

# H桥级联型SSSC的动态模型及小干扰稳定性分析

高本锋<sup>1</sup>,江 婷<sup>1</sup>,于弘洋<sup>2</sup>,赵国亮<sup>2</sup>,王飞跃<sup>1</sup>,邵冰冰<sup>1</sup>,赵书强<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学 分布式储能与微网河北省重点实验室,河北 保定 071003;

2. 全球能源互联网研究院有限公司 先进输电技术国家重点实验室,北京 102200)

**摘要:**基于模块化建模的方法,考虑实际电路结构,建立了含H桥级联型静止同步串联补偿器(SSSC)的系统小信号模型。结合实际工程参数,通过对比小信号模型计算结果与PSCAD/EMTDC电磁仿真结果,验证了小信号模型的准确性。然后采用特征值分析法分析了该系统的振荡模态,并研究了控制器参数对系统小干扰稳定性的影响。研究表明随着解耦控制器以及均压控制器参数的增大,系统稳定性均增强。最后通过时域仿真算例验证了特征值分析结论的准确性。

**关键词:**H桥级联型SSSC;小信号模型;特征值分析法;小干扰稳定性;时域仿真法

**中图分类号:**TM 712

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202001033

## 0 引言

随着电力系统的高速发展,其结构日益复杂且运行环境更加多变。而静止同步串联补偿器(SSSC)具备强大的应用韧性,是发展现代电网必需的柔性交流输电系统(FACTS)装置<sup>[1-3]</sup>。H桥级联型SSSC换流器相较于其他结构而言,具备补偿容量大、成本低的优势。2018年12月6日,全球首个H桥级联型SSSC在天津正式投运。结合近几年国内外FACTS技术的研发及工程实践,H桥级联型SSSC引起了越来越多的关注<sup>[4]</sup>。

目前针对SSSC的相关研究主要集中于拓扑结构、参数设计以及控制策略等方面<sup>[4-7]</sup>,而关于H桥级联型SSSC的小信号模型以及含SSSC的系统小干扰稳定性方面的研究相对较少。文献[8-9]研究了在固定串补系统中增加SSSC对串联补偿传输系统稳定性的影响,结果表明SSSC能改善系统稳定性。文献[10]基于48脉波结构的SSSC的小信号模型设计控制器参数。文献[11-14]分析了SSSC提高电力系统动态稳定性的机理。文献[15]研究时空谐波对安装有SSSC的单机无穷大系统的小信号稳定。文献[15]仅对SSSC主电路进行小信号建模,未考虑控制部分。文献[8]中采用调制比和相位角的间接电流控制,并进行小信号建模。本文采用的是电压电流双环的直接电流控制。

上述文献均为基于48脉波或者三电平结构的

SSSC的研究,而关于H桥级联型SSSC的小信号建模的研究相对较少。且上述文献均采用了特征值分析法,在建立小信号模型的过程中,SSSC采用电压源及阻抗等效代替,未考虑其接入系统的具体结构,对系统稳定性的影响因素考虑得不够全面。

本文基于模块化建模的方法,考虑接入系统的具体电路结构,建立H桥级联型SSSC的小信号模型,并结合实际工程参数,通过PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真与小信号模型仿真结果对比,验证其准确性。在此基础上,利用特征值分析法对系统振荡模态进行研究,并分析控制器参数对系统小干扰稳定性的影响。最后,基于PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真模型验证特征值分析结果的准确性。

## 1 系统结构及参数

### 1.1 含H桥级联型SSSC的系统结构

含H桥级联型SSSC的系统结构如图1所示。图中, $v_s$ 为系统的等值电压源; $R_{s1}$ 、 $L_{s1}$ 和 $R_{s2}$ 、 $L_{s2}$ 分别为SSSC接入点左侧和右侧系统的等效电阻、电感; $u_k$ 为SSSC接入点左侧的线路电压。

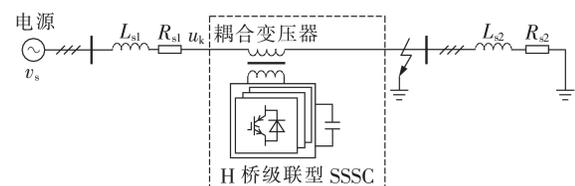


图1 系统结构图

Fig.1 Structure diagram of system

H桥级联型SSSC的内部结构及接入系统的电路图见附录中图A1。H桥级联型SSSC的主电路主要由N个电压源换流器(VSC)串联组成的三相逆变器、输出LC滤波电路以及耦合变压器三部分组成。

### 1.2 系统的总体控制结构

系统的总体控制结构如图2所示,主要分为子

收稿日期:2019-06-13;修回日期:2019-12-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507064);国家电网公司科技项目(GEIRI-DL-71-18-005);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018MS087)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51507064), the Science and Technology Project of SGCC (GEIRI-DL-71-18-005) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2018MS087)

