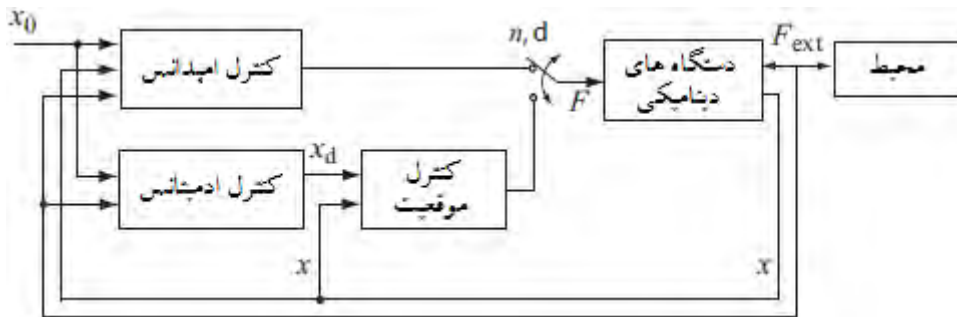
$$M_\theta(\ddot{x}_d - \ddot{x}_0) + D_\theta(\dot{x}_d - \dot{x}_0) + K_\theta(x_d - x_0) = m\ddot{x} + K_d \dot{x} + K_p(x - x_d) \quad (10)$$

3. ساختار روش تلفیقی ایده آل

برای یک سیستم یک درجه آزادی توسط معادله (1) پیشنهاد می‌شود که کنترلر را بین کنترلر امپدانس و کنترلر ادمیتانس تغییر دهیم به طوری که:

$$F = \begin{cases} F_i & : t \in [t_0 + k\delta, (k+1-n)\delta) \\ F_a & : t \in [t_0 + (k+1-n)\delta, t_0 + (k+1)\delta) \end{cases} \quad (11)$$

که در آن t_0 زمان اولیه، δ بازه تغییر بین کنترلر امپدانس و ادمیتانس، $n \in [0, 1]$ چرخه کار، k یک عدد صحیح است که مقادیر $0, 1, 2, \dots$ را می‌گیرد و F_i قانون فیدبک حالت استاتیک است از معادله (6) بدست می‌آید و F_a نیروی کنترلر دینامیکی می‌باشد که با معادلات (7) و (9) تشریح می‌یابد؛ که در شکل 2 نمایش داده شده است.



شکل 2 - کنترل کننده متغیر بین کنترلر امپدانس و ادمیتانس

اگر محیط به عنوان یک فنر خطی مدل گردد داریم:

$$F_{ext} = K_e(x - x_0) \quad (12)$$

و با فرض

$$\ddot{x}_0 = \dot{x}_0 = 0$$

معادله سیستم تلفیقی اینگونه تشریح می‌گردد:

$$\begin{aligned} \dot{X}_i &= A_i X_i : t \in [t_0 + k\delta, (k+1-n)\delta) \\ \dot{X}_a &= A_a X_a : t \in [t_0 + (k+1-n)\delta, t_0 + (k+1)\delta) \end{aligned} \quad (13)$$

که

$$X_i = (e \quad \dot{e})^T \quad (14)$$

$$X_a = (e \quad \dot{e} \quad e_d \quad \dot{e}_d)^T \quad (15)$$

$$e_d = x_d - x_0 \quad (16)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(K_\theta + K_e)/M_\theta & -D_d/M_\theta \end{bmatrix} \quad (17)$$

و

$$A_a = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -(K_p + K_e)/m & -K_d/m & K_p/m & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

هنگامی که سیستم از کنترل امپدانس به کنترل ادیتانس تغییر میکند دو ترم اضافی بوجود می‌آید. این دو ترم، e_d و \dot{e}_d ، به راحتی برای حفظ پیوستگی و تداوم نیروی کنترل F و مشتقات آن انتخاب می‌گردد.

