

控制系统对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响

王燕宁, 郭春义, 王 烨

(新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 基于模块化多电平换流器的高压直流输电 (MMC-HVDC) 系统的小信号稳定性研究可为工程设计及参数选择提供一定理论指导, 而控制系统是影响 MMC-HVDC 系统稳定性的关键因素。本文针对两端 MMC-HVDC 系统, 同时考虑了 MMC 的内部谐波动态特性及整流站和逆变站之间的相互作用关系, 在 MATLAB 中建立了其小信号模型, 并与 PSCAD/EMTDC 中详细电磁暂态模型进行对比, 验证了模型的正确性。然后基于所建立的小信号模型, 采用特征根及参与因子分析方法, 研究了整流侧与逆变侧 MMC 系统的电流矢量控制 (VCC)、环流抑制控制 (CCSC) 及锁相环 (PLL) 参数对系统小信号稳定性的影响。最后获得了可以保证系统稳定运行的控制系统参数的可行域, 并揭示了易导致系统振荡甚至失稳的关键控制参数及对应主导模态特征。该工作可为 MMC-HVDC 工程的控制系统参数设计提供有价值的理论指导, 同时为分析系统失稳原因提供了思路。

关键词: 模块化多电平换流器; 小信号稳定性; 控制系统; 高压直流输电系统; 电流矢量控制; 环流抑制控制

DOI: 10.12067/ATEEE1902010

文章编号: 1003-3076(2019)10-0020-12

中图分类号: TM712; TM722

1 引言

模块化多电平换流器高压直流输电 (Modular Multilevel Converter based HVDC, MMC-HVDC) 因具有开关频率低、波形质量高等优点, 在风电场并网、异步联网等场合得到了广泛应用^[1,2]。然而, 与传统两电平电压源型换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 相比, MMC 内部谐波动态行为 (子模块电容电压波动、桥臂环流等) 和控制系统较为复杂, 系统运行方式的变化、功率参考值的变化以及其他外部因素的干扰均有可能引发系统振荡甚至失稳现象^[3,4]。因此, 有必要对考虑 MMC 内部谐波动态特性的 MMC-HVDC 系统的小信号稳定性进行研究。

目前已有诸多关于两电平 VSC-HVDC 小信号稳定性分析的研究, 包括锁相环 (Phase-Locked-Loop, PLL) 参数对换流器联接弱交流系统时运行极限的限制^[5-7], 风机与 VSC-HVDC 相联接时系统的小信号稳定性分析^[8,9]等。

对于 MMC-HVDC 小信号稳定性分析, 文献

[10,11] 研究了 MMC-HVDC 系统在额定运行工况下的小信号稳定性; 文献 [12] 对比研究了 VSC-HVDC 和 MMC-HVDC 系统的小信号稳定性; 文献 [13] 研究了 MMC 主电路参数对系统小信号稳定性的影响。以上研究均未涉及控制系统参数对系统稳定性的影响, 然而在控制系统的作用下, MMC 内部的谐波动态行为与外部交直流侧电路之间存在交互影响, 控制系统带来的小信号稳定性问题不容忽视^[14-17]。

文献 [18] 研究了基于 MMC 平均值模型的系统小信号稳定性, 但忽略了 MMC 内部的谐波动态特性; 文献 [19,20] 研究了环流抑制控制器 (Circulating Current Suppressing Control, CCSC) 参数对 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响, 并提出提升系统小信号稳定性的改进小信号模型, 但对于其他主要控制环节 (电流矢量控制器 (Vector Current Control, VCC)、锁相环) 参数的研究还有所欠缺; 文献 [21,22] 研究了控制系统参数对单端 MMC 换流站的小信号稳定性, 但对单端换流站的

收稿日期: 2019-02-20

基金项目: 国家电网公司总部科技项目“±800kV 特高压柔性直流输电换流阀和控制保护关键技术研究”

作者简介: 王燕宁 (1996-), 女, 吉林籍, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电;

郭春义 (1984-), 男, 山西籍, 副教授, 硕导, 博士, 研究方向为直流输电和 FACTS 技术等。

研究无法反映实际两端系统中整流侧与逆变侧之间可能存在的耦合关系。

由上述研究现状可知,目前在 MMC 系统的小信号稳定性方面有很多研究成果;然而,针对两端 MMC-HVDC 系统,同时考虑 MMC 内部谐波动态特性及整流站和逆变站之间相互作用关系的稳定性研究还有待进一步探索。本文针对两端 MMC-HVDC 系统展开研究,首先在 MATLAB 中建立考虑换流器内部谐波特性及整流站和逆变站之间相互作用关系的两端 MMC-HVDC 系统的小信号模型,并与 PSCAD/EMTDC 中详细电磁暂态模型进行对比,验证了模型的正确性;然后基于所建立的小信号模型,采用特征根及参与因子分析方法^[23],对比研究了整流侧及逆变侧 MMC 控制系统对两端 MMC-HVDC

系统小信号稳定性的影响。通过特征根分析可以得到控制系统参数可行域,即使得系统稳定运行的参数变化范围;通过参与因子分析可以得到系统失稳时参与程度较高的状态变量,进而分析引起系统振荡甚至失稳的主要原因。该工作可为 MMC-HVDC 工程控制系统参数设计提供有价值的理论指导,同时为分析系统失稳原因提供思路。

2 两端 MMC-HVDC 系统及其小信号模型

2.1 两端 MMC-HVDC 系统

两端 MMC-HVDC 系统结构图如图 1 所示,由 MMC 换流站、联结变压器、交流系统和直流线路组成,其等效电路图如图 2 所示。图 2 所示的物理量及其含义见表 1。

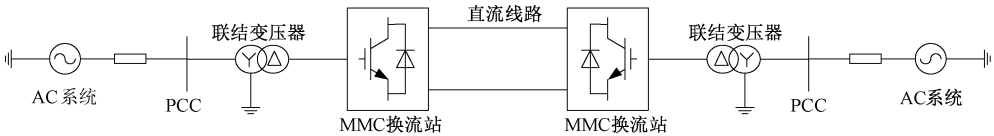


图 1 两端 MMC-HVDC 系统结构图
Fig.1 Diagram of two-terminal MMC-HVDC system

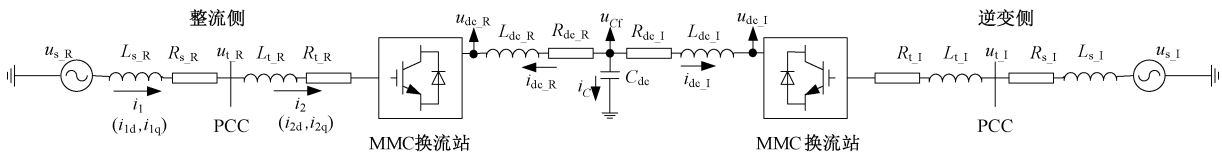


图 2 两端 MMC-HVDC 系统等效电路图
Fig.2 Equivalent circuit diagram of two-terminal MMC-HVDC system

表 1 MMC-HVDC 系统物理量及其含义

物理量	物理含义
$u_{s,R}(u_{s,I})$	交流系统等效电压
$u_{t,R}(u_{t,I})$	公共连接点(PCC)电压
i_1,i_2	交流系统电流、MMC 出口电流
$L_{t,R},R_{t,R}(L_{t,I},R_{t,I})$	联接变压器等效电感和电阻
C_{dc}	直流线路等效电容
u_{CT},i_C	直流线路等效电容的电压和电流
$u_{dc,R},i_{dc,R}(u_{dc,I},i_{dc,I})$	MMC 直流侧电压和电流
$L_{s,R},R_{s,R}(L_{s,I},R_{s,I})$	交流系统等效电感和电阻
$L_{dc,R},R_{dc,R}(L_{dc,I},R_{dc,I})$	直流线路等效电感和电阻

