

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231137

# 基于模块化思想的 LCC-HVDC 改进小信号建模及交互稳定性分析

王顺亮, 刘海军, 谢洋, 马俊鹏, 李永琪, 焦宁, 刘天琪

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 随着电网换相型高压直流输电(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)技术的广泛应用, 交直流混联电力系统的交互稳定性问题日益突出。首先基于状态空间平均法建立了考虑非线性换相重叠动态过程的 LCC 换流器传递函数模型。为适应愈加复杂的直流输电系统建模, 提出利用模块化思想分别建立 LCC-HVDC 各子系统小信号模型, 并推导了能反映交直流系统和换流器之间电气耦合特性的接口矩阵实现子系统连接, 从而模块化建立精确且易于扩展的计及控制链路延时和锁相环输出相位波动的双端 LCC-HVDC 系统改进小信号模型。最后分析了控制系统参数和控制链路延时对系统小干扰稳定性的影响以及失稳模态的主导因素, 揭示了双端 LCC-HVDC 系统交直流混合谐振机理及送受端交互影响具体过程。研究结果可以为系统参数设计、谐振抑制措施提供理论基础。

**关键词:** LCC-HVDC; 状态空间模型; 模块化; 控制链路延时; 谐振影响因素

## Improved small signal modeling and interaction stability analysis of LCC-HVDC based on modularization

WANG Shunliang, LIU Haijun, XIE Yang, MA Junpeng, LI Yongqi, JIAO Ning, LIU Tianqi  
(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** With the widespread application of line commutated converter based high voltage direct current (LCC-HVDC) technology, the interactive stability problem of AC-DC hybrid power systems is becoming increasingly prominent. This paper first establishes the transfer function model of an LCC converter considering the nonlinear commutation overlapping dynamic process based on the state-space averaging method. To accommodate more complex DC transmission system modeling, it is proposed to establish small-signal models of LCC-HVDC subsystems using a modularization idea, and the interface matrix reflecting the electrical coupling characteristics between AC/DC system and converter is derived to realize subsystem connection, thereby modularly establishing accurate and easily expandable small-signal models of double-ended LCC-HVDC system. These consider the control time delay and phase fluctuation of phase-locked loop output. Finally, the influence of control system parameters and control time delay on the small disturbance stability of the system and the dominant factors of the instability modes are analyzed. The mechanism of AC-DC hybrid resonance of double-ended LCC-HVDC system and the interaction between sender and receiver are revealed. The research results can provide a theoretical basis for the design of system parameters and resonance suppression measures.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977135).

**Key words:** LCC-HVDC; state space model; modularity; control time delay; resonance influence factor

## 0 引言

我国能源基地与负荷中心呈逆向分布的特点, 为促进资源的优化配置, 具有远距离、大容量输电

优势的电网换相型高压直流输电(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)技术得到了广泛的应用, 已成为我国交直流混联电网的主要组成部分<sup>[1-5]</sup>。然而, 随着 LCC-HVDC 传输容量逐渐增长, 交直流混联电网的谐振问题日益突出, 给电力系统的安全稳定运行带来挑战<sup>[6-8]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977135)

建立精确的 LCC-HVDC 系统小信号模型是开展交直流混合系统稳定性分析的基础<sup>[9-10]</sup>。基于开关函数方法, 文献[11]建立了 LCC 逆变站的小干扰动态模型, 分析了锁相环和控制参数对系统稳定性的影响。文献[12]从小干扰稳定性方面对逆变侧定电压控制和预测型定关断角控制策略进行了对比。文献[13]采用谐波线性化方法建立 LCC 整流站导纳模型并分析系统存在的频率耦合现象。文献[14]基于谐波状态空间理论建立了 LCC 整流站小信号模型。文献[15-17]建立了多馈入 LCC-HVDC 系统和混合直流输电系统的小信号模型并进行稳定性分析。文献[18]建立考虑换相过程的 12 脉动换流器动态相量模型。文献[19]进一步将动态相量法的适用范围拓展到不对称故障工况下。上述文献针对不同 LCC-HVDC 系统结构和工况进行建模分析, 但是为了简化建模过程忽略了系统的实际换相过程或对非线性换相电流采用线性近似等效, 模型精度有待进一步提高。

文献[20-21]考虑换相重叠过程阀电流的正弦特性进一步修正开关函数, 模型精度有所提高, 但大大地增加了模型复杂程度。文献[22]推导了改进统一的 12 脉动电压电流开关函数并进行谐波传递分析, 但模型仍较为复杂。文献[23]基于无限多个 6 脉动换流器串联的假设, 采用平均值思想考虑换相过程建立 LCC 逆变站小信号模型。文献[24]采用平均值方法考虑换相过程建立 LCC 逆变站的复矢量阻抗模型。文献[25]在文献[24]的基础上考虑换流阀阻尼支路的影响, 提高了阻抗模型的精度, 但同样只针对单端系统进行建模, 双端 LCC-HVDC 系统谐波交互稳定性机理尚未提及。同时上述文献也没有考虑到控制链路延时对系统稳定性的影响。

本文以双端 12 脉动 LCC-HVDC 系统为研究对象, 首先基于模块化思想, 采用状态空间平均法考虑换相重叠角和非线性阀电流建立精确且易于扩展的双端 12 脉动 LCC-HVDC 改进小信号模型, 并通过 PSCAD 仿真对比验证模型的正确性。其次利用特征值法分析控制系统参数和控制链路延时变化对 LCC-HVDC 系统稳定性的具体影响, 采用参与因子分析法研究振荡模态的主要影响因素, 揭示 LCC-HVDC 系统送受端之间的交互影响机理。

## 1 LCC-HVDC 系统拓扑结构和工作原理

### 1.1 双端 12 脉动换流器拓扑结构

图 1 为双端 12 脉动 LCC-HVDC 系统的结构示意图, 包含整流侧、直流线路、逆变侧 3 个子系统。

整流侧(逆变侧)分别包含交流电源、交流滤波器、换流器和控制系统。其中, 整流侧采用定电流控制方式, 逆变侧采用定电压控制方式。

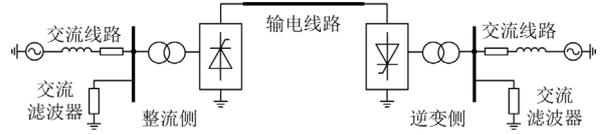


图 1 LCC-HVDC 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LCC-HVDC system

### 1.2 考虑非线性换相重叠动态过程的换流器模型

首先以 6 脉动换流器为例, 推导 LCC 换流器的数学模型。图 2(a)为阀 5 换相到阀 1 过程中换流器的导通电路图, 其中,  $u_{k(k=a,b,c)}$  为换流变压器阀侧三相交流电压,  $i_{k(k=a,b,c)}$  为换流变压器阀侧三相交流电流,  $L_c$  为换相电感,  $u_{dc}$  为换流器的输出直流电压,  $i_{dc}$  为直流电流。图 2(b)为换相过程中的 a 相交流电流及直流电压波形图,  $\alpha$  为触发角,  $\mu$  为换相角,  $\delta$  为关断角,  $\varphi_f$  为换相开始时刻,  $\varphi_e$  为换相结束时刻。

