

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.04.006

特高压混合级联多端直流输电系统的协调控制策略研究

胡宏¹, 陈浩¹, 丁浩寅¹, 李晓栋², 王国腾², 徐政²

(1. 国家电网华东电力调控中心, 上海 200120;

2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 逆变侧采用电网换相换流器(LCC)和模块化多电平换流器(MMC)串联组成的特高压混合级联多端直流输电系统,为特高压直流输电提供了一种更为经济、灵活、快捷的输电方式。基于现有直流电网的协调控制策略,文中对受端MMC阀组之间的协调控制策略进行了深入的分析研究,并考虑了5种协调控制策略。然后,在PSCAD/EMTDC中,对上述5种策略遭受不同故障的响应特性分别进行仿真,故障包括送端交流故障、直流线路故障、受端LCC交流故障、受端MMC1交流故障及MMC1紧急闭锁退出。最后,基于仿真结果,对上述5种协调控制策略的适用性进行了对比分析。仿真结果表明:策略1和策略3遭受各种故障均能有效穿越;策略2、策略4和策略5在遭受直流线路故障时均发生不同程度的功率倒转,需要采取措施抑制。

关键词: 电网换相换流器(LCC);模块化多电平换流器(MMC);协调控制;主从控制;直流电压下垂控制

中图分类号: TM715;TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)04-0042-10

0 引言

相比于高压交流输电,特高压直流输电(ultra-high voltage direct current, UHVDC)技术以其功率调节快速灵活、不存在交流输电的稳定性问题、线路通道造价低廉以及可实现异步联网等明显的技术优势,成为远距离输电的主要途径^[1-2]。

基于电网换相换流器的特高压直流输电(line-commutated converter based ultra-high voltage direct current, LCC-UHVDC)技术凭借输送容量大、制造成本低、技术成熟可靠等优点,在我国大容量远距离输电场合发挥着不可替代的作用^[3-5]。然而,LCC-UHVDC 逆变站容易发生换相失败,尤其是我国华东、珠三角地区的直流多馈入问题,成为制约 LCC-UHVDC 发展的重要因素^[6-7]。近年来,基于模块化多电平换流器的高压直流输电(modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC-HVDC)技术,因其有功无功解耦控制、不存在换相失败、易构造多端 HVDC 系统等优点,逐步应用于远距离大容量输电场合^[8-9]。相比于 LCC-UHVDC, MMC-HVDC 受限于电力电子器件的现有制造水平和工程运行经验,且存在输送容量小、建造成本高、运行损耗大等缺陷,制约了其在特高压直流输电场合的应用^[10-11]。

为此,众多学者提出将 LCC 和 MMC 灵活组合,以形成混合直流输电系统,既可以发挥 LCC 成本低、损耗小、容量大、技术成熟度高以及 MMC 的无

换相失败、控制灵活的优势,又可以克服各自存在的缺点^[12-16]。其中,LCC-MMC 特高压混合级联多端直流输电系统为 UHVDC 系统提供了一种更为经济、灵活、快捷的输电方式^[17]。

特高压混合级联多端直流输电系统的送端采用 LCC,受端采用 LCC 和 3 台 MMC 级联,具有多重优势:(1) 直流故障期间利用 LCC 强制移相快速清除直流故障;(2) 依靠 MMC 无换相失败、功率调节快速灵活的优势,改善直流多馈入问题;(3) 受端形成多个落点,有利于直流功率的分散消纳,缓解交流主网架电力疏散能力。针对该拓扑结构,文献[17-18]对其受端接线方式、控制方式和换流站建设形式进行了分析研究;文献[19]为了抑制该拓扑结构的暂态电流,提出在 MMC 直流侧串联二极管和在旁路开关串联电阻 2 种方法。但鲜有文献对受端 MMC 阀组之间的协调控制策略进行研究。

相比于架空线或电缆连接的多端直流输电系统,该拓扑受端 3 台 MMC 直流侧直接并联,除特殊工况,均为逆变状态。任意一台 MMC 的功率、电压发生扰动,都会迅速干扰剩余 MMC 的正常运行。如果受端 3 台 MMC 无法快速协调功率、电压的扰动,MMC 直流侧可能会发生严重的过电压,造成 MMC 闭锁或系统崩溃。因此,受端 MMC 阀组之间的功率、直流电压协调控制策略需要进行深入的相关分析研究。

针对 LCC-MMC 特高压混合级联多端直流输电系统,文中参考现有直流电网的协调控制策略^[20-21],对受端 MMC 阀组 5 种潜在的功率、直流

电压协调控制策略的适用性进行了分析,分别为:(1) 3台 MMC 均采用定直流电压控制;(2) 主从控制;(3) 带死区的直流电压下垂控制;(4) 带直流电压下垂的主从控制;(5) 直流电压裕额控制。然后,在 PSCAD/EMTDC 中,对上述 5 种策略遭受不同故障的响应特性分别进行仿真,故障包括送端交流故障、直流线路故障、受端 LCC 交流故障、受端 MMC1 交流侧故障及 MMC1 紧急闭锁退出。最后,基于仿真结果,对上述 5 种协调控制策略的适用性进行了对比分析。

1 混合级联多端直流输电系统

1.1 拓扑结构及参数

以单极系统为例,所述系统的基本拓扑结构如图 1 所示。送端由 2 组 12 脉动 LCC 换流阀串联组成,受端由一组 12 脉动 LCC 和 3 台并联的 MMC 串联组成,4 个换流阀采取合站建设并分别连接到不同的 500 kV 交流母线。其中,3 台 MMC 的结构和参数完全一样,均采用半桥子模块。

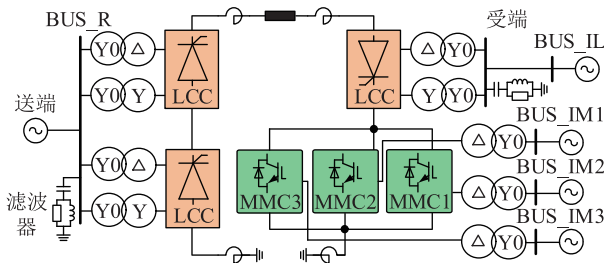


图 1 系统拓扑结构

Fig.1 System topology

该系统的基本参数见表 1—表 3,高压、低压绕组各疏散一半直流功率。其中,LCC 联结变压器绕组类型为 Y0/Y、Y0/Δ;MMC 联结变压器绕组类型为 Y0/Δ。

对于全压运行方式,受端 1LCC+3MMC(1+3)工况为正常运行方式;允许 1+2 工况长期运行,即退出 1 台 MMC,直流传输功率不损失,单个 MMC 长期过负荷能力达到 1 200 MW;不允许 1+1 工况长期运行,由于此时暂态过电压和过电流将由一个 MMC 全部承担,需要将 MMC 退出仅保持高端 LCC 投入以维持系统长期半压运行,提高输送能力。

1.2 数学模型

1.2.1 送端换流阀

送端换流阀的直流侧电压为^[1-2]:

$$U_{dcR} = 4 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{vR} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_R I_{dc} \right) \quad (1)$$