معادله (7) که بیانی از کنترل نیرو در کنترل ادیتانس را ارائه می‌دهد می‌تواند به صورت زیر تشریح گردد:

$$\begin{aligned} x_d &= x + K_p^{-1}(F_i + K_d \dot{x}) \\ e_d &= e + K_p^{-1}(F_i + K_d \dot{e}) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= \dot{x} + K_p^{-1}[\dot{F}_i + K_d \ddot{x}] \\ \dot{e}_d &= \dot{e} + K_p^{-1}[\dot{F}_i + K_d(F + F_{ext})] \end{aligned} \quad (20)$$

با جایگذاری F_i در معادلات (19) و (20) که F_i از معادله (6) حاصل می‌گردد داریم:

$$X_a = S_{ai} X_i, \quad S_{ai} = \begin{bmatrix} I \\ S \end{bmatrix} \quad (21)$$

که I ماتریس مشخصه می‌باشد و ورودی‌های $S = [S_{ij}]_{2 \times 2}$ عبارتند از:

$$S_{11} = 1 - \frac{K_e}{K_p} \left(\frac{m}{M_\theta} - 1 \right) - \frac{K_\theta m}{K_p M_\theta}$$

$$S_{12} = \frac{K_d}{K_p} - \frac{D_\theta m}{K_p M_\theta}$$

$$s_{21} = -\frac{m}{M_{\theta}} \frac{K_{\theta} + K_e}{K_p} \left(\frac{K_d}{m} - \frac{D_{\theta}}{M_{\theta}} \right)$$

$$s_{22} = 1 - \frac{K_e}{K_p} \left(\frac{m}{M_{\theta}} - 1 \right) - \frac{D_{\theta}}{M_{\theta}} \left(\frac{K_d}{K_p} - \frac{D_{\theta}}{K_p} \frac{m}{M_{\theta}} \right) - \frac{K_{\theta}}{K_p} \frac{m}{M_{\theta}}$$
(22)

هنگامی که کنترلر از ادیتانس به امیدانس تغییر می‌کند، نگاشت متغیر این ترم از رابطه

$$X_i = S_{ia} X_a, \quad S_{ia} = [I \quad G]$$
(23)

بدست می‌آید که G یک ماتریس 2×2 صفر است.

4. پایداری

می‌دانیم که حالت سیستم در زمان $t = t_0 + k\delta$ و حالت در زمان $t = t_0 + (k+1)\delta$ ، که $k=0,1,2,\dots$ ، با کمک روابط (13)، (21) و (23) بصورت زیر مشخص می‌گردد:

$$X_i(t_0 + (k+1-n)\delta) = e^{A_i(1-n)\delta} X_i(t_0 + k\delta)$$

$$X_a(t_0 + (k+1-n)\delta) = S_{ai} X_i(t_0 + (k+1-n)\delta)$$

$$X_a(t_0 + (k+1)\delta) = e^{A_a n \delta} X_a(t_0 + k+1-n)\delta$$

$$X_i(t_0 + (k+1)\delta) = S_{ia} X_a(t_0 + (k+1)\delta)$$
(24)

که

$$X_i(t_0 + (k+1)\delta) = S_{ia} e^{A_a n \delta} S_{ai} e^{A_i(1-n)\delta} X_i(t_0 + k\delta)$$
(25)

حال با تعریف ماتریس

$$A_{DES} \triangleq S_{ia} e^{A_a n \delta} S_{ai} e^{A_i(1-n)\delta}$$
(26)

داریم:

$$X_i(t_0 + (k+1)\delta) = A_{DES} X_i(t_0 + k\delta)$$
(27)

حال زیر سیستم هم ارز گسسته را بر پایه تعریف هم ارز گسسته در داس و موخارجی [6] بیان می‌کنیم.

