



华南理工大学

SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## 学生研究计划(SRP)项目验收 项目结题报告

|          |                               |
|----------|-------------------------------|
| 参加项目名称   | 风机控制技术对并网系统小干扰稳定的影响分析         |
| 参加起止时间   | 2022 年 1 月 至 2023 年 1 月       |
| 指导教师姓名   | 朱林                            |
| 指导教师所在学院 | 电力学院                          |
| 项目成员     | 胡培炎、丁晟泽、黄宇翔、余智永、<br>张望、张浩然、章涛 |
| 学生所在学院   | 电力学院                          |
| 学生所学专业   | 电气工程及其自动化                     |
| 填表日期     | 2023 年 3 月                    |

教务处

制

2022 年 3 月

# 1 摘要

伴随“碳达峰”和“碳中和”的提出，传统电力系统面临向新型电力系统转化的发展趋势，风力发电、光伏发电等与传统同步电机系统有较大差异。本小组在 SRP 期间对风机控制技术对并网系统小干扰稳定的影响进行了学习和分析。小组成员对相关理论进行学习并掌握了部分仿真软件的使用。建立单机-无穷大同步发电机和三机九节点 MATLAB/Simulink 模型，并运用特征值分析等方法对模型进行分析。学习跟网型逆变器模型，对电流内环、电压外环、锁相环等结果进行分析和修改。最后由风机、逆变器、同步发电机组成小型电网，通过 PSCAD 仿真得到稳定潮流数据带入 Simulink 模型，分析小信号干扰下对系统稳定性的影响。除以上内容，小组成员还完成了新能源发电原理技术报告，包括 PMSG、DFIG 和光伏发电系统。部分成员参与节能减排大赛，制作了船舶微电网模型，顺应节能减排宗旨在船舶上添加了风光互补发电系统。资料查询与模型建立均由参与成员独立完成。

With the proposal of "carbon peaking" and "carbon neutrality", traditional power systems are facing a trend of transformation to new power systems, which have significant differences with traditional synchronous motor systems, such as wind power and photovoltaic power generation. Our group studied and analyzed the impact of wind turbine control technology on the small disturbance stability of grid-connected systems during the SRP period. Our group members studied the relevant theories and mastered the use of some simulation software. A single-machine-infinite synchronous generator model and a three-machine nine-node model were established on MATLAB/Simulink, and the model was analyzed using methods such as eigenvalue analysis. Our group also studied the grid-tied inverter model, analyzed and modified the results of current inner loop, voltage outer loop, and phase-locked loop. Finally, a small-scale power grid consisting of a wind turbine, inverter, and synchronous generator was established, and stable flow data obtained through PSCAD simulation was imported into the Simulink model to analyze the impact of small signal interference on system stability. In addition to the above content, the group members also completed a technical report on the principles of new energy generation, including PMSG, DFIG, and photovoltaic power generation systems. Some members participated in *the Energy-saving and Emission Reduction Competition* and made a ship microgrid model, adding a wind-solar complementary power generation system to the ship in accordance with the purpose of energy-saving and emission reduction. Data query and model establishment were completed independently by participating members.

关键词：风机并网，小信号扰动模型

KEY WORD: wind turbine grid-connection, small signal disturbance model

## 2 引言

随着全球化进程的加快和对化石能源的过度开采，国家对可再生能源的关注度日益上升。面临传统能源的衰竭，发展新能源对具有长远的战略意义。在风能、太阳能、水能、生物质能、地热能等可再生能源中，风能是最具开发前景和技术发展最为成熟的电力新能源之一，并正向着规模化、成熟化和产业化的方向发展[i]。最近几年，我国风电产业发展较快，但是与世界先进水平相比仍具有一定差距[ii]。其中制约风电发展的瓶颈之一是大规模风电并网问题，其主要原因一方面在于风电场及风力发电机的相关技术不成熟，与电网稳定运行的要求难以完全匹配，另一方面在于现有的电网运行能力不稳定，控制水平不高，不足以接纳大量的风电接入[iii]。因此有必要针对风力发电机的实际并网情况进行建模分析并指导风电机组的并网控制相关策略制定合理稳定高效的运行方案。

在风力发电机并入电网运行过程中会受到一些小的干扰，而小干扰不稳定的系统在实际生产中难以正常运行，也就是说，正常并网运行的电力系统首先应该满足小干扰稳定性的前提。因此进行电力系统的小干扰稳定分析，判断系统在指定的运行方式下是否稳定，是电力系统分析中最基本和最重要的任务之一[iv]。文献[iv]建立了风力发电系统的小信号简化模型，并分析了直流电压小干扰稳定特性；文献[v]建立了 VSG-DFIG 系统的小信号模型，并分析了高中低频振荡模式在不同条件下的变化；文献[vi]给出了基于虚拟同步发电机 VSG 的三相逆变器系统的小信号模型及稳定分析。

在风力发电机实际并网中，对风电系统小干扰稳定性的影响有诸多因素。文献[vii]分别研究了线路阻抗、SG 惯性常数、阻尼系数和 VSC 控制器参数对系统稳定性的影响作用。文献[viii]建立了联接到风机和 SG 的多端 VSC-HVDC 构成的直流电网系统的小信号模型，并采用特征根分析法研究了风机网侧 VSC 控制器、直流电压控制器等对系统特性的影响。目前，针对联接到含转动惯量的交流电网的 HVDC 系统的研究文献多采用同步发电机（SG）或风机等模拟含惯量的交流系统，且集中在 LCC 与 SG 的交互作用上。

本文在现有的研究基础之上，充分考虑风机控制技术对并网系统小干扰稳定的影响，分析系统中各个重要环节的详细模型，建立适用于暂态稳定分析的全系统小信号模型，并据此分析风机发电系统小干扰稳定性和次同步频振荡特性，采用特征值分析法对系统进行稳定性分析，最后结合电磁暂态仿真软件进行仿真验证。

## 3 研究方案

为了深入研究该模型的稳定性，本文将采用状态空间小信号模型（针对网侧换流器和六阶单机无穷大发电机模型），可以利用参与因子计算得到各模态的参与度与线性化后的系数矩阵，运用 State-Space 模块将线性化后的图像与仿真图形进行吻合度比对，以此判断出线性化结果的可靠性。同时通过特征根分析法和根轨迹进行系统的稳定性进行判别。

## 4 研究内容

### 4.1 混合同步机、风机系统

#### 4.1.1 六阶同步发电机建模

发电机主要包括发电机本体、调速系统和励磁系统三个部分。通过对发电机方程组进行矩阵运算，得到发电机绕组的数学模型：

$$\begin{cases} v_q = -R_a i_q + e_q'' - X_d'' i_d \\ v_d = -R_a i_d + e_d'' + X_q'' i_q \\ T_{do}'' \frac{de_q''}{dt} = e_q' - e_q'' - (X_d' - X_d'') i_d \\ T_{do}' \frac{de_q'}{dt} = V_f - e_q' - \frac{X_d - X_d'}{X_d' - X_d''} (e_q' - e_q'') \\ T_{qo}'' \frac{de_d''}{dt} = e_d' - e_d'' + (X_q' - X_q'') i_q \\ T_{qo}' \frac{de_d'}{dt} = -e_d' - \frac{X_q - X_q'}{X_q' - X_q''} (e_d' - e_d'') \\ T = e_d'' i_d + e_q'' i_q + (X_q'' - X_d'') i_d i_q \\ M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} = T_M - T_E \end{cases}$$