式中: U_{dcR} 为送端换流阀出口的直流电压; U_{vR} 为送

表 1 单极系统参数

Table 1 Monopolar system parameters

类别	名称	数值	
		送端	受端
基本参数	额定有功功率 P_N/MW	4 000	4 000
	额定直流电压 U_{dcN}/kV	800	760
	额定直流电流 I_{dcN}/kA	5.0	5.0
	交流系统电压有效值 U_{acms}/kV	525	510
	X/R	8.66	8.66
直流线路参数	平波电抗器 L_{dc}/mH	150×2	150×2
	线路长度 L/km	2 172	
	正序电阻 $R_1/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.005 43	
	正序电感 $L_1/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	0.807 8	

表 2 LCC 换流器参数

Table 2 Parameters of the LCCs

参数	数值	
	送端	受端
LCC 直流电压 $U_{dcN,LCC}/\text{kV}$	800	380
LCC 变比	525 kV/ 179.75 kV	510 kV/ 161.50 kV
	容量 $S_{NT}/(\text{MV} \cdot \text{A})$	1 200
漏抗 $u_k/\%$	19	18

表 3 MMC 换流单元参数

Table 3 Parameters of the MMC unit

参数	数值
MMC 直流电压 $U_{dcN,MMC}/\text{kV}$	380
额定容量 $S_{N,MMC}/(\text{MV} \cdot \text{A})$	1 200
单个桥臂半桥子模块个数 n_{SM}	200
额定有功功率 $P_{dcN,MMC}/\text{MW}$	667 (1+3) 或 1 000 (1+2)
子模块电容 C_{sm}/mF	20
桥臂电抗 L_{arm}/mH	25.33
MMC 变比	510 kV/210 kV
	容量 $S_{NT}/(\text{MV} \cdot \text{A})$
漏抗 $u_k/\%$	15

端 LCC 阀侧空载线电压有效值; I_{dc} 为直流电流; X_R 为换相电抗; α 为触发角。

正常运行时,送端 LCC 定直流电流 I_{dc} , 直流电压 U_{dcR} 由受端换流站决定。当送端交流系统因发生故障导致 U_{vR} 下降时,送端 LCC 的定直流电流控制通过减小 α 以维持 I_{dc} 不变。当 α 减小至 $\alpha_{min} = 5^\circ$ 时,LCC 失去 α 调节能力,此时送端直流电压 U'_{dcR} 由送端交流电压 U'_{vR} 决定,不再由受端换流站控制^[11],即:

$$U'_{dcR} = 4 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} U'_{vR} \cos \alpha_{min} - \frac{3}{\pi} X_R I'_{dc} \right) \quad (2)$$

式中: U'_{vR} , I'_{dc} 分别为发生故障后的换流器阀侧线电压有效值和直流侧电流。

1.2.2 受端换流阀

稳态运行时,受端换流阀的数学模型为:

$$U_{\text{del,LCC}} = 2 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{\text{vl,LCC}} \cos \gamma - \frac{3}{\pi} X_l I_{\text{dc}} \right) \quad (3)$$

$$U_{\text{vl,MMC}_i} = \frac{1}{2} m_i U_{\text{del,MMC}} \sin(\omega t + \Delta \delta_i) \quad (4)$$

$$I_{\text{dc}} = \sum_{i=1}^3 I_{\text{dc,MMC}_i} = 3 I_{\text{dc,MMC}_i} \quad (5)$$

$$U_{\text{del}} = U_{\text{del,LCC}} + U_{\text{del,MMC}} \quad (6)$$

式中: $U_{\text{vl,LCC}}$ 为受端 LCC 阀侧线电压有效值; $U_{\text{vl,MMC}_i}$ 为受端第 i 台 MMC 阀侧线电压瞬时值, $i=1, 2, 3$; $U_{\text{del,LCC}}$, $U_{\text{del,MMC}}$ 分别为受端 LCC 和 MMC 的直流侧电压; U_{del} 为受端换流阀入口处的直流电压; m_i 为第 i 台 MMC 的电压调制比; $\Delta \delta_i$ 为第 i 台 MMC 出口处的交流电压及与交流母线电压的相位差; $I_{\text{dc,MMC}_i}$ 为第 i 个 MMC 直流入口的直流电流, 稳态时, 3 台 MMC 直流侧电流相等。

1.3 LCC 控制方式

LCC 控制框图如图 2 所示。送端 LCC 采用定直流电流控制及最小触发角控制, 受端 LCC 采用定直流电压控制, 并配置后备定电流控制和后备定关断角控制, 以提高交流故障穿越能力^[17]。其中, 上标 * 代表指令值; 上标 0 代表上层指令。

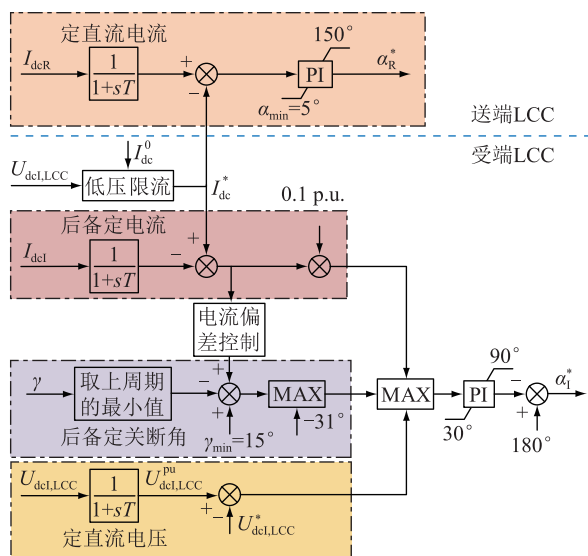


图2 LCC 控制框图

Fig.2 Control diagram of LCC

2 受端 MMC 阀组协调控制策略

受端 3 台 MMC 均采用基于 dq 轴解耦的直接电流矢量控制, 该控制策略主要分为内环电流控制和外环功率控制两部分^[4], 有功无功解耦控制, 控制方式灵活。为了稳定受端 MMC 的直流电压, 需要至少 1 台 MMC 采用定直流电压控制。

文中所述拓扑的 3 台 MMC 均为逆变状态, 现有直流电网的协调控制策略的适用性有待讨论, 以功率注入交流系统为参考方向。

2.1 策略 1: 3 台 MMC 均采用定直流电压控制

3 台 MMC 均采用定直流电压控制策略的基本控制框图如图 3 所示。



图3 策略1控制框图

Fig.3 Control diagram of strategy 1

该策略中, 需要进一步配置电流均衡控制, 原理是: 根据 MMC 实际输送功率 $P_{\text{ac,MMC}_i}$ 与 3 台 MMC 平均输送功率 $P_{\text{ac,MMC}}^{\text{ave}}$ 的偏差, 按照合适比例 K_1 折算为 MMC 附加电压指令值 $\Delta U_{\text{dc,MMC}_i}$, 再加上上层电压指令值 $U_{\text{del,MMC}}^0$, 生成 MMC 的实际电压指令值 $U_{\text{del,MMC}_i}^*$, 以实现均衡直流电流的功能。其中, $P_{\text{ac,MMC}}^{\text{ave}}$ 和 $U_{\text{del,MMC}}^0$ 分别为:

$$P_{\text{ac,MMC}}^{\text{ave}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 P_{\text{ac,MMC}_i} \quad (7)$$

$$U_{\text{del,MMC}_i}^* = U_{\text{del,MMC}}^0 + K_1 (P_{\text{ac,MMC}_i} - P_{\text{ac,MMC}}^{\text{ave}}) \quad (8)$$