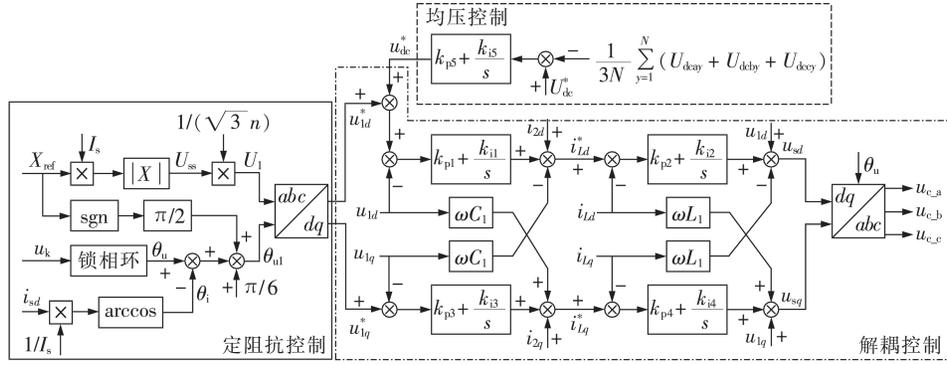


图2 系统的总体控制框图

Fig.2 Overall control block diagram of system

模块电容均压控制、定阻抗控制及解耦控制3个部分。图中,  $k_{p1}$ 、 $k_{p3}$  和  $k_{i1}$ 、 $k_{i3}$  分别为电压外环控制器的比例和积分系数;  $k_{p2}$ 、 $k_{p4}$  和  $k_{i2}$ 、 $k_{i4}$  分别为电流内环控制器的比例和积分系数;  $k_{p5}$  和  $k_{i5}$  分别为均压控制器的比例和积分系数。

虚线框内为均压控制部分,由电容电压参考指令值与三相链节总平均直流电压比较得到误差信号,再经过PI调节器实现其控制功能。图中,  $U_{dcxy}$  ( $x=a, b, c; y=1, 2, \dots, N$ ) 为子模块电容电压;  $U_{dc}^*$  为电容电压指令值;  $u_{dc}^*$  为均压控制器的输出量。

实线框内为定阻抗控制部分,具体阐述参考文献[6],本文不再赘述。图中,  $X_{ref}$  为阻抗指令值;  $|X|$  为取绝对值;  $\text{sgn}$  为符号函数,根据  $X_{ref}$  的正负来决定  $\pi/2$  的符号;  $I_s$  为线路电流的幅值;  $i_{sd}$  为线路电流的  $d$  轴分量;  $n$  为耦合变压器变比;  $U_{ss}$  为SSSC注入交流系统中电压幅值的指令值;  $\theta_u$  为锁相环输出角度;  $\theta_{ul}$  为SSSC输出电压相角的指令值;  $\theta_l$  为线路电流相对于  $d$  轴的相位角;  $U_1$  为SSSC输出电压幅值的指令值。其中锁相环控制部分与文献[6]略有不同,本文以线路电压  $u_k$  为基准设定  $dq$  旋转坐标系。

点划线框内为解耦控制部分。图中,  $i_{2d}$ 、 $i_{2q}$  分别为耦合变压器阀侧电流的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $\omega$  为电气旋转角速度;  $C_1$ 、 $L_1$  分别为滤波电容、电感;  $u_{c-x}$  为解耦控制输出的三相电压调制波。电压给定信号  $u_{1d}^*$ 、 $u_{1q}^*$  与输出电压反馈信号  $u_{1d}$ 、 $u_{1q}$  比较得到电压误差,经过电压调节器产生电感电流给定信号  $i_{Ld}^*$ 、 $i_{Lq}^*$ ,再与电感电流反馈信号  $i_{Ld}$ 、 $i_{Lq}$  比较,得到的电流误差信号经过电流调节器形成电压信号  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ ,进而通过载波相移正弦脉宽调制(CPS-SPWM)环节对逆变器实施控制。

## 2 小信号模型及验证

小信号模型是系统小干扰稳定性分析的基础。本文首先构建H桥级联型SSSC主电路、控制系统以及RL线路的线性化状态空间模型,然后利用模块化建模的方法构成全系统的小信号模型。

### 2.1 系统各部分数学模型

#### 2.1.1 SSSC主电路数学模型

SSSC主电路数学模型主要分为2个部分,分别为交流侧和直流侧。

如图A1所示,SSSC交流侧经过LC滤波器接入交流系统,其在  $abc$  三相静止坐标系中的数学模型为:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{Lx}}{dt} = u_{sx} - u_{1x} \\ C_1 \frac{du_{1x}}{dt} = i_{Lx} - i_{2x} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $i_{Lx}$ 、 $i_{2x}$  分别为SSSC输出滤波电感的三相电流、耦合变压器阀侧三相电流分量;  $u_{sx}$ 、 $u_{1x}$  分别为逆变器的三相交流侧电压、输出电压。

采用同步旋转变换矩阵<sup>[6]</sup>,将式(1)由  $abc$  三相静止坐标系转换到  $dq$  旋转坐标系下,变换矩阵中的  $\theta$  决定了  $dq$  旋转坐标系中  $d$  轴的取向。SSSC主电路交流侧在  $dq$  坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{Ld}}{dt} = u_{sd} - u_{1d} + \omega L_1 i_{Lq} \\ L_1 \frac{di_{Lq}}{dt} = u_{sq} - u_{1q} - \omega L_1 i_{Ld} \\ C_1 \frac{du_{1d}}{dt} = i_{Ld} - i_{2d} + \omega C_1 u_{1q} \\ C_1 \frac{du_{1q}}{dt} = i_{Lq} - i_{2q} - \omega C_1 u_{1d} \end{cases} \quad (2)$$

由于逆变器的损耗较小,在建模中可以忽略,因此电容消耗的有功等于系统输入的有功。并假设子模块电容电压值相等,均等于  $U_{dc}$ ,则H桥级联型SSSC直流侧数学模型为:

$$3NC_{dc}U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = -3(u_{sd}i_{Ld} + u_{sq}i_{Lq})/2 \quad (3)$$