MMC 内部结构图如图 3 所示。上下两桥臂各串联 N 个子模块(Sub-Module, SM), L_{arm} 和 R_{arm} 分别为桥臂电感和桥臂电阻, C 为子模块电容; U_a 、 U_b 、 U_c 为 MMC 交流系统输出电压; u_{px} 、 $u_{nx}(x=a,b,c)$ 为各相上、下桥臂电压; i_{px} 、 i_{nx} 为各相上、下桥臂电流;

u_{dc} 、 i_{dc} 分别为直流侧电压、电流。

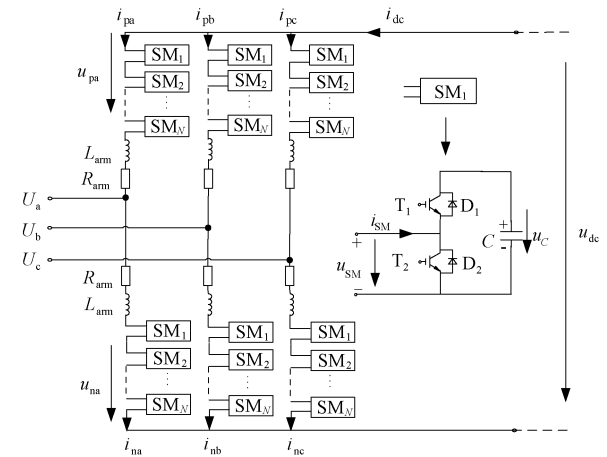


图 3 MMC 内部结构图
Fig.3 Internal diagram of MMC

VCC 系统是 dq 解耦控制系统,在本文中作为

MMC-HVDC 系统的主控制器。整流侧 VCC 系统采用定有功功率控制和定交流电压控制(PV 控制)策略,逆变侧 VCC 系统采用定直流电压控制和定交流电压控制(UV 控制)策略,如图 4(a)所示。其中, P_{ref} 、 P_m 分别为有功功率的参考值和测量值; U_{ref} 、 U_m 分别为交流电压的参考值和测量值; U_{dref} 、 U_{dm} 分别为直流电压的参考值和测量值; I_{dref} 、 I_{qref} 分别为内环控制器的 d、q 轴电流参考值; U_{tdm} 、 U_{tqm} 分别为 MMC 交流侧电压的 d、q 轴分量经过一阶滤波得到的测量值; U_{ed} 、 U_{eq} 为换流器输出电压的参考值; θ 为锁相环输出的相角,用于派克变换。

CCSC 系统用于抑制 MMC 各桥臂电压上存在的二倍频分量,其结构图如图 4(b)所示。其中, I_{cird} 、 I_{cirq} 分别为 MMC 二倍频环流的 d、q 轴分量; $2\omega L_{arm}$ 为馈补偿耦合项。锁相环 PLL 用于锁定 MMC 交流侧电压的相位,其结构如图 4(c)所示。其中, U_{tqPLL} 为 MMC 交流侧电压经过一阶惯性环节的测量值。

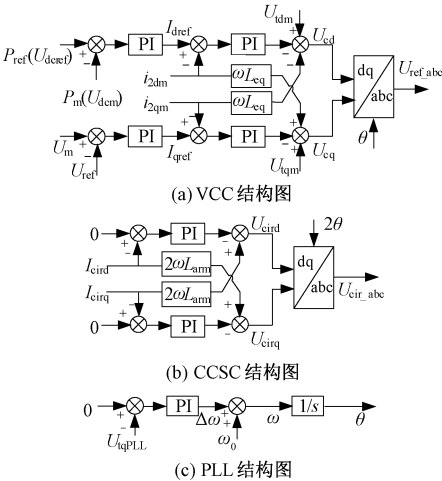


图 4 MMC 控制系统结构图

Fig.4 Diagram of MMC control system

2.2 两端 MMC-HVDC 系统小信号模型

基于文献[24]中包含内部谐波动态特性的 MMC 换流站 12 阶状态空间模型,可知 MMC 换流站的状态变量包括:子模块电容电压直流分量 u_{C_dc} 、基频分量(u_{C_1d} 、 u_{C_1q})、二倍频分量(u_{C_2d} 、 u_{C_2q})、三倍频分量(u_{C_3x} 、 u_{C_3y})、交流电流(I_{sd} 、 I_{sq})、二倍频环流(I_{cird} 、 I_{cirq})及直流电流 i_{dc} 。

VCC 系统(见图 4(a))中,一阶惯性测量环节所对应的状态变量为 I_{sdm} 、 I_{sqm} 、 U_{tdm} 、 U_{tqm} ,比例积分(PI)环节所对应的状态变量为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 ;CCSC 系统(见图 4(b))中,比例积分环节对应的状态变

量为 f_1 、 f_2 ;PLL(见图 4(c))所对应的状态变量为 x_5 、 θ 、 U_{tqPLL} 。综上可以得到控制系统的 13 阶状态空间模型,详见附录。

对直流输电线路等效电容电压 u_{cf} 进行微分,可以得到直流输电线路的状态空间模型,如式(1)所示;两端 MMC-HVDC 系统在稳态下,根据直流输电线路有功功率表达式及基尔霍夫定律,可以得到直流输电线路与整流侧、逆变侧的接口方程,如式(2)所示。

$$\frac{du_{cf}}{dt} = -\frac{i_{dc_R} + i_{dc_I}}{C_{dc}} \tag{1}$$

$$\begin{cases} P_{ref_R} = -i_{dc_R}u_{dc_R} \\ u_{dc_I} = u_{dc_I} - i_{dc_I}(R_{dc_R} + R_{dc_I}) \end{cases} \tag{2}$$

结合本节所描述的 MMC 换流站、控制系统及直流线路模型,可以得到两端 MMC-HVDC 系统的状态空间模型。对状态空间模型在平衡点处进行线性化^[23],即可得到两端 MMC-HVDC 系统的小信号模型,其形式为:

$$\Delta \dot{X} = A\Delta X + B\Delta U \tag{3}$$

式中, A 为 51×51 阶系统状态矩阵; B 为 51×4 阶输入矩阵;状态变量为 $X = [u_{C_dc_R}, u_{C_1d_R}, u_{C_1q_R}, u_{C_2d_R}, u_{C_2q_R}, u_{C_3x_R}, u_{C_3y_R}, i_{dc_R}, I_{sd_R}, I_{sq_R}, I_{cird_R}, I_{cirq_R}, I_{sdm_R}, I_{sqm_R}, U_{tdm_R}, U_{tqm_R}, x_{1_R}, x_{2_R}, x_{3_R}, x_{4_R}, U_{tqPLL_R}, x_{PLL_R}, x_5, f_{1_R}, f_{2_R}, u_{C_dc_I}, u_{C_1d_I}, u_{C_1q_I}, u_{C_2d_I}, u_{C_2q_I}, u_{C_3x_I}, u_{C_3y_I}, i_{dc_I}, I_{sd_I}, I_{sq_I}, I_{cird_I}, I_{cirq_I}, I_{sdm_I}, I_{sqm_I}, U_{tdm_I}, U_{tqm_I}, x_{1_I}, x_{2_I}, x_{3_I}, x_{4_I}, U_{tqPLL_I}, x_{PLL_I}, x_5, f_{1_I}, f_{2_I}, u_{cf}]^T$;输入变量为 $U = [P_{ref_R}, U_{ref_R}, U_{dref_I}, U_{ref_I}]^T$ 。由于篇幅限制,此处不再给出矩阵 A 、 B 的详细表达式。两端 MMC-HVDC 系统小信号模型的状态变量及物理含义见表 2。

表 2 MMC-HVDC 系统小信号模型状态变量及物理含义

MMC-HVDC system small-signal model		
MMC-HVDC	状态变量	物理含义
MMC 换流站	u_{C_dc}	子模块电容电压直流分量
	u_{C_1d}, u_{C_1q}	子模块电容电压基频分量
	u_{C_2d}, u_{C_2q}	子模块电容电压二倍频分量
	u_{C_3x}, u_{C_3y}	子模块电容电压三倍频分量
	I_{cird}, I_{cirq}	二倍频环流
	I_{sd}, I_{sq}	交流侧电流的 d 轴、q 轴分量
直流系统	i_{dc}, u_{cf}	线路电流,线路等效电容的电压
CCSC	f_1, f_2	d 轴、q 轴电流控制器