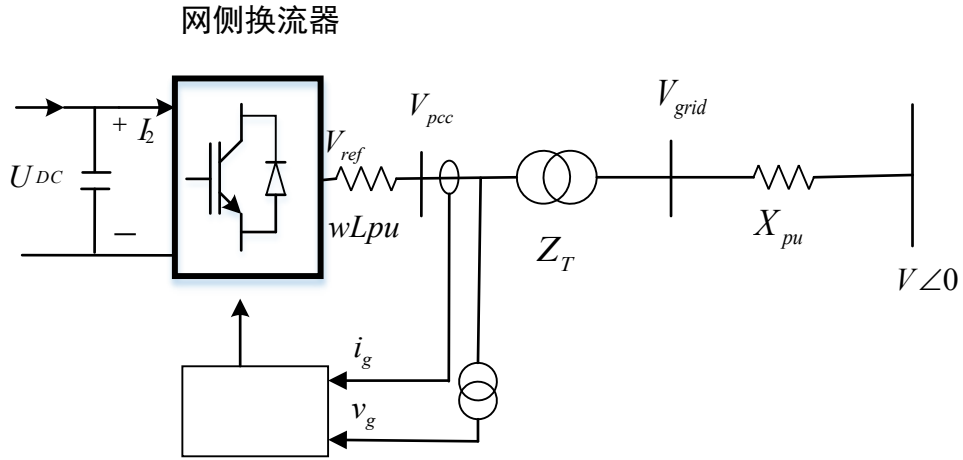
调速系统有关的状态方程：

$$\begin{cases} \frac{dx_{1g}}{dt} = K_G (\omega_{refg} - \omega_g) + (P_{refg} - P_g) \\ \frac{d\mu}{dt} = \frac{1}{T_{sm}} ((K_{pg} \frac{dx_{1g}}{dt} + K_{ig} x_{1g} - \mu) \\ \frac{dP_{mg}}{dt} = \frac{1}{T_{ch}} (\mu - P_{mg}) \end{cases}$$

励磁系统的状态空间方程：

$$\begin{cases} \frac{du_m}{dt} = \frac{1}{T_R} (u_g - u_m) \\ \frac{dE_f}{dt} = \frac{1}{T_A} (K_A (u_{refg} + u_{pss} - u_m) - E_f) \\ \frac{du_1}{dt} = \frac{1}{T_W} (K_S T_W \frac{d\omega_g}{dt} - u_1) \\ \frac{du_{pss}}{dt} = \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_W} (K_S T_W \frac{d\omega_g}{dt} - u_1) - \frac{1}{T_2} (u_{pss} - u_1) \end{cases}$$

#### 4.1.2 风机、换流器建模



双闭环控制模型：

网侧变流器采用电压电流双闭环控制，能够稳定直流母线电压且提高系统响应速度，其控制方程为：

$$-((I_{dref} - I_d)K_{p4} + A_4) + V_d - I_q \times wLpu1 = V_{dref}$$

$$\frac{dA_4}{dt} = \frac{1}{T_4}(I_{dref} - I_d)$$

$$-((I_{qref} - I_q)K_{p5} + A_5) + V_q + I_d \times wLpu1 = V_{qref}$$

$$\frac{dA_5}{dt} = \frac{1}{T_5}(I_{qref} - I_q)$$

内环控制（标么）：

$$(U_{DCref} - U_{DC})K_{p3} + A_3 = I_{dref}$$

$$\frac{dA_3}{dt} = \frac{1}{T_3}(U_{DCref} - U_{DC})$$

$$(Q - Q_{ref})K_{p2} + A_2 = I_{dref}$$

$$\frac{dA_2}{dt} = \frac{1}{T_2}(Q - Q_{ref})$$

$$Q = (V_{gridq}I_d - V_{gridd}I_q)$$

式中： $i_{dref, qref}$  为电流内环 d、q 轴给定值； $K_{p2,3,4,5}$  为电压控制环比例、积分系数， $A_{p2,3,4,5}$  为中间变量； $U_{DCref}$  为直流电压外环给定值。

**锁相环（有名值）：**

锁相环可以用于检测电网电压的频率和相位信息，从而使风力发电机输出的电压与电网电压保持同步，实现与电网的无缝连接。本文采用单同步旋转坐标系的 PLL 保证控制系统与电网电压同步，其数学模型如下：

$$\frac{dA_{PLL}}{dt} = V_q K_{iPLL}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s + V_q K_{pPLL} + A_{PLL}$$

式中： $K_{ppll}$  与  $K_{ipll}$  分别为锁相环比例系数、积分系数； $\omega_s$  为电网参考角频率；

$\theta$  为锁相环得到的电网角度； $V_{d, q}$  为并网点电压的 d、q 轴分量。

**换流器出口滤波电感：**

$$(V_{refd} + jV_{refq}) = (V_d + jV_q) - (I_{gd} + jI_{gq}) \times j\omega L_{pu1} - L \frac{d(I_{gd} + jI_{gq})}{dt}$$

$$\begin{cases} V_{refd} = V_d + I_{gq} \times \omega L_{pu1} - \frac{L}{\omega_{base}} \frac{dI_{gd}}{dt} \\ V_{refq} = V_q - I_{gd} \times \omega L_{pu1} - \frac{L}{\omega_{base}} \frac{dI_{gq}}{dt} \end{cases}$$

**直流电容：**

对于机侧变流器，在忽略功率消耗和线路损耗的情况下，有如下数学表达式：

$$U_{DC} C \frac{dU_{DC}}{dt} = P_g - P_{DC}$$

$$P_{DC} = U_{DC} I_{DC}$$

$$P_g = \frac{3}{2} (V_{gridd} I_d + V_{gridq} I_q)$$

$$U_{DC*} \frac{C}{\omega_{base}} \frac{dU_{DC*}}{dt} = (V_{gridd} I_d + V_{gridq} I_q) - U_{DC} I_{DC}$$

为了验证和分析极弱电网下直驱风电并网变流器的小信号稳定性特性，本文在 MATLAB/Simulink 平台中搭建了仿真模型，后施加小信号干扰，采用特征根分析法和根轨迹法对模型的稳定性进行探究。