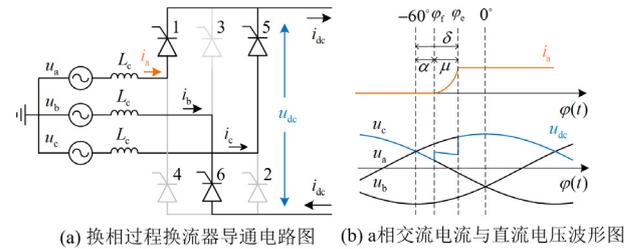


图 2 LCC 换流器换相过程

Fig. 2 LCC converter commutation process

#### 1.2.1 关断角

由图 2(a)换相过程换流器导通电路图与基尔霍夫定律可得

$$u_a - L_c \frac{di_a}{dt} = u_c - L_c \frac{di_c}{dt} \quad (1)$$

$$i_a + i_c = i_{dc} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得

$$2L_c \frac{di_a}{dt} = u_a - u_c + L_c \frac{di_{dc}}{dt} \quad (3)$$

将式(3)中的交流电压转换到  $dq$  坐标系下, 即

$$\begin{cases} u_a(\varphi) = u_d \cos \varphi - u_q \sin \varphi \\ u_c(\varphi) = u_d \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) - u_q \sin(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  分别为交流电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $\varphi$  为换相时刻角度。将式(4)代入式(3)中, 可得到  $dq$  坐标系下的换相关系表达式为

$$2L_c \frac{di_a}{dt} = \sqrt{3} \left[ u_d \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) - u_q \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) \right] + L_c \frac{di_{dc}}{dt} \quad (5)$$

在换相开始时, 由于阀 1 处于断开状态, 阀 5 处于导通状态, 则有  $i_a(\varphi_f) = 0$ ,  $i_c(\varphi_f) = i_{dc}$ 。对式(5)进行积分可得

$$i_a(\varphi) = \frac{\sqrt{3}}{2X_c} \left[ u_d \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) + u_q \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) \right] - \frac{\sqrt{3}}{2X_c} \left[ u_d \sin\left(\varphi_f - \frac{\pi}{6}\right) + u_q \cos\left(\varphi_f - \frac{\pi}{6}\right) \right] \quad (6)$$

式中,  $X_c$  为换流变压器电抗值,  $X_c = \omega_0 L_c$ , 其中  $\omega_0$  为角速度。在换相结束时, 阀 1 处于导通状态, 阀 5 处于关断状态,  $i_a(\varphi_e) = i_{dc}$ ,  $i_c(\varphi_e) = 0$ , 代入式(6)可得

$$i_{dc} = \frac{\sqrt{3}}{2X_c} \left[ u_d \sin\left(\varphi_e - \frac{\pi}{6}\right) + u_q \cos\left(\varphi_e - \frac{\pi}{6}\right) \right] - \frac{\sqrt{3}}{2X_c} \left[ u_d \sin\left(\varphi_f - \frac{\pi}{6}\right) + u_q \cos\left(\varphi_f - \frac{\pi}{6}\right) \right] \quad (7)$$

式中,  $\varphi_f = \alpha - \pi/3$  和  $\varphi_e = \delta - \pi/3$ , 对式(7)小信号线性化, 可得关断角  $\Delta\delta$  和  $\Delta u_d$ 、 $\Delta u_q$ 、 $\Delta i_{dc}$ 、 $\Delta\alpha$  的传递函数,  $\Delta$  表示变量的小信号分量, 下文同。

### 1.2.2 直流电压

由图 2(b)可知, 6 脉动换流器输出的直流电压  $u_{dc}$  由两部分组成, 如式(8)所示。

$$u_{dc} = \begin{cases} \frac{u_a(\varphi) + u_c(\varphi)}{2} - u_b(\varphi), & \alpha - \frac{\pi}{3} \leq \varphi \leq \delta - \frac{\pi}{3} \\ u_a(\varphi) - u_b(\varphi), & \delta - \frac{\pi}{3} < \varphi \leq \alpha \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)通过派克变换转换到  $dq$  坐标系下:

$$u_{dc} = \begin{cases} \frac{3}{2} \left[ u_d \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{3}\right) - u_q \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{3}\right) \right], & \alpha - \frac{\pi}{3} \leq \varphi \leq \delta - \frac{\pi}{3} \\ \sqrt{3} \left[ u_d \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) - u_q \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) \right], & \delta - \frac{\pi}{3} < \varphi \leq \alpha \end{cases} \quad (9)$$

通过对式(9)在一个换相周期  $\pi/3$  内积分然后求平均, 可计算出  $dq$  坐标系下 6 脉动换流器直流电压  $u_{dc}$  的解析式, 如式(10)所示。

$$u_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} [u_q (\sin\alpha + \sin\delta) - u_d (\cos\alpha + \cos\delta)] \quad (10)$$

12 脉动换流器输出直流电压为 6 脉动换流器输

出直流电压的两倍。

### 1.2.3 交流电流

根据图 2(b), 三相交流电流由换相和非换相两部分组成, 可表示为

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} i_a(\varphi) \\ -i_{dc}(\varphi) \\ i_{dc}(\varphi) - i_a(\varphi) \end{bmatrix}, & \alpha - \frac{\pi}{3} \leq \varphi \leq \delta - \frac{\pi}{3} \\ \begin{bmatrix} i_{dc}(\varphi) \\ -i_{dc}(\varphi) \\ 0 \end{bmatrix}, & \delta - \frac{\pi}{3} < \varphi \leq \alpha \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)通过坐标变换, 可以得到交流电流  $dq$  坐标系下的分量  $i_d$ 、 $i_q$  分别为

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{3}}{3} \begin{bmatrix} i_a \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) - i_{dc} \sin(\varphi) \\ -i_a \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) - i_{dc} \cos(\varphi) \end{bmatrix}, & \alpha - \frac{\pi}{3} \leq \varphi \leq \delta - \frac{\pi}{3} \\ \frac{2\sqrt{3}}{3} i_{dc} \begin{bmatrix} \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) \\ -\sin\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) \end{bmatrix}, & \delta - \frac{\pi}{3} < \varphi \leq \alpha \end{cases} \quad (12)$$

在  $\pi/3$  的周期内对式(12)进行积分求平均, 可计算出  $dq$  坐标系下的换流器交流侧电流的解析表达式为

$$i_d = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} i_{dc} \left[ \cos\left(\delta + \frac{\pi}{3}\right) + \cos\left(\delta - \frac{\pi}{3}\right) \right] + \frac{3u_d}{4\pi X_c} (\cos 2\delta - \cos 2\alpha) - \frac{3u_q}{4\pi X_c} (\sin 2\delta - \sin 2\alpha) + \frac{3}{\pi X_c} (-u_d \cos\alpha + u_q \sin\alpha) (\cos\delta - \cos\alpha) + \frac{3u_q(\delta - \alpha)}{2\pi X_c} \quad (13)$$

$$i_q = -\frac{2\sqrt{3}}{\pi} i_{dc} \left[ \sin\left(\delta + \frac{\pi}{3}\right) + \sin\left(\delta - \frac{\pi}{3}\right) \right] - \frac{3u_d}{4\pi X_c} (\sin 2\delta - \sin 2\alpha) - \frac{3u_q}{4\pi X_c} (\cos 2\delta - \cos 2\alpha) - \frac{3}{\pi X_c} (-u_d \cos\alpha + u_q \sin\alpha) (\sin\delta - \sin\alpha) - \frac{3u_d(\delta - \alpha)}{2\pi X_c} \quad (14)$$