续表 2

MMC-HVDC	状态变量	物理含义
VCC	x_1, x_2	内环 d 轴、q 轴电流控制器
	x_3, x_4	外环直流电压(有功功率)控制器、交流电压控制器
PLL	x_5	积分环节状态变量
	x_{PLL}	角频率偏差量的积分
	U_{iqPLL}	MMC 交流母线电压测量值
测量系统	$I_{sdm}, I_{sqm}, U_{tdm}, U_{tqm}$	MMC 交流侧电流测量值、交流母线电压测量值

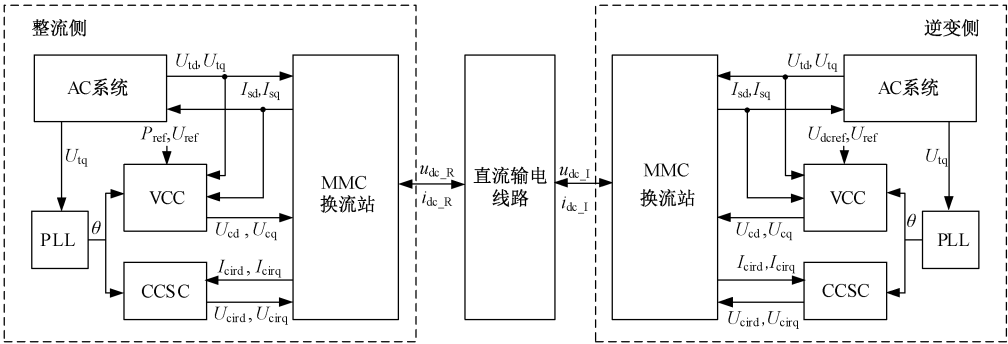


图 5 MMC-HVDC 系统小信号模型逻辑结构图

Fig.5 Small-signal model logic diagram of MMC-HVDC system

2.3 两端 MMC-HVDC 系统小信号模型验证

两端 MMC-HVDC 系统的主电路参数见表 3,控制系统参数见表 4。

表 3 MMC-HVDC 系统主电路参数

MMC-HVDC 系统参数	数值
额定直流电压 U_{dbase}/kV	± 500
额定容量 $S_{base}/(MV \cdot A)$	1000
额定交流电压 U_{base}/kV	260
桥臂子模块数 N	200
交流系统短路比 SCR	5
交流系统等值阻抗角 $(^\circ)$	85
等效变压器漏感 L_T/H	0.025
桥臂电感 L_{arm}/H	0.06
桥臂电阻 R_{arm}/Ω	1.0
子模块电容 C/F	0.01
直流输电线路长度 L_g/km	500
直流输电线路电阻 $R_{pkm}/(\Omega/km)$	0.0127
直流输电线路电感 $L_{pkm}/(H/km)$	0.88×10^{-3}
直流输电线路电容 $C_{pkm}/(F/km)$	0.013×10^{-6}

为了验证两端 MMC-HVDC 系统小信号模型的正确性,分别基于 MATLAB 小信号模型和 PSCAD 详细电磁暂态模型进行如下研究:初始时系统在额

两端 MMC-HVDC 系统小信号模型逻辑结构图如图 5 所示。由图 5 可知,整流侧(逆变侧)由 AC 系统、MMC 换流站及控制系统组成,图 5 中标识箭头和变量表示各组成部分之间的接口变量。 $U_{id}、U_{iq}$ 分别为 AC 系统母线电压的 d、q 轴分量; U_{iq} 为锁相环 PLL 提供锁相信号; $U_{cird}、U_{cirq}$ 为环流抑制控制器的输出信号; $U_{cd}、U_{cq}$ 为换流器输出电压的参考值;PLL 为 VCC、CCSC 系统提供相位信号 θ ; $u_{dc}、i_{dc}$ 分别为 MMC 的直流侧电压、电流;其余接口变量的物理意义见表 2。

表 4 MMC-HVDC 控制系统参数

控制系统参数	数值
外环有功功率控制器参数 (k_{p1}, k_{i1})	(0.5, 50)
外环无功功率控制器参数 (k_{p2}, k_{i2})	(0.5, 50)
内环 d 轴电流控制器参数 (k_{p3}, k_{i3})	(0.5, 5)
内环 q 轴电流控制器参数 (k_{p4}, k_{i4})	(0.5, 5)
环流抑制控制器参数 (k_{pcir}, k_{icir})	(0.1, 10)
锁相环参数 (k_{pPLL}, k_{iPLL})	(10, 50)
电压测量时间常数 $(T_{muq}, T_{miq})/s$	(0.002, 0.002)
电流测量时间常数 $(T_{mid}, T_{miq})/s$	(0.0002, 0.0002)
锁相环 q 轴电压测量时间常数 T_{PLLm}/s	0.0001

定工况(见表 4)下运行,逆变侧交流电压指令值 $U_{ref_I} = 1.0pu$ 。在 $t = 3s$ 时,将 U_{ref_I} 由 $1.0pu$ 阶跃到 $0.95pu$,在 $t = 5s$ 时将 U_{ref_I} 由 $0.95pu$ 阶跃到 $1.0pu$,阶跃过程所得验证波形如图 6 所示。同理可对整流侧有功功率指令值 P_{ref_R} 做相同的阶跃,阶跃过程所得验证波形如图 7 所示。由图 6、图 7 可知,当 MMC-HVDC 系统两端控制指令阶跃时,基于 MATLAB 小信号模型的理论计算结果和基于 PSCAD 的详细电磁暂态仿真结果具有很好的一致性,能够说明模型的正确性。

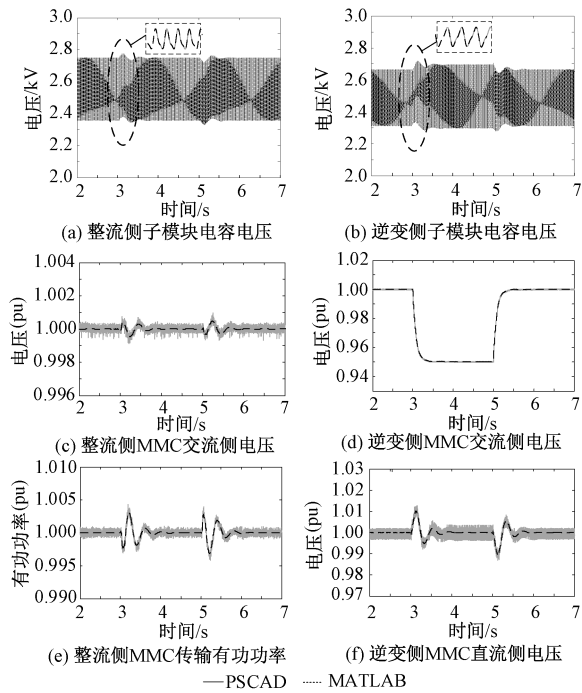


图 6 逆变侧交流电压指令值 U_{ref1} 阶跃验证波形
Fig.6 Verification waveforms under step change of inverter side AC voltage instruction (U_{ref1})