其中,  $C_{dc}$  为子模块电容。

#### 2.1.2 控制系统数学模型

假设子模块电容电压值相等,均压控制系统中三相链节总平均直流电压满足:

$$\frac{1}{3N} \sum_{y=1}^N (U_{\text{decay}} + U_{\text{deby}} + U_{\text{decy}}) = U_{\text{dc}} \quad (4)$$

则该控制的状态空间模型为:

$$\begin{cases} dx_3/dt = U_{\text{dc}}^* - U_{\text{dc}} \\ u_{\text{dc}}^* = k_{p5} dx_3/dt + k_{i5} x_3 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $x_3$  为均压控制中的状态变量。

定阻抗控制系统在建模过程中不考虑锁相环, 其状态空间模型为:

$$\begin{cases} U_1 = |X_{\text{ref}}| \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} / \sqrt{3} \\ \theta_{u1} = \theta_u - \theta_i - \pi/2 + \pi/6 \\ u_{1d}^* = U_1 \cos[\theta_u - (\omega t + \theta_{u1})] \\ u_{1q}^* = U_1 \sin[(\omega t + \theta_{u1}) - \theta_u] \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $i_{sq}$  为线路电流的  $q$  轴分量。

解耦控制系统的状态空间模型为:

$$\begin{cases} dx_6/dt = u_{\text{dc}}^* + u_{1d}^* - u_{1d} \\ i_{Ld}^* = k_{p1} dx_6/dt + k_{i1} x_6 + i_{2d} - \omega C_1 u_{1d} \\ dx_7/dt = i_{Ld}^* - i_{Ld} \\ u_{sd} = k_{p2} dx_7/dt + k_{i2} x_7 + u_{1d} - \omega L_1 i_{Ld} \\ dx_8/dt = u_{1q}^* - u_{1q} \\ i_{Ld}^* = k_{p3} dx_8/dt + k_{i3} x_8 + i_{2q} + \omega C_1 u_{1d} \\ dx_9/dt = i_{Ld}^* - i_{Ld} \\ u_{sq} = k_{p4} dx_9/dt + k_{i4} x_9 + u_{1q} + \omega L_1 i_{Ld} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $x_6 \sim x_9$  为解耦控制中的状态变量。

### 2.1.3 RL 线路的数学模型

将图 1 中系统等效为理想电压源以及线路阻抗, 系统等效阻抗分别为  $R_s = R_{s1} + R_{s2}$  和  $L_s = L_{s1} + L_{s2}$ , 其数学模型为:

$$\begin{cases} L_s di_{sd}/dt = -R_s i_{sd} + v_{sd} - u_{ssd} + \omega L_s i_{sq} \\ L_s di_{sq}/dt = -R_s i_{sq} + v_{sq} - u_{ssq} - \omega L_s i_{sd} \end{cases} \quad (8)$$

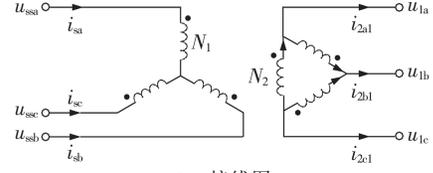
其中,  $v_{sd}$ 、 $v_{sq}$  分别为电压源电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $u_{ssd}$ 、 $u_{ssq}$  分别为 SSSC 注入电压的  $d$ 、 $q$  轴分量。

### 2.1.4 耦合变压器的数学模型

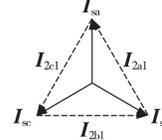
耦合变压器的漏抗较小, 建模过程中可以忽略, 但是接线方式会对数学模型产生影响<sup>[16]</sup>。Yd11 联结变压器接线以及电流、电压相位关系如图 3 所示。图中,  $u_{\text{ssx}}$ 、 $U_{\text{ssx}}$  分别为 SSSC 注入交流系统中的电压及其相量;  $u_{1x}$ 、 $U_{1x}$  分别为 SSSC 输出电压及其相量;  $i_{2x1}$ 、 $I_{2x1}$  分别为耦合变压器三角形侧的线电流及其相量;  $i_{sx}$ 、 $I_{sx}$  分别为线路电流及其相量;  $N_1$ 、 $N_2$  分别为星形、三角形侧变压器的线圈匝数。

根据图 3(b)、(c) 所示相量图, 推导出耦合变压器两侧电气量在  $dq$  轴坐标下的关系式为:

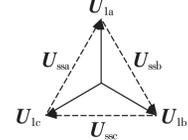
$$\begin{cases} u_{ssd} = 3u_{1d}/2 + \sqrt{3}u_{1q}/2 \\ u_{ssq} = 3u_{1q}/2 - \sqrt{3}u_{1d}/2 \\ i_{2d1} = 3i_{sd}/2 - \sqrt{3}i_{sq}/2 \\ i_{2q1} = 3i_{sq}/2 + \sqrt{3}i_{sd}/2 \end{cases} \quad (9)$$



(a) 接线图



(b) 电流相量图



(c) 电压相量图

图 3 Yd11 变压器接线图和相量图

Fig.3 Wiring diagram and phasor diagram of Yd11 transformer

其中,  $i_{2d1}$ 、 $i_{2q1}$  分别为耦合变压器三角形侧线电流的  $d$ 、 $q$  轴分量。

## 2.2 模块化建模

为解决传统小信号建模时消除代数数量难度大、模型改动时灵活性差的问题, 采用基于 MATLAB 的模块化小信号建模方法<sup>[17]</sup>。以 RL 线路为例阐述模块化建模的过程。