同理, 12 脉动换流器  $dq$  交流电流  $i_d$ 、 $i_q$  为 6 脉动换流器的两倍。

### 1.2.4 换流器数学模型

由上述分析可以得到 LCC-HVDC 换流器的小信号模型如式(15)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \\ \Delta u_{dc} \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \\ \Delta i_{dc} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中  $m_{ij}(i,j=1,2,3,4)$  是对式(7)、式(10)、式(13)、式(14)小信号线性化得到的换流器各变量之间的传递函数。

## 2 基于模块化思想的双端 LCC-HVDC 系统改进小信号模型

本节基于模块化思想将双端 LCC-HVDC 系统拆分为“送-输-受”3个子系统,其中送、受端子系统进一步拆分为交流系统、控制系统、锁相环、换流器4个子模块,分别建立各子系统(子模块)的小信号模型,通过推导接口矩阵将“送-输-受”3个子系统连接成整体,建立考虑换相过程、控制链路延时、锁相环输出相位波动影响的双端 LCC-HVDC 系统改进小信号模型。

### 2.1 交流系统

以送端交流系统为例,图3为送端交流系统(含交流电源和交流滤波器)拓扑结构。下标“r”表示送端系统相关变量,  $u_{sr}$  和  $i_{sr}$  分别是交流电源电压和电流,  $L_{sr}$  和  $R_{sr}$  分别是交流电源线路等值电感和电阻,  $R_{r1} - R_{r3}$ 、 $L_{r1} - L_{r2}$ 、 $C_{r1} - C_{r4}$  分别为交流滤波器的电阻、电感和电容,  $u_{pccr}$  和  $i_{cr}$  分别为交流母线电压与电流,交流滤波器等主电路参数和 CIGRE 高压直流标准模型保持一致,选取交流滤波器电感电流的  $dq$  轴分量、电容电压的  $dq$  轴分量、交流母线与交流电源的电流和电压的  $dq$  轴分量作为状态变量。

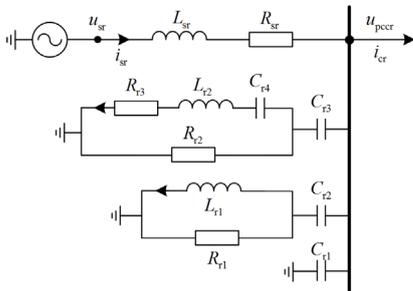


图3 交流系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of AC system

$dq$  坐标系下交流系统小信号状态空间模型可以由文献[16]得到,在此不再赘述。

$$\Delta \dot{x}_1 = A_1 \Delta x_1 + B_1 \Delta u_1 \quad (16)$$

式中:  $A_1$  和  $B_1$  分别为交流系统小信号模型的系统矩阵和输入矩阵,  $B_1 = [B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{14}]$ , 其中  $B_{1k}(k=1,2,3,4)$  为  $B_1$  矩阵列向量;  $\Delta x_1$  为状态变量,  $\Delta x_1 = [\Delta u_{pccr}, \Delta u_{pccr}, \Delta u_{cr2d}, \Delta u_{cr2q}, \Delta i_{lr1d}, \Delta i_{lr1q}, \Delta u_{cr3d}, \Delta u_{cr3q}, \Delta u_{cr4d}, \Delta u_{cr4q}, \Delta i_{lr2d}, \Delta i_{lr2q}, \Delta i_{sr}, \Delta i_{sr}]^T$ ;  $\Delta u_1$  为输入变量,  $\Delta u_1 = [\Delta \theta_{pll}, \Delta i_{crd}, \Delta i_{crq}, \Delta \omega_r]^T$ ,  $\Delta \omega_r$  和  $\Delta \theta_{pll}$  分别为锁相环输出的角频率和相位状态变量。

### 2.2 考虑控制链路延时的控制系统

LCC-HVDC 系统在实际运行过程中,控制环节存在着测量采样、信号传输、计算执行、脉冲触发等链路延时(约 0.5~2.5 ms),将这一系列延时等效为  $e^{-sT_d}$  考虑到控制系统中[26]。以整流站定电流控制为例,具体的控制框图如图4所示。

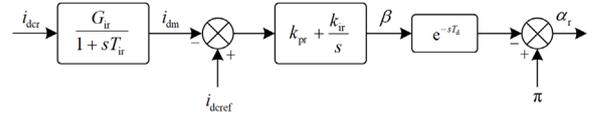


图4 考虑控制链路延时的定电流控制框图

Fig. 4 Block diagram of constant DC current control considering time delay

图4中:  $G_{ir}$  和  $T_{ir}$  分别为一阶惯性环节比例增益和时间常数;  $k_{pr}$  和  $k_{ir}$  分别为 PI 环节比例增益和积分增益;  $i_{dm}$  为直流电流  $i_{dcr}$  的测量值;  $i_{dcref}$  为直流电流指令值;  $T_d$  为控制链路延时;  $\beta$  为超前触发角;  $\alpha_r$  为控制器触发角指令值。由于控制链路延时  $e^{-sT_d}$  的传递函数是离散的,因此采用 Pade 近似来等效控制链路延时[27]。Pade 近似公式为

$$e^{-sT_d} \approx \frac{b_0 + b_1 T_d s + \dots + b_l (T_d s)^n}{a_0 + a_1 T_d s + \dots + a_k (T_d s)^n} \quad (17)$$

$$\text{式中, } \begin{cases} a_j = \frac{n!(2n-j)!}{(n-j)!j!} \\ b_j = (-1)^j \frac{n!(2n-j)!}{(n-j)!j!} \end{cases}。$$

LCC-HVDC 系统控制链路延时对于系统振荡模态的影响主要体现在 100 Hz 以内的频率,延时效果对比如图5所示。

从图5可以看出,在 100 Hz 内二阶 Pade 近似已经较好地拟合实际延时,因此本文中采用二阶 Pade 近似,可得考虑控制链路延时的控制系统小信号模型为

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_2 = A_2 \Delta x_2 + B_2 \Delta u_2 \\ \Delta y_2 = C_2 \Delta x_2 + D_2 \Delta u_2 \end{cases} \quad (18)$$



$$\mathbf{D}_r = [-m_{34}k_{pr} \quad m_{33}]$$

式中:  $\mathbf{ZM}_1$ 、 $\mathbf{ZM}_2$ 、 $\mathbf{ZM}_3$ 、 $\mathbf{ZM}_4$  分别为  $4 \times 14$ 、 $4 \times 2$ 、 $2 \times 16$ 、 $1 \times 12$  的零矩阵;  $\mathbf{A}_{1\text{mod}}$  由交流系统小信号模型的系统矩阵  $\mathbf{A}_1$  修改第 1 列和第 2 列得到。

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{1\text{mod}}(:,1) = \mathbf{A}_1(:,1) + m_{11}\mathbf{B}_{12} + m_{21}\mathbf{B}_{13} \\ \mathbf{A}_{1\text{mod}}(:,2) = \mathbf{A}_1(:,2) + m_{12}\mathbf{B}_{12} + m_{22}\mathbf{B}_{13} + \mathbf{B}_{14}\mathbf{D}_{31} \end{cases} \quad (21)$$

