作业二 同步发电机模型仿真

电 02 肖锦松 2020010563

1.通过 MATLAB 仿真，以励磁电压的阶跃为输入（在原有 基础上变化，比如 的初值取 1.1，阶跃输入，则此时输入的励磁电压为 1.15），构建非线性模型，计算不同稳态初值条件下系统状态的动态过程。

这里选取 3 个稳态初值，分别是$V_f=1.05$、$V_f=1.1$、$V_f=1.15V$。分别利用实验一中计算运行点和加小扰动判断稳定性的方法来求解出 upper 和 lower 两种情况的运行点和稳定性。代码和实验一相同，此处省略，算出来结果如下：

对于 upper 情况，$V_f=1.15V$

```
deltasolve =

[0.70668462741791737702357067973935, 1.1639585729085650811498453549575]


Eq2solve =

[0.87599882214143398595496137204464, 0.61935296763008451659260344968061]
```

借助三阶状态方程解出 2 个运行点如上。

```
Eq2dDisturb =

[-0.00025229850300362607483726354287527, 0.00025200299717117792351056418862021]
[-0.00035680643259993559305601819805416, 0.00035646539147119864764918852482171]


omegadDisturb =

[-0.00010374197260891617600186829176186,   0.00010419542896532916215990697158662]
[0.000098376866725516257910122593722538, -0.000097551600427311192060718614078509]
```

加正负小扰动（对应列）后 2 个运行点（对应行）的$\dot{E}_q'$和$\dot{\omega}$的情况如上，可以看出第一个运行点是稳定的，而第二个不稳定。稳定运行点的$\delta=0.70668462741791737702357067973935$，将其存为$deltaUpperSolve$。

同理，对于 lower 情况，$V_f=1.05V$

```
deltasolve =

[0.77202379136310927965070050004969, 1.0725200271430268550432174379239]


Eq2solve =

[0.81538213051435548539558340053319, 0.64753469364612870062813954064041]
```

借助三阶状态方程解出 2 个运行点如上。

```
Eq2dDisturb =

[-0.00027108755681264999175415227114279, 0.00027070420254712834314102754332982]
[-0.00034130383211880265363110934059921, 0.00034092536398659935557930288672396]


omegadDisturb =

[-0.000067718758812403562709274696357753,  0.000068358769631677662639353151463227]
[0.000066051867034664378535355244084845, -0.000065232525738715915805846928270524]
```

加正负小扰动（对应列）后 2 个运行点（对应行）的$\dot{E}_q'$和$\dot{\omega}$的情况如上，可

以看出第一个运行点是稳定的，而第二个不稳定。稳定运行点的$\delta = 0.77202379136310927965070050049 69$，将其存为$deltaLowerSolve$。

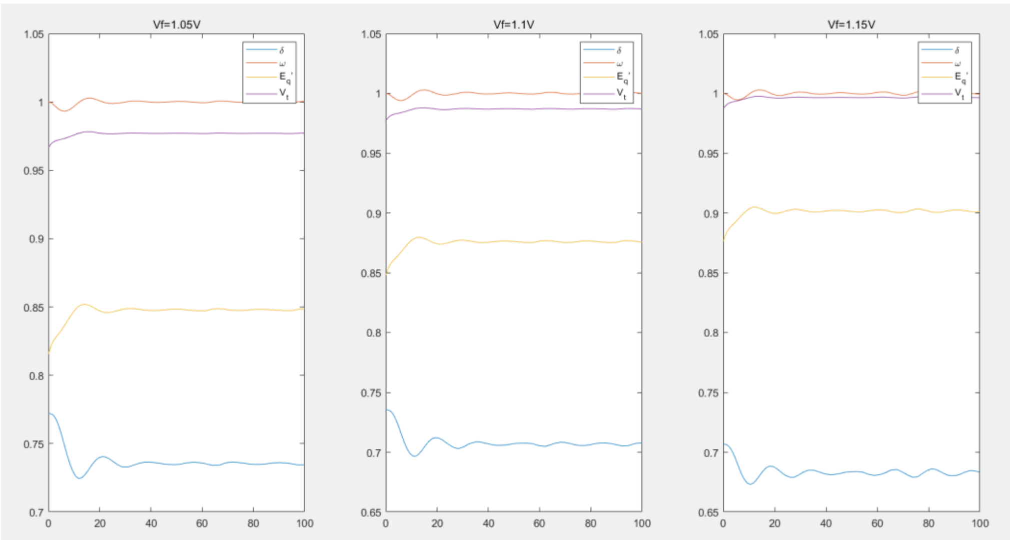
把所有的初值存到x_0内，三列分别为$V_f = 1.05V$、$V_f = 1.1V$、$V_f = 1.15V$情况的状态变量初值。