### 2.2.1 各部分微分方程的线性化

RL 线路线性化后的微分方程为:

$$\begin{cases} L_s d\Delta i_{sd}/dt = -R_s \Delta i_{sd} + \Delta v_{sd} - \Delta u_{ssd} + \omega L_s \Delta i_{sq} \\ L_s d\Delta i_{sq}/dt = -R_s \Delta i_{sq} + \Delta v_{sq} - \Delta u_{ssq} - \omega L_s \Delta i_{sd} \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\Delta i_{sd}$ 、 $\Delta i_{sq}$  分别为线路电流  $d$ 、 $q$  轴分量的变化量;  $\Delta v_{sd}$ 、 $\Delta v_{sq}$  分别为电压源电压  $d$ 、 $q$  轴分量的变化量;  $\Delta u_{ssd}$ 、 $\Delta u_{ssq}$  分别为 SSSC 注入电压  $d$ 、 $q$  轴分量的变化量。

### 2.2.2 各个模块的状态空间模型的建立

依据模块间的输入输出关系确定各个模块的输入、输出, 设 RL 线路模块为第  $i$  个模块, 其状态空间方程可以表示为:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X_i}{dt} = A_i \Delta X_i + B_i \Delta U_i \\ \Delta Y_i = C_i \Delta X_i + D_i \Delta U_i \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $\Delta X_i$ 、 $\Delta U_i$  和  $\Delta Y_i$  分别为模块  $i$  的状态变量、输入量和输出量;  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ 、 $D_i$  为模块  $i$  的系数矩阵。RL 线路模块  $i$  的输入量为  $\Delta U_i = [\Delta u_{ssd}, \Delta u_{ssq}]^T$ , 状态变量  $\Delta X_i$  和输出量  $\Delta Y_i$  均为  $[\Delta i_{sd}, \Delta i_{sq}]^T$ 。RL 线路模块  $i$  对应的矩阵  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ 、 $D_i$  分别为:

$$\begin{cases} A_i = \begin{bmatrix} -R_s/L_s & \omega \\ \omega & -R_s/L_s \end{bmatrix} \\ B_i = \begin{bmatrix} -1/L_s & 0 \\ 0 & -1/L_s \end{bmatrix} \\ C_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ D_i = 0 \end{cases} \quad (12)$$

将上述矩阵输入 MATLAB 的状态空间模块中,

建立相应的状态空间模型。

采用相同方法建立各个模块的状态空间模型,部分模块的状态空间矩阵涉及稳定运行点参数,可通过计算或时域仿真获取稳定运行点初始值,系统稳定运行点参数见附录中表A1。

各个模块状态空间模型间的接口关系如图4所示。

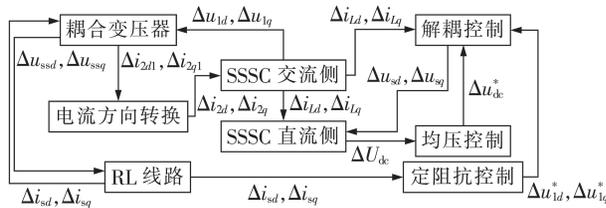


图4 模块化建模接口图

Fig.4 Interface diagram of modular modeling

### 2.2.3 整个系统的状态空间模型的形成

由2.2.2节分析可知,建立各个模块的状态空间模型,通过MATLAB中linmod函数即可自动生成16阶系统状态空间模型:

$$\begin{cases} d\Delta X/dt = A\Delta X + B\Delta U \\ \Delta Y = C\Delta X + D\Delta U \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 为系统状态空间模型的系数矩阵;  $X = [i_{sd}, i_{sq}, i_{Ld}, i_{Lq}, u_{1d}, u_{1q}, U_{dc}, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9]^T$ ,  $x_1$ 、 $x_2$ 分别为电流方向转换和耦合变压器中的状态变量。 $X$ 共包含16个状态变量,将系统的16个状态变量按所属子系统及模块划分为如附录中表A2所示的7个部分。

### 2.3 小信号模型验证

目前较多文献采用小信号模型与时域仿真模型的阶跃响应对比证明小信号模型的准确性<sup>[18]</sup>。本文利用此方法验证2.2节中基于模块化建模法建立的小信号模型的准确性。

系统初始运行参数见附录中表A3。当第5.0s时,阻抗指令值 $X_{ref}$ 的绝对值由10Ω阶跃降至9Ω。MATLAB小信号模型和PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真模型的结果对比如图5所示,图5(a)、(b)分别对比了在阻抗指令值 $X_{ref}$ 发生阶跃时线路电流 $d$ 、 $q$ 轴分量的动态响应。

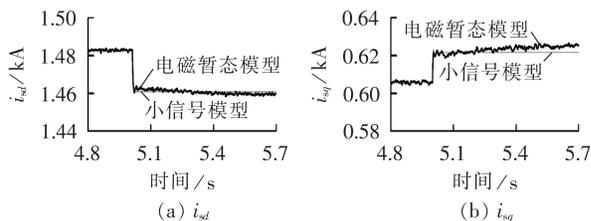


图5  $X_{ref}$ 阶跃时系统动态响应

Fig.5 Dynamic response of system under step change of  $X_{ref}$

由图5可知,基于MATLAB的小信号模型动态响应与PSCAD/EMTDC的电磁暂态仿真结果基本一致,有效地验证了H桥级联型SSSC小信号模型的准确性。

## 3 特征值分析

### 3.1 特征值计算

基于MATLAB的小信号模型,利用特征值分析法分析其振荡模态,算例参数见附录中表A3。计算系统状态矩阵的特征值、阻尼比和振荡频率,结果如表1所示,表中不包含非振荡模态。表中, $\lambda_{1,2}$ 、 $\lambda_{3,4}$ 、 $\lambda_{5,6}$ 分别为模态1—3对应的共轭特征根。