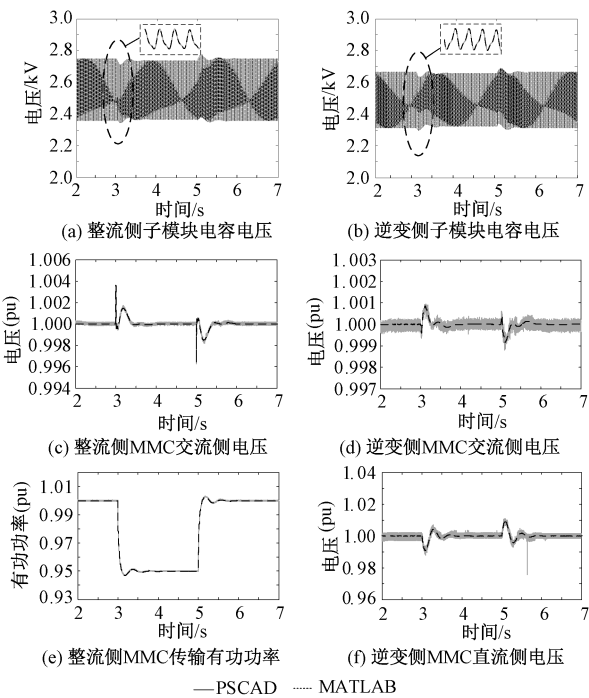


图 7 整流侧有功功率指令值 P_{refR} 阶跃的验证波形
Fig.7 Verification waveforms under step change of rectifier side active power instruction (P_{refR})

3 整流侧控制系统对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响

3.1 整流侧电流矢量控制器参数对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响

3.1.1 VCC 外环有功功率控制器参数

初始时,系统运行于额定工况(见表 4),保持系统其他参数不变,将整流侧外环有功功率控制器参数 k_{p1R} 、 k_{i1R} 分别从 1 变化到 40、3000,系统的特征根轨迹如图 8(a)、图 8(b) 所示。由图 8 可知,随着 k_{p1R} 、 k_{i1R} 的逐渐增大,系统特征根逐渐靠近虚轴,系统的稳定性逐渐减弱。当 $k_{p1R} < 34$ 、 $k_{i1R} < 2750$ 时,系统特征根保持在复平面的左半平面,表明系统能够稳定运行;当 $k_{p1R} > 34$ 、 $k_{i1R} > 2750$ 时,系统特征根穿越虚轴进入复平面的右半平面,表明系统失稳。由此可知,参数 k_{p1R} 、 k_{i1R} 的可行域为 $k_{p1R} < 34$ 、 $k_{i1R} < 2750$,即参数在此范围内变化时,系统保持稳定,而参数超出此范围时,系统失稳。

通过参与因子分析方法,得到 k_{p1R} 、 k_{i1R} 增大使得系统失稳时,参与程度最高的状态变量,如图 8(c)、图 8(d) 所示。图 8(c) 中参与程度较高的状态变量为 I_{sdR} 、 I_{sdmR} 、 U_{tdmR} ,分别为整流侧 MMC 交流侧电流 d 轴分量及其测量值、PCC 电压 d 轴分量测量值;图 8(d) 中参与程度较高的状态变量为 I_{sdR} 、 I_{sdmR} 、 U_{tdmR} 、 x_{3R} ,分别代表整流侧 MMC 交流侧电流 d 轴分量及其测量值、PCC 电压 d 轴分量、VCC 外环有功功率控制状态变量。

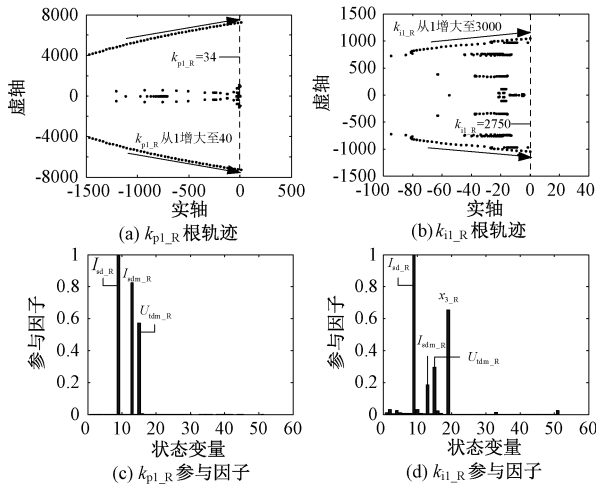


图 8 k_{p1R} 、 k_{i1R} 变化的特征根轨迹及参与因子
Fig.8 Eigen locus and participation factors under k_{p1R} 、 k_{i1R} variation

以上特征根分析及参与因子分析结果表明,整流侧 VCC 参数 k_{p1_R} 、 k_{i1_R} 过大时,有可能引起 MMC 交流侧电压及电流不稳定,从而引发两端系统的小信号失稳现象。

3.1.2 VCC 外环交流电压控制器参数

整流侧外环交流电压控制器参数 k_{p2_R} 、 k_{i2_R} 变化时,系统的特征根轨迹如图 9(a)、图 9(b)所示。同理 3.1.1 节的分析过程,可知 k_{p2_R} 、 k_{i2_R} 的可行域为 $k_{p2_R}<21.7$ 、 $k_{i2_R}<1660$,相应的参与因子分析结果如图 9(c)、图 9(d)所示。

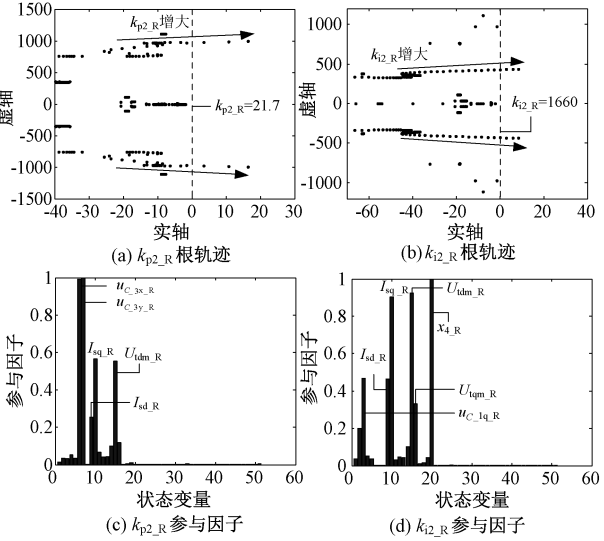


图 9 k_{p2_R} 、 k_{i2_R} 变化的特征根轨迹及参与因子
Fig.9 Eigen locus and participation factors under k_{p2_R} , k_{i2_R} variation

3.1.3 VCC 内环 d 轴电流控制器参数

整流侧内环 d 轴电流控制器参数 k_{p3_R} 、 k_{i3_R} 变化时,系统的特征根轨迹如图 10(a)、图 10(b)所示,可知其可行域为 $k_{p3_R}<35$ 、 $k_{i3_R}<1180$,相应的参与因子分析结果如图 10(c)、图 10(d)所示。

3.1.4 VCC 内环 q 轴电流控制器参数

整流侧内环 q 轴电流控制器参数 k_{p4_R} 、 k_{i4_R} 变化时,系统的特征根轨迹如图 11(a)、图 11(b)所示。由图 11(a)可知,随着 k_{p4_R} 的逐渐增大(由 1~1000),系统特征根始终保持在复平面的左半平面,说明 k_{p4_R} 对系统小信号稳定性的影响较小,其可行域为 $k_{p4_R}<1000$;由图 11(b)可知, k_{i4_R} 的可行域为 $k_{i4_R}<1235$ 。相应的参与因子分析结果如图 11(c)所示。

为了验证整流侧特征根分析所得到的控制器参数可行域的正确性,基于 PSCAD/EMTDC 平台对其

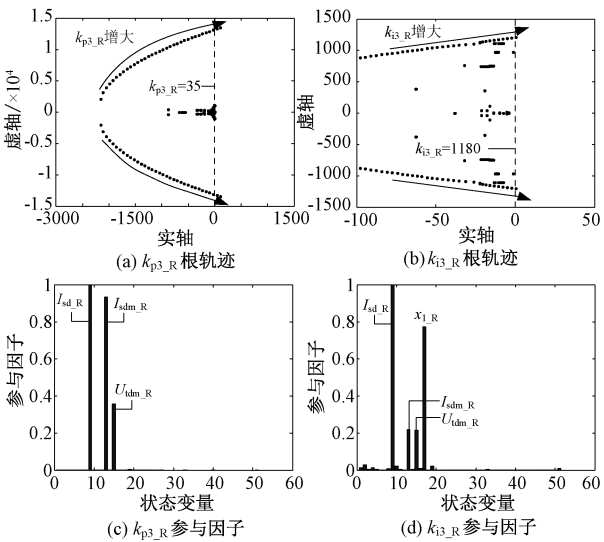


图 10 k_{p3_R} 、 k_{i3_R} 变化的特征根轨迹及参与因子
Fig.10 Eigen locus and participation factors under k_{p3_R} , k_{i3_R} variation