计算不同稳态初值条件下系统状态的动态过程，代码如下，$t = 0$时刻发生阶跃输入，$y(1)$到$y(4)$分别表示δ、ω、E_q'、V_t。

```
% 123列分别为Vf,upperVf,lowerVf的初值
% 用double函数否则"错误使用 odearguments输入必须为单精度或双精度浮点值"
x0 = double([[deltaLowerSolve(1);omega0;Eq2LowerSolve(1)]...
    [deltaSolve(1);omega0;Eq2Solve(1)]...
    [deltaUpperSolve(1);omega0;Eq2UpperSolve(1)]]);
Vfs = [1.05;1.1; 1.15];
tspan = [0 100];
for i=1:3
stateFunction = @(t,x)[x(2)-omega0;...
    (omega0/(2*H))*Pm - D*(x(2)-omega0)/(2*H) - (omega0/(2*H))*((x(3)*Vs)/xdSigma2)*sin(x(1));...
    -x(3)/Td2 + (1/Td02)*((xd-xd2)/xdSigma2)*Vs*cos(x(1)) + (Vfs(i)+DeltaVf)/Td02];
    [t,y] = ode45(stateFunction,tspan,x0(:,i));

    delta = y(:,1);
    Eq2 = y(:,3);
    id = (Eq2-Vs.*cos(delta))./xdSigma2;
    Vtq = Eq2-id.*xd2;
    iq = Vs.*sin(delta)/xdSigma;
    Vtd = iq.*xq;
    Vt = sqrt(Vtd.^2 + Vtq.^2);
    y(:,4) = Vt;

    subplot(1,3,i);
    plot(t,y);
    legend('\delta','\omega','E_{q}''','V_{t}');
end
```



δ、ω、E_q'、V_t的变化图像如上，从左到右分别为$V_f = 1.05V$、$V_f = 1.1V$、$V_f = 1.15V$。

2. 通过 MATLAB 仿真，以励磁电压的阶跃为输入，采用作业一构建的线性模型，计算不同稳态初值条件下系统状态的动态过程。（采用 ode45 计算）

作业一构建的线性模型如下：

$$\begin{matrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{E_q}' \end{matrix} = A \cdot \begin{matrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E_q' \end{matrix} + B \cdot \Delta V_f$$

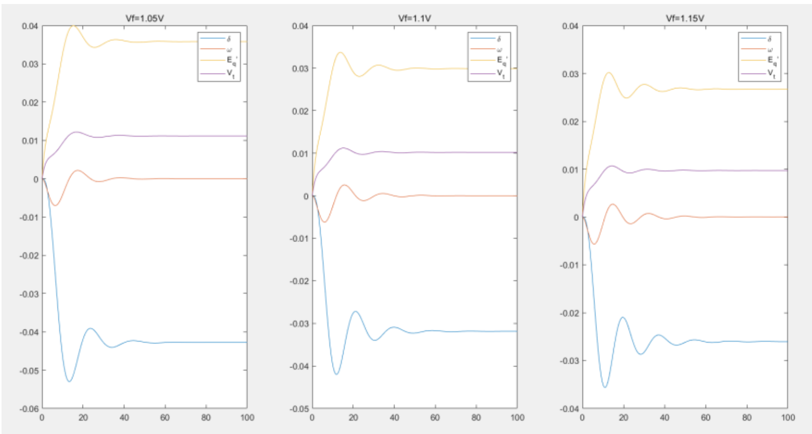
$$\Delta V_t = C \cdot \begin{matrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E_q{'} \end{matrix}$$

