معادلات حالت سیستم انتخاب شده به صورت زیر است :

$$\dot{X} = f(X) + g(X)u$$

با فرض متغییرهای سیستم به صورت

$$X = [I_{ds}\ \ I_{qs}\ \ \varphi_r\ \ \omega_r]^T \quad \rightarrow \quad X = \begin{cases} x_1 = I_{ds} \\ x_2 = I_{qs} \\ x_3 = \varphi_r \\ x_4 = \omega_r \end{cases}$$

و ورودی سیستم به صورت

$$u = [V_{ds}\ \ V_{qs}]^T$$

داریم :

$$f(X) = \begin{bmatrix} -\lambda . x_1 + \omega_s . x_2 + \sigma_r . \beta . x_3 \\ -\omega_s . x_1 - \lambda . x_2 - \beta . x_4 . x_3 \\ \sigma_r . L_m . x_1 - \sigma_r . x_3 \\ p^2 . \dfrac{L_m}{L_r . J} . x_3 . x_2 - \dfrac{p}{J} . C_r - \dfrac{f}{J} . x_4 \end{bmatrix}$$

در این صورت :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -142.358\, x_1 + 148.702\, x_2 + 231.152\, x_3 + 19.869\, V_{ds} \\ \dot{x}_2 = -148.702\, x_1 - 142.358\, x_2 - 19.879\, x_4 x_3 + 19.869\, V_{qs} \\ \dot{x}_3 = 1.468\, x_1 - 11.628\, x_3 \\ \dot{x}_4 = 26.667 x_3 x_2 - 0.333\, x_4 - 1333.4 \end{cases}$$

سیستم را حول مبدا خطی سازی می کنیم :

$$f(x_1, \dots, x_n) = f(x_{10}, \dots, x_{n0}) - (x_1 - x_{10}) \frac{\partial f}{\partial x_1} - \cdots - (x_n - x_{n0}) \frac{\partial f}{\partial x_n}$$

در این صورت سیستم خطی سازی شده به صورت زیر است :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -142.358\,x_1 + 148.702\,x_2 + 231.152\,x_3 + 19.869\,V_{ds} \\ \dot{x}_2 = -148.702\,x_1 - 142.358\,x_2 + 19.869\,V_{qs} \\ \dot{x}_3 = 1.468\,x_1 - 11.628\,x_3 \\ \dot{x}_4 = -0.333\,x_4 \end{cases}$$

فرم ماتریسی فضای حالت به صورت زیر است :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -142.358 & 148.702 & 231.152 & 0 \\ -148.702 & -142.358 & 0 & 0 \\ 1.468 & 0 & -11.628 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.333 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 19.869 & 0 \\ 0 & 19.869 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}$$

$$y = [1 \ \ 0 \ \ 0 \ \ 0]X$$

برای بررسی پایداری سیستم ، قطب های سیستم را بررسی می کنیم ، اما توجه داشته باشید چون سیستم ، یک سیستم چندمتغیره است ، فقط نوع قطب ها را بدست می آوریم .

$$eigen\ values\ are \ \ \rightarrow \ -142.9 \pm 148.0\,i \ \ , -10.5 \,, -0.3$$

و لذا قطب های سیستم پایدار می باشند .

با بدست آوردن ماتریس های کنترل پذیری و روئیت پذیری برای سیستم ، مشاهده می کنیم که رتبه ماتریس کنترل پذیری برابر 3 بوده و لذا این ماتریس رتبه ناقص است و این یعنی سیستم کنترل ناپذیر است ، از طرف دیگر با بدست آوردن ماتریس روئیت پذیری مشاهده می کنیم که این ماتریس رتبه کامل بوده و لذا سیستم روئیت پذیر است .