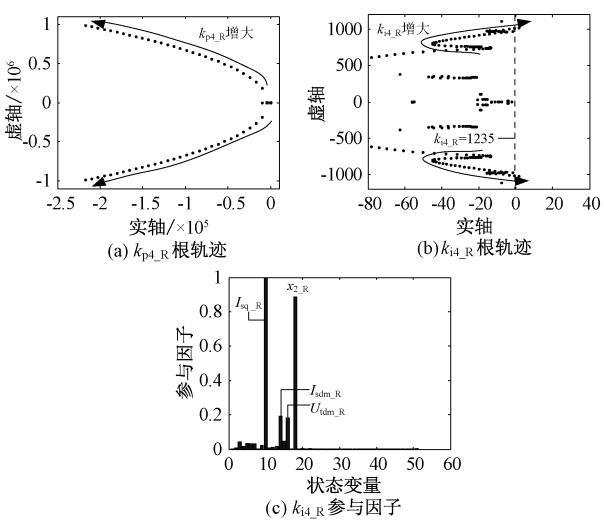


图 11 k_{p4_R} 、 k_{i4_R} 变化的特征根轨迹及参与因子
Fig.11 Eigen locus and participation factors under k_{p4_R} , k_{i4_R} variation

进行电磁暂态仿真验证。初始时系统运行于额定工况,在 $t=5s$ 时将 k_{i1_R} 由 2500 阶跃到 2800,该过程整流侧的有功功率响应如图 12 所示。由图 12 可知, k_{i1_R} 阶跃前系统稳定运行, k_{i1_R} 阶跃后整流侧有功功率逐渐发散,此时系统失稳,由此可以说明 k_{i1_R} 的可行域为 $k_{i1_R}<2750$,同理也可对整流侧其他控制器参数的可行域进行验证。

3.2 整流侧环流抑制控制器参数对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响

整流侧 CCSC 参数 k_{pcir_R} 、 k_{icir_R} 变化时,系统的

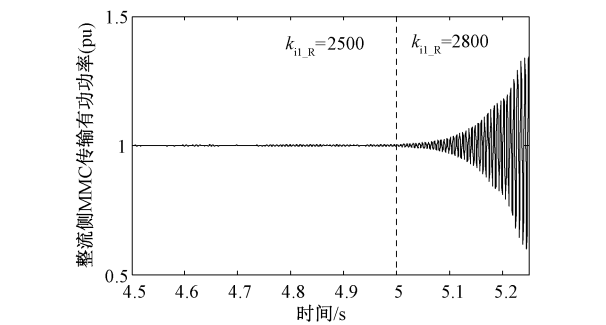


图 12 k_{il_R} 可行域验证

Fig.12 Verification of k_{il_R} feasible region

特征根轨迹如图 13(a)、图 13 (b) 所示,可知其可行域为 $k_{pcir_R}<78$ 、 $k_{icir_R}<1600$,相应的参与因子分析结果如图 13(c)、图 13 (d) 所示,参与程度较高的状态变量为 $u_{C_2d_R}$ 、 $u_{C_2q_R}$,代表整流侧换流器的子模块电容电压二倍频分量的 d、q 轴分量。

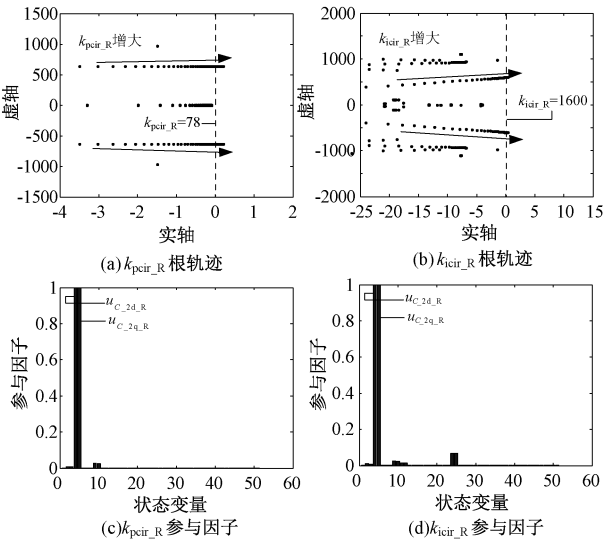


图 13 k_{pcir_R} 、 k_{icir_R} 变化的特征根轨迹及参与因子

Fig.13 Eigen locus and participation factors under k_{pcir_R} , k_{icir_R} variation

以上特征根分析及参与因子分析结果表明,当 CCSC 参数 k_{pcir_R} 、 k_{icir_R} 过大时,有可能引起 MMC 内部谐波不稳定现象,从而引发两端系统的小信号失稳现象。

3.3 整流侧锁相环参数对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响

整流侧 PLL 比例系数 k_{pPLL_R} 从 1 变化到 1000、 $k_{iPLL_R}=5k_{pPLL_R}$ 时系统的特征根轨迹如图 14 所示。由图 14 可知,随着 k_{pPLL_R} 逐渐增大,系统特征根始终保持在复平面的左半平面且保持稳定,可知交流

系统强度较强(短路比 $SCR=5.0$) 时,整流侧 PLL 参数对系统的小信号稳定性的影响较小,参数的可行域较大。

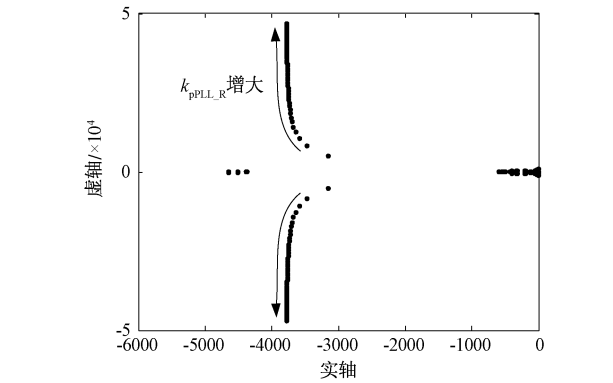


图 14 k_{pPLL_R} 变化的特征根轨迹

Fig.14 Eigen locus under k_{pPLL_R} variation

4 逆变侧控制系统对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响

4.1 逆变侧电流矢量控制器参数对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响

4.1.1 VCC 外环直流电压控制器参数

初始时,系统运行于额定工况,保持系统其他参数不变,将逆变侧外环直流电压控制器参数 k_{p1_I} 从 1 变化到 40、 k_{i1_I} 从 100 变化到 4000,系统的特征根轨迹如图 15(a)、图 15 (b) 所示,可知其可行域为 $k_{p1_I}<29$ 、 $k_{i1_I}<3450$ 。

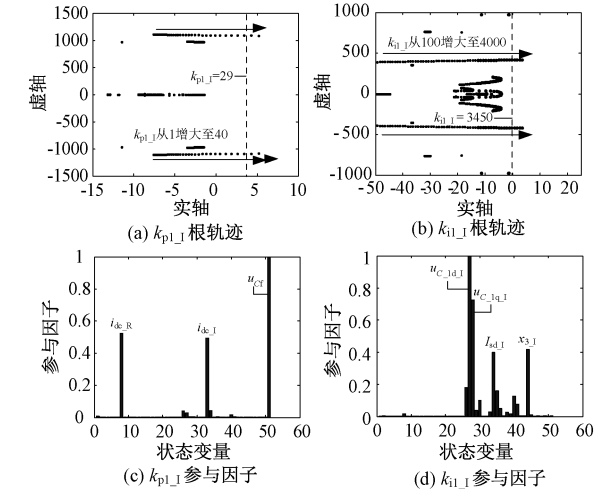


图 15 k_{p1_I} 、 k_{i1_I} 变化的特征根轨迹及参与因子

Fig.15 Eigen locus and participation factors under k_{p1_I} , k_{i1_I} variation

参与因子分析结果如图 15(c)、图 15 (d) 所示。

图 15(c) 中参与程度较高的状态变量为 i_{dc_R} 、 i_{dc_L} 、 u_{cf} , 分别代表整流侧(逆变侧)直流线路电流、直流线路电容电压;图 15(d) 中参与程度较高的状态变量为 $u_{c_ld_l}$ 、 $u_{c_lq_l}$ 、 I_{sd_l} 、 x_{3_l} , 分别代表子模块电容电压基频分量、MMC 交流侧电流 d 轴分量、VCC 外环直流电压控制器状态变量。