## 4.2 小信号模型建立

在小干扰稳定性分析中，小信号模型通过线性化动态电力系统，利用线性理论来评估特定工作点附近的稳定性，简化分析过程。

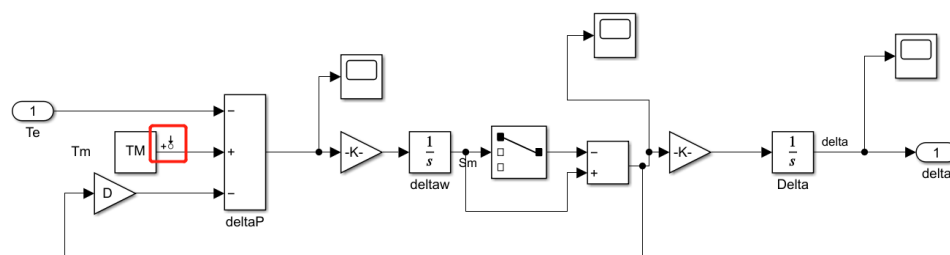
结合发电机子系统、负荷以及换流器系统的状态空间方程，将状态空间方程在稳态运行点进行线性化，得到整个系统的小信号模型如下：

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta U$$

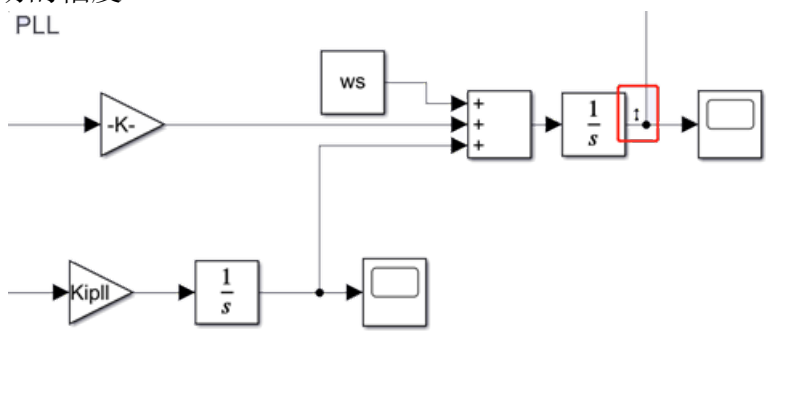
其中  $\Delta X$  为状态矢量，输入矢量  $\Delta U = [\Delta \omega_{refg} \Delta P_{refg} \Delta u_{refg} \Delta P_{ref} \Delta Q_{ref}]^T$ ，A 为状态矩阵，B 为输入矩阵。

在实际 MATLAB/Simulink 仿真中，我们使用了 `linearize` 函数实现系统线性化过程。不同于使用泰勒级数展开的线性化方法，`linearize` 函数主要使用了数值线性化方法，通过在工作点附近对非线性系统进行微小扰动，然后根据系统在工作点的响应计算线性化后的状态空间矩阵。具体来说，数值线性化方法包括以下几个步骤：

1. 微扰非线性系统：在稳态工作点附近，对发电机的机械扭矩施加一个微小扰动，以便系统在工作点附近系统的响应可以近似为线性系统的响应。

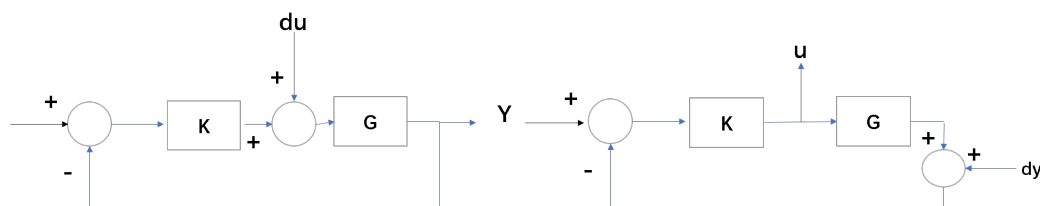


2. 小扰动的输出测量：在对系统施加微小扰动后，测量锁相环输出结果在工作点附近的导数。这些导数可以通过有限差分法计算，即将系统在两个相邻点的响应之差除以扰动的幅度。



3. 构建线性化后的状态空间矩阵：将计算得到的导数值填充到状态空间矩阵 A、B、C 和 D 中。这些矩阵描述了线性化后的系统的动态行为，可以用于进一步的稳定性分析和控制设计。

对于扰动点和输出测量点，可以用以下两图进行表示：



定义线性化的传输函数，可以将输入扰动与输出一起使用测量或开环输出，将输出测量与输入一起使用扰动或开环输入。其中输出扰动点为  $u$ ，输入的扰动点为  $du$ ，输出点为  $y$ ，差值为  $dy$ 。

通过比对线性化后的输出函数与仿真实际值曲线的吻合度，可以判断出 State-Space 模块线性化结果的可靠性，运行及曲线比对部分于后文中介绍。

### State-space 模块介绍

经过查询有关资料，可以得到 Simulink 中 State-Space 模块可以实现有如下行为定义的系统：

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \\ x|_{t=t_0} = x_0 \end{cases}$$

其中  $x$  是状态向量， $u$  是输入向量， $y$  是输出向量， $x$  是状态向量的初始条件。A、B、C、D 矩阵可以指定为稀疏矩阵或稠密矩阵。矩阵系数必须具有以下特征：

- (1) A 必须是  $n \times n$  矩阵，其中  $n$  是状态的数量。
- (2) B 必须是  $n \times m$  矩阵，其中  $m$  是输入的数量。
- (3) C 必须是  $r \times n$  矩阵，其中  $r$  是输出的数量。
- (4) D 必须是  $r \times m$  矩阵。

由相关资料，可知发电机组的方程式可以表示如下：

$$\begin{cases} \frac{d\Delta x_c}{dt} = A_G \Delta x_G + B_G \Delta V_V \\ \Delta I_G = C_G \Delta x_G + D_G \Delta V_G \end{cases}$$

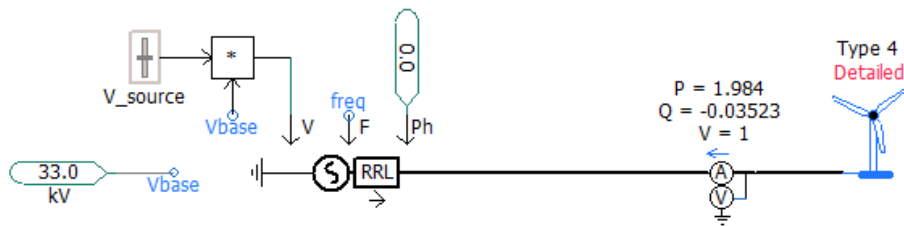
发现其满足 Simulink 中 State-Space 模块的基本定义，因此本文应用此模块进行小信号模型稳定性的分析。