电流均衡控制, 在稳态运行时, 消除各 MMC 器件参数潜在偏差导致的电流分配不均衡^[17]; 在某 1 台 MMC 受端发生交流故障导致功率输送受阻或者紧急闭锁退出时, 剩余 2 台健全 MMC 可以通过适当增大直流电压指令值快速消纳盈余功率, 以防止 MMC 发生过电压以及直流电流、功率振荡。

2.2 策略 2: 主从控制

主从控制是并联型多端直流输电系统最基本的控制策略, 概念清晰, 结构简单, 但是对通信系统依赖性强。对于文中所述拓扑, MMC1 为主控站, MMC2 和 MMC3 为从控站, 该策略的基本原理如图 4 所示。

图 4 中, 纵轴的右侧代表逆变状态, 左侧代表整流状态; 黑色虚线方框代表受端 3 台 MMC 直流电压和有功功率的运行范围, 由于 3 台 MMC 均处于逆变状态, 有功功率 P_{ac} 为负值的范围较小。图 4 (a) 的黑色圆点代表稳态运行时 3 台 MMC 的运行点; 图 4 (b) 的蓝色圆点代表从控站退出后 (以 MMC3 退出为例), MMC1 和 MMC2 过渡到新的稳态运行点; 图 4 (c) 的红色圆点代表主控站退出后 (MMC1 退出), 从控站 MMC2 和 MMC3 过渡到新的稳态运行点。

由于 3 台 MMC 均为逆变状态, 主控站退出和从控站退出, 都需要依赖阀组间通信改变功率指令

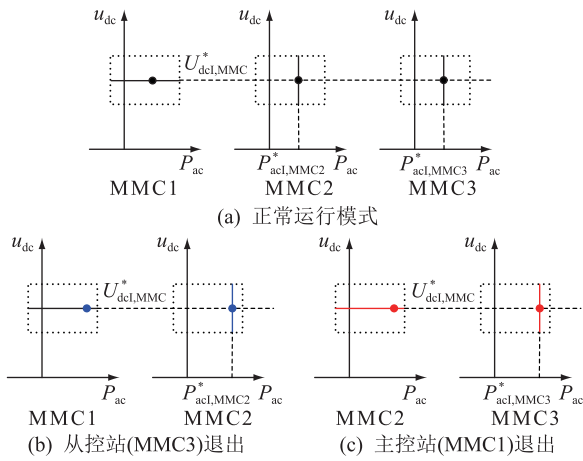


图4 策略2原理

Fig.4 Principle of strategy 2

值,以实现健全 MMC 之间功率平衡,直流电压运行点保持不变。

后文图中坐标轴、虚线框、圆点等标识代表的意义和图4类似,不再赘述。

2.3 策略3:带死区的直流电压下垂控制

由于直流电压下垂控制的控制结果不精确,文中仅考虑带死区的电压下垂控制。该策略基本原理如图5所示。

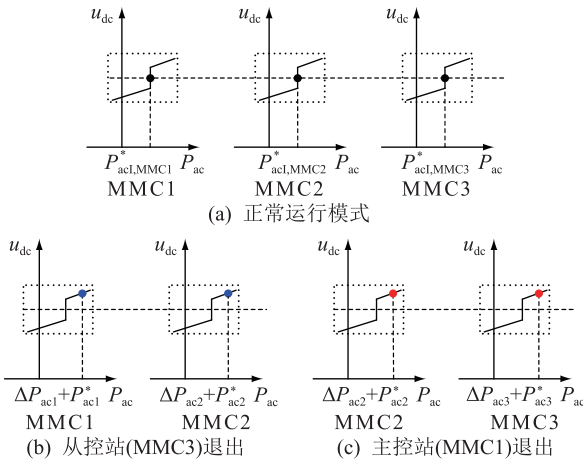


图5 策略3原理

Fig.5 Principle of strategy 3

相比于主从控制策略,主控站或者从控站退出运行,该策略均不需要阀组间通信,只依靠下垂控制策略在原有功率指令值基础上增加一个 ΔP_{ac} ,以实现健全 MMC 之间的功率平衡。同时,健全 MMC 的直流侧电压运行点会改变(变大)。

2.4 策略4:带直流电压下垂的主从控制

在带直流电压下垂的主从控制中,主控站 MMC1 采用定直流电压控制,从控站采用带死区的电压下垂控制。该策略基本原理如图6所示。该策略在直流电网中具有不需要站间通信等诸多优点。

然而,在文中所述拓扑中,从控站 MMC3 退出运行,需要依赖阀组间通信改变 MMC2 功率指令值,以实现健全 MMC 之间的功率平衡,否则 MMC1 将承担所有的盈余功率;主控站退出运行,和策略3类似,直流电压运行点会改变(变大)。

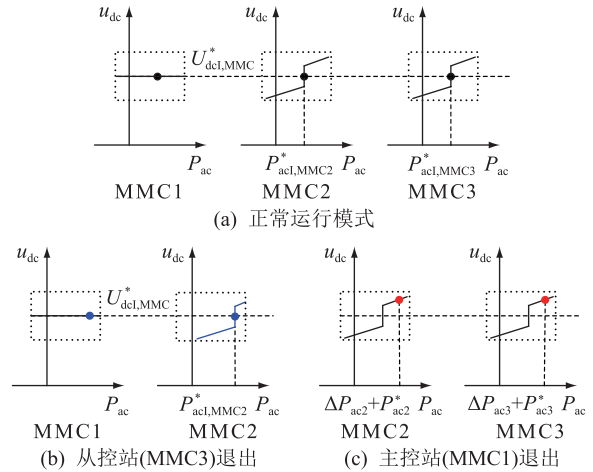


图6 策略4原理

Fig.6 Principle of strategy 4

2.5 策略5:直流电压裕额控制

该控制策略的主控站 MMC1 采用定直流电压控制;从控站的外环功率控制器采用比较器实现^[4],正常运行时定有功功率,当直流电压升高至设定的电压指令值 $U_{dcl,MMCH}^*$ 或者降低至设定的电压指令值 $U_{dcl,MMCL}^*$,切换为定直流电压模式。该策略基本原理如图7所示。图7(b)中,从控站 MMC1 退出运行,需要依赖阀组间通信改变 MMC2 功率指令值,以实现健全 MMC 之间的功率平衡;主控站 MMC1 退出运行,MMC 直流侧电压上升至 $U_{dcl,MMCH}^*$,剩余2台健全 MMC 均转为定直流电压控制模式。