به خاطر این که سیستم دو ورودی دارد لذا تابع تبدیل سیستم با ابعاد 2×1 ظاهر می شود :

$$Y(s) = \frac{29.168s + 4152.254}{s^3 + 296.344s^2 + 45349s + 444466} V_{ds}(s) + \frac{4337.294}{s^3 + 14.636s^2 + 0.096 + 0.01} V_{qs}(s)$$

مشاهده می شود که سیستم چند متغییره است اما اغلب در موتورها چون استاتور و روتور از یک منبع تغذیه می شوند ، لذا ما فرض می کنیم که $V_{ds} = V_{qs}$. که در این صورت به یک سیستم SISO دست پیدا می کنیم که تابع تبدیل این سیستم به صورت زیر است :

$$G(s) = \frac{29.168\,s + 8490}{s^3 + 296.344s^2 + 45349s + 444465}$$

که صفرها و قطب های سیستم به صورت زیر می باشند :

$$\begin{cases} zeros \;\rightarrow\; -291.072 \\ poles \;\rightarrow\; -142.92 \pm 148.06\,i\,, -10.5 \end{cases}$$

مشاهده می شود که قطب 0.33- به دلیل اینکه قطب کنترل ناپذیر است در قطب های تابع تبدیل ظاهر نشده اند .

با استفاده از دستور

```
[T,J]=jordan(A)
```

معادلات فضای حالت سیستم را به فرم قطری جردن تبدیل می کنیم . با اجرای دستور فوق در محیط ماتریس تبدیل سیستم به صورت زیر است :

$$T = \begin{bmatrix} -89.44 + 100.86\,i & 0.77 & -89.44 - 100.86\,i & 0 \\ -101.64 - 89.44\,i & -0.87 & -101.64 + 89.44\,i & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

که در این صورت فرم فضای حالت به صورت زیر است :

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} -142.92 + 148.06\,i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -10.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -142.92 - 148.06\,i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.33 \end{bmatrix} Z + \begin{bmatrix} -0.104 - 0.006\,i \\ 0.207 \\ -0.104 + 0.006\,i \\ 0 \end{bmatrix} V$$

$$y = [1\;\;1\;\;1\;\;1]Z$$

از دستور

```
[Abar,Bbar,Cbar,T,k] = ctrbf(A,B,C)
```

استفاده می کنیم که با اجرای این دستور ، ماتریس های جدید را به عنوان خروجی بر می گرداند . با اجرای این دستور داریم :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -0.333 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -12.873 & 1.943 & 0 \\ 0 & 164.354 & -141.706 & 148.706 \\ 0 & 164.483 & -142.358 & -142.358 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 28.1 \end{bmatrix} V$$

$$y = [1 \ \ 0 \ \ 0 \ \ 0] X$$

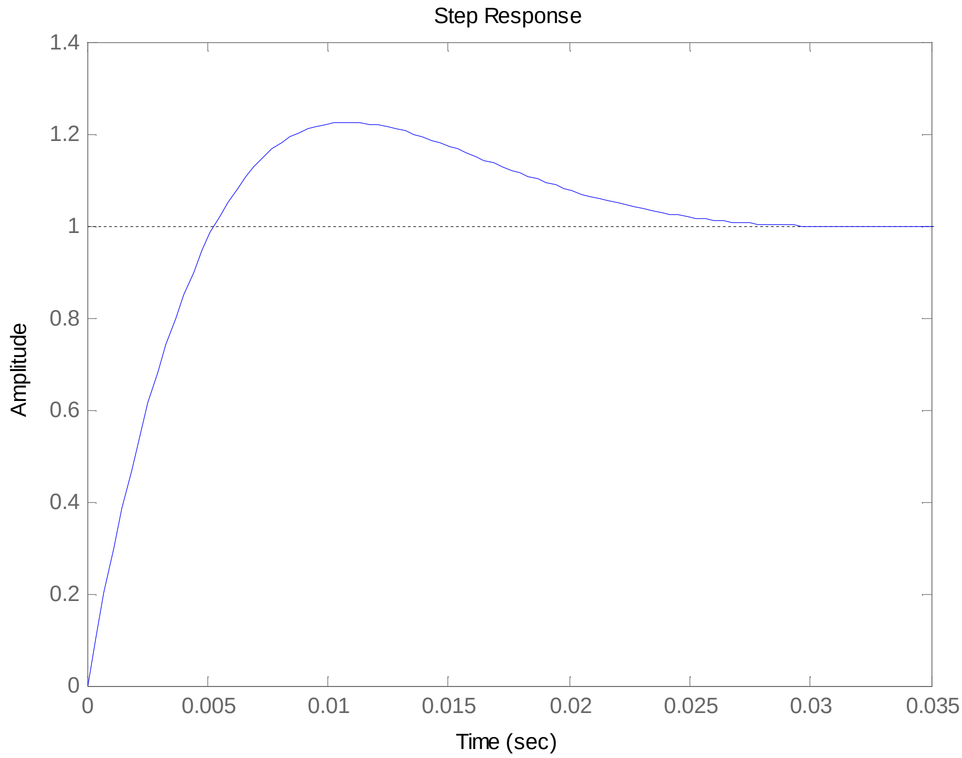
همانطور که می دانیم ، سیستم کنترل ناپذیر است و قطب 0.333- قابل کنترل نیست و نمی توان این قطب را کنترل کرد ، اما سه قطب دیگر که یک فضای حالت با ابعاد 3 را تشکیل می دهد ، قابلیت جایابی را داشته و در محیط متلب این قطب ها را جایابی می کنیم .