三个稳态初值对应的 A、B、C 矩阵是各不相同的，因此用循环的方式每次算出各自的 A、B、C 矩阵，然后进行解微分方程组求动态过程。

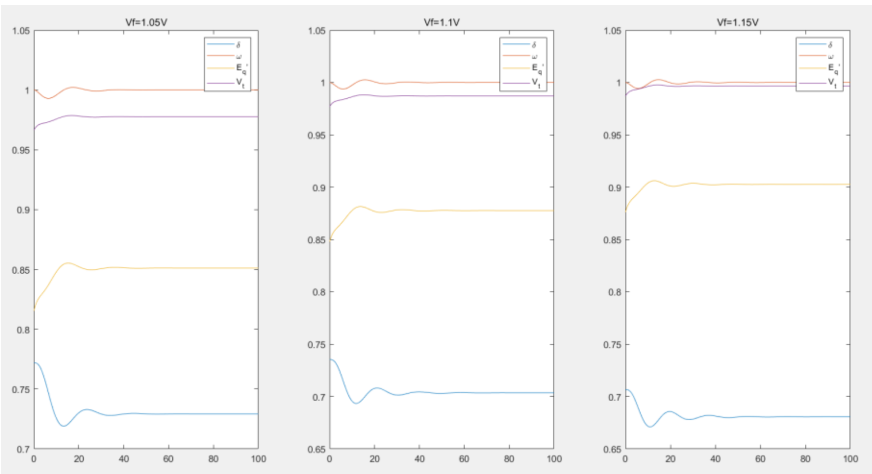
```
for i=1:3
    dVts = vpa(subs(dVt,x,x0(:,i)));
    ddeltads = vpa(subs(ddeltad,x,x0(:,i)));
    domegads = vpa(subs(domegad,x,x0(:,i)));
    dEq2ds = vpa(subs(dEq2d + (1/Td02).*dVf,x,x0(:,i)));

    dd = [ddeltads domegads dEq2ds]';
    d = [ddelta domega dEq2 dVf];
    A = double([diff(dd,d(1)) diff(dd,d(2)) diff(dd,d(3))]);
    B = double([diff(dd,d(4))]);
    C = double([diff(dVts,d(1)) diff(dVts,d(2)) diff(dVts,d(3))]);

    linearFuntion = @(t,linear_x)(A*linear_x+B*DeltaVf);
    [t,y] = ode45(linearFuntion,[0 100],[0;0;0]);
    y(:,4) = C(1)*y(:,1)+C(2)*y(:,2)+C(3)*y(:,3);
    subplot(1,3,i);
    plot(t,y);
    legend('\delta','\omega','E_{q}''','V_{t}');
    titles = ["Vf=1.05V" "Vf=1.1V" "Vf=1.15V"];
    title(titles(i));
```