以上特征根分析及参与因子分析结果表明, 逆变侧 VCC 参数 k_{p1_l} 、 k_{i1_l} 过大时, 有可能引起 MMC 直流侧电压及电流不稳定, 从而引发两端系统的小信号失稳现象。

4.1.2 VCC 外环交流电压控制器参数

逆变侧外环交流电压控制器参数 k_{p2_l} 、 k_{i2_l} 变化时, 系统的特征根轨迹如图 16(a)、图 16(b) 所示, 可知其可行域为 $k_{p2_l} < 18.5$ 、 $k_{i2_l} < 1560$ 。相应的参与因子分析结果如图 16(c)、图 16(d) 所示。

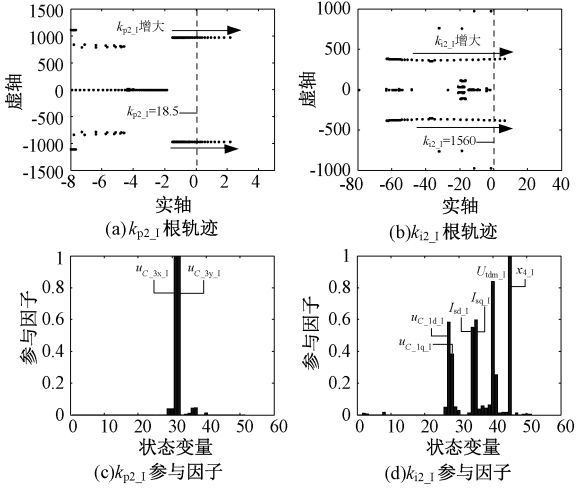


图 16 k_{p2_l} 、 k_{i2_l} 变化的特征根轨迹及参与因子

Fig.16 Eigen locus and participation factors under k_{p2_l} , k_{i2_l} variation

4.1.3 VCC 内环 d 轴电流控制器参数

逆变侧内环 d 轴电流控制器参数 k_{p3_l} 、 k_{i3_l} 变化时, 系统的特征根轨迹如图 17(a)、图 17(b) 所示, 可知其可行域为 $k_{p3_l} < 464$ 、 $k_{i3_l} < 1310$ 。参与因子结果如图 17(c)、图 17(d) 所示。

4.1.4 VCC 内环 q 轴电流控制器参数

逆变侧内环 q 轴电流控制器参数 k_{p4_l} 、 k_{i4_l} 变化时, 系统的特征根轨迹如图 18(a)、图 18(b) 所示, 可知其可行域为 $k_{p4_l} < 2060$ 、 $k_{i4_l} < 1180$ 。参与因子分析结果如图 18(c)、图 18(d) 所示。

为了验证逆变侧特征根分析所得到的控制器参数可行域的正确性, 基于 PSCAD/EMTDC 平台对其

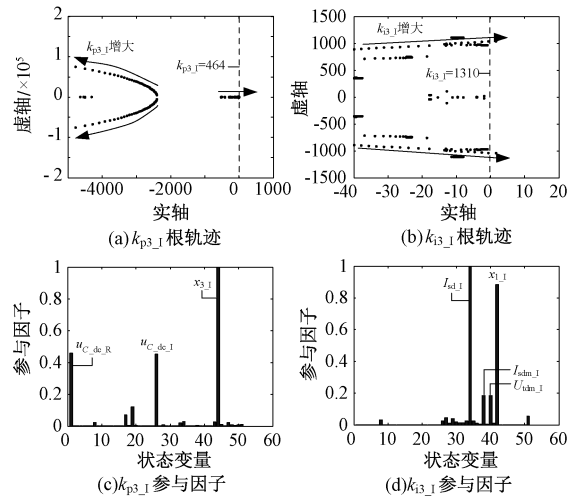


图 17 k_{p3_l} 、 k_{i3_l} 变化的特征根轨迹及参与因子

Fig.17 Eigen locus and participation factors under k_{p3_l} , k_{i3_l} variation

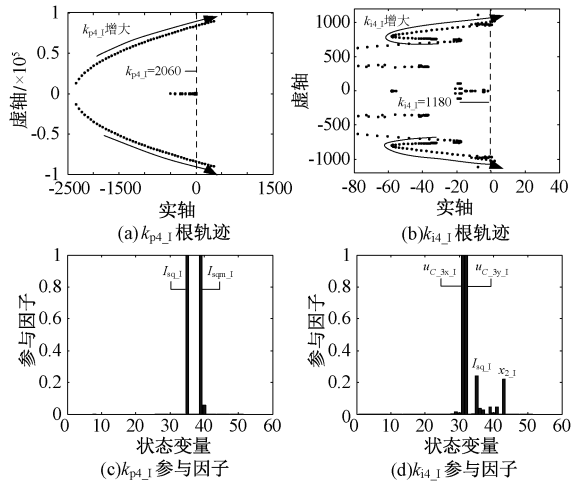


图 18 k_{p4_l} 、 k_{i4_l} 变化的特征根轨迹及参与因子

Fig.18 Eigen locus and participation factors under k_{p4_l} , k_{i4_l} variation

进行电磁暂态仿真验证。初始时系统运行于额定工况, 在 $t=5s$ 时将 k_{i2_l} 由 1400 阶跃到 1600, 该过程逆变侧的有功功率响应如图 19 所示。由图 19 可知, k_{i2_l} 阶跃前系统稳定运行, k_{i2_l} 阶跃后逆变侧有功功率逐渐发散, 系统失稳, 由此说明 k_{i2_l} 的可行域为 $k_{i2_l} < 1560$, 同理也可对逆变侧其他控制器参数的可行域进行验证。

4.2 逆变侧环流抑制控制器参数对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响

逆变侧 CCSC 参数 k_{peir_l} 、 k_{icir_l} 变化时, 系统的特征根轨迹如图 20(a)、图 20(b) 所示, 可知其可行域为 $k_{peir_l} < 2.1$ 、 $k_{icir_l} < 820$ 。参与因子分析结果如图 20

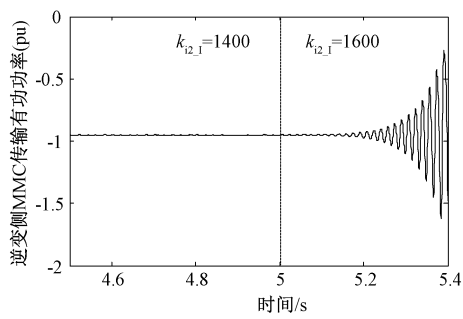


图 19 $k_{i2,1}$ 可行域验证波形

Fig.19 Verification of $k_{i2,1}$ feasible region

(c)、图 20 (d) 所示,参与程度较高的状态变量为 $u_{C_{3x,1}}$ 、 $u_{C_{3y,1}}$,代表逆变侧子模块电容电压三倍频分量,说明当 CCSC 参数 $k_{peir,1}$ 、 $k_{icir,1}$ 过大时,有可能引起 MMC 内部谐波不稳定现象,从而引发两端系统的小信号失稳现象。