表1 特征值分析

Table 1 Eigenvalue analysis

振荡模态	特征值	振荡频率/Hz	阻尼比
1	$\lambda_{1,2} = -1333.8 \pm j6925.8$	1102.3	0.1891
2	$\lambda_{3,4} = -1376.2 \pm j6942.8$	1105.0	0.1944
3	$\lambda_{5,6} = -462.1 \pm j267.5$	42.6	0.8654

由表1可知,含H桥级联型SSSC系统的所有特征值都分布在复平面左侧,是小干扰稳定的。在典型参数下,整个系统共有3个振荡模态,即2个高频振荡模态和1个次同步振荡模态,且均为强阻尼模态,振荡会快速衰减。然而,当系统参数发生变化时,系统特征根变化,系统模态也会随之变化,可能使得原来阻尼较强的模态变为弱阻尼模态,系统小干扰稳定性发生变化<sup>[18]</sup>。

### 3.2 参与因子分析

为了研究系统状态变量和振荡模态之间的关系,计算了各振荡模态的参与因子,并将参与因子归一化,所得结果如图6所示。

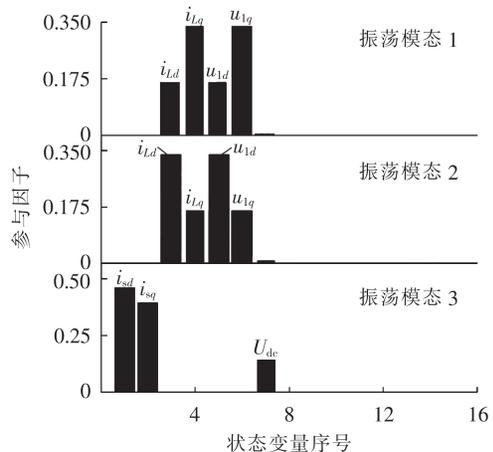


图6 各振荡模态的参与因子

Fig.6 Participating factors of oscillation modes

振荡模态1主要由状态变量 $i_{Ld}$ 、 $i_{Lq}$ 、 $u_{1d}$ 和 $u_{1q}$ 主导参与,其大小分别为0.1613、0.3358、0.1624和0.3376。振荡模态2主要由状态变量 $i_{Ld}$ 、 $i_{Lq}$ 、 $u_{1d}$ 和 $u_{1q}$ 主导参与

与,其大小分别为0.3321、0.1613、0.3350和0.1618。模态1、2均是由LC滤波器中电感与电容相互作用引起的,具体分析参考文献[19],本文不再赘述。振荡模态3主要由状态变量 $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 和 $U_{dc}$ 主导参与,其大小分别为0.4602、0.3937和0.1432。该振荡模态主要受系统参数以及均压控制器参数的影响。

#### 4 小干扰稳定性分析

由上述的参与因子分析可知,模态1和2的主要参与变量是 $i_{Ld}$ 、 $i_{Lq}$ 、 $u_{1d}$ 和 $u_{1q}$ ,而模态3的主要参与变量是 $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 和 $U_{dc}$ ,由图2可知,这些变量均参与调节。因此,本节重点分析解耦控制器参数以及均压控制器参数对系统小干扰稳定性的影响。

##### 4.1 电压外环控制器参数 $k_{p1}$ 对系统稳定性的影响

保持系统参数与表A3一致。为了简化分析,外环控制器比例系数 $k_{p1}$ ( $k_{p3}$ 与 $k_{p1}$ 相等)以及积分系数 $k_{i1}$ ( $k_{i3}$ 与 $k_{i1}$ 相等)变化时,均保持固定比例。当比例系数 $k_{p1}$ 在[1,20]范围内变化时,根轨迹曲线如图7中左图所示,模态3的根轨迹曲线放大后如图7中右图所示(箭头方向表示 $k_{p1}$ 增大时特征根的移动方向)。

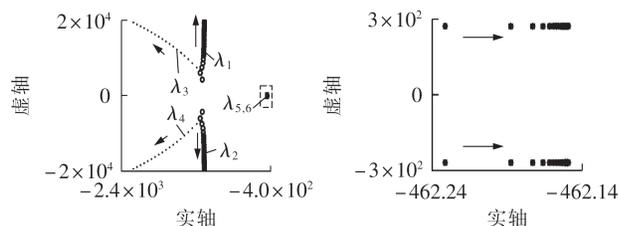


图7  $k_{p1}$ 变化时的根轨迹

Fig.7 Eigenvalue locus when  $k_{p1}$  changes

由图7可知,在 $k_{p1}$ 变化过程中,所有特征根始终位于左半平面,并且离虚轴较远,系统仍能够稳定运行。随着 $k_{p1}$ 增大,模态1先向左后向右移动,但是该模态阻尼比变化不大;模态2则一直向左边移动,阻尼比增大;模态3的移动方向向右,阻尼比减小,但是从最终趋势来看,最终会稳定在左半平面的一个点上,并且模态3的变化不如模态2的变化明显。所以整体而言,随着 $k_{p1}$ 增大,系统的稳定裕度增大。