$$desired\ poles\ \rightarrow\ -10\ ,-20\ ,-30$$

در این صورت با استفاده از دستور place ماتریس بهره فیدبک به صورت زیر می باشد :

$$K = [1.584 \ \ -1.664 \ \ -8.432]$$

و پاسخ پله سیستم به صورت زیر است :



سیستم اصلی به صورت زیر است :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -142.358 & 148.702 & 231.152 & 0 \\ -148.702 & -142.358 & 0 & 0 \\ 1.468 & 0 & -11.628 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.333 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 19.869 \\ 19.869 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v$$

$$y = [1 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0]X$$

این سیستم یک سیستم روئیت ناپذیر است . و رتبه ماتریس روئیت پذیری ناقص و برابر 3 می باشد . لذا مدهای روئیت پذیر را از مد روئیت ناپذیر جدا می کنیم و سپس روئیت گر طراحی می کنیم . با استفاده از دستور زیر

```
[Abar,Bbar,Cbar,T,k] = obsvf(A,B,C)
```

در نرم افزار متلب ، فرم فضای حالت جدید به صورت زیر می باشد :

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} -0.333 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -104.092 & 59.483 & 125.854 \\ 0 & 59.483 & -49.894 & -79.217 \\ 0 & 0 & 274.852 & -142.358 \end{bmatrix} Z + \begin{bmatrix} 0 \\ -16.710 \\ 10.750 \\ 19.869 \end{bmatrix} V$$

$$y = [0\ \ 0\ \ 0\ \ 1]Z$$

که در آن ماتریس تبدیل به صورت زیر است :

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.814 & 0.541 & 0 \\ 0 & 0.541 & 0.841 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

بنابراین یکی از مدهای سیستم روئیت ناپذیر است و سه مد دیگر روئیت پذیر می باشند ، ما در ادامه برای این مدها روئیت گر طراحی می کنیم .

$$observer\ poles\ \rightarrow \{-10\ ,-20\ ,-30\}$$

با استفاده از دستور place ماتریس بهره روئیت گر به صورت زیر است :

$$L = [47.128\quad -28.582\quad -236.344]$$

در این قسمت می خواهیم روئیت گر کاهش مرتبه یافته از مرتبه 2 را طراحی کنیم . بنابراین فرض می کنیم یکی از سه مد قابل اندازه گیری نیست و برای طراحی ، روند زیر را دنبال می کنیم :

با انتخاب :

$$D = \begin{bmatrix} -163.575 & 0 \\ 59.483 & -10 \end{bmatrix}$$

قطب های روئیتگر را در 163.575- و 10- قرار می دهیم .

ماتریس Q را چنان تعیین می کنیم که :

$$CQ = [0\ \ 0\ \ 1]\ \rightarrow\ [0\ \ 0\ \ 1]Q = [0\ \ 0\ \ 1]$$

بنابراین :

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

و لذا :

$$\tilde{A} = Q^{-1}AQ = \begin{bmatrix} -163.575 & 220.654 & 226.288 \\ 59.483 & 9.589 & -138.7 \\ 0.000 & 274.852 & -142.358 \end{bmatrix}$$

از رابطه $\tilde{A}_{11} + \tilde{L}\tilde{A}_{21} = D$ ، ماتریس $\tilde{L}$ را بدست می آوریم :

$$\tilde{L} = \begin{bmatrix} -0.803 \\ -0.071 \end{bmatrix}$$

و با استفاده از رابطه $\tilde{A}_{12} + \tilde{L}\tilde{A}_{22} - D\tilde{L} = T$ مقدار ماتریس T را به صورت زیر بدست می آوریم :

$$T = \begin{bmatrix} 209.250 \\ -81.538 \end{bmatrix}$$

و داریم :