采用与 LCC-HVDC 送端系统相同的求解步骤, 可得受端系统(相关变量和矩阵的下标用“i”表示)的状态空间模型如式(22)所示。

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_i \Delta \mathbf{u}_i \\ \Delta \mathbf{y}_i = \mathbf{C}_i \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{D}_i \Delta \mathbf{u}_i \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $\mathbf{A}_i$ 、 $\mathbf{B}_i$ 、 $\mathbf{C}_i$ 、 $\mathbf{D}_i$  分别为受端系统小信号状态空间模型系统矩阵、输入矩阵、输出矩阵和直接传输矩阵;  $\Delta \mathbf{x}_i$  为状态变量,  $\Delta \mathbf{x}_i = [\Delta u_{\text{pccid}}, \Delta u_{\text{pcciq}}, \Delta u_{\text{ci2d}}, \Delta u_{\text{ci2q}}, \Delta i_{\text{li1d}}, \Delta i_{\text{li1q}}, \Delta u_{\text{ci3d}}, \Delta u_{\text{ci3q}}, \Delta u_{\text{ci4d}}, \Delta u_{\text{ci4q}}, \Delta i_{\text{li2d}}, \Delta i_{\text{li2q}}, \Delta i_{\text{sid}}, \Delta i_{\text{siq}}, \Delta x_{0i}, \Delta u_{\text{dcm}}, \Delta x_{1i}, \Delta x_{2i}, \Delta x_{\text{plli}}, \Delta \theta_{\text{plli}}]^T$ ;  $\Delta \mathbf{u}_i$  为输入变量,  $\Delta \mathbf{u}_i = [\Delta u_{\text{deref}}, \Delta i_{\text{dci}}]^T$ , 其中  $\Delta u_{\text{deref}}$  表示逆变侧定电压控制直流电压参考值的小信号分量;  $\Delta \mathbf{y}_i$  为输出变量,  $\Delta \mathbf{y}_i = \Delta u_{\text{dci}}$ 。

## 2.5 直流线路

直流线路与 CIGRE 高压直流标准模型保持一致, 采用 T 型等效线路, 其中  $L_{\text{deq}}$  为等效线路电感,  $R_d$  为线路电阻,  $C_d$  为线路电容,  $u_{\text{cd}}$  为电容电压,  $i_{\text{dcr}}$  和  $u_{\text{dcr}}$  分别为整流侧直流电流和电压,  $i_{\text{dci}}$  和  $u_{\text{dci}}$  分别为逆变侧直流电流和电压, 如图 8 所示。

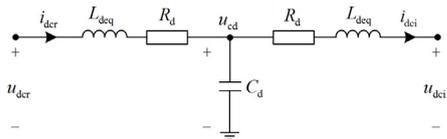


图 8 直流线路示意图

Fig. 8 Schematic diagram of DC line

可以得到直流输电线路的小信号模型为

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{dc}} = \mathbf{A}_{\text{dc}} \Delta \mathbf{x}_{\text{dc}} + \mathbf{B}_{\text{dc}} \Delta \mathbf{u}_{\text{dc}} \\ \Delta \mathbf{y}_{\text{dc}} = \mathbf{C}_{\text{dc}} \Delta \mathbf{x}_{\text{dc}} \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $\mathbf{A}_{\text{dc}}$ 、 $\mathbf{B}_{\text{dc}}$ 、 $\mathbf{C}_{\text{dc}}$  分别为直流系统小信号状态空间模型的系统矩阵、输入矩阵, 输出矩阵; 状态变量  $\Delta \mathbf{x}_{\text{dc}} = [\Delta u_{\text{cd}}, \Delta i_{\text{dcr}}, \Delta i_{\text{dci}}]^T$ ; 输入变量  $\Delta \mathbf{u}_{\text{dc}} = [\Delta u_{\text{dcr}}, \Delta u_{\text{dci}}]^T$ ; 输出变量  $\Delta \mathbf{y}_{\text{dc}} = [\Delta i_{\text{dcr}}, \Delta i_{\text{dci}}]^T$ 。

直流输电线路作为送端系统和受端系统的接口, 其输入变量分别来自送端系统和受端系统, 其输出变量分别作为送端系统和受端系统的输入变量, 如图 9 所示。



图 9 LCC-HVDC 各子系统变量之间的关系

Fig. 9 Relationship between the subsystem variables of the LCC-HVDC

可得考虑直流输电线路的送、受端系统的小信号模型为

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_r = \mathbf{A}_r \Delta \mathbf{x}_r + \mathbf{B}_{r1} \Delta \mathbf{u}_{r1} + \mathbf{B}_{r2} \Delta \mathbf{u}_{r2} = \\ \mathbf{A}_r \Delta \mathbf{x}_r + \mathbf{B}_{r1} \Delta \mathbf{u}_{r1} + \mathbf{B}_{r2} \mathbf{C}_{\text{dc1}} \Delta \mathbf{x}_{\text{dc}} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{y}_r = \mathbf{C}_r \Delta \mathbf{x}_r + \mathbf{D}_{r1} \Delta \mathbf{u}_{r1} + \mathbf{D}_{r2} \mathbf{C}_{\text{dc1}} \Delta \mathbf{x}_{\text{dc}} \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_{i1} \Delta \mathbf{u}_{i1} + \mathbf{B}_{i2} \Delta \mathbf{u}_{i2} = \\ \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_{i1} \Delta \mathbf{u}_{i1} + \mathbf{B}_{i2} \mathbf{C}_{\text{dc2}} \Delta \mathbf{x}_{\text{dc}} \end{cases} \quad (25)$$

$$\Delta \mathbf{y}_i = \mathbf{C}_i \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{D}_{i1} \Delta \mathbf{u}_{i1} + \mathbf{D}_{i2} \mathbf{C}_{\text{dc2}} \Delta \mathbf{x}_{\text{dc}}$$

式中:  $\mathbf{B}_{r1}$  和  $\mathbf{B}_{r2}$  为送端系统小信号模型输入矩阵  $\mathbf{B}_r$  的列向量;  $\mathbf{B}_{i1}$  和  $\mathbf{B}_{i2}$  为受端系统小信号模型输入矩阵  $\mathbf{B}_i$  的列向量;  $\mathbf{D}_{r1}$  和  $\mathbf{D}_{r2}$ 、 $\mathbf{D}_{i1}$  和  $\mathbf{D}_{i2}$  同理。  $\Delta \mathbf{u}_{r1}$  和  $\Delta \mathbf{u}_{r2}$  为  $\Delta \mathbf{u}_r$  的行向量,  $\Delta \mathbf{u}_{i1}$  和  $\Delta \mathbf{u}_{i2}$  为  $\Delta \mathbf{u}_i$  的行向量。  $\mathbf{C}_{\text{dc1}}$  和  $\mathbf{C}_{\text{dc2}}$  分别为直流输电线路小信号模型输出矩阵  $\mathbf{C}_{\text{dc}}$  的行向量。