加上三个稳态初值后

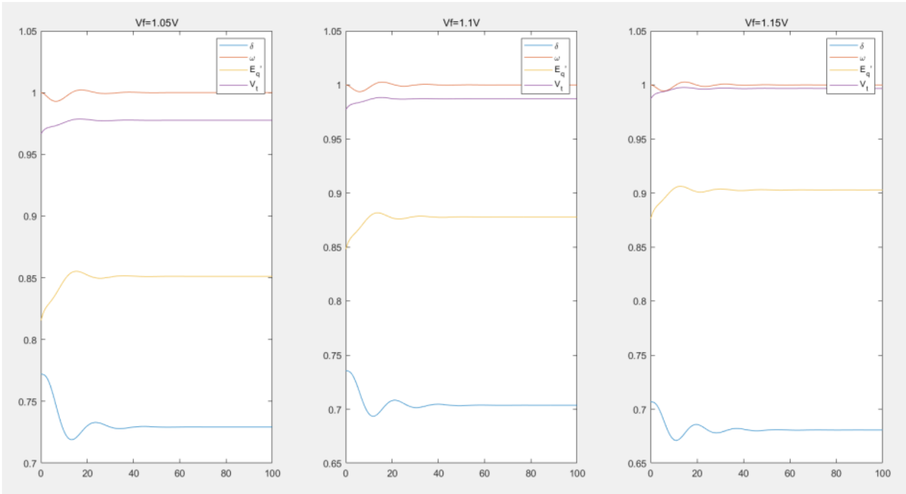


3. 通过 MATLAB 仿真，以励磁电压的阶跃为输入，构造系统传递函数，计算不同稳态初值条件下系统状态的动态过程，与任务 1、 2 的结果进行对比。

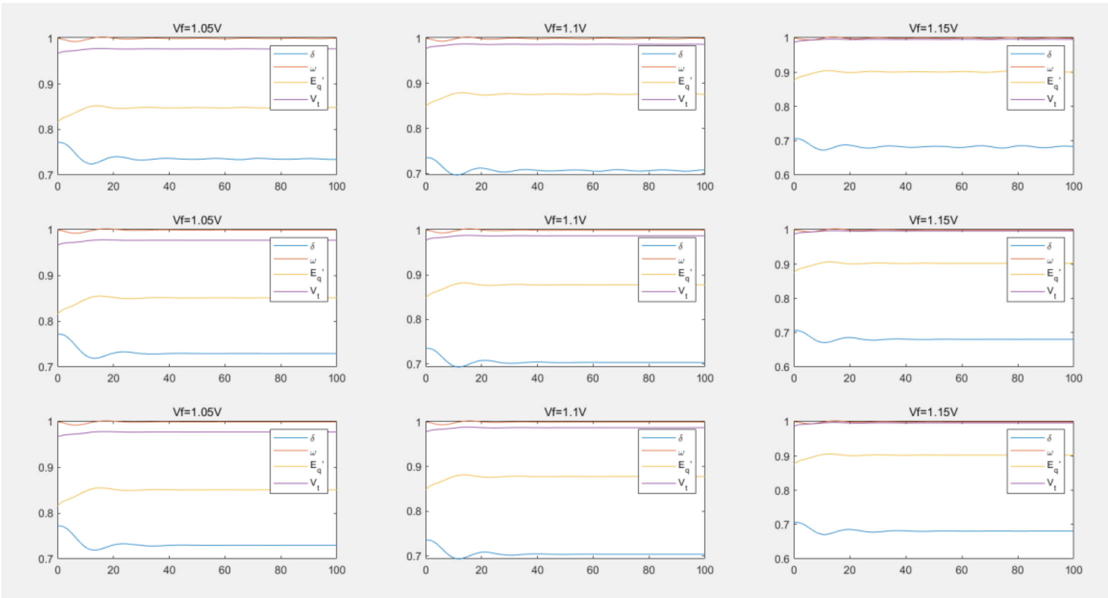
构建的线性模型如下：

$$\begin{matrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{E_q}' \end{matrix} = A\cdot \begin{matrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E_q' \end{matrix} + B\cdot \Delta V_f$$

$$\Delta V_t = C\cdot \begin{matrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E_q' \end{matrix}$$