在 MATLAB 中对模型进行有关特征值分析后，将获得的有关参数对 State-Space 模块内部参数中的系数矩阵与初值进行填写。

通过比对线性化后的输出函数与仿真实际值曲线的吻合度，可以判断出 State-Space 模块线性化结果的可靠性，运行及曲线比对部分于下文中介绍。

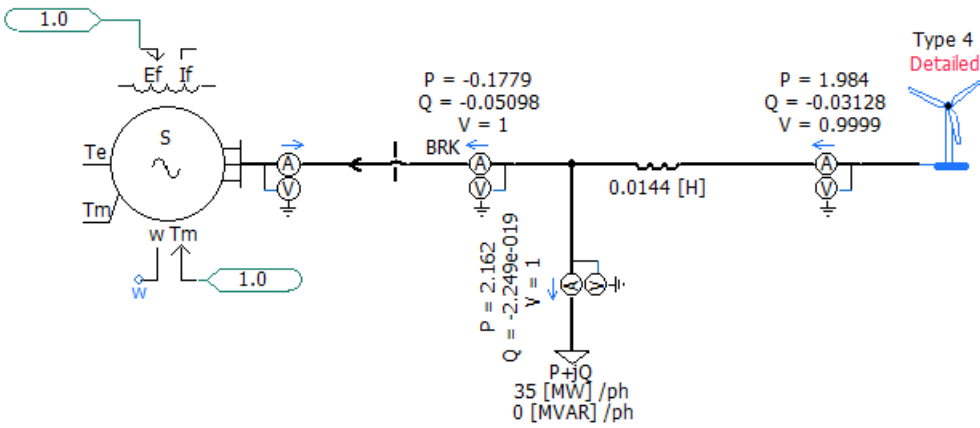
### 4.3 PSCAD 模型

原有的 PSCAD 风力发电机模型如下图所示，其中风机与无穷大电源通过导线直接相连。



为了与 MATLAB/Simulink 中的模型互相印证，需对该模型进行修改，用同步发电机模块代替受控电压源，模拟无穷大电网；在同步发电机与风力发电机之

间加入电感，代表输电线路；同时，在二者之间加入一恒功率负荷，作为风力发电机的本地负荷。修改后的 PSCAD 建模如下图所示：



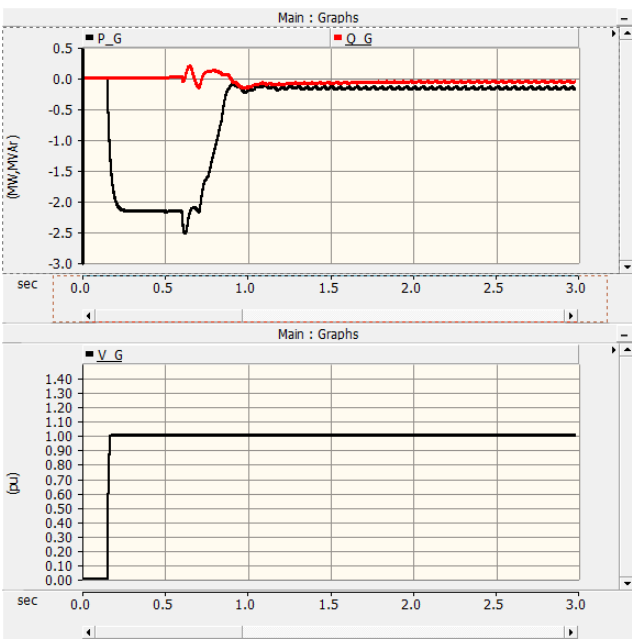
用同步发电机代替电压源后，二者电压和电流水平应保持一致，初始模型三相电压源输出的交流电压有效值为  $V_{base}$ ，即 33kV，根据电压和功率水平可以确定同步发电机的某些基本参数如下所示：

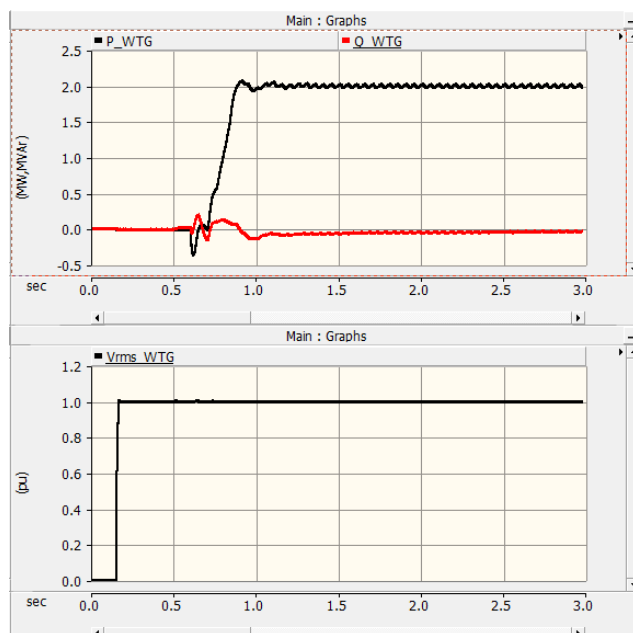
|                                   |                  |
|-----------------------------------|------------------|
| <b>General</b>                    |                  |
| Rated RMS Line-to-Neutral Voltage | 19.05255888 [kV] |
| Rated RMS Line Current            | 3.15 [kA]        |
| Base Angular Frequency            | 376.992 [rad/s]  |
| Inertia Constant                  | 1.7 [s]          |

|                                           |   |
|-------------------------------------------|---|
| <b>General</b>                            |   |
| Source[0] to Machine[1] transition        | 0 |
| Lock-rotor[0] - Normal mode[1] transition | 1 |

同步发电机运行于“01”模式，电动机模拟为简单的三相电压源，且以完全自由的模式运行。

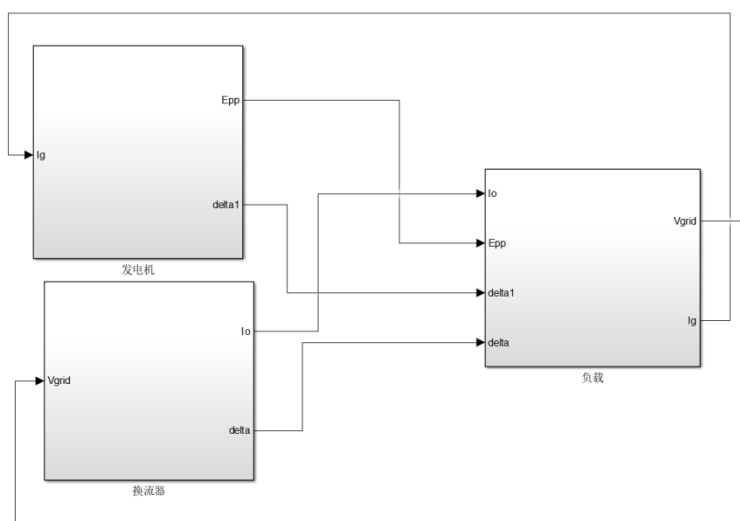
在上述参数设定下，PSCAD 模型在经过短暂震荡后，最终趋于稳定，同步发电机侧功率与电压 ( $P_G, Q_G, V_G$ ) 以及风机侧功率与电压 ( $P_{WTG}, Q_{WTG}, V_{WTG}$ ) 波形如图：