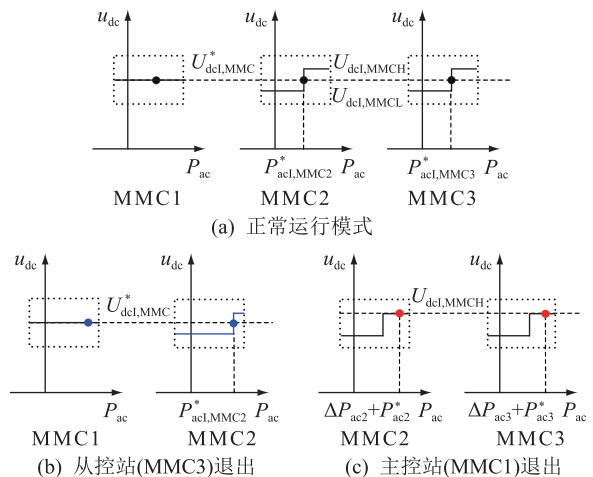


图7 策略5原理

Fig.7 Principle of strategy 5

3 仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 中搭建一个单极特高压混合级联多端直流输电系统,拓扑结构如图 1 所示。对第二章所述 5 种策略遭受不同故障的响应特性分别进行仿真和结果分析。

3.1 送端交流故障

$t=2.0\text{ s}$ 时,在图 1 的母线 BUS_R 处施加持续 0.1 s 的三相短路故障,电压跌落至 50% 。仿真结果如图 8 所示,LCC 的直流电压、直流电流均在受端 LCC 入口处测量; I_{pa} 为 MMC a 相上桥臂电流;直流电压 U_{dc} ,直流电流 I_{dc} 和有功功率 P_{ac} 的基准值分别为 800 kV , 5 kA 和 $4\,000\text{ MW}$,下同。

如图 8(a) 和 (c) 所示,策略 1 和策略 3 的 3 台 MMC 直流侧电压均基本保持不变,直流电流均衡分配。如图 8(b) 和 (e) 所示,由于 MMC1 控制直流电压,策略 2 和策略 5 的 MMC2 和 MMC3 的直流电压波动幅度比 MMC1 大,MMC1 功率出现暂时倒转。如图 8(d) 所示,策略 4 虽然 3 台 MMC 直流电压基本不变,但直流电流分配不均衡。

3.2 直流线路故障

$t=2.0\text{ s}$ 时,在直流线路中点处施加持续 0.1 s 的直流短路故障。当检测到送端 LCC 直流出口电流 I_{dcr} 大于 1.2 p.u. 时,将送端 LCC 触发角强制移相至 150° ;待 $I_{dcr}=0$ 时,继续保持移相状态 0.2 s ,去游离;然后重启送端和受端 LCC。故障期间,MMC 不

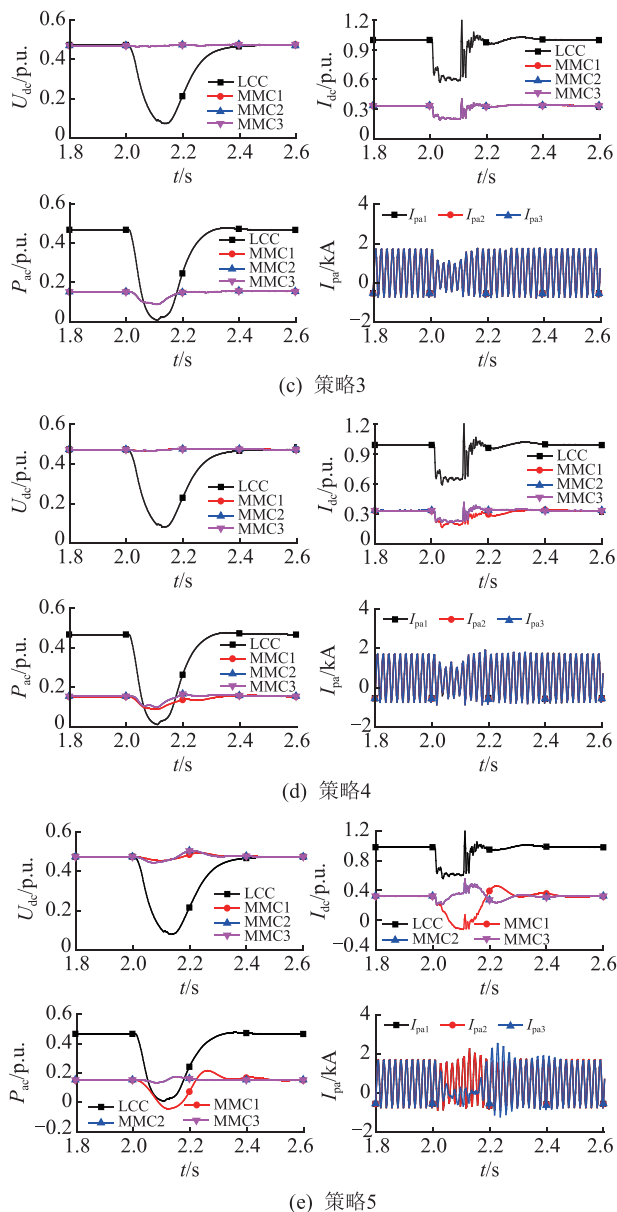
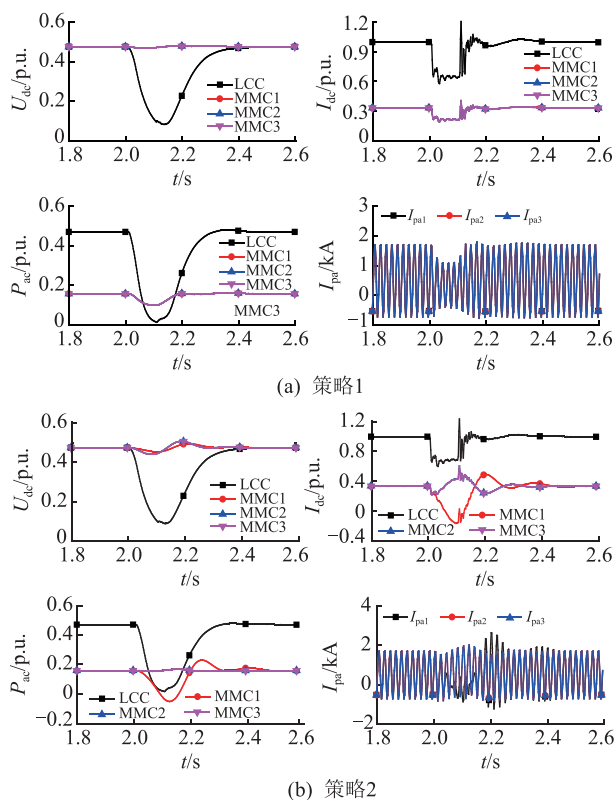
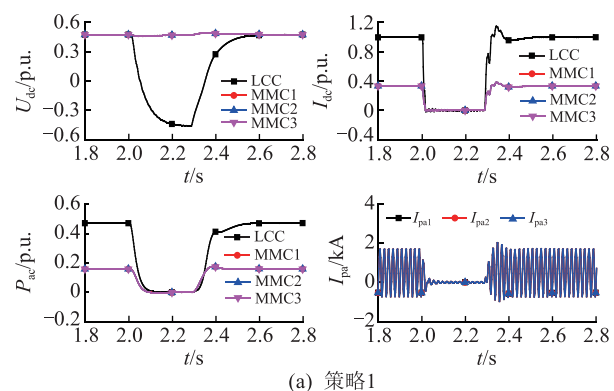