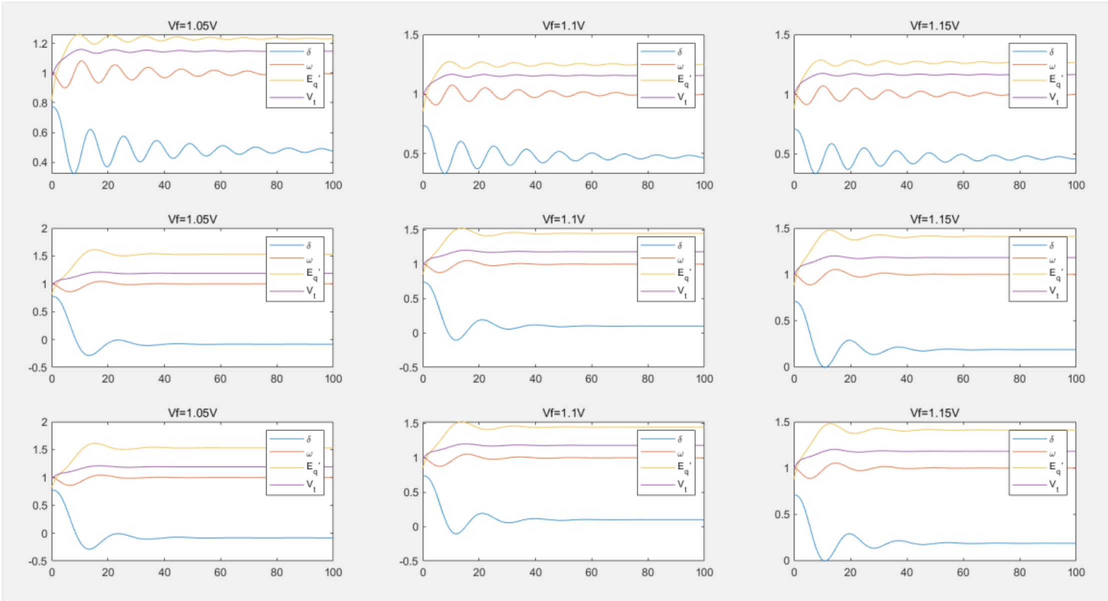
任务 1、2、3 的对比图如下，从上到下分别为任务一、二、三。



可以看出，由于任务二和任务三均进行了平衡点附近的线性化，因此状态量的动态过程图像是一样的，而任务一是非线性三阶微分方程直接求解，过程更加接近于真实情况，同时其稳定所需要的时间比二、三更长。任务二、三的状态变量在$t=50$的时候基本上已经稳定，而任务一仍有小幅度的波动。

令$\Delta V_f=1V$，重新运行 3 个任务代码，得到以下三个图像，任务要的是每张

图中间的原始初值图像，从上到下为任务一、二、三。



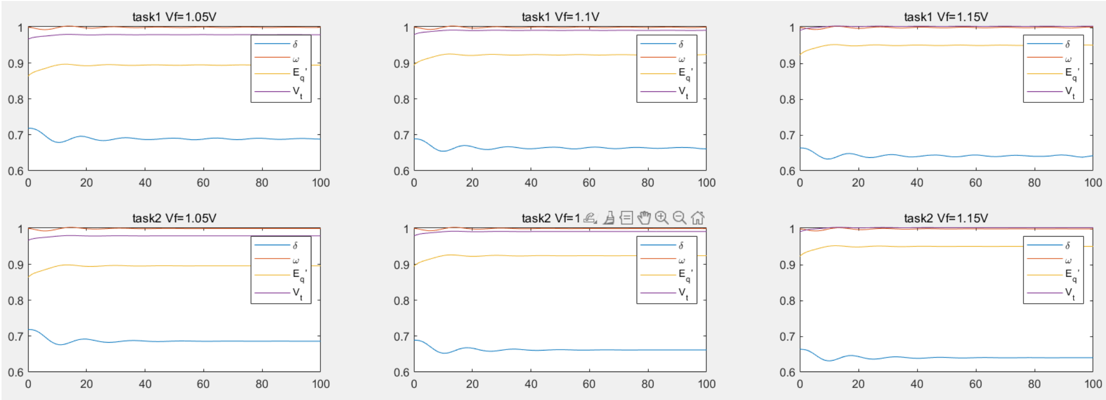
$\Delta V_f = 1V$的情况相对于$\Delta V_f = 0.05V$有明显的变化，首先是状态量在开始时的波动更大，总体的稳定时间更长。同样的任务二、三，肉眼可见稳定时间超过$t = 60$，而任务一在$t = 100$前仍未稳定。

本质上任务一采用的是对三阶状态方程直接进行微分方程求解，该过程更为真实，应该采用这种方法。而任务二、三在平衡点附近对状态方程进行线性化，其实在加上阶跃到稳定状态时，状态量并不遵循该线性化方程，该线性化方程本质上来说只是对稳定点处及其附近的状态变量的描述。