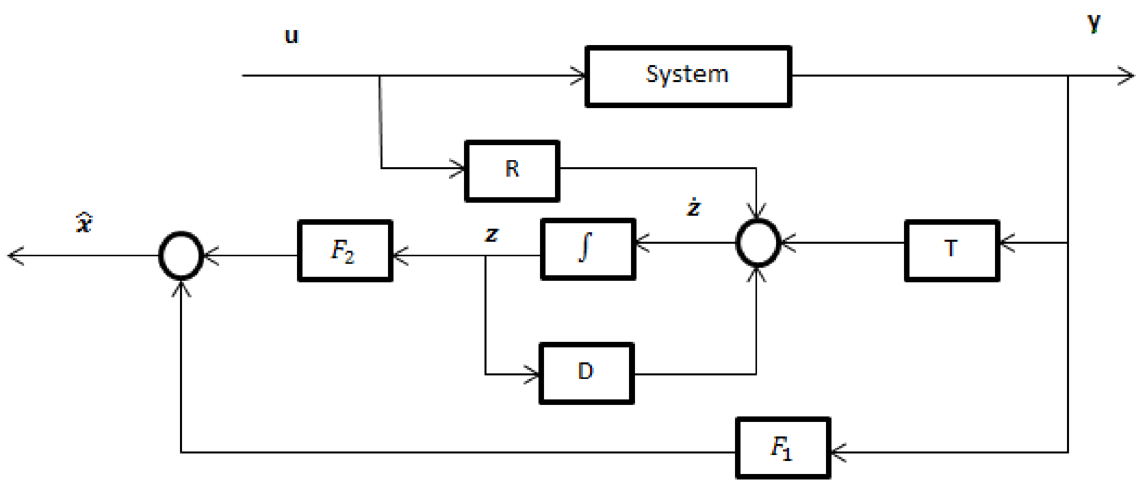
$$L = [I_{n-l} \quad \tilde{L}_{n-l,l}]Q^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0.197 \\ 0 & 1 & -0.071 \end{bmatrix}$$

و در نهایت داریم :

$$R = LB = \begin{bmatrix} -23.545 \\ 9.339 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C \\ L \end{bmatrix}^{-1} = [F_1 \quad F_2] \quad \rightarrow \quad F_1 = \begin{bmatrix} -0.126 \\ 0.071 \\ 1 \end{bmatrix} \quad and \quad F_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

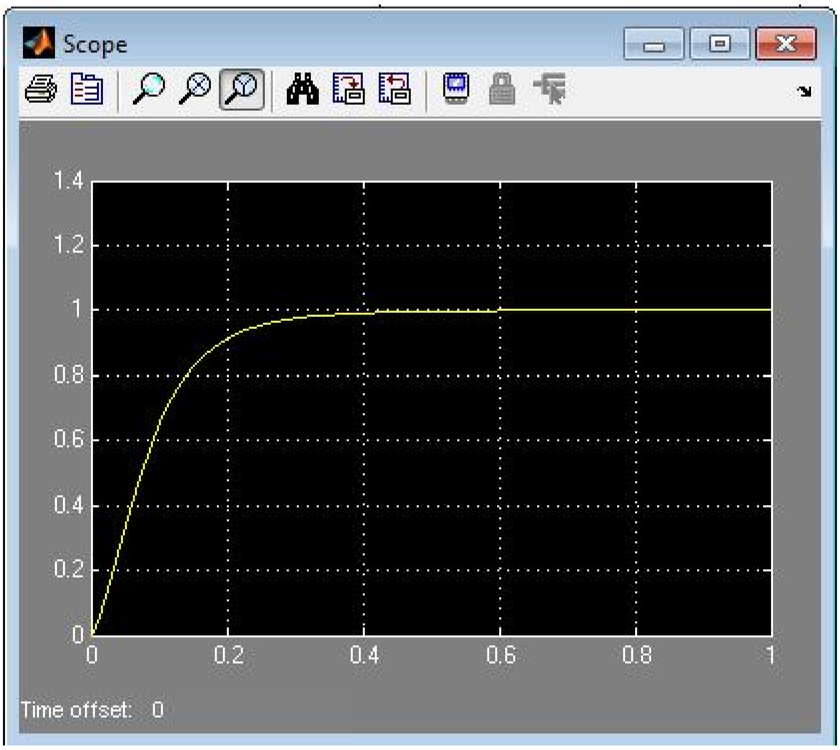
روئیت گر به صورت زیر است :