将式(24)、式(25)代入式(23)可得考虑送、受端系统的直流输电线路小信号模型为

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{dc}} = \mathbf{A}_{\text{dc}} \Delta \mathbf{x}_{\text{dc}} + \mathbf{B}_{\text{dc1}} \Delta \mathbf{u}_{\text{dc1}} + \mathbf{B}_{\text{dc2}} \Delta \mathbf{u}_{\text{dc2}} = \\ \mathbf{A}_{\text{dc}} \Delta \mathbf{x}_{\text{dc}} + \mathbf{B}_{\text{dc1}} \Delta \mathbf{y}_r + \mathbf{B}_{\text{dc2}} \Delta \mathbf{y}_i = \\ (\mathbf{A}_{\text{dc}} + \mathbf{B}_{\text{dc1}} \mathbf{D}_{r2} \mathbf{C}_{\text{dc1}} + \mathbf{B}_{\text{dc2}} \mathbf{D}_{i2} \mathbf{C}_{\text{dc2}}) \Delta \mathbf{x}_{\text{dc}} + \\ \mathbf{B}_{\text{dc1}} \mathbf{C}_r \Delta \mathbf{x}_r + \mathbf{B}_{\text{dc2}} \mathbf{C}_i \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_{\text{dc1}} \mathbf{D}_{r1} \Delta \mathbf{u}_{r1} + \mathbf{B}_{\text{dc2}} \mathbf{D}_{i1} \Delta \mathbf{u}_{i1} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $\mathbf{B}_{\text{dc1}}$  和  $\mathbf{B}_{\text{dc2}}$  分别为直流输电线路小信号模型输入矩阵  $\mathbf{B}_{\text{dc}}$  的列向量;  $\Delta \mathbf{u}_{\text{dc1}}$  和  $\Delta \mathbf{u}_{\text{dc2}}$  为  $\Delta \mathbf{u}_{\text{dc}}$  的行向量。

## 2.6 双端 LCC-HVDC 系统

将送、受端系统和直流输电线路的状态空间表达式进行整理, 即可得到考虑换相过程、控制链路延时、锁相环输出相位波动对交流系统影响的双端 12 脉动 LCC-HVDC 系统的改进小信号模型为

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (27)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_r & \mathbf{B}_{r2} \mathbf{C}_{\text{dc1}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_{\text{dc1}} \mathbf{C}_r & \mathbf{A}_{\text{dc}} + \mathbf{B}_{\text{dc1}} \mathbf{D}_{r2} \mathbf{C}_{\text{dc1}} + \mathbf{B}_{\text{dc2}} \mathbf{D}_{i2} \mathbf{C}_{\text{dc2}} & \mathbf{B}_{\text{dc2}} \mathbf{C}_i \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_{i2} \mathbf{C}_{\text{dc2}} & \mathbf{A}_i \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{r1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_{\text{dc1}} \mathbf{D}_{r1} & \mathbf{B}_{\text{dc2}} \mathbf{D}_{i1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_{i1} \end{bmatrix};$$

$$\Delta \mathbf{x} = [\Delta \mathbf{x}_r^T, \Delta \mathbf{x}_{dc}^T, \Delta \mathbf{x}_i^T]^T; \quad \Delta \mathbf{u} = [\Delta i_{dref}, \Delta u_{dref}]^T。$$

### 3 小信号模型验证

#### 3.1 系统参数

LCC-HVDC 系统的参数如表 1 所示, 滤波器的参数与 CIGRE 高压直流标准模型相同。

表 1 LCC-HVDC 系统参数

Table 1 LCC-HVDC system parameters

类别	参数	整流侧	逆变侧
电源线路	额定电压/kV	382.8672	215.05
	电感/H	0.1509	0.0652
	电阻/ $\Omega$	4.778	5.4985
换流变压器	额定容量/MVA	603.73	591.79
	变比(kV/kV)	345/213.4557	230/209.2288
	漏抗/p.u.	0.18	0.18
直流线路参数	直流电压/kV	500	
	直流电流/kA	2	
	电感/H	0.5968	
	电阻/ $\Omega$	2.5	
	电容/ $\mu\text{F}$	26	
PLL	比例增益	10	10
	积分增益	50	50
控制器	比例增益	1.0989	0.01
	积分增益	1/0.01092	1/0.1

#### 3.2 动态响应验证

工况 1: 系统开始运行在额定工况下,  $t = 3.0 \text{ s}$  时整流侧定电流控制参考值  $i_{dref}$  从 1.0 p.u. 阶跃到 1.05 p.u., 时间持续 1 s。图 10 为所建小信号模型与 PSCAD 仿真各变量动态响应对比图。

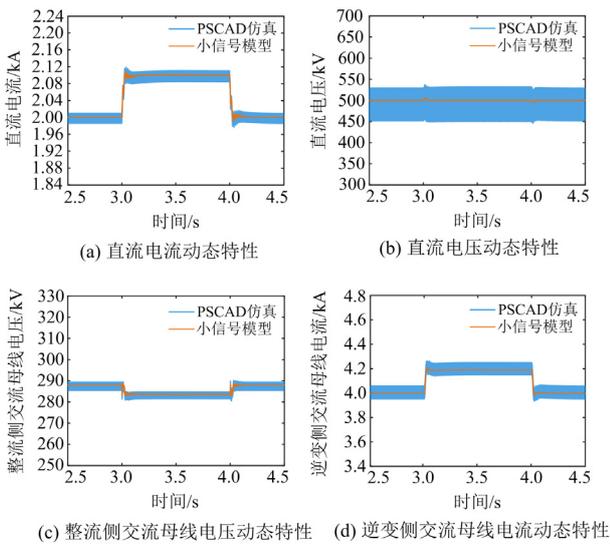


图 10 工况 1 动态响应验证

Fig. 10 Dynamic response verification of Condition 1

工况 2: 系统开始运行在额定工况下,  $t = 3.0 \text{ s}$  时逆变站定电压控制器电压参考值  $u_{dref}$  从 1.0 p.u. 阶跃到 0.95 p.u. 图 11 为所建小信号模型与 PSCAD 仿真各变量动态响应对比图。

由图 10 和图 11 可以看出, 所建小信号模型与电磁暂态仿真模型的动态响应基本一致, 验证了所建小信号模型的精确性。PSCAD 电磁暂态仿真中因为包含了所有频率成分, 所以其波动范围比较大, 但是两者平均值保持一致。

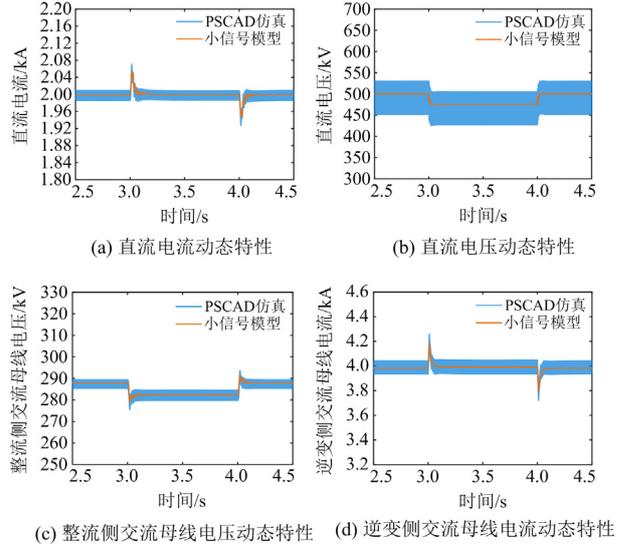


图 11 工况 2 动态响应验证

Fig. 11 Dynamic response verification of Condition 2

### 4 LCC-HVDC 系统小信号交互稳定性分析

本小节以整流侧定电流控制器比例增益  $k_{pr}$  和控制链路延时  $T_d$  为例进行 LCC-HVDC 系统送受端小信号交互稳定性分析, 其余谐振影响因素的稳定性分析过程与之类似, 具体分析步骤如下。