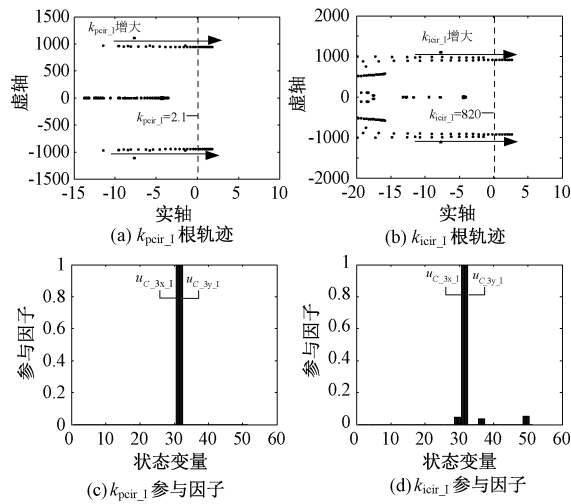


图 20 $k_{peir,1}$ 、 $k_{icir,1}$ 变化的特征根轨迹及参与因子

Fig.20 Eigen locus and participation factors under $k_{peir,1}$, $k_{icir,1}$ variation

4.3 逆变侧锁相环参数对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响

逆变侧 PLL 比例系数 $k_{pPLL,1}$ 从 1 变化到 1000、 $k_{iPLL,1}=5k_{pPLL,1}$ 时系统的特征根轨迹如图 21 所示。由图 21 可知,随着 $k_{pPLL,1}$ 逐渐增大,系统特征根始终保持在复平面的左半平面,系统保持稳定,说明交流系统强度较强(短路比 $SCR=5.0$)时,逆变侧 PLL 参数对系统小信号稳定性的影响较小,参数的可行域较大。

为了更直观地对比分析控制系统参数变化对系统小信号稳定性的影响,将整流侧及逆变侧控制系统参数的可行域及参与因子分析结果汇总于表 5。

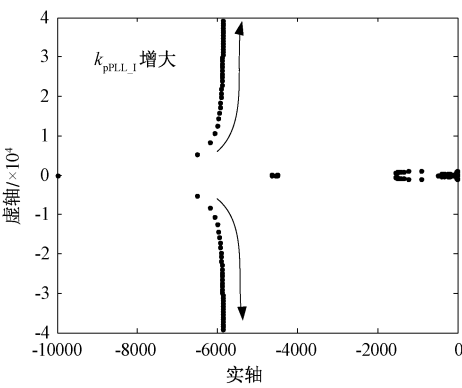


图 21 $k_{pPLL,1}$ 变化的特征根轨迹

Fig.21 Eigen locus under $k_{pPLL,1}$ variation

特征根分析结果表明,VCC 及 CCSC 参数过大均有可能引发系统的小信号失稳现象, $k_{p3,1}$ 的可行域远大于 $k_{p3,R}$ 的可行域,而 $k_{peir,R}$ 及 $k_{p4,R}$ 的可行域远大于逆变侧相同参数的可行域;对于其他控制系统参数,整流侧与逆变侧的可行域相差不多。参与因子分析结果表明,当 VCC 参数过大时,有可能引起 MMC 交直流侧电压及电流不稳定,从而引发两端系统的小信号失稳现象;而当 CCSC 参数过大时,有可能引起 MMC 内部谐波不稳定现象,从而引发两端系统的小信号失稳现象。

5 结论

本文首先建立了考虑换流器内部谐波特性及整流站和逆变站之间相互作用关系的两端 MMC-HVDC 系统小信号模型,并与 PSCAD 详细电磁暂态仿真结果进行对比,验证了小信号模型的正确性。然后采用特征根及参与因子分析法分别研究了整流侧及逆变侧控制系统(包括 VCC、CCSC 及 PLL)参数对两端 MMC-HVDC 系统的小信号稳定性影响。本文主要结论如下:

- (1)当交流系统较强时(本文算例为短路比 $SCR=5.0$),整流侧(逆变侧)的 VCC 及 CCSC 参数对两端 MMC-HVDC 系统的小信号稳定性均有较大影响,而 PLL 参数对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响较小;
- (2)当 VCC 参数过大时,有可能引起 MMC 交直流侧电压及电流不稳定,从而引发两端系统的小信号失稳现象;
- (3)当 CCSC 参数过大时,有可能引起 MMC 内部谐波不稳定现象,从而引发两端系统的小信号失稳现象。

表 5 控制系统参数可行域及参与因子分析结果

Tab.5 Feasible region of control system parameters and results of participation factor analysis

控制系统	整流侧			逆变侧		
	参数	可行域	主要参与状态变量	参数	可行域	主要参与状态变量
VCC	k_{p1_R}	<34	$I_{sd_R} \setminus I_{sdm_R} \setminus U_{tdm_R}$	k_{p1_I}	<29	$i_{dc_R} \setminus i_{dc_I} \setminus u_{Cf}$
	k_{i1_R}	<2750	$I_{sd_R} \setminus I_{sdm_R} \setminus U_{tdm_R} \setminus x_{3_R}$	k_{i1_I}	<3450	$u_{C_1d_I} \setminus u_{C_1q_I} \setminus I_{sd_I} \setminus x_{3_I}$
	k_{p2_R}	<21.7	$u_{C_3x_R} \setminus u_{C_3y_R} \setminus I_{sd_R} \setminus I_{sq_R} \setminus U_{tdm_R}$	k_{p2_I}	<18.5	$u_{C_3x_I} \setminus u_{C_3y_I}$
	k_{i2_R}	<1660	$u_{C_1q_R} \setminus I_{sd_R} \setminus I_{sq_R} \setminus U_{tdm_R} \setminus U_{tqm_R} \setminus x_{4_R}$	k_{i2_I}	<1560	$u_{C_1d_I} \setminus u_{C_1q_I} \setminus I_{sd_I} \setminus I_{sq_I} \setminus U_{tdm_I} \setminus x_{4_I}$
	k_{p3_R}	<35	$I_{sd_R} \setminus I_{sdm_R} \setminus U_{tdm_R}$	k_{p3_I}	<464	$u_{C_dc_R} \setminus u_{C_dc_I} \setminus x_{3_I}$
	k_{i3_R}	<1180	$I_{sd_R} \setminus I_{sdm_R} \setminus U_{tdm_R} \setminus x_{1_R}$	k_{i3_I}	<1310	$I_{sd_I} \setminus I_{sdm_I} \setminus U_{tdm_I} \setminus x_{1_I}$
	k_{p4_R}	<1000	—	k_{p4_I}	<2060	$I_{sq_I} \setminus I_{sqm_I}$
	k_{i4_R}	<1235	$I_{sq_R} \setminus I_{sqm_R} \setminus U_{tqm_R} \setminus x_{2_R}$	k_{i4_I}	<1180	$u_{C_3x_I} \setminus u_{C_3y_I} \setminus I_{sq_I} \setminus x_{2_I}$
CCSC	k_{pcir_R}	<78	$u_{C_2d_R} \setminus u_{C_2q_R}$	k_{pcir_I}	<2.1	$u_{C_3x_I} \setminus u_{C_3y_I}$
	k_{icir_R}	<1600	$u_{C_2d_R} \setminus u_{C_2q_R}$	k_{icir_I}	<820	$u_{C_3x_I} \setminus u_{C_3y_I}$

以上结论可以为 MMC-HVDC 控制系统参数的选择提供参考,为分析系统失稳的原因提供思路。

附录

两端 MMC-HVDC 系统控制系统状态空间模型如下:

(1)VCC 系统状态空间模型

VCC 系统一阶惯性测量环节的状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{I}_{sdm} = (I_{sd} - I_{sdm})/T_{mid} \\ \dot{I}_{sqm} = (I_{sq} - I_{sqm})/T_{miq} \\ \dot{U}_{tdm} = (U_{td} - U_{tdm})/T_{mud} \\ \dot{U}_{tqm} = (U_{tq} - U_{tqm})/T_{muq} \end{cases}$$

VCC 外环有功功率(直流电压)控制器、交流电压控制器的状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = P_{ref} - P_m \\ (\dot{x}_3 = U_{dref} - U_{dem}) \\ \dot{x}_4 = U_m - U_{ref} \end{cases}$$