为验证特征值分析结果的正确性,基于图1和图2在PSCAD/EMTDC中搭建电磁暂态仿真模型进行时域仿真。在图1所示的SSSC接入点右侧设置三相接地故障,故障起始时间3.0s,持续时间为0.075s,选取电流 $i_{2d}$ 作为观测对象,时域仿真曲线如图8所示,3条曲线分别代表电压外环比例系数为 $k_{p1}$ 、 $2k_{p1}$ 、 $3k_{p1}$ 时,系统发生故障后电流 $i_{2d}$ 的恢复曲线。

由图8可知,当电压外环比例系数分别为 $k_{p1}$ 、 $2k_{p1}$ 、 $3k_{p1}$ 时,系统发生故障后电流 $i_{2d}$ 振荡衰减完全所需的周期数依次为7、4、3,说明随着电压外环控制器比例系数增大,故障恢复时间变短,系统稳定性增

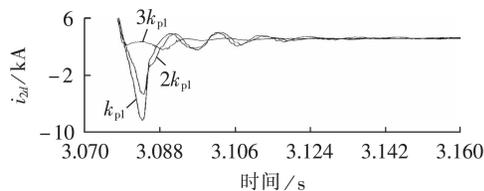


图8 时域仿真曲线( $k_{p1}$ 变化)

Fig.8 Time domain simulative curves when  $k_{p1}$  changes

强,验证了上述特征值分析的结论。

##### 4.2 电流内环控制器参数 $k_{p2}$ 对系统稳定性的影响

保持系统参数与表A3一致,令 $k_{p2}$ ( $k_{p4}$ 与 $k_{p2}$ 相等)在[1,20]范围内变化,积分系数与比例系数的比例保持不变。根轨迹曲线如图9中左图所示,模态3根轨迹的放大图如图9中右图所示(箭头方向为 $k_{p2}$ 增大时根轨迹的移动方向)。

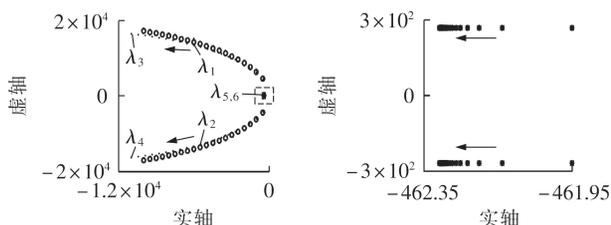


图9  $k_{p2}$ 变化时的根轨迹

Fig.9 Eigenvalue locus when  $k_{p2}$  changes

由图9可知,在 $k_{p2}$ 变化过程中,各模态的特征根始终位于左半平面,所以在此变化过程中不会引起系统失稳。由于模态1和模态2受参数变化的影响都比较大,继续减小比例系数,模态1、2可能会由强阻尼模态转化为弱阻尼模态。模态3也会受到参数变化的影响,但是相较于模态1和2而言,影响较小。整体而言,随着 $k_{p2}$ 的增大,系统稳定裕度增大,稳定性增强。

故障设置与4.1节中相同。时域仿真曲线如图10所示,3条曲线分别代表电流内环比例系数为 $k_{p2}$ 、 $2k_{p2}$ 、 $3k_{p2}$ 时,系统发生故障后电流 $i_{2d}$ 的恢复曲线。

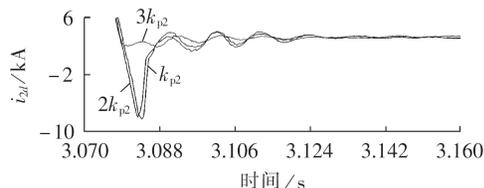


图10 时域仿真曲线( $k_{p2}$ 变化)

Fig.10 Time domain simulative curves when  $k_{p2}$  changes

由图10可知,随着 $k_{p2}$ 的增大,故障后电流在振荡过程中振荡幅度减小,并且振荡衰减完全所需的时间减少。通过时域仿真验证了特征值分析的结论。

##### 4.3 均压控制器参数 $k_{p5}$ 对系统稳定性的影响

保持系统参数与表A3一致,令 $k_{p5}$ 在 $[0.1k_{p5}, 2k_{p5}]$ 范围内变化,积分系数与比例系数的比例保持不变。

根轨迹曲线如图11中左图所示,模式3的根轨迹放大图如图11中右图所示(箭头方向为 $k_{ps}$ 增大时特征根的移动方向)。

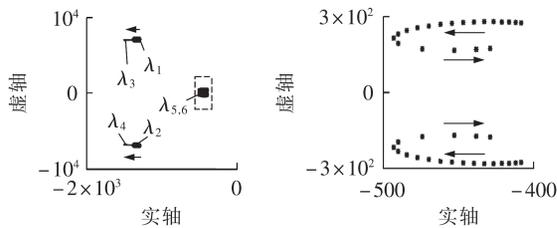


图11  $k_{ps}$ 变化时的根轨迹

Fig.11 Eigenvalue locus when  $k_{ps}$  changes

由图11可知,随着 $k_{ps}$ 的增大,模式1和模式2均向左边移动,即阻尼比增大,频率基本不受影响。模式3与模式1、2的移动方向不同,但模式2受比例系数变化的影响比模式3明显。整体而言,当 $k_{ps}$ 在 $[0.1k_{ps}, 2k_{ps}]$ 区间增大时,系统仍处于稳定状态,但是稳定裕度增大,稳定性增强。

故障设置与4.1节中相同。时域仿真曲线如图12所示,3条曲线分别代表均压控制器比例系数为 $k_{ps}$ 、 $1.5k_{ps}$ 、 $2k_{ps}$ 时,系统发生故障之后电流 $i_{2d}$ 的恢复曲线。