- 1) 求解系统矩阵  $A$  的特征值:  $\lambda = \sigma \pm j\omega$ 。
- 2) 求解阻尼比  $\zeta$  和振荡频率  $f$ 。

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}, \quad f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (28)$$

3) 计算振荡模态的参与因子:  $P_{ki} = \phi_{ki} \psi_{ki}$ 。其中:  $P_{ki}$  表示第  $k$  个状态变量对第  $i$  个模态的参与程度;  $\psi_{ki}$  为系统左特征向量第  $k$  行第  $i$  列的元素;  $\phi_{ki}$  为系统右特征向量第  $k$  行第  $i$  列的元素。

#### 4.1 小信号模型稳定性分析

##### 4.1.1 控制器参数

保持系统其他参数不变, 逐渐增加定电流控制比例增益  $k_{pr}$ , 通过特征值与参与因子分析法得到的小信号模型稳定性分析结果如图 12 所示。

图 12(a)为系统的根轨迹,可以看出 $k_{pr} = 2.38$ 时,系统有特征根出现在右半平面,系统不稳定;图 12(b)和图 12(c)分别为系统的阻尼比分布情况及各模态对应的振荡频率,可知系统临界稳定时振荡主导模态振荡频率为 70.3 Hz。由于  $dq$  坐标下系统振荡频率与实际三相系统存在 50 Hz 频率差,因此三相交流系统振荡频率为 120.3 Hz。

图 12(d)为振荡主导模态的参与因子分布情况,可得当 $k_{pr} = 2.38$ 系统临界稳定时,影响振荡主导模态的状态变量为 $\Delta u_{cr3d}$ 、 $\Delta i_{srd}$ 、 $\Delta i_{srq}$ 、 $\Delta u_{cd}$ 、 $\Delta i_{dcr}$ ,表明该振荡主导模态会受到交流侧与直流侧状态变量的共同影响,且 $\Delta i_{dcr}$ 对该模态的影响最为显著,说明该模态与实际直流电流密切相关。因此,需要重点关注定直流电流控制器的参数稳定运行域以预防系统发生振荡。

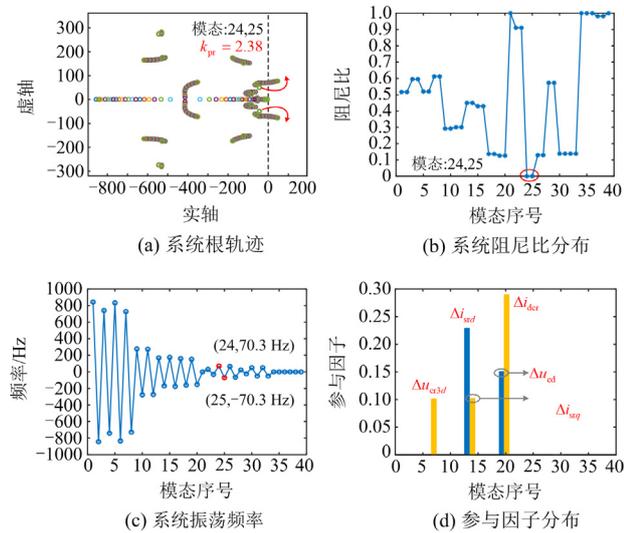


图 12  $k_{pr}$  变化时系统稳定性分析结果

Fig. 12 System stability analysis results when  $k_{pr}$  changes

上述送受端交直流系统交互影响过程可由式 (15)做出解释: $k_{pr}$  变化导致控制器输出触发角  $\Delta \alpha$  变化,影响整流侧交流系统电流  $\Delta i_d$ 、 $\Delta i_q$  和直流电压  $\Delta u_{dcr}$ ,而  $\Delta u_{dcr}$  通过直流线路影响直流电流  $\Delta i_{dcr}$  和  $\Delta i_{dci}$  的动态响应,逆变侧直流电流  $\Delta i_{dci}$  通过逆变站影响受端交流系统的动态响应,形成送受端交直流的耦合。

#### 4.1.2 控制链路延时

图 13 是不同控制链路延时系统的根轨迹。由图 13 可以看出控制链路延时  $T_d = 1.5$  ms 时系统特征值更容易穿越 0 轴到右半平面,系统更容易失稳。

表 2 为不同控制链路延时下小信号模型稳定性分析结果。

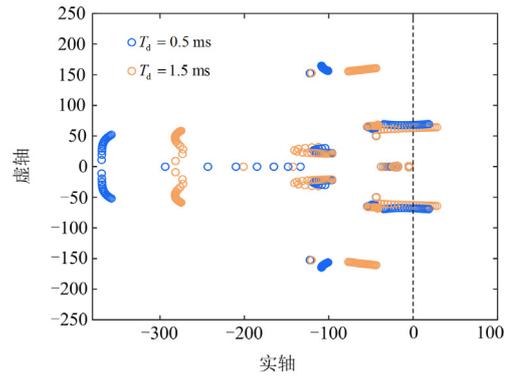


图 13 不同控制链路延时系统根轨迹

Fig. 13 Different control time delay system root trajectories

表 2 不同控制链路延时系统稳定性分析数据

Table 2 System stability analysis data with different control time delays

		临界失稳值	直流振荡频率
$T_d = 0.5$ ms	状态变量	$\Delta u_{cr3q}$ (0.10)	$\Delta i_{srd}$ (0.25)
	参与因子	$\Delta i_{srq}$ (0.12)	$\Delta u_{cd}$ (0.17)
		$\Delta i_{dcr}$ (0.31)	$\Delta i_{dci}$ (0.10)
$T_d = 1.5$ ms	状态变量	$\Delta i_{srd}$ (0.28)	$\Delta i_{srq}$ (0.13)
	参与因子	$\Delta u_{cd}$ (0.16)	$\Delta i_{dcr}$ (0.31)
		$\Delta i_{dci}$ (0.10)	$\Delta x_{1r}$ (0.13)

由上述分析可知,控制链路延时会影响控制系统参数的稳定运行域和系统振荡频率,同时控制链路延时也会改变系统的主导模态及振荡模态的主要影响因素。

## 4.2 仿真验证

### 4.2.1 控制器参数稳定性影响仿真验证

为了更精确地判断仿真失稳临界值,保持其他参数不变,设置 $k_{pr}$ 每 10 s 增加 0.01, 10 s 内不发生振荡判定为不失稳。图 14 为 $k_{pr}$ 变化时直流电流仿真结果。可以看出 $k_{pr}$ 增加到 2.12 时系统发生失稳现象,且随着 $k_{pr}$ 继续增大振荡失稳愈加明显。