زیر سیستم هم ارز گسسته (DES): سیستم خطی زمان-ثابت

$$\dot{X} = A_{eq} X$$
(28)

یک DES از یک سیستم خطی سوئیچی است اگر حالت متغیر از این DES، به صورت مقادیر یکسان از زیر مجموعه‌ی حالت سیستم سوئیچ شده در فواصل منظم از زمان فرض شود و از همان شرایط اولیه یکسان آغاز گردد. با توجه به تعریف بالا، سیستم شرح داده شده با معادله (28) یک DES از سیستم شرح داده شده بوسیله معادلات (13)، (21) و (23) می‌باشد اگر:

$$A_{eq} = \frac{1}{\delta} \ln[A_{DES}]$$
(29)

که \ln به عنوان لگاریتم طبیعی ماتریس اصلی تعریف می‌گردد.

حال تئوری پیرو در پایداری را شرح می‌دهیم [5]. معادله $X_i=0$ برای سیستم سوئیچ شده که با معادلات (13)، (21) و (23) شرح داده شده است به صورت تابع نمایشی است اگر A_{eq} سیستم DES در معادله (28) بصورت ماتریس هارویتز (Hurwitz) باشد. شرط لازم و کافی برای وجود A_{eq} در معادله (29) این است که A_{DES} غیر منفرد باشد [6]. بنابراین اگر λ_{DES} یک مقدار مشخصه برای A_{DES} باشد پس مقدار مشخصه λ_{eq} مرتبط می‌شود با A_{eq} با [6]:

$$\lambda_{eq} = \frac{1}{\delta} \ln(|\lambda_{DES}|) + i \frac{1}{\delta} \arg(\lambda_{DES}) \quad (30)$$

که \arg آرگومان λ_{eq} می‌باشد و منظور از i بخش موهومی می‌باشد. آنالیز پایداری بر پایه تغییر از کنترل امپدانس به کنترل ادیمیتانس و بازگشت به کنترل امپدانس می‌باشد. این ترتیب منجر به تعریف DES با لگاریتم ماتریس اصلی 2×2 $S_{ia} e^{A_a n \delta} S_{ai} e^{A_i (1-n)\delta}$ نشان داده شده در معادله (25) می‌گردد. اگرچه اگر سیستم تلفیقی از کنترل ادیمیتانس به کنترل امپدانس سوئیچ کند و به کنترل ادیمیتانس بازگردد منجر به تعریف DES با لگاریتم ماتریس اصلی 4×4 $S_{ai} e^{A_i (1-n)\delta} S_{ia} e^{A_a n \delta}$ می‌گردد. این مشکل ساز است زیرا برای ماتریس‌هایی نظیر $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ و $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ با $m < n$ مقدار ویژه AB و BA همانند یکدیگر است بجز برای مقدار ویژه اضافی ماتریس BA (ماتریس $m - n$) که برابر با صفر است. بنابراین ماتریس $S_{ai} e^{A_i (1-n)\delta} S_{ia} e^{A_a n \delta}$ بصورت منفرد یا منحصر بفرد می‌باشد.

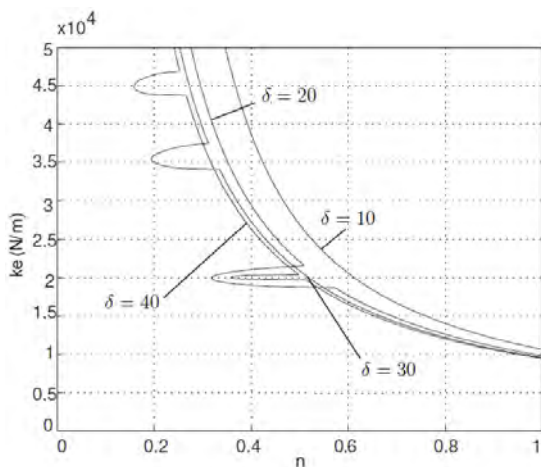
5. بررسی پایداری سیستم اسمی

ماتریس A_{eq} به مقادیر سختی خارجی محیط، K_e ، دوره سوئیچ کردن δ و مقدار n بستگی دارد. بنابراین قبل از شبیه سازی سیستم ساده، مشخصات پایداری سیستم را در غیاب ابهامات مدلی آنالیز می‌کنیم. مقادیر سیستم نمونه را بصورت زیر اختیار می‌کنیم:

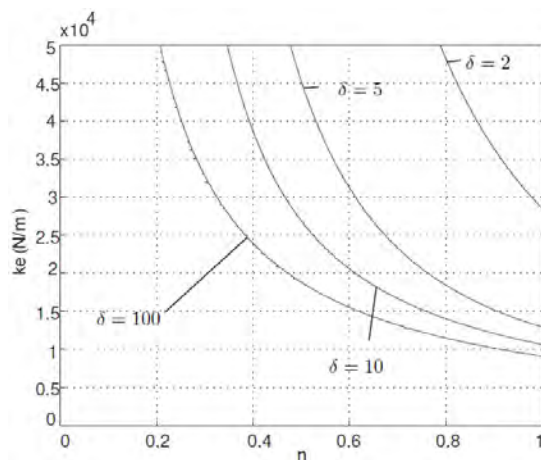
$$m=1 \text{ Kg} \quad K_p=10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad K_d=1.4 \sqrt{K_p m} \frac{\text{N.s}}{\text{m}}$$

$$M_0=1 \text{ Kg} \quad K_0=100 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad D_0=1.4 \sqrt{K_0 M_0} \frac{\text{N.s}}{\text{m}}$$

در شکل 1 و 2 مرزهای پایداری سیستم برای مقادیر مختلف K_e و δ نمایش داده شده است. خط‌های نمودار نشان دهنده مرزهای پایداری برای یک مقدار ثابت δ در صفحه (n, K_e) می‌باشند که مقادیر موجود در سمت چپ و پایین خطوط نشان دهنده نواحی پایدار سیستم می‌باشد. با دیدن این شکل متوجه افزایش مساحت نواحی پایدار با کاهش مقدار δ می‌شویم.



شکل 2- مرزهای پایداری برای مقادیر دیگر δ



شکل 1- مرزهای پایداری برای مقادیر مختلف δ

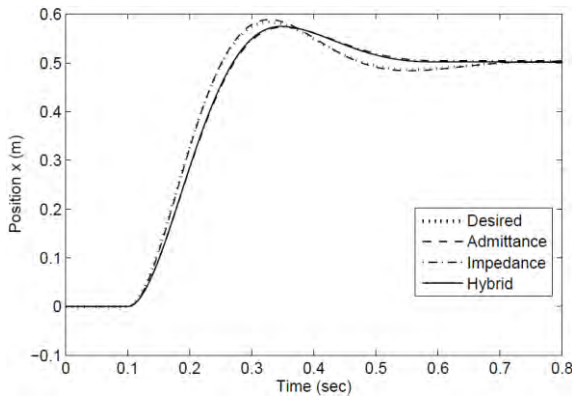
با در نظر گرفتن M_0 به مقدار 0.08٪ مقدار واقعی و در نظر گرفتن تاخیر مقادیر F_{ext} و X و \dot{X} به مقدار $T_d=0.002$ s و X_0 برابر با مقدار 1 متر شبیه سازی را در نرم افزار متلب انجام می دهیم .

در شکل های 3 و 4 و 5 انحراف از مقدار مطلوب سیستم در محیطی نرم با سختی $K_e=100$ N/m و برای $\delta=0.5$ و n های متفاوت رسم گردیده است که در آن رفتار کنترل امپدانس (Impedance) ، کنترل ادیتانس (Admittance) ، کنترل کننده تلفیقی سوئیچی (Hybrid) و پاسخ ایده آل یا مطلوب (Desired) نمایش داده شده است .