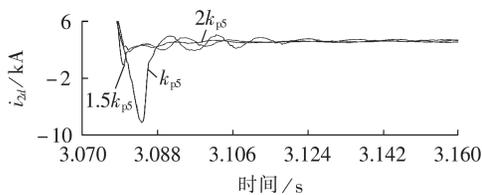


图12 时域仿真曲线( $k_{ps}$ 变化)

Fig.12 Time domain simulation curves when  $k_{ps}$  changes

由图12可知,随着 $k_{ps}$ 的增大,故障后电流振荡幅度减小,恢复稳定所需的时间减小。通过时域仿真验证了特征值分析的结论。

## 5 结论

H桥级联型SSSC相较于其他结构SSSC而言,具备补偿容量大、成本低的优势,但是目前H桥级联型SSSC的小信号建模的研究较少。基于此现状进行了相关研究,主要结论如下。

(1)采用模块化建模的方法,考虑SSSC接入系统的具体电路结构,建立了H桥级联型SSSC的小信号模型,并结合实际工程参数,通过MATLAB小信号模型的动态响应与PSCAD/EMTDC电磁暂态模型的仿真结果对比,验证了所建立模型的准确性。

(2)在典型参数下,该系统存在2个高频振荡模态和1个次同步振荡模态,且均呈现正阻尼。其中,2个高频振荡模态是由滤波电感、电容的相互作用引起的,而次同步振荡模态主要受线路参数以及子

模块电容电压的影响。

(3)采用特征值分析法和时域仿真法,研究了在典型参数下解耦控制器参数以及均压控制器参数对系统小干扰稳定性的影响。结果表明,随着解耦控制器以及均压控制器参数的增大,系统稳定性均增强,其中解耦控制中电流内环控制器参数对系统稳定性的影响最大。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 杜翼,朱克平,江道灼,等. 含有限流式静止同步串联补偿器的直流配电网[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):108-113,121. DU Yi, ZHU Keping, JIANG Daozhuo, et al. DC distribution network with current limiting static synchronous series compensator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8):108-113, 121.
- [2] 丁冠军,丁明,汤广福. 基于六脉波电压源逆变器的SSSC直流电容电压控制机理[J]. 电力自动化设备,2007,27(11):1-7. DING Guanjun, DING Ming, TANG Guangfu. Mechanism of DC capacitor voltage control of 6-pulse VSI-based SSSC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11):1-7.
- [3] 蒋晨阳,刘青,梁宵. 多FACTS元件控制变量配对方法与协调投运策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):179-184,196. JIANG Chenyang, LIU Qing, LIANG Xiao. Control variable pairing and coordinated commissioning for multiple FACTS components[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4):179-184, 196.
- [4] 宋方方. 静止同步串联补偿器(SSSC)潮流控制技术[D]. 北京:华北电力大学,2017. SONG Fangfang. Research on power flow control technology of static synchronous series compensator[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2017.
- [5] 姜旭. H桥级联式SSSC主电路拓扑分析及控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2007. JIANG Xu. Analysis of main circuit topology and research on control of H-bridge cascade SSSC[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2007.
- [6] 张帆,徐政. 静止同步串联补偿器控制方式及特性研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(19):75-80. ZHANG Fang, XU Zheng. Study on control and characteristics of static synchronous series compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19):75-80.
- [7] 刘黎明,康勇,陈坚,等. SSSC建模、控制策略及性能[J]. 电工技术学报,2006,21(9):37-43. LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Static synchronous series compensator modeling, control scheme and performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9):37-43.
- [8] FAWZI A, RAHMAN A J, OOI B T. Series compensation of radial power system by a combination of SSSC and dielectric capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1):458-465.
- [9] PILLAI G N, ARINDAM G, JOSHI A. Torsional interaction studies on a power system compensated by SSSC and fixed capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3):988-993.
- [10] SUNIL K L, ARINDAM G. Modeling and control design of a static synchronous series compensator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(4):448-1453.

- [11] RIGBY B S, HARLEY R G. Resonant characteristics of inverter-based transmission line series compensators[C]//Power Electronics Specialists Conference. Charleston, South Carolina, USA:IEEE,1999:412-417.
- [12] KOTWAL C, SANGALA U, PILLAI G N. Improving power oscillation damping using static synchronous series compensator[C]//2013 Annual IEEE India Conference (INDIC-ON). Mumbai, India:IEEE,2013:1-6.
- [13] THERATTIL J P, PANDA P C. Improving dynamic stability of a power system using adaptive Static Synchronous Series Compensator[C]//TENCON 2011-2011 IEEE Region 10 Conference. Bali, Indonesia:IEEE,2011:928-932.
- [14] PILLAI G N, ARINDAM G, JOSHI A. Torsional oscillation studies in an SSSC compensated power system[J]. Electric Power Systems Research,2000,55(1):57-64.
- [15] LADJAVARDI M, MASOUM S A M, ISLAM M S. Small-signal stability analysis of distorted power systems installed with SSSC[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA:IEEE,2007:1-6.
- [16] 肖湘宁. 电力系统次同步振荡及其抑制方法[M]. 北京:机械工业出版社,2014:48-49.
- [17] 赵书强,李忍,高本锋,等. 适用于多源系统次同步振荡分析的图形化建模方法[J]. 电工技术学报,2017,32(14):184-193,228. ZHAO Shuqiang, LI Ren, GAO Benfeng, et al. A graphical modeling method applied for multi-sources system sub-synchronous oscillation analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(14):184-193,228.
- [18] 郭春义,殷子寒,王焯,等. LCC-MMC型混合直流输电系统小干扰稳定性研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(4):1040-1052. GUO Chunyi, YIN Zihan, WANG Ye, et al. Investigation on small-signal stability of hybrid LCC-MMC HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(4):1040-1052.
- [19] 秦世耀,李少林,王瑞明,等. 大容量永磁同步风电机组系统谐振与抑制策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(22):11-16. QIN Shiyao, LI Shaolin, WANG Ruiming, et al. Resonance and suppression strategy of large-capacity permanent magnet synchronous generator wind turbine system[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(22):11-16.