图 8 送端交流系统故障响应特性

Fig.8 Response to sending-end AC fault

需要额外控制。仿真结果如图 9 所示。

如图 9(a) 和 (c) 所示,策略 1 和策略 3 的 3 台 MMC 直流侧电压均基本保持不变,未发生功率倒转。如图 9(b) 所示,直流故障发生后,受端接受的



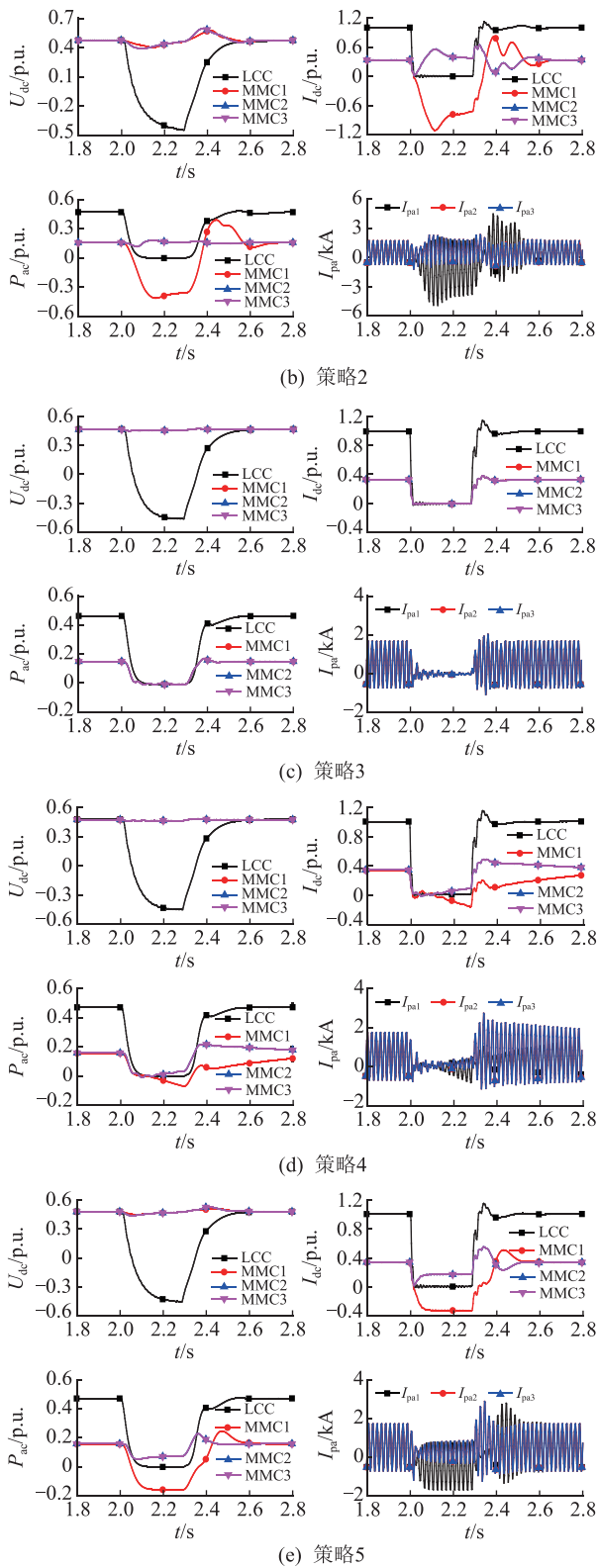


图9 直流线路故障响应特性
Fig.9 Response to DC line fault

有功功率为0,策略2由于MMC1定直流电压,MMC2和MMC3定有功功率,MMC2和MMC3输送的功率基本不变,MMC1倒转的功率为MMC2和MMC3输送功率的总和。如图9(d)所示,策略4的MMC1发生最大为0.07 p.u.的功率倒转,故障清除

后直流系统恢复时间长。如图9(e)所示,策略5的MMC2和MMC3维持约0.075 p.u.的功率输送,MMC1发生约0.15 p.u.的功率倒转。相比于策略2,MMC2倒转的功率为策略2的一半。

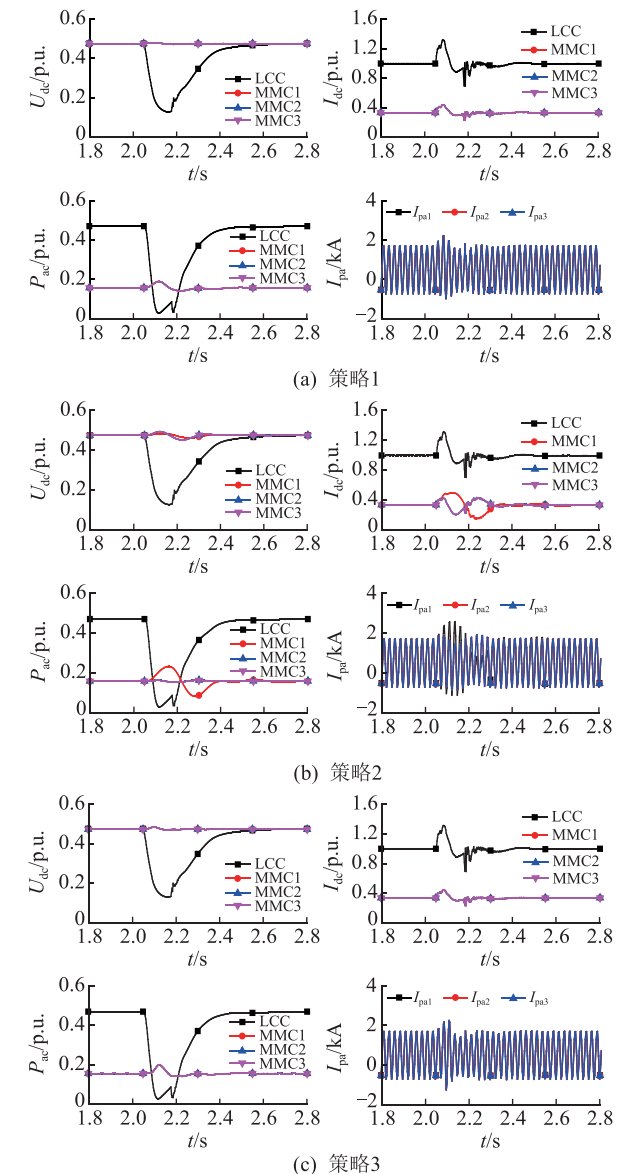
3.3 受端LCC交流故障

$t=2.0$ s时,在图1的母线BUS_IL处施加持续0.1 s的三相短路故障,母线电压跌落至50%。仿真结果如图10所示。

故障发生后,LCC发生换相失败,直流电流增大,MMC直流侧出现盈余功率。如图10(a)、(c)和(d)所示,策略1、策略3和策略4的直流侧盈余功率由3台MMC均衡消纳,3台MMC的直流电压基本不变。如图10(b)和(e)所示,策略2和策略5的直流侧盈余功率全部由MMC1消纳,造成MMC1直流电流由0.33 p.u.增大至0.5 p.u.。