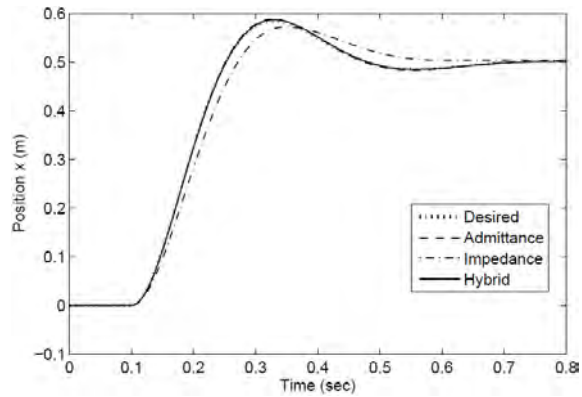
در شکل 3 مقدار n را برابر با 0.9 اختیار کرده و در شکل نیز می بینیم که مقادیر کنترل ادیتانس و کنترل کننده تلفیقی سوئیچی بسیار به مقدار مطلوب نزدیک می باشند زیرا کنترل ادیتانس رفتاری بسیار شبیه به کنترل کننده تلفیقی دارد زمانی که $n \rightarrow 1$.

در شکل 4 با اختیار n به مقدار 0.1 ، متوجه رفتار تقریبی کنترل کننده تلفیقی سوئیچی به کنترل امپدانس می گردیم. نظیر رفتار قبلی هنگامی که $n \rightarrow 0$ اختیار گردد رفتار کنترل کننده تلفیقی سوئیچی به کنترل امپدانس میل می کند.

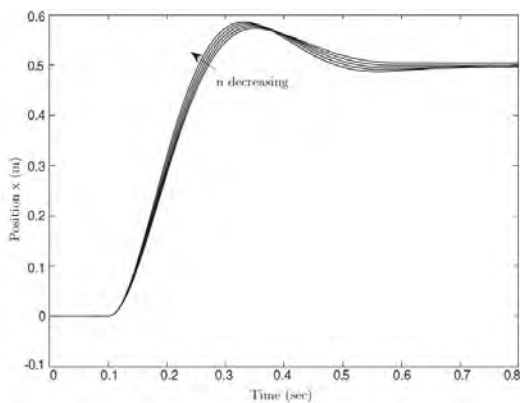
در شکل 5 با اختیار n به مقدار 0.5 متوجه رفتاری کاملاً تلفیقی از کنترل امپدانس و کنترل ادیتانس در کنترل کننده تلفیقی سوئیچی می شویم . پاسخی که از کنترل کننده تلفیقی سوئیچی حاصل می گردد بسیار به مقدار n وابسته است . این مهم در شکل 6 نمایش داده شده است .



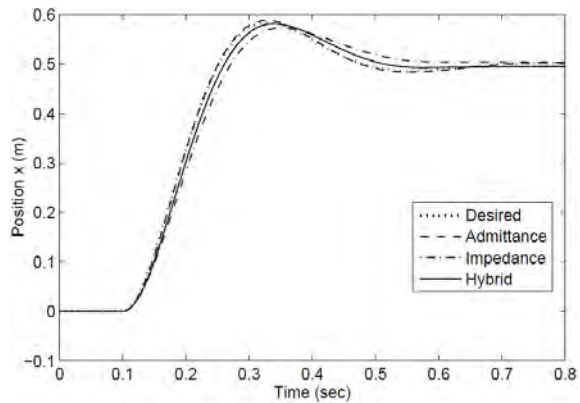
شکل 4- پاسخ موقعیت سیستم برای $n=0.1, \delta=0.5, K_e=100$ N/m