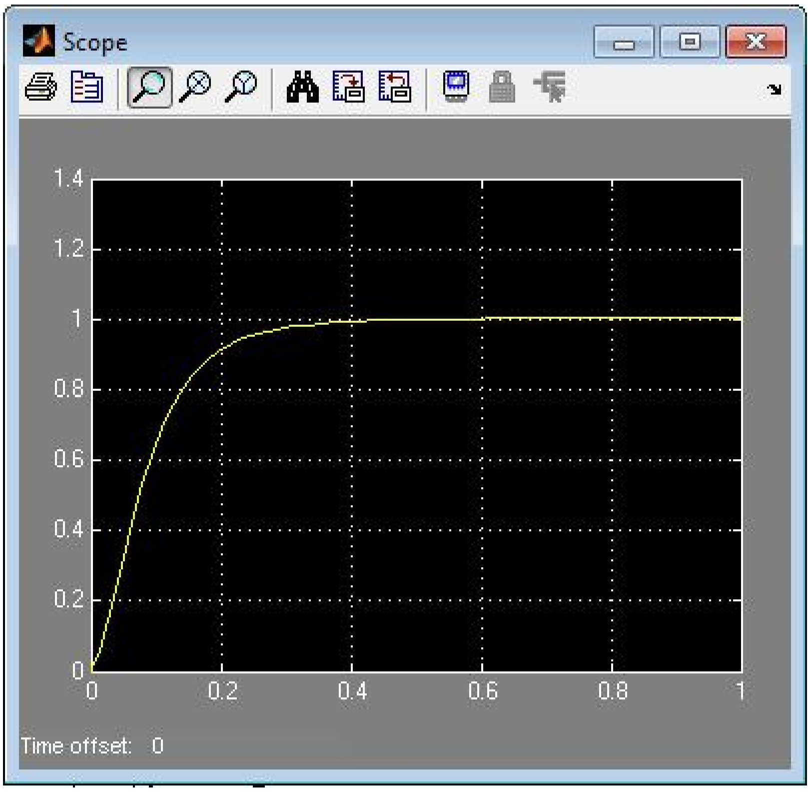
فایل های شبیه سازی برای این قسمت آماده شده اند که خروجی سیستم به صورت زیر می باشد :

✓ شرایط اولیه صفر

روئیت گر مرتبه کامل :



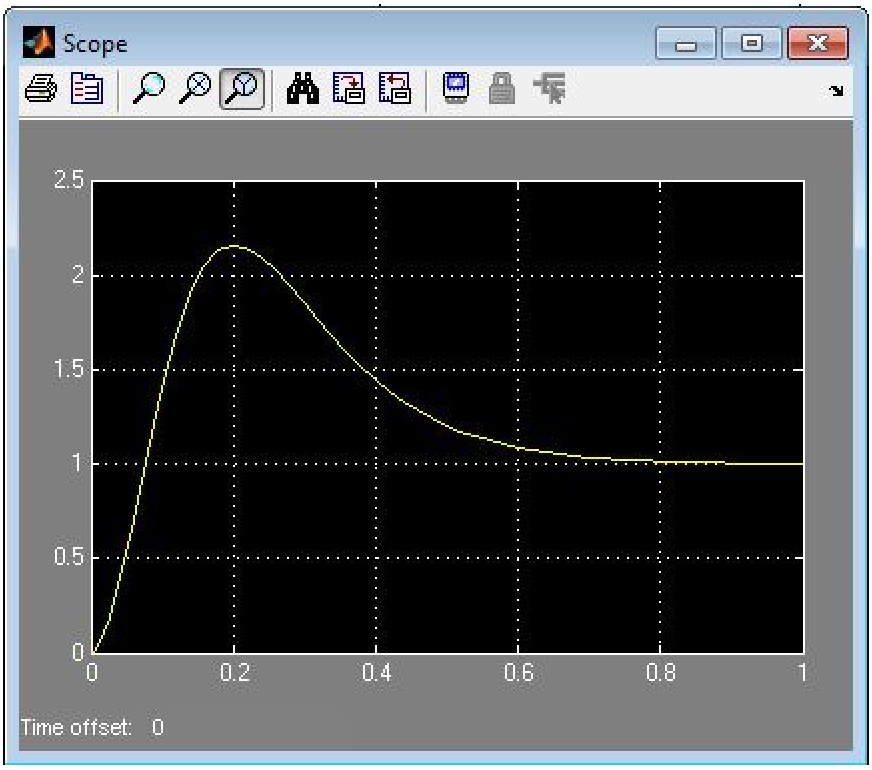
روئیت گر مرتبه کاهش یافته :