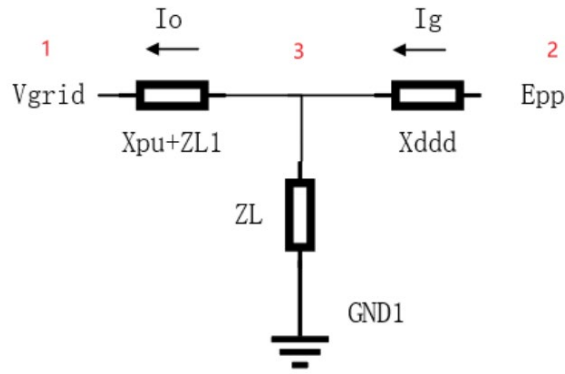


#### 4.4 换流器+同步电机+负载的建模

网侧换流器结构图如上文所示，其中用 6 阶发电机替代无穷大电网，并在其上接上恒阻抗负载，Simulink 模型接法展示如下：



由下图所示，取换流器中三个节点形成节点导纳矩阵，通过已知节点网络可以写出三节点的导纳矩阵  $Y$  如下(其中将  $V_{pcc}$  左侧视为断路)：



对于同步发电机和网侧换流器方面，有如下表达式：

$$\begin{cases} I_g = \frac{(E_{pp} - V)}{Z} \\ V_{grid} = I_o * Z_T + V_{pcc} \end{cases}$$

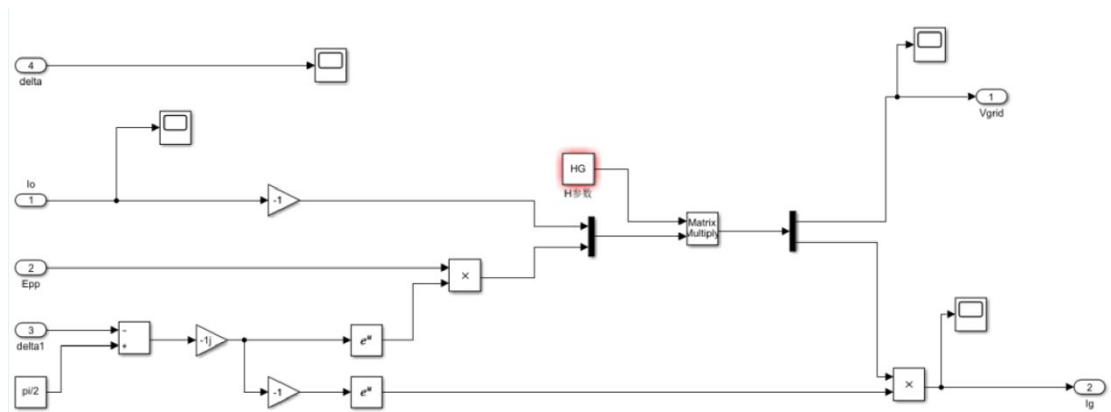
为了更好描述二端口网络的情况，采用混合 H 参数，经过推导与计算，结果如下（h 为上述导纳矩阵中元素计算而得）：

$$\begin{pmatrix} V_{grid} \\ I_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_o \\ E_{pp} \end{pmatrix}$$

其中 H 矩阵内部结构为：

$$\begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{Y_{11}} & \frac{-Y_{12}}{Y_{11}} \\ \frac{Y_{21}}{Y_{11}} & \frac{\Delta Y}{Y_{11}} \end{pmatrix}$$

对应于 H 矩阵输出  $V_{grid}$  与  $I_g$  的负载侧 Simulink 模型如下：

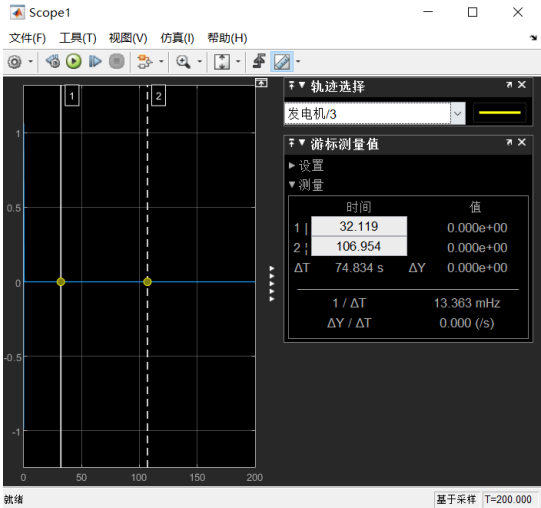
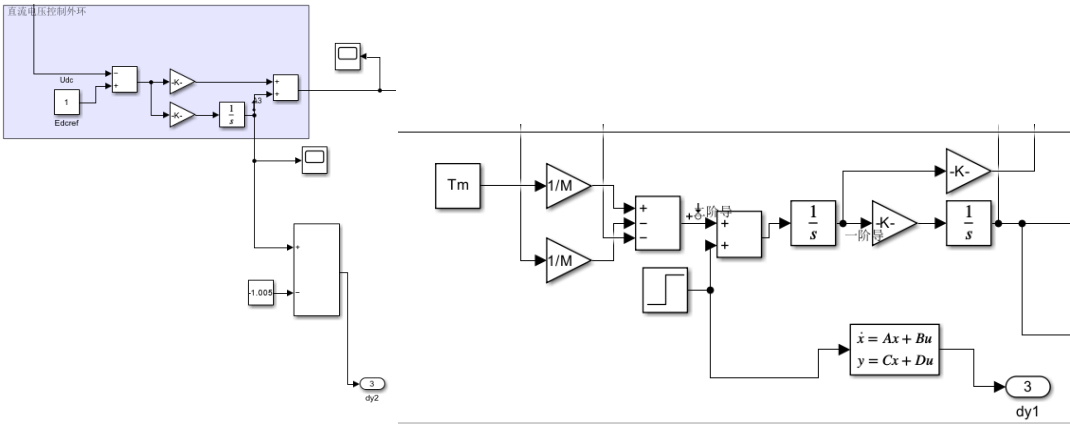


## 5 研究分析与结果

### 5.1 小信号干扰分析

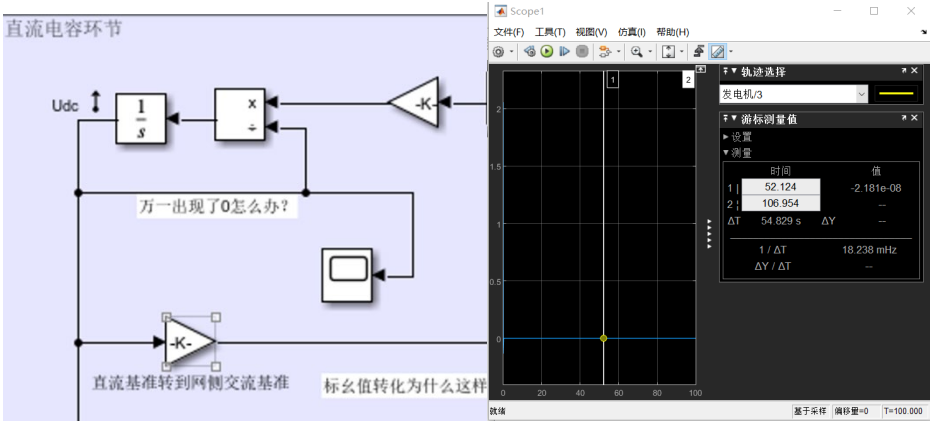
以六阶发电机转矩  $T_m$  作为扰动点，xEdc 输出作为例，其中阶跃响应参数在