图 15 为 LCC-HVDC 各子系统变量傅里叶分析结果。由图 15(a)和图 15(b)可知,仿真临界失稳时逆变侧交流系统电容  $q$  轴电压  $u_{ci3q}$  振荡频率为 69 Hz,该电容 a 相电压  $u_{ci3a}$  的振荡频率为 119 Hz,与特征值分析的交流系统振荡频率 120.3 Hz 一致,误差为 1.09%。

从图 15(c)可得仿真临界失稳时直流电流的振荡频率为 69 Hz,与逆变侧交流系统振荡频率相差

50 Hz, 满足交直流谐波传递规律; 由图 15(d)可得仿真临界失稳时整流侧交流系统的振荡频率为 119 Hz, 与直流振荡频率相差 50 Hz, 同样满足交直流谐波传递规律。

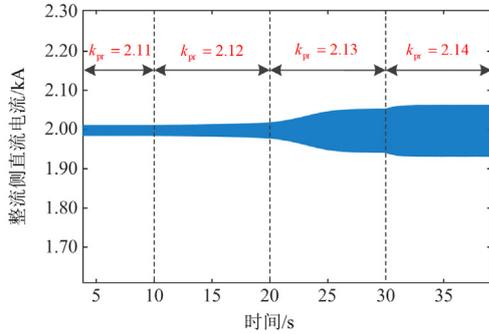


图 14  $k_{pr}$  变化的直流电流仿真结果

Fig. 14 Simulation results for DC current when  $k_{pr}$  changes

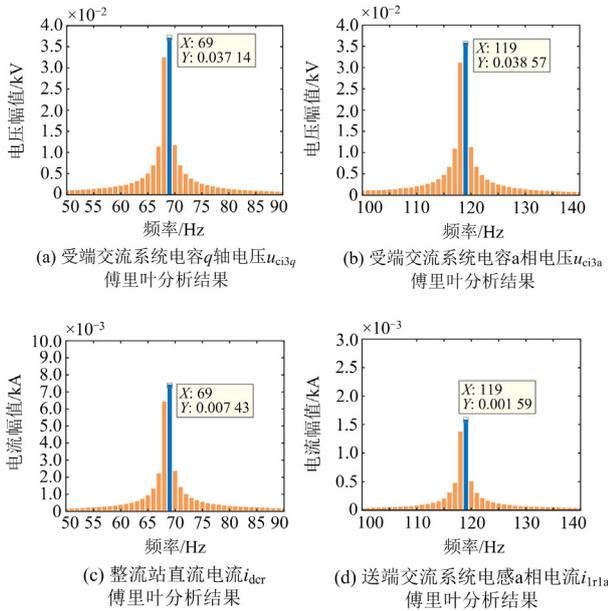


图 15 LCC-HVDC 各子系统变量傅里叶分析结果

Fig. 15 Fourier analysis results for each subsystem variables of LCC-HVDC

4.2.2 控制链路延时稳定性影响仿真验证

当  $T_d = 0.5 \text{ ms}$ 、 $k_{pr}$  变化时的直流电流时域仿真及傅里叶分析结果如图 16 所示。当  $k_{pr}$  为 2.13 时仿真模型临界失稳, 直流电流振荡频率为 67 Hz。小信号模型对应的振荡频率为 68.08 Hz, 频率误差为 1.58%。

当  $T_d = 1.5 \text{ ms}$ 、 $k_{pr}$  变化时的整流侧直流电流时域仿真及傅里叶分析结果如图 17 所示。当  $k_{pr}$  为 2.06 时仿真模型临界失稳。直流系统主导的振荡频率为

63 Hz。小信号模型对应振荡频率为 62.85 Hz, 频率误差为 0.24%, 上述仿真结果验证了理论分析的正确性。

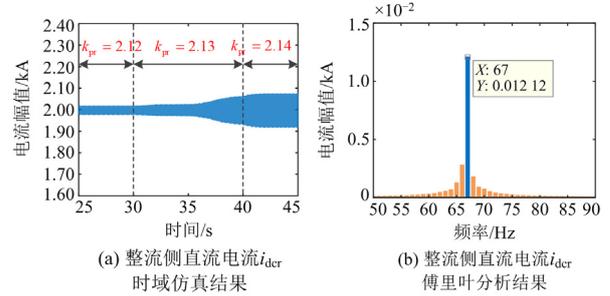


图 16  $T_d = 0.5 \text{ ms}$  时仿真结果

Fig. 2 Simulation results when  $T_d = 0.5 \text{ ms}$

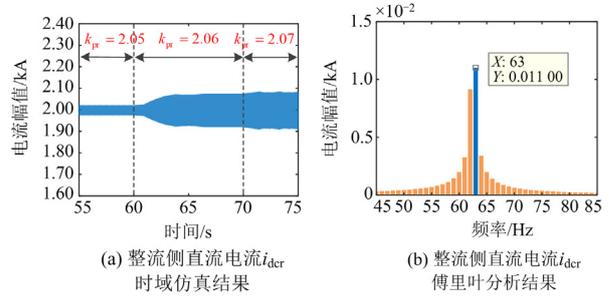


图 17  $T_d = 1.5 \text{ ms}$  时仿真结果

Fig. 17 Simulation results when  $T_d = 1.5 \text{ ms}$

5 结论

1) 本文考虑 LCC-HVDC 实际非线性换相过程, 采用状态空间平均法建立了精确的 LCC 换流器传递函数模型。其次基于模块化思想建立计及控制链路延时、锁相环输出相位波动影响的改进双端 12 脉动 LCC-HVDC 小信号模型, 并通过与仿真阶跃响应对比验证了所建模型的正确性。

2) 采用特征值和参与因子分析法对双端 LCC-HVDC 系统进行小信号稳定性分析, 小信号模型预判系统振荡频率与仿真结果误差均小于 2%; 稳定性分析结果表明增大控制系统参数  $k_{pr}$  会降低系统稳定性, 其中直流电流  $i_{dcr}$  对系统稳定性的影响较大; 控制链路延时变化会影响控制系统参数的稳定运行域和系统的振荡频率。