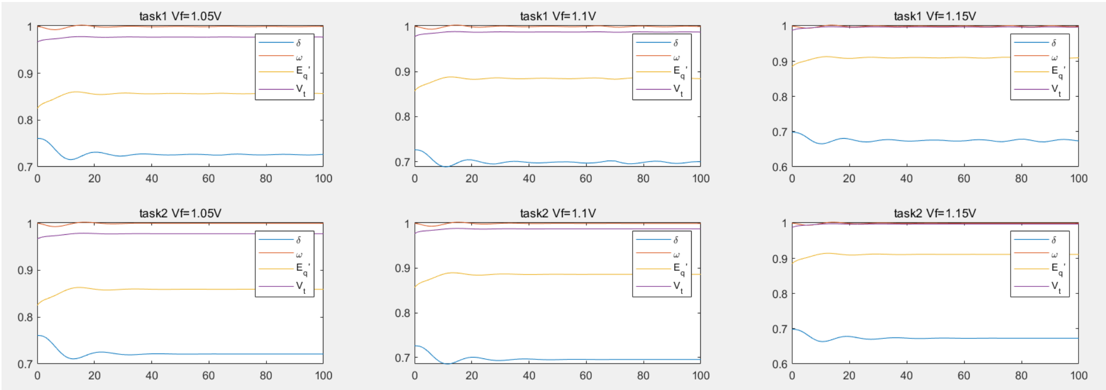
也正是因为如此，在$\Delta V_f = 0.05V$的时候，相比于初值可以忽略，因此此时状态变量的方程与线性化后的方程更为贴切，因此任务一、二、三的图像其实并没有太大区别。而在$\Delta V_f = 1V$的时候，相比于初值不可以忽略，系统状态已经偏移平衡点较远了，此时状态变量的方程与线性化后的方程有较大差别，因此任务一、二、三的图像有明显差别。