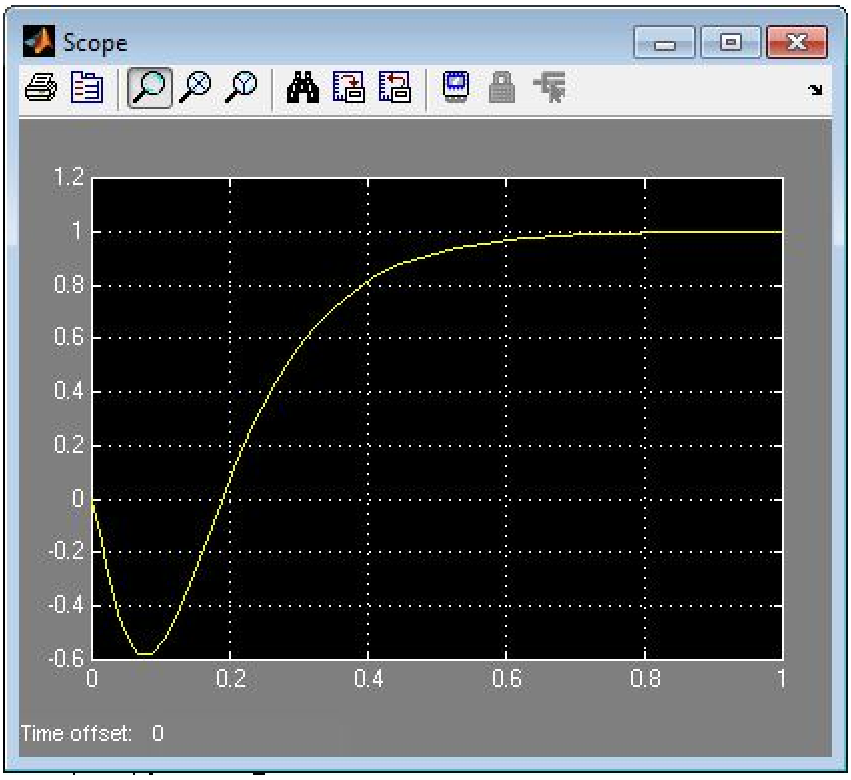
در حالت دوم ، پاسخ با کمی خطا همراه است .

✓ شرایط اولیه غیر صفر

رویئت گر مرتبه کامل :