3.4 受端MMC1交流故障

$t=2.0$ s时,在图1的母线BUS_IM1处施加持续



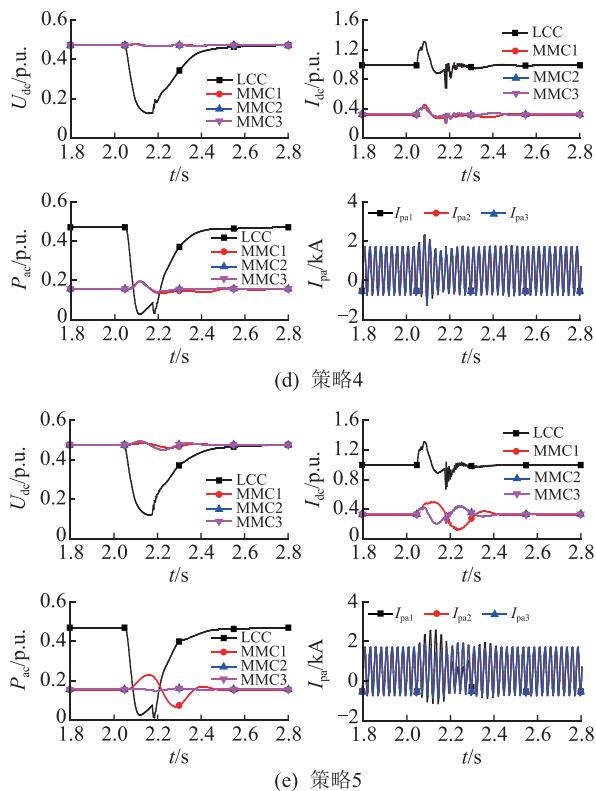


图 10 受端 LCC 交流系统故障响应特性

Fig.10 Response to AC fault of receiving-end LCC

续 0.1 s 的三相短路故障,母线电压跌落至 50%。仿真结果如图 11 所示。

故障发生后,MMC1 输送功率受阻,MMC 直流侧出现盈余功率。如图 11(a)和(d)所示,策略 1 和策略 4 的直流侧盈余功率由 MMC2 和 MMC3 均衡

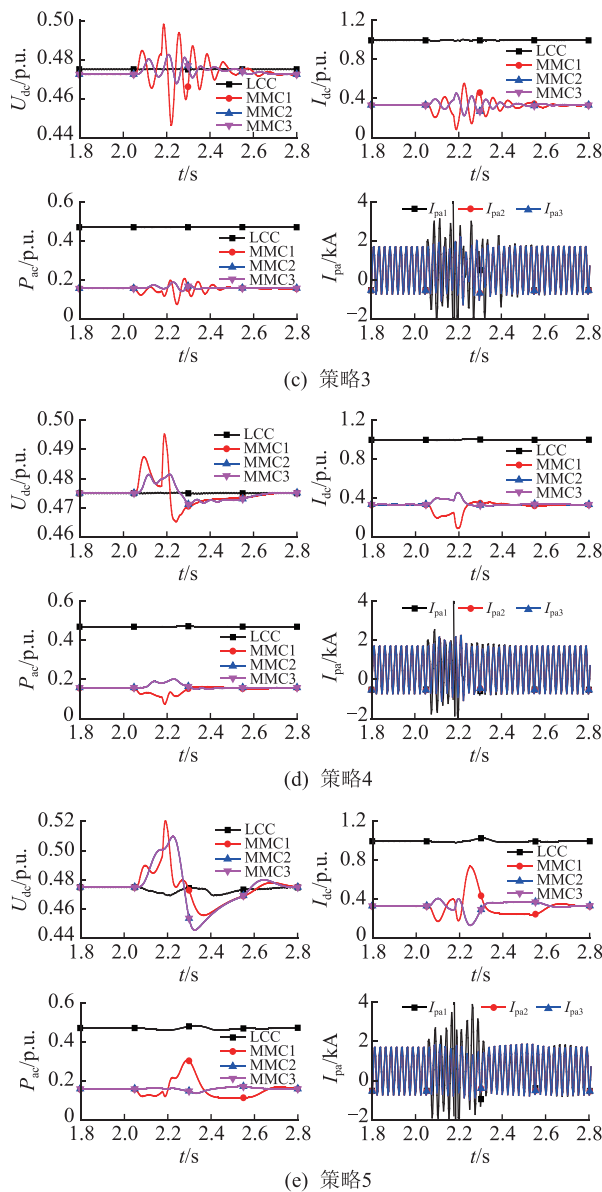
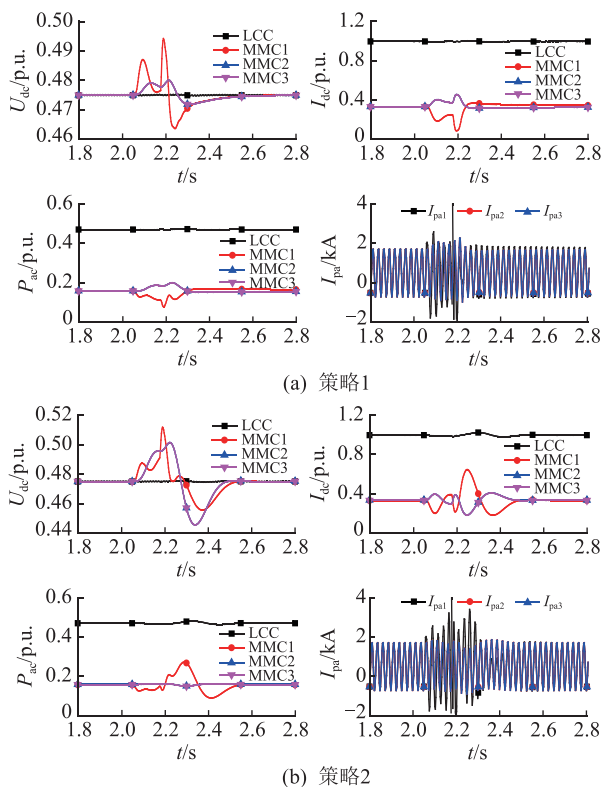


图 11 MMC1 交流系统故障响应特性

Fig.11 Response to MMC1 AC fault

消纳,MMC1 电压波动的最大幅度为 0.495 p.u.。如图 11(b)所示,策略 2 由于 MMC2 和 MMC3 定功率,其指令值在故障期间保持不变,故盈余功率难以消纳,从而 MMC1 电压波动的最大幅度为 0.51 p.u., MMC2 和 MMC3 电压波动的最大幅度为 0.50 p.u.。如图 11(c)所示,策略 3 的 3 台 MMC 均参与电压-功率调节,但是 3 台 MMC 直流侧直接并联,无法找到一个平衡点,其直流电流和直流电压均长时间振荡。如图 11(e)所示,策略 5 的 MMC1 电压波动的最大幅度为 0.52 p.u.,MMC2 和 MMC3 电压波动最大幅度为 0.51 p.u.,MMC 直流电流振荡时间长,从而影响 LCC 的功率输送。