VCC 内环 d 轴、q 轴电流控制器的状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = I_{dref} - I_{sdm}, I_{dref} = k_{p1} \dot{x}_3 + k_{i1} x_3 \\ \dot{x}_2 = I_{qref} - I_{sqm}, I_{qref} = k_{p2} \dot{x}_4 + k_{i2} x_4 \end{cases}$$

式中, U_{td} 、 U_{tq} 分别为 MMC 交流侧电压的 d 轴、q 轴分量;其他变量含义见正文表 2。

(2)CCSC 系统状态空间模型

CCSC 系统的状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{f}_1 = I_{cirdref} - I_{cird} \\ \dot{f}_2 = I_{cirpref} - I_{cirp} \end{cases}$$

式中, $I_{cirdref}$ 、 $I_{cirpref}$ 为 MMC 二倍频环流的 d 轴、q 轴参考值($I_{cirdref}=0, I_{cirpref}=0$)。

(3)锁相环 PLL 的状态空间模型

PLL 的状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{U}_{tqPLL} = (U_{tq} - U_{tqPLL})/T_{PLLm} \\ \dot{x}_5 = U_{tqPLL} \\ \dot{x}_{PLL} = -k_{pPLL} \dot{x}_5 - k_{iPLL} x_5 \end{cases}$$

式中,变量含义详见正文表 2。

参考文献 (References):

[1] Nami A, Liang J, Dijkhuizen F, et al. Modular multilevel converters for HVDC applications; review on converter cells and functionalities [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (1): 18-36.

[2] Dekka A, Wu B, Fuentes R L, et al. Evolution of topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5 (4): 1631-1656.

[3] 吕敬,蔡旭,张占奎,等 (Lv Jing, Cai Xu, Zhang Zhankui, et al.). 海上风电场经 MMC-HVDC 并网的阻抗建模及稳定性分析 (Impedance modeling and stability analysis of MMC-based HVDC for offshore wind farms) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (14): 3771-3781.

[4] Lyu J, Cai X, Molinas M. Optimal design of controller parameters for improving the stability of MMC-HVDC for wind farm integration [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6 (1): 40-53.

[5] Egea-Alvarez A, Fekriasl S, Hassan F, et al. Advanced vector control for voltage source converters connected to weak grids [J]. IEEE Transactions on Power System, 2015, 30 (6): 3072-3081.

[6] Suul J A, D' Arco S, Rodríguez P, et al. Impedance

- compensated grid synchronization for extending the stability range of weak grids with voltage source converters [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10 (6): 1315-1326.
- [7] Arani M F M, Mohamed Y A-R I. Analysis and performance enhancement of vector-controlled VSC in HVDC links connected to very weak grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32 (1): 684-693.
- [8] 刘士琦 (Liu Shiqi). 双馈风场与传统直流输电的小信号相互作用研究 (Research of small signal interaction between the DFIG based wind farm and the LCC-HVDC) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science & Technology), 2015.
- [9] 张鹏, 刘海涛, 李旭, 等 (Zhang Peng, Liu Haitao, Li Xu, et al.). 海上风电场直流并网系统小扰动稳定分析 (Analysis of small disturbance stability of DC grid-connected system on offshore wind farms) [J]. 南京工程学院学报 (自然科学版) (Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition)), 2017, 15 (2): 45-51.
- [10] Endegnanew A G, Uhlen K, Bergna-Diaz G, et al. Small-signal modelling of an MMC-based HVDC link interfacing large AC systems [A]. 2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics [C]. 2016. 1-9.
- [11] Diaz G B, Suul J A, D'Arco S. Small-signal state-space modeling of modular multilevel converters for system stability analysis [A]. Energy Conversion Congress & Exposition [C]. 2015. 5822-5829.
- [12] Beerten J, Diaz G B, D'Arco S, et al. Comparison of small-signal dynamics in MMC and two-level VSC HVDC transmission schemes [A]. 2016 IEEE International Energy Conference [C]. 2016. 1-6.
- [13] Jiang H, Joós G, Ooi B T. Analytical tool for designing MMC parameters to improve damping of transients [A]. 2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition [C]. 2014. 1-4.
- [14] 吕泳庆, 邓富金, 王青松, 等 (Lv Yongqing, Deng Fujin, Wang Qingsong, et al.). 基于单相矢量控制的 MMC 环流抑制策略 (Circulating current elimination strategy for MMCs based on single phase vector control) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (6): 18-24.
- [15] 赵聪, 雷鸣, 李子欣, 等 (Zhao Cong, Lei Ming, Li Zixin, et al.). 全桥型模块化多电平换流器环流特性分析与自抑制方法 (Circulating current characteristics analysis and self-suppression method of full-bridge modular multilevel converter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (8): 1-8.
- [16] 汪玉凤, 王济东, 佟丽新, 等 (Wang Yufeng, Wang Jidong, Tong Lixin, et al.). 基于自适应准 PR 控制器的 MMC 环流控制策略研究 (Circulating current characteristics analysis and self-suppression method of full-bridge modular multilevel converter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (12): 24-31.
- [17] Li T, Gole A M, Zhao C. Harmonic instability in modular multilevel converters resulting from internal converter dynamics [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31 (4): 1738-1747.
- [18] 万勋, 李云丰, 彭敏放 (Wan Xun, Li Yunfeng, Peng Minfang). 直流输电系统虚拟并联电阻阻尼控制策略研究 (Virtual parallel resistor damping control of VSC based HVDC system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (12): 3471-3480.
- [19] Freytes J, Bergna G, Suul J A, et al. Improving small-signal stability of an MMC with CCSC by control of the internally stored energy [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33 (1): 429-439.
- [20] Sakinci O C, Beerten J. Generalized dynamic phasor modeling of the MMC for small-signal stability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, DOI: 10.1109/TPWRD. 2019. 2898468.
- [21] 李探, 赵成勇, Gole A Aniruddha (Li Tan, Zhao Chengyong, Gole A Aniruddha). MMC-HVDC 内部谐波模态识别及其稳定性分析 (Identification and stability analysis of the internal harmonic modes of the MMC-HVDC system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (8): 2185-2195.
- [22] 郭春义, 殷子寒, 赵成勇 (Guo Chunyi, Yin Zihan, Zhao Chengyong). MMC-HVDC 系统在整流和逆变工作模式下的小信号稳定性对比研究 (Comparative study on small-signal stability of MMC-HVDC system under rectification and inversion modes) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (24): 7349-7358, 7461.
- [23] Kundur P. Power system stability and control [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1993.
- [24] 李探 (Li Tan). 模块化多电平换流器直流输电系统稳定性关键问题研究 (Research on key issues of stability of a modular multilevel converter based HVDC system) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2016.

Impact of control system on small-signal stability of two-terminal MMC-HVDC system

WANG Yan-ning, GUO Chun-yi, WANG Ye

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The small-signal stability study of modular multilevel converter based HVDC (MMC-HVDC) system is able to provide a theoretical guidance for engineering design and system parameter selection. Furthermore, control system has great impact on small-signal stability of the whole MMC-HVDC system. This paper focuses on the two-terminal MMC-HVDC system and takes into account the internal harmonic dynamic characteristics of MMC and the interaction between rectifier and inverter station. Firstly, the small-signal model of the system is established in MATLAB and validated through comparison with the detailed electromagnetic transient model in PSCAD/EMTDC. Then, based on the established small-signal model, the impacts of vector current control (VCC), circulating current suppressing control (CCSC) and phase-locked-loop (PLL) on small-signal stability of the system are studied by means of eigenvalue analysis and participation factor analysis. Finally, the feasible regions of the control system parameters are summarized, within which the stable operation of the system can be ensured. Besides, the key control parameters related to the system oscillation or instability are given, and dominant modes characteristics corresponding to the key control parameters are revealed. This work provides a valuable theoretical reference for control system parameter design and instability analysis for MMC-HVDC system.

Key words: modular multilevel converter; small-signal stability; control system; high voltage direct current system; vector current control; circulating current suppressing control