第 50s 时取为 10（Simulink 接法如下图所示），进行线性化曲线与仿真曲线的比较与分析（如下图所示），同时能够得到 A、B、C、D 四个系数矩阵及特征向量与特征值。



从阶跃信号的幅度来看，可以发现虽然具有较大的干扰程度，但不难发现其结果吻合性依然良好，可以发现模型的稳定性较强（其中黄线为线性化的曲线，蓝线为原仿真曲线）

为了体现结果的稳健性，同理，另以六阶发电机转矩  $T_m$  作为扰动点， $x_{Udc}$  输出作为例，Simulink 接法及其运行结果如下图所示：



通过上述两个例子试运行 State-Space 模块的线性化效果，可以发现与原模型

仿真曲线吻合性良好，在一定程度上可以认为换流器+同步电机+负载模型的线性化结果较为稳健，可以应用于接下来的根轨迹分析。

## 5.2 特征值及参与因子的分析

相关因子：

定义相关因子  $p_{ki}$  为：量度第  $k$  个状态量  $x_k$  同第  $i$  个特征根  $\lambda_i$  的相关性的物理量：

$$p_{ki} = \frac{v_{ki} u_{ki}}{v_i^T u_i}$$

式中， $v_{ki}$ 、 $u_{ki}$  分别为左、右特征向量矩阵  $U$ 、 $V$  中第  $k$  行  $i$  列的元素。 $p_{ki}$  的模  $|p_{ki}|$  反映了  $x_k$  和  $\lambda_i$  的相关性大小。

在 MATLAB 中对换流器+同步电机+负载模型进行线性化求取特征值，同时得到各个模态的震荡频率和阻尼比，整理如下表所示：

| 模态 | 特征值           | 阻尼比    | 振荡频率 (rad/s) |
|----|---------------|--------|--------------|
| 1  | 0             | 1      | 0            |
| 2  | 0             | 1      | 0            |
| 3  | -81.12+75.04i | 1      | 119.43       |
| 4  | -81.12-75.04i | 1      | 119.43       |
| 5  | 26.5+19.03i   | -0.138 | 30.3         |
| 6  | 26.5-19.03i   | -0.138 | 30.3         |
| 7  | 48.2          | 1      | 0            |
| 8  | 48.9 + 45.8i  | 0.73   | 7.2875       |
| 9  | 48.9 -45.8i   | 0.73   | 7.2875       |
| 10 | -0.5804       | 1      | 0            |
| 11 | -1.4611       | 1      | 0            |

|    |            |   |        |
|----|------------|---|--------|
| 12 | 23.7478    | 1 | 0      |
| 13 | 40 + 0.03i | 1 | 0.0047 |
| 14 | 40 - 0.03i | 1 | 0.0047 |

由上表可以发现，换流器输出电流侧有振荡模态，分别为次同步与低频，对应阻尼比可以发现模态 5、6 的阻尼比小于 0，处于不稳定的状态。

对于参与因子，将数据导入 Excel 表后保留两位小数，如下图所示：

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 |
| 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.06 | 0.00 | 0.21 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.06 | 0.00 | 0.21 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 1.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.05 | 0.03 | 0.00 | 0.94 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.05 | 0.03 | 0.00 | 0.94 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.20 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1.00 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

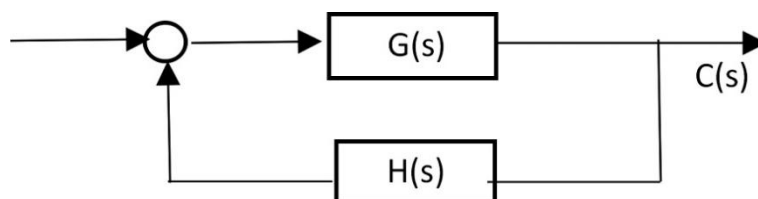
在表格中，容易读出不同的状态变量对不同模态的参与程度，例如第一个状态变量对第 12 个模态影响占据着主要部分，同理可以得出后续各个状态变量在不同模态的参与度，方便比较各个状态变量对系统稳定性的作用。

## 5.3 换流器+同步电机+负载模型的根轨迹分析

### 5.3.1 原理阐述

根轨迹法是分析和设计线性定常控制系统的图解方法，方法简便且通俗易懂。根轨迹也可称为根迹，它是任意开环系统中一参数从零到变化至无穷时，闭环系统特征方程式的根在 s 平面上的变化的轨迹。若运用根轨迹分析，可以快速且精准地找到该系统的在任意一点的开环增益或任意参数值下的闭环零、极点位置。

为具体清晰表述根轨迹法，举例控制系统结构如下图所示：



该系统的开环传递函数为：

$$G(s)H(s)$$

其闭环传递函数为：

$$\varphi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

所以该函数的特征方程可以写为：

$$1 + G(s)H(s) = 0$$

即：

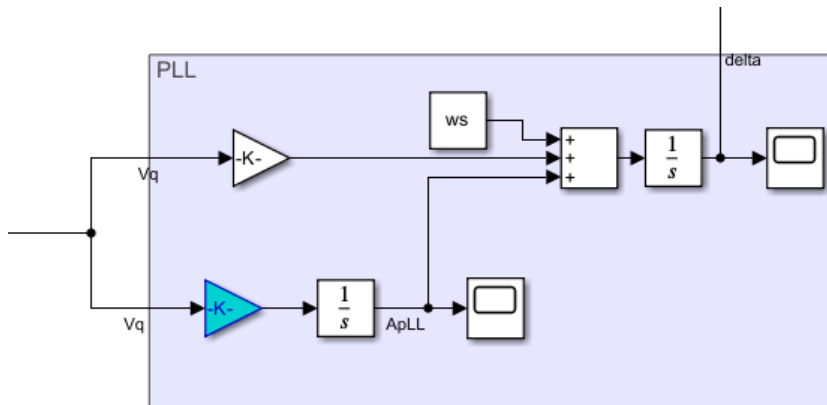
$$K^* \frac{\prod_{j=1}^m (s - z_j)}{\prod_{i=1}^n (s - p_i)} = -1$$

在进行根轨迹分析时，我们选择锁相环参数和电压外环和电流外环 pi 控制器参数来进行一定幅度的修改，然后将输出选在锁相环 delta 处和直流电压控制外环两处，从而得到他们的根轨迹图像，通过观察根轨迹可以发现对应的积分环节和比例环节对于系统稳定性的影响作用大小，同时也可以用来判断系统稳定的范围和系统稳定程度。