4. 设置不同的电抗参数，采用任务 1 和任务 2 的模型，观察系统时域仿真的动态过程，分析系统参数对系统运行结果的影响。

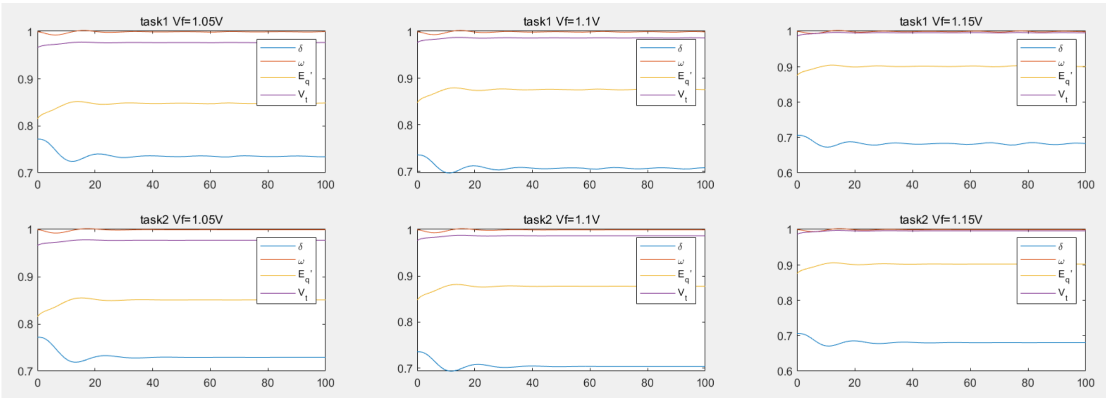
$$x_d = 1.5\Omega$$



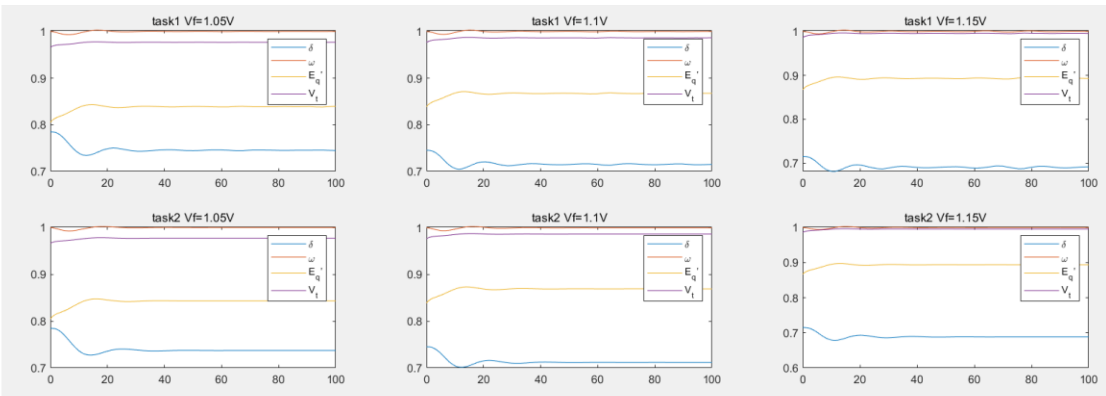
$x_d = 1.9\Omega$



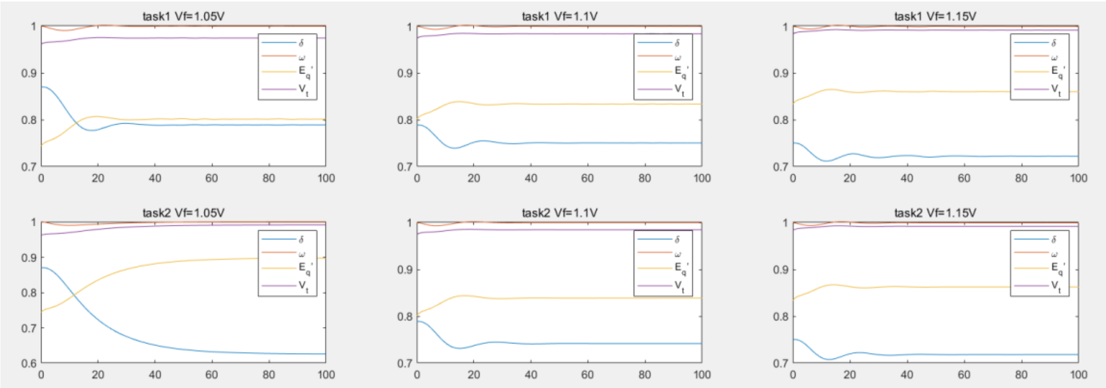
$x_d = 1.998\Omega$



$x_d = 2.1\Omega$



$x_d = 2.5\Omega$



上图反映了参数x_d逐渐增大时任务一、二的状态量变化过程，有以下几点变化规律。

随着x_d的增大，由于三阶状态方程的改变导致状态量的运行点（即稳态初值）发生了变化，反映在图像$t=0$的数值，包括最终的稳态过程也不一样。反映在t很大的时候。

随着x_d的增大，状态变量的运行到新稳态的时间更短了。这可能是因为 d 轴暂态时间常数的减小。

$$T_d' = T_{d0}' \cdot \frac{x_d' + x_{tl}}{x_d + x_{tl}}$$

5. 总结

对工程问题进行仿真的一般方法：

即三个任务所采用的方法，分别是

一、对系统的原始状态方程直接进行数值求解，求出动态过程。

二、对系统的原始状态方程先进行平衡点附近的线性化，然后对线性化后的方程进行数值求解，求出动态过程。

三、对线性化后的状态方程构建系统传递函数，然后加入激励进行数值求解，求出动态过程。

编程时间：约 5 小时。

撰写报告时间：约 1.5 小时。

总结与反馈：作业二较好地衔接作业一，在把作业一搞懂的前提下来做作业二，相对来说做的比较顺利。

源代码名称：Generator_sim.m