شکل 3- پاسخ موقعیت سیستم برای $n=0.9, \delta=0.5, K_e=100$ N/m



شکل 6- پاسخ موقعیت سیستم برای $\delta=0.5, K_e=100$ N/m



شکل 5- پاسخ موقعیت سیستم برای $n=0.5, \delta=0.5, K_e=100$ N/m

در مدل سازی قبل شبیه سازی برای محیطی نرم بررسی گردید. حال سیستم را در تعامل با محیط سخت تری با $K_e=1000$ N/m قرار داده و نتایج را بررسی می کنیم . در شکل های 7 و 0 و 9 انحراف از مقدار مطلوب سیستم در محیطی سخت با سختی $K_e=1000$ N/m و برای $\delta=0.5$ و n های متفاوت رسم گردیده است که در آن رفتار کنترل امپدانس (Impedance) ، کنترل ادیتانس (Admittance) ، کنترل کننده تلفیقی سوئیچی (Hybrid) و پاسخ ایده آل یا مطلوب (Desired) نمایش داده شده است .

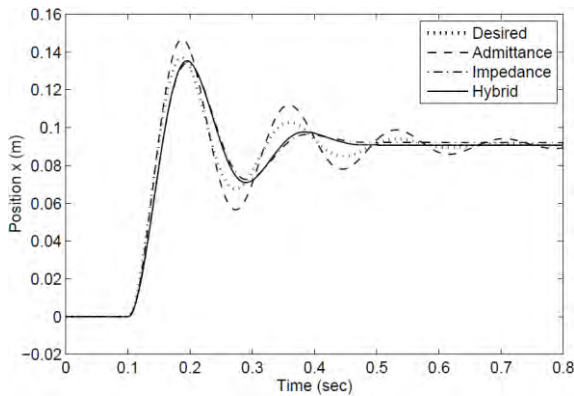
در شکل 7 مقدار n را برابر با 0.9 اختیار کرده و در شکل نیز می بینیم که مقادیر کنترل ادیتمانس و کنترل کننده تلفیقی سوئیچی بسیار به یکدیگر نزدیک می باشند اما رفتار هر دو روش با رفتار ایده ال مطابقت ندارد.

در شکل 8 با اختیار n به مقدار 0.1 متوجه رفتار تقریبی کنترل کننده تلفیقی سوئیچی به کنترل ادیتمانس می گردیم اما هر دو رفتار با رفتار ایده ال مطابقت ندارد. این نتیجه نیز قابل پیش بینی بود.

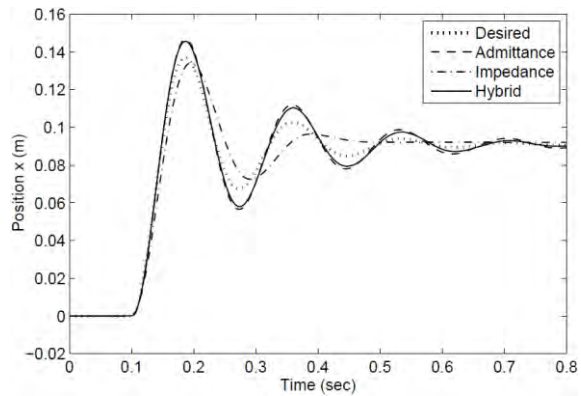
در شکل 9 با اختیار n به مقدار 0.5 متوجه رفتاری کاملاً تلفیقی از کنترل ادیتمانس و کنترل ادیتمانس در کنترل کننده تلفیقی سوئیچی می شویم با این تفاوت که رفتار کنترل کننده سوئیچی بسیار با رفتار ایده ال مطابقت دارد. همانند قبل پاسخی که از کنترل کننده تلفیقی سوئیچی در محیطی سخت حاصل می گردد بسیار به مقدار n وابسته است. این مهم در شکل 18 نمایش داده شده است.