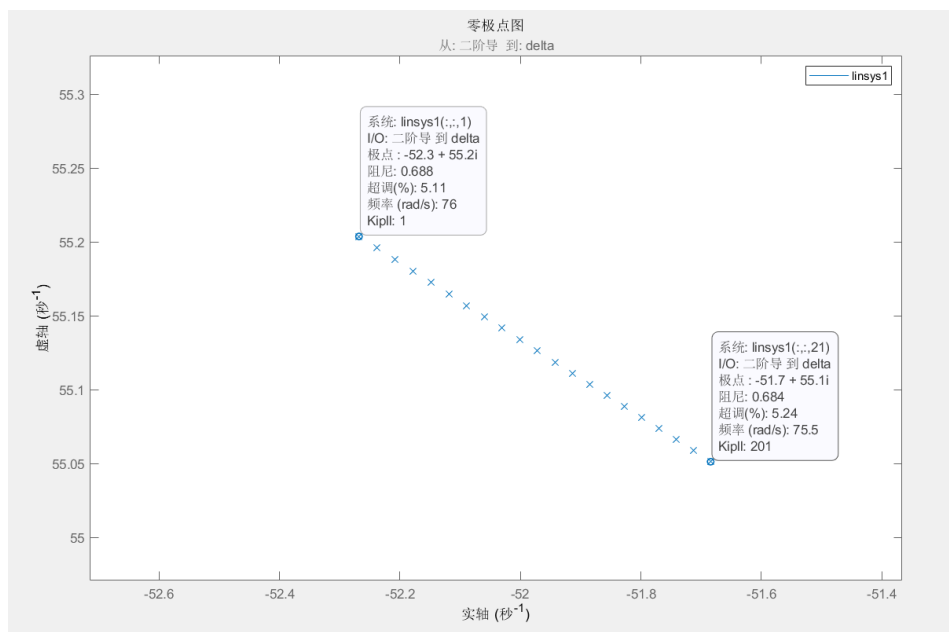
### 5.3.2 根轨迹图分析

锁相环处分析：

下图为 Simulink 中锁相环环处修改 Kipl1 比例环节处的参数(下图中标蓝处)：

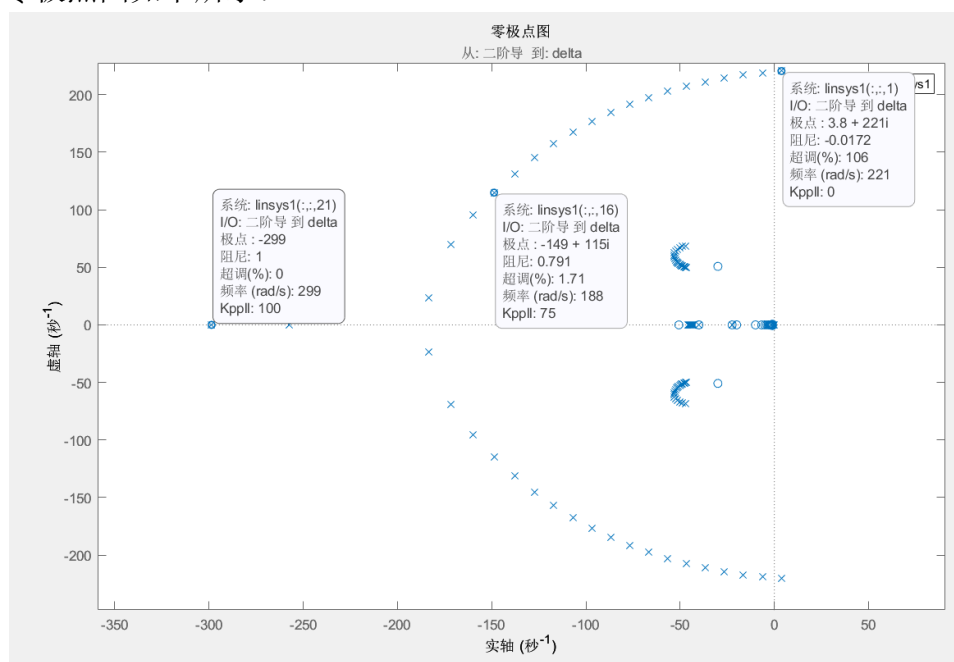


其中比例环节系统初始值为 100，现以 10 为步长从 1 到 200 进行更改并绘出根轨迹曲线图，如下图所示：



由上图可以发现随着 Kip11 参数的不断增加，其阻尼比几乎不变，超调量微量增加，系统稳定几乎不变，零极点始终保持在复平面左侧，系统稳定性良好。

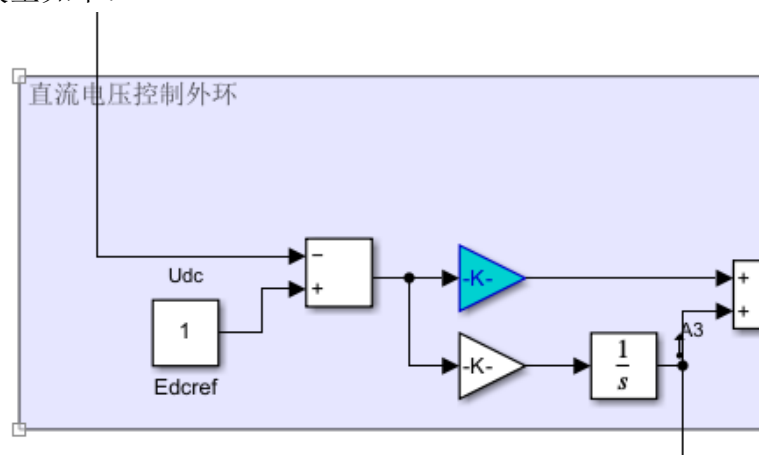
另外以 5 的步长对积分环节进行从 0 到 100 的遍历（其中积分环节初值为 50），零极点图如下所示：



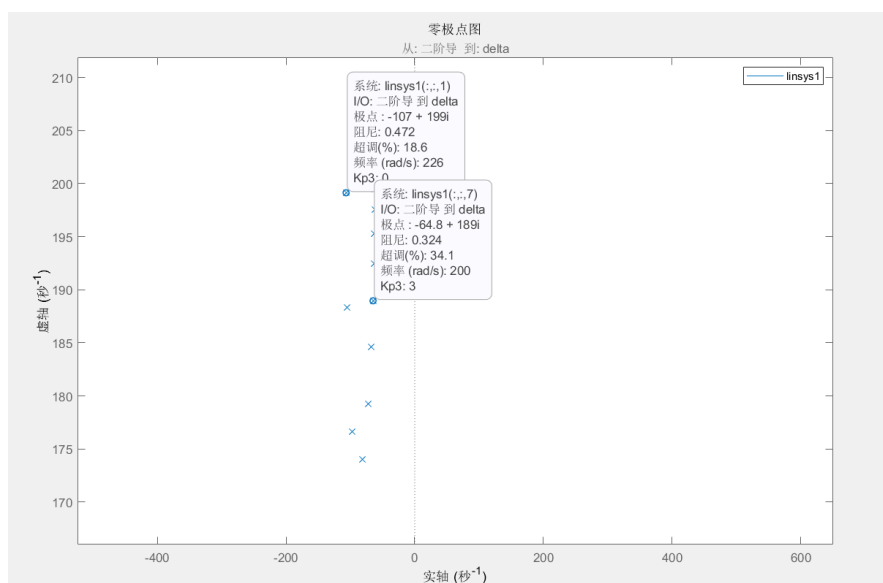
可以发现积分环节的改动会使系统发生较大的改变，阻尼比逐渐变大至 1，同时超调逐渐较小至 0，曲线的变化范围较大，可以看出该积分环节对于系统的稳定性影响较大。