3) 稳定性分析结果可为系统参数设计、谐振抑制提供理论基础, 对保证 LCC-HVDC 系统的安全稳定运行具有一定的工程实践意义。

本文仅对逆变侧采用定电压控制策略的双端 LCC-HVDC 系统进行了建模分析, 而对于逆变侧采用定关断角控制策略的双端 LCC-HVDC 系统小信号建模和稳定性分析有待进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4732.  
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.
- [2] 王顺亮, 谢洋, 马俊鹏, 等. 基于直流电流控制的特高压直流分层接入系统协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 167-178.  
WANG Shunliang, XIE Yang, MA Junpeng, et al. Coordinated control strategy for a UHVDC hierarchical connection system based on DC current control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 167-178.
- [3] 何平港, 牟大林, 林圣. LCC-MMC 混合级联型直流输电系统启动控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 71-80.  
HE Pinggang, MU Dalin, LIN Sheng. Start-up control strategy for an LCC-MMC hybrid cascade HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 71-80.
- [4] 郝晓弘, 黄伟, 裴婷婷, 等. 基于模块化多电平换流器的高压直流系统直流侧故障限流技术研究[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(1): 23-36.  
HAO Xiaohong, HUANG Wei, PEI Tingting, et al. Research on current limiting technology of DC-side fault of high voltage direct current system based on modular multilevel converter[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(1): 23-36.
- [5] 张帆, 高凯, 杨岳峰, 等. 具备有载调压功能的 LCC-HVDC 拓扑及控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 1-10.  
ZHANG Fan, GAO Kai, YANG Yuefeng, et al. LCC-HVDC topology with on-load voltage regulation function and its control strategy[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 1-10.
- [6] 李欢, 傅闯, 辛清明, 等. 高压直流输电系统直流谐波阻抗的解析计算及谐振分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 67-79.  
LI Huan, FU Chuang, XIN Qingming, et al. Analytical calculation of DC harmonic impedance and DC resonance analysis of an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 67-79.
- [7] 陈思源, 景巍巍, 史明明, 等. 新能源接入背景下的谐波源建模方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 162-175.  
CHEN Siyuan, JING Weiwei, SHI Mingming, et al. Review of harmonic source modeling methods with the background of renewable energy access[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 162-175.
- [8] 林晓婉, 代锋, 刘沈全, 等. 含 LCC-HVDC 的交直流混联电网统一谐波状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 94-103.  
LIN Xiaowan, DAI Feng, LIU Shenquan, et al. Unified harmonic state estimation method for AC/DC hybrid power grid with LCC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 94-103.
- [9] 王杨, 田旭, 赵劲帅, 等. 基于相移原理的 LCC-HVDC 降维谐波状态空间建模[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 11-22.  
WANG Yang, TIAN Xu, ZHAO Jinshuai, et al. Dimension-reduced harmonic state space modeling of an LCC-HVDC based on the phase shift principle[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 11-22.
- [10] 付强, 杜文娟, 王海风. 交直流混联电力系统小干扰稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2829-2840.  
FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Small signal stability analysis of AC/DC hybrid power system: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2829-2840.
- [11] 郭春义, 宁琳如, 王虹富, 等. 基于开关函数的 LCC-HVDC 换流站动态模型及小干扰稳定性[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3862-3870.  
GUO Chunyi, NING Linru, WANG Hongfu, et al. Switching-function based dynamic model of LCC-HVDC station and small signal stability analysis[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3862-3870.
- [12] 陈威, 叶运铭, 周保荣, 等. 定电压与预测型定关断角控制对 HVDC 小干扰稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 98-106.  
CHEN Wei, YE Yunming, ZHOU Baorong, et al. Influence of constant voltage control and predictive constant extinction angle control on small-signal stability of HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 98-106.
- [13] 年珩, 刘一鸣, 胡彬, 等. 计及频率耦合特性的 LCC-HVDC 送端系统阻抗建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 876-886.  
NIAN Heng, LIU Yiming, HU Bin, et al. Impedance modeling and stability analysis of LCC-HVDC sending terminal system considering frequency coupling characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 876-886.
- [14] 周攀, 刘天琪, 王顺亮, 等. 考虑谐波耦合特性的 LCC-HVDC 换流站小信号建模[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 153-161.

- ZHOU Pan, LIU Tianqi, WANG Shunliang, et al. Small signal modeling of LCC-HVDC station with consideration of harmonic coupling characteristics[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 153-161.
- [15] KARAWITA C, ANNAKAGE U D. Multi-infeed HVDC interaction studies using small-signal stability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 910-918.
- [16] 郭春义, 殷子寒, 王烨, 等. LCC-MMC 型混合直流输电系统小干扰动态模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4705-4714.
- GUO Chunyi, YIN Zihan, WANG Ye, et al. Small-signal dynamic model of LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4705-4714.
- [17] 郑安然, 郭春义, 殷子寒, 等. 提高弱交流系统下混合多端直流输电系统小干扰稳定性的控制参数优化调节方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1336-1345.
- ZHENG Anran, GUO Chunyi, YIN Zihan, et al. Optimal adjustment method of control parameters for improving small-signal stability of hybrid multi-terminal HVDC system under weak AC condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1336-1345.
- [18] DARYABAK M, FILIZADEH S, JATSKEVICH J, et al. Modeling of LCC-HVDC systems using dynamic phasors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1989-1998.
- [19] 曾淑云, 江全元, 陆韶琦, 等. 适用于不对称情况的线换相换流器动态相量模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 129-135.
- ZENG Shuyun, JIANG Quanyuan, LU Shaoqi, et al. Dynamic phasor model of line commutated converter under unbalanced conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 129-135.
- [20] 贺永杰, 向往, 赵静波, 等. 一种用于 LCC-HVDC 系统小干扰稳定性分析的改进动态相量模型[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1417-1428.
- HE Yongjie, XIANG Wang, ZHAO Jingbo, et al. Modified dynamic phasor model for small-signal stability analysis of LCC-HVDC system[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1417-1428.
- [21] 莫泽, 汪娟娟, 丁天皓, 等. 基于改进开关函数的 LCC-HVDC 直流阻抗建模及小扰动稳定性分析[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4491-4505.
- MO Ze, WANG Juanjuan, DING Tianhao, et al. LCC-HVDC impedance modeling and small disturbance stability analysis based on improved switching function[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4491-4505.
- [22] 陈代忠, 王顺亮, 焦宁, 等. 基于动态相量法的电网换相换流器谐波传递研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4250-4261.
- CHEN Daizhong, WANG Shunliang, JIAO Ning, et al. Research on harmonic transfer of line commutated converter based on dynamic phasors method[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4250-4261.
- [23] QI Yi, ZHAO Huanfeng, FAN Shengtao, et al. Small signal frequency-domain model of a LCC-HVDC converter based on an infinite series-converter approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 95-106.
- [24] CHEN Xiang, MA Junpeng, WANG Shunliang, et al. An accurate impedance model of line commutated converter with variable commutation overlap[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(1): 562-572.
- [25] 周盛宇, 汪娟娟, 刘岳坤, 等. 考虑换流阀阻尼电路的 LCC-HVDC 系统小信号精准建模[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3730-3744.
- ZHOU Shengyu, WANG Juanjuan, LIU Yuekun, et al. Small signal accurate modeling of LCC-HVDC system considering converter valve damping circuit[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3730-3744.
- [26] 杨硕, 郭春义, 张加卿, 等. 控制链路延时对 LCC-HVDC 系统小信号稳定性的影响及机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊 1): 70-79.
- YANG Shuo, GUO Chunyi, ZHANG Jiaqing, et al. Impact of time-delay on small signal stability of LCC-HVDC system and its mechanism analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 70-79.
- [27] 陈锦洲, 陈磊, 陈亦平, 等. 基于 Pade 近似的电力系统频率振荡模式延时轨迹分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 120-125.
- CHEN Jinzhou, CHEN Lei, CHEN Yiping, et al. Trajectory analysis of time delay for frequency oscillation mode of power system based on Pade approximation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 120-125.

收稿日期: 2023-09-02; 修回日期: 2023-12-14

作者简介:

王顺亮(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为高压直流输电系统建模及分析、多电平换流器控制与调制; E-mail: slwang@scu.edu.cn

刘海军(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电系统建模及分析; E-mail: hjliu@stu.scu.edu.cn

马俊鹏(1990—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为高压直流输电系统建模及分析、新能源并网变换器建模及控制等。E-mail: jma@scu.edu.cn

(编辑 魏小丽)