6. نتیجه گیری

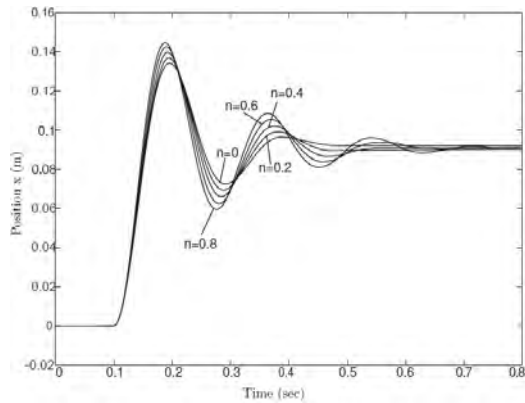
ما در اینجا رفتار کنترل کننده تلفیقی که توسط او.تی.تی [5] ارائه گردید را بررسی کردیم. با استفاده از تلفیق دو روش کنترل ادیتمانس و کنترل ادیتمانس که هر کدام معایبی در تعامل با محیط باشند توانستیم یک کنترل کننده تلفیقی ایجاد کرده که بین کنترل ادیتمانس و کنترل ادیتمانس سوئیچ میکند و دقت کنترل ادیتمانس در محیط های نرم و قدرت کنترل ادیتمانس را در محیط های سخت را در این کنترل کننده فراهم آورد. این کنترل کننده تلفیقی سوئیچی رفتاری بین رفتار کنترل ادیتمانس و کنترل ادیتمانس دارد و همین رفتار است که به این کنترل کننده اجازه تعامل با محیط با سختی های متفاوت را می دهد. اگرچه در این بررسی تنها پایداری برای سیستم خطی یک درجه آزادی بررسی گردید اما پیش بینی می شود که این پایداری برای سیستم های غیر خطی و چند درجه آزادی طبق شرایط خاصی نیز حاصل می گردد [5].



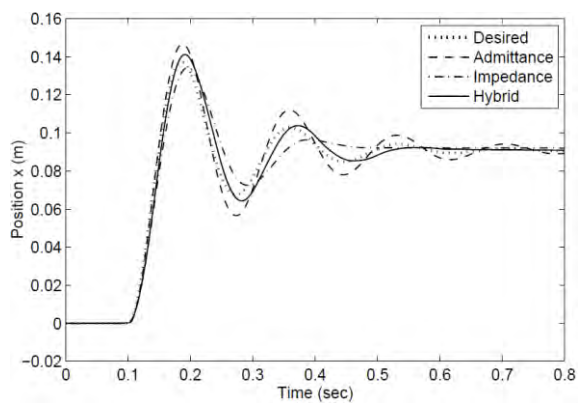
شکل 7- پاسخ موقعیت سیستم برای $n=0.1, \delta=0.5, K_e=1000\text{N/m}$



شکل 8- پاسخ موقعیت سیستم برای $n=0.9, \delta=0.5, K_e=1000\text{N/m}$



شکل 9- پاسخ موقعیت سیستم برای $\delta=0.5, K_e=1000\text{N/m}$



شکل 10- پاسخ موقعیت سیستم برای $n=0.5, \delta=0.5, K_e=1000\text{N/m}$



7. مراجع

1. Whitney D., Historical perspective and state of the art in robot force control. Int. J. Robotics Res.6.3-14(1998)
2. Paul R., Problems and research issues associated with the hybrid control of force and displacement Proc. Workshop on Space Telerobotics 255-260 (1987).
3. Hogan N. and Collgate E., In Robotics Review (Edited by Khatib O., Craig J.J and Lozano-Perez T.), pp.339-348. MIT Press, Cambridge (1989)
4. Hogan N., Impedance control: an approach to manipulation. Part I: Theory. Part II: Implementation. Part III: Applications. Trans ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control 107, 1-24 (1985) .
5. C. Ott , R. Mukherjee, and Y. Nakamura. Unified Impedance and Admittance Control. In Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conferenceon, pages 554–561. IEEE, 2010.
6. FR Gantmacher. The Theory of Matrices. Chelsea, 1959.