### 直流控制外环处分析：

同上，选取直流电压外环处的比例环节与积分环节上的参数进行研究，对应 Simulink 中模型如下：

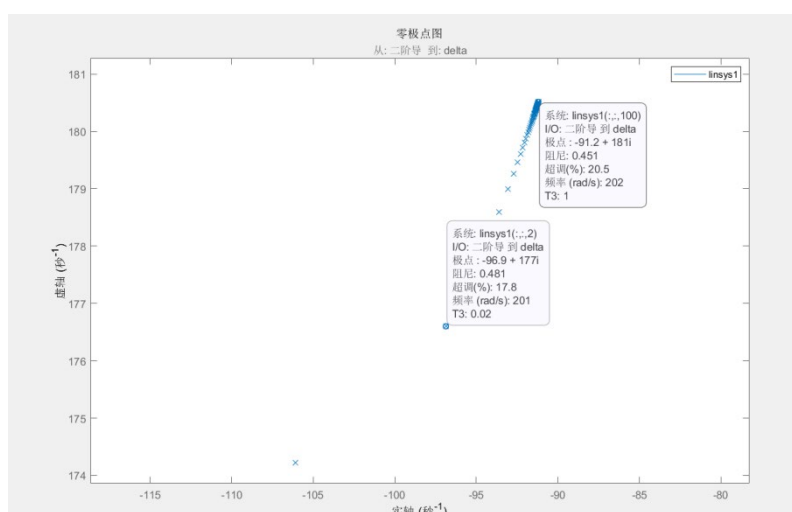


对于该处的比例环节 Kp3，以 0.5 为步长从 0 至 10（系统初始值为 1）进行根轨迹图形的绘制，根轨迹图如下所示：



可以发现直流控制外环处中极点均较靠近于复平面虚轴，同时随着  $K_{p3}$  的增大，阻尼比和超调量都有一定程度的变化，且在虚轴左侧略微震荡，因此可以看出该出比例环节对系统稳定性能的影响较大。

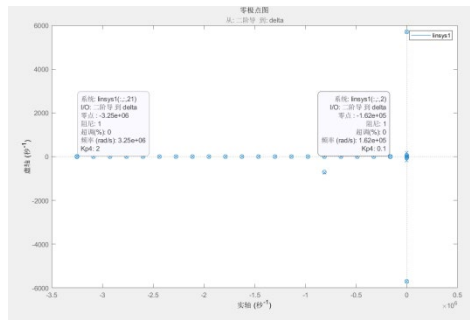
对于积分环节以 0.01 为步长从 0.01 到 2（系统初值为 0.02），运行后根轨迹图如下所示：



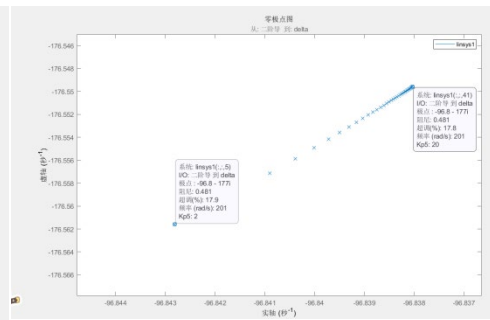
同样我们发现对于该积分环节的改变，系统的反应并不明显，阻尼比与超调量虽然均有略微的增大，但并不会显著影响系统的稳定性。

### 电流内环处分析：

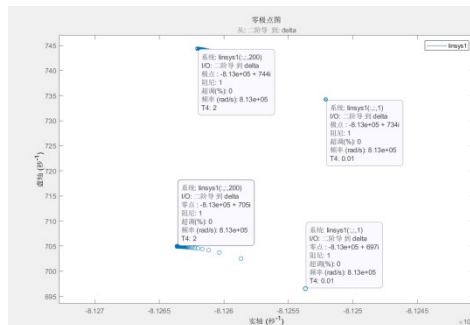
同上文类似，分别针对电流内环 d、q 轴处进行根轨迹分析，根轨迹图及相关参数变化趋势如下文所示：



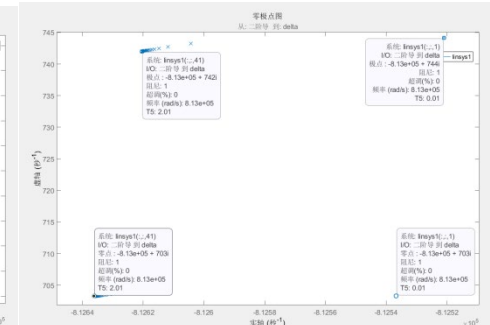
d 轴比例环节



q 轴比例环节



d 轴积分环节



q 轴积分环节

## 6 研究总结

由上文的小信号干扰及根轨迹图的分析，我们可以发现换流器+同步电机+负载模型在一定程度的干扰中依旧能够保持良好的稳定性。在参与因子分析中，我们可以得到不同特征根对不同模态的参与程度，从前文根轨迹分析中容易看出其抗干扰能力强，基本没有极点位于复平面的右半平面，模型的稳定性较为可靠。

## 7 参考文献

- [i] 秦云甫. 我国风电产业发展问题分析与解决途径[D]. 华北电力大学, 2012.
- [ii] 谭忠富, 鞠立伟. 中国风电发展综述: 历史、现状、趋势及政策[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2013, No. 82(02): 1-7.
- [iii] 贺益康, 胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 1-15.
- [iv] 黄汉奇. 风力发电与光伏发电系统小干扰稳定研究[D]. 华中科技大学, 2012.
- [v] 李蕴红, 刘芳, 刘威等. VSG-DFIG 风力发电系统小信号建模及稳定性分析[J]. 电源学报, 2020, 18(02): 73-82.
- [vi] 江浩, 刘辉, 王阳等. 虚拟同步发电机单机并网小信号模型及其稳定性分析[J]. 华北电力技术, 2017, No. 450(04): 55-60.
- [vii] 赵成勇, 袁艺嘉, 苑宾等. 联接含惯量交流系统的 VSC-HVDC 系统特性分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(04): 1095-1105.
- [viii] KALCON G O, ADAM G P, ANAYA-LARA O, et al. Small-signal stability analysis of multi-terminal VSC-based DC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1818-1830.