#### 作者简介:



高本锋

高本锋(1981—),男,山东聊城人,副教授,博士,主要研究方向为高压直流输电和电力系统次同步振荡(E-mail: gaobenfeng@126.com);

江婷(1995—),女,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统次同步振荡(E-mail: ting\_jiang0@163.com)。

(编辑 王欣竹)

## Dynamic model and small interference stability analysis of H-bridge cascaded SSSC

GAO Benfeng<sup>1</sup>, JIANG Ting<sup>1</sup>, YU Hongyang<sup>2</sup>, ZHAO Guoliang<sup>2</sup>, WANG Feiyue<sup>1</sup>,

SHAO Bingbing<sup>1</sup>, ZHAO Shuqiang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province,

North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Transmission Technology,

Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China)

**Abstract:** Based on the modular modeling method and considering the actual circuit structure, the small signal model of the system with H-bridge cascaded SSSC (Static Synchronous Series Compensator) is established. Based on the actual engineering parameters, the accuracy of the small signal model is verified by comparing the calculative results of the small signal model with the PSCAD/EMTDC electromagnetic simulation results. Then the eigenvalue analysis method is used to analyze the system oscillation mode, and the influence of controller parameters on the system stability under small disturbance is studied. The study results show that the system stability is enhanced with the increase of the parameters of the decoupling controller and the equalization controller. Time domain simulation verifies the accuracy of eigenvalue analytical conclusions.

**Key words:** H-bridge cascaded SSSC; small signal model; eigenvalue analysis method; small interference stability; time domain simulation

## 附录

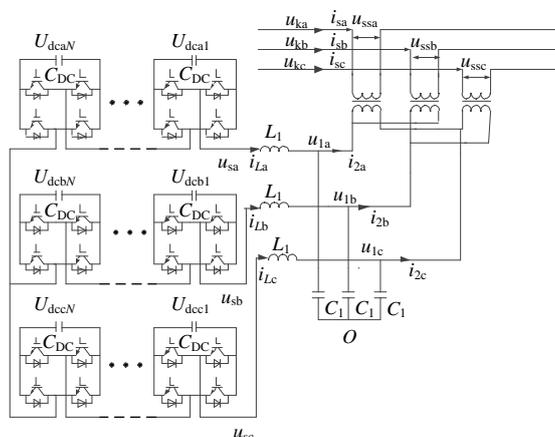


图 A1 SSSC 内部结构以及接入系统的具体电路图

Fig.A1 Internal structure of SSSC and specific circuit diagram of accessing to the system

表 A1 系统稳定运行点参数

Table A1 Parameters of system stable operating point

参数	参数值
线路电流 $d$ 轴分量 $i_{sd}/\text{kA}$	1.482
线路电流 $q$ 轴分量 $i_{sq}/\text{kA}$	0.605
耦合变压器阀侧电流 $d$ 轴分量 $i_{2d}/\text{kA}$	-2.524
耦合变压器阀侧电流 $q$ 轴分量 $i_{2q}/\text{kA}$	0.352
逆变器交流侧电压 $d$ 轴分量 $u_{sd}/\text{kV}$	3.533
逆变器交流侧电压 $q$ 轴分量 $u_{sq}/\text{kV}$	10.282
电容电压指令值 $U_{dc}^*/\text{kV}$	3.0
线路电流相对于 $d$ 轴的相位角 $\theta$	0.3875

表 A2 状态变量分组

Table A2 Grouping of state variables

模块	状态变量	状态变量序号
RL 线路	线路电流 $dq$ 轴分量 $i_{sdq}$	1-2
	电感电流 $dq$ 轴分量 $i_{Ldq}$	3-4
主电路	电容电压 $dq$ 轴分量 $u_{1dq}$	5-6
	子模块电容电压 $U_{dc}$	7
电流方向转换	$x_1$	8
耦合变压器	$x_2$	9
均压控制	$x_3$	10
定阻抗控制	$x_4, x_5$	11-12
解耦控制	$x_{6-9}$	13-16

表 A3 系统主要参数

Table A3 Major parameters of system

系统参数	参数值	系统参数	参数值
系统电压/kV	110	滤波电容 $C_1/\mu\text{F}$	14
耦合变压器变比 $n$	1	级联个数 $N$	5
$R_{s1}, R_{s2}/\Omega$	0.375, 50.01	均压控制器参数	$k_{p5}=35, k_{i5}=0.001$
$L_{s1}, L_{s2}/\text{H}$	0.0243, 0.1	电压外环控制器参数	$k_{p1}=k_{p3}=2.7, k_{i1}=k_{i3}=0.1$
子模块电容 $C_{DC}/\mu\text{F}$	8000	电流内环控制器参数	$k_{p2}=k_{p4}=2.6, k_{i2}=k_{i4}=0.003$