3.5 MMC1 紧急闭锁退出

$t=2.0$ s 时,MMC1 紧急闭锁,15 ms 以后断开

MMC1 直流侧的直流开关。策略 2 的通信延时为 3 ms。仿真结果如图 12 所示。

如图 12(a) 所示,策略 1 健全 MMC 的直流电流和输送功率可以平滑过渡到新的稳态运行点。如图 12(b) 所示,策略 2 由于 MMC2 需要依赖阀组间通信改变功率指令值,健全 MMC 的直流电流发生小幅振荡后过渡至新的稳态运行点,需要依赖阀组

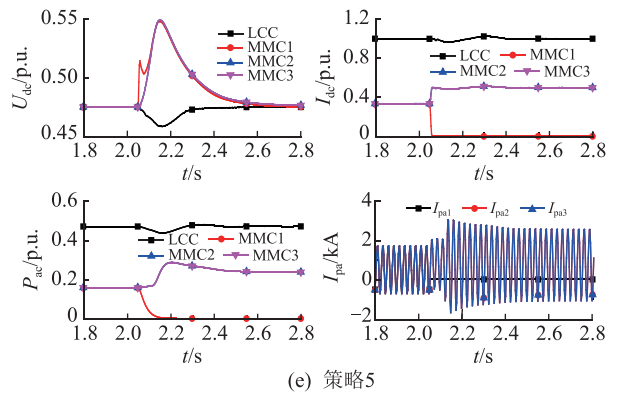
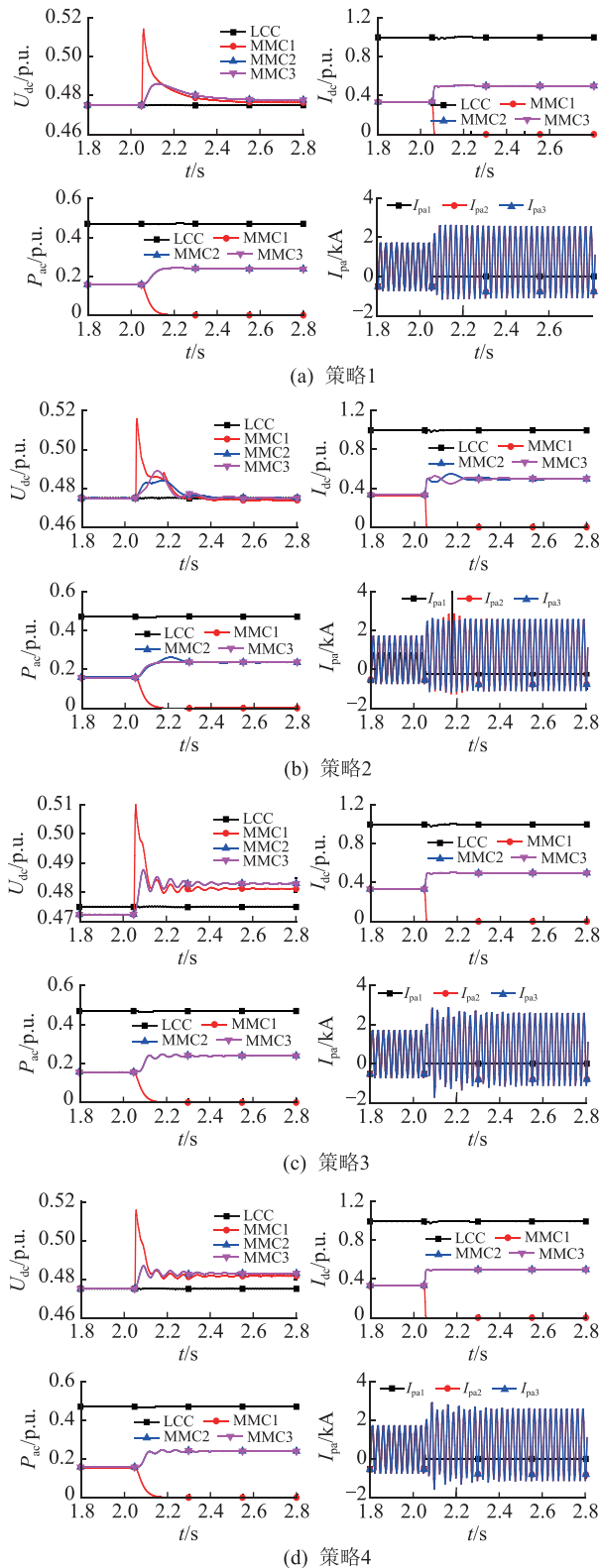


图 12 MMC1 紧急闭锁退出响应特性

Fig.12 Response to MMC1 shutdown and exit

间通信。如图 12(c) 和(d) 所示,策略 3 和策略 4 依赖 MMC2 和 MMC3 的电压下垂控制,健全 MMC 的直流电压衰减振荡至稳态运行点。如图 12(e) 所示,策略 5 健全 MMC 电压波动的最大幅度为 0.55 p.u.,使 LCC 直流电压降低,LCC 输送的有功功率短时减小。

3.6 仿真结果总结

综合 3.1—3.5 节仿真结果,策略 1 遭受各种故障均能有效穿越,直流电压、直流电流和有功功率波动最小;策略 2、4 和 5 在遭受直流线路故障时,均发生功率倒转,其中策略 2 倒转的功率最大,超过稳态运行输送功率的 2 倍,需要在定电压站 MMC 直流入口配置大功率二极管或者额外的控制措施,在主控站 MMC1 退出运行时,需要依赖阀组件通信;策略 3 遭受送端或受端 LCC 交流侧故障及直流线路故障时,其响应特性类似于策略 1,但在 MMC 交流侧发生故障或 MMC 退出运行时,MMC 直流侧电压会发生振荡。

4 结论

文中对受端 MMC 阀组 5 种潜在的功率、直流电压协调控制策略的适用性进行了分析。然后,在 PSCAD/EMTDC 中,对上述 5 种策略遭受不同故障的响应特性分别进行了仿真。最后,基于仿真结果,对上述 5 种协调控制策略的适用性进行了对比分析。

综合仿真结果:在送端送出容量较大时,采用策略 1,提高特高压混合级联多端直流系统的交、直流故障穿越能力,增强受端交流电网的安全稳定运行能力;送端送出容量较小时,采用策略 2 或者策略 5,MMC2 或者 MMC3 转为整流模式,优先保证向重点区域负荷供电,或用于交流输电通道的功率调节,提升潮流的多向疏散性。由于受端 3 台 MMC

直流侧直接并联,策略3和策略4的功率-电压下垂控制在MMC直流侧功率变化时,3台MMC直流电压的也跟随变化,不利于MMC间的功率和电流的均衡分配,也不利于高压LCC和低压MMC的电压平衡,因此策略3和策略4不适用于文中所述特高压混合级联多端直流系统。

本文得到国家电网有限公司华东分部科技项目“混合级联多端特高压直流馈入受端电网仿真和运行控制关键技术(机电暂态仿真和运行控制)”资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
XU Zheng. Dynamic behavior analysis of AC and DC power system[M]. Beijing:China Machine Press,2004.

[2] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京:电力工业出版社,1982.
DC Transmission Research Group of Zhejiang University Power Generation Teaching and Research Group. DC transmission [M]. Beijing:Electric Power Industry Press,1982.

[3] 赵畹君. 高压直流输电工程技术(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
ZHAO Wanjun. HVDC engineering technology (2nd edition) [M]. Beijing:China Electric Power Press,2011.