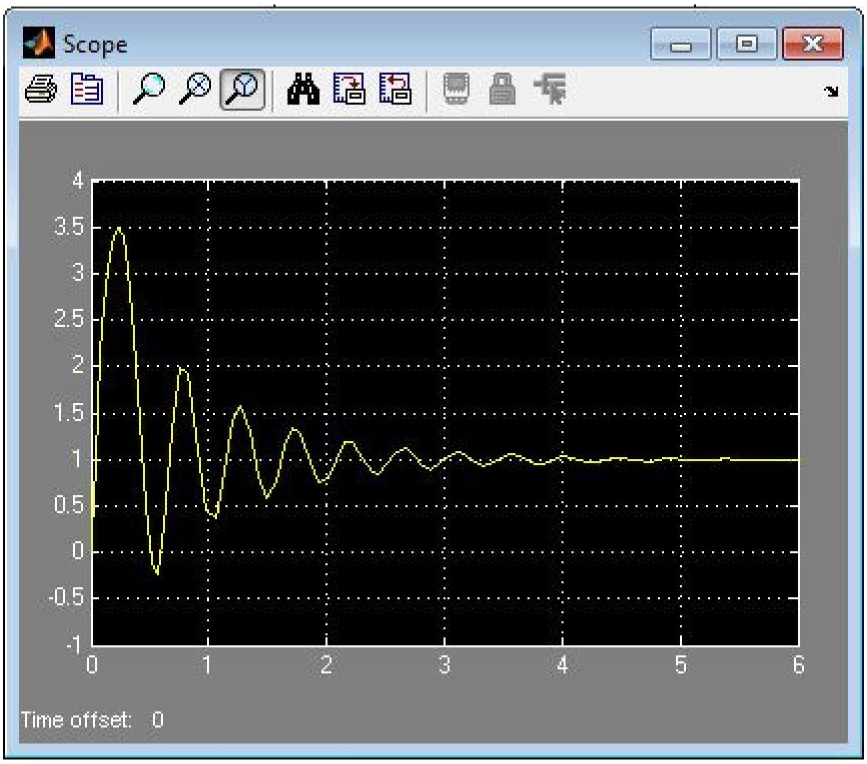


روئیت گر کاهش مرتبه یافته :

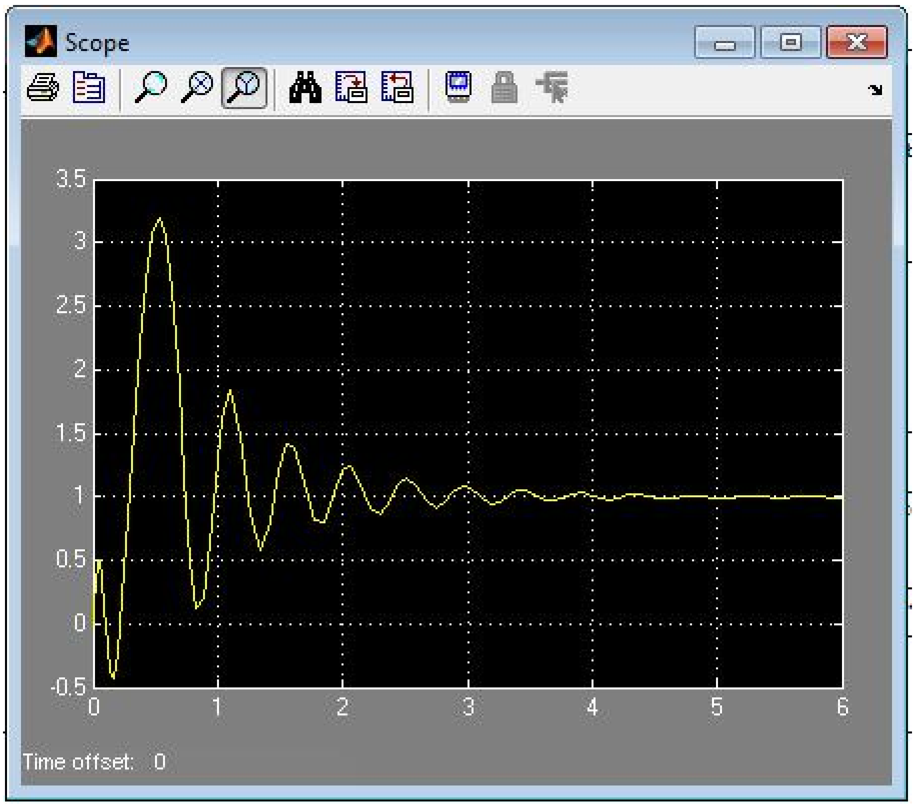


مشاهده می کنید که در این حالت پاسخ با مقداری خطا همراه می شود .

شرط اولیه صفر :



شرط اولیه غیر صفر :



مشاهده می شود در صورتی که شبیه سازی با شرایط اولیه x_1 انجام می شود ، پاسخ سیستم با فروجهش اولیه روبرو می شود ، اما پس از گذشت زمان خروجی را به خوبی دنبال می کند . در کل مشاهده می کنیم زمانی که از تخمین گر استفاده می شود خصوصا تخمین گر کاهش مرتبه یافته ، مقداری خطا در خروجی ظاهر می شود . همچنین ملاحظه می کنیم که برای سیستم خطی سازی شده ، خروجی سریع به حالت ماندگار می رسد ، یعنی سرعت پاسخ سیستم بالاست ، اما در صورتی که سیستم اصلی که یک سیستم غیرخطی می باشد ، برای شبیه سازی مورد استفاده قرار می گیرد ، سرعت پاسخ بسیار کمتر می شود . و این بهای تقریبی است که از آن در جهت طراحی روئیت گر و کنترلر برای سیستم ، استفاده شده است .