[4] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
XU Zheng. Modular multilevel converter based high voltage direct current transmission system [M]. Beijing:China Machine Press,2014.

[5] 宋金钊,李永丽,曾亮,等. 高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力系统自动化,2020,44(22):2-13.
SONG Jinzhao,LI Yongli,ZENG Liang,et al. Review on commutation failure of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(22):2-13.

[6] 黄弘扬,徐政,林晞. 基于故障限流器的直流多馈入受端系统动态分区技术[J]. 中国电机工程学报,2012,32(19):58-64,186.
HUANG Hongyang,XU Zheng,LIN Xi. Fault current limiters based dynamic segmentation technique for multi-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(19):58-64,186.

[7] 徐政,唐庚,黄弘扬,等. 消解多直流馈入问题的两种新技术[J]. 南方电网技术,2013,7(1):6-14.
XU Zheng,TANG Geng,HUANG Hongyang,et al. Two new technologies for eliminating the problems with multiple HVDC infeeds[J]. Southern Power System Technology,2013,7(1):6-14.

[8] 颜新洋,么莉,张炳达,等. 采用模块组多样性等效的模块化多电平换流器实时仿真[J]. 电力系统自动化,2021,45(12):142-150.
YAN Xinyang,YAO Li,ZHANG Bingda,et al. Real-time simu-

lation of modular multilevel converter based on diversity equivalent of module group [J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(12):142-150.

[9] 李兴源,曾琦,王渝红,等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. 高电压技术,2016,42(10):3025-3037.
LI Xingyuan,ZENG Qi,WANG Yuhong,et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system [J]. High Voltage Engineering,2016,42(10):3025-3037.

[10] 饶宏,洪潮,周保荣,等. 乌东德特高压多端直流工程受端采用柔性直流对多直流集中馈入问题的改善作用研究[J]. 南方电网技术,2017,11(3):1-5.
RAO Hong,HONG Chao,ZHOU Baorong,et al. Study on improvement of VSC-HVDC at inverter side of wudongde multi-terminal UHVDC for the problem of centralized multi-infeed HVDC[J]. Southern Power System Technology,2017,11(3):1-5.

[11] 李晓栋,徐政,胡四全,等. 3种混合直流输电系统的交流故障特性对比[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):228-235.
LI Xiaodong,XU Zheng,HU Siqian,et al. Comparison of AC fault characteristics among three types of hybrid HVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(9):228-235.

[12] 赵成勇,郭春义,刘文静. 混合直流输电[M]. 北京:科学出版社,2014.
ZHAO Chengyong, GUO Chunyi, LIU Wenjing. Hybrid high voltage direct current transmission system [M]. Beijing: Science Press,2014.

[13] 黄慧,吴雪莲,楼伯良,等. 调相机参与多直流馈入受端电网紧急控制策略研究[J]. 浙江电力,2020,39(8):20-25.
HUANG Hui,WU Xuelian,LOU Boliang,et al. Research on emergency control strategy of synchronous condenser in receiving-end grid with multiple DC infeed [J]. Zhejiang Electric Power,2020,39(8):20-25.

[14] 唐庚,徐政,薛英林. LCC-MMC混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报,2013,28(10):301-310.
TANG Geng,XU Zheng,XUE Yinglin. A LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(10):301-310.

[15] 徐雨哲,徐政,张哲任,等. 基于LCC和混合型MMC的混合直流输电系统控制策略[J]. 广东电力,2018,31(9):13-25.
XU Yuzhe,XU Zheng,ZHANG Zheren,et al. Control strategy for hybrid HVDC transmission system based on LCC and hybrid MMC[J]. Guangdong Electric Power,2018,31(9):13-25.

[16] 许烽,徐政. 基于LCC和FHMMC的混合型直流输电系统[J]. 高电压技术,2014,40(8):2520-2530.
XU Feng,XU Zheng. Hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC[J]. High Voltage Engineering,2014,40(8):2520-2530.

[17] 李乃一,陈俊,任广振,等. 一起柔性直流输电电缆双极短路故障分析[J]. 浙江电力,2020,39(10):28-35.
LI Naiyi,CHEN Jun,REN Guangzhen,et al. Analysis of a bi-

- polar short circuit fault of VSC-HVDC transmission cables[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(10): 28-35.
- [18] 徐政, 王世佳, 张哲任, 等. LCC-MMC 混合级联型直流输电系统受端接线和控制方式[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 115-122.
- XU Zheng, WANG Shijia, ZHANG Zheren, et al. Inverter station connection modes and control strategies of LCC-MMC hybrid HVDC systems[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 115-122.
- [19] 许冬, 李探, 梅念, 等. VSC 与 LCC 混合级联直流输电系统暂态电流抑制方法[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 166-171.
- XU Dong, LI Tan, MEI Nian, et al. Transient current suppression method for VSC and LCC cascaded hybrid HVDC system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 166-171.
- [20] 徐政, 张哲任, 刘高任. 柔性直流输电网的电压控制原理研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 54-59.
- XU Zheng, ZHANG Zheren, LIU Gaoren. Research on voltage control principle of flexible DC transmission power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 54-59.
- [21] 徐晓颖, 吴继平, 滕贤亮, 等. 带频率-电压死区的 VSC-HVDC 系统一次调频控制策略[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 8-14.
- XU Xiaoying, WU Jiping, TENG Xianliang, et al. Primary frequency modulation control strategy for VSC-HVDC system with frequency-voltage dead zone[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 8-14.

作者简介:



胡宏

胡宏(1970), 硕士, 高级工程师, 从事大电网运行控制和仿真计算相关工作(E-mail: sdu_lxd@126.com);

陈浩(1984), 硕士, 高级工程师, 从事大电网运行控制和管理相关工作;

丁浩寅(1986), 硕士, 高级工程师, 从事大电网运行控制和管理相关工作。

Coordinated control strategy for hybrid cascaded UHVDC system

HU Hong¹, CHEN Hao¹, DING Haoyin¹, LI Xiaodong², WANG Guoteng², XU Zheng²

(1. State Grid East China Electric Power Control Center, Shanghai 200120, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The hybrid cascaded ultra-high voltage direct current (UHVDC) system of line-commutated converter (LCC) and modular multilevel converter (MMC) in series at receiving end provides a more economical, flexible and fast transmission mode for UHVDC transmission. Based on the existing coordinated control strategy of DC power grid, the coordinated control strategy among MMC valve groups is analyzed and studied, and five coordinated control strategies are considered. Then, with PSCAD/EMTDC, the response characteristics of the above five strategies subjected to different faults are simulated respectively, including sending-end AC fault, DC line fault, receiving-end LCC AC fault, receiving-end MMC1 AC fault and MMC1 immediately shutdown and exit. Finally, based on the simulation results, the applicability of the above five coordinated control strategies is compared and analyzed. The simulation results show that strategy 1 and strategy 3 ride through effectively under various faults. Strategies 2, 4, and 5 suffer from different degrees of power reversal under DC line fault, and the measures should be taken to restrain the power reversal.

Keywords: line-commutated converter (LCC); modular multilevel converter (MCC); coordinated control; master-slave control; DC voltage droop control

(编辑 钱悦)