3种混合直流输电系统的交流故障特性对比

李晓栋¹,徐 政¹,胡四全²,张哲任¹,韩 坤²,王帅卿² (1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 许继集团有限公司,河南 许昌 461000)

摘要:综合电网换相换流器(LCC)和模块化多电平换流器(MMC)的优点,并针对我国西电东送的实际场景, 对如下3种目前比较有应用价值的混合直流输电系统方案进行研究:方案1的送端采用LCC,受端采用半桥 子模块型MMC串联二极管阀;方案2的送端采用LCC,受端采用全桥子模块与半桥子模块构成的子模块混合 型MMC;方案3的送端采用LCC,受端采用LCC和半桥子模块型MMC构成的串联混合型换流器。首先,分别 介绍了3种混合直流输电系统的拓扑结构、数学模型及控制方式;然后,在PSCAD/EMTDC中搭建了3种混 合直流输电系统,对3种混合直流系统在送端交流系统故障和受端交流系统故障情景下的响应特性进行对 比分析;最后,基于仿真结果总结了每种拓扑结构的优劣势。仿真结果表明,在送端交流系统故障的情景下, 方案1可能会出现功率中断;在受端交流系统故障的情景下,方案1的故障响应特性要优于其他2种方案。 关键词:混合直流输电系统;电网换相换流器;模块化多电平换流器;交流故障;故障特性

中图分类号:TM 721.3

文献标志码:A

DOI:10.16081 / j.epae.201909051

0 引言

相比于高压交流输电,高压直流输电HVDC (High Voltage Direct Current)因具有输电线路造价 低、有功功率调节快速灵活、可实现2个电网的非同 步联网以及不存在交流系统稳定性问题等优势,已 成为解决我国西电东送问题的主要途径^[1-2]。

传统的基于电网换相换流器的高压直流输电 (LCC-HVDC)系统具有造价低、损耗小、可靠性高、 技术成熟等优点,目前已被广泛应用在海底电缆送 电、远距离大容量输电、异步电网互联等场合^[34]。 但是,LCC-HVDC存在逆变站容易发生换相失败、运 行过程需要消耗大量无功、无法向弱交流系统或无 源网络送电等缺点,限制了其进一步的发展^[54]。

近年来,随着电力电子技术的发展,基于模块化 多电平换流器 MMC(Modular Multilevel Converter) 的柔性直流输电 VSC-HVDC(Voltage Sourced Converter based HVDC)技术因其具有可独立控制有功 功率和无功功率、不存在换相失败、开关频率低、开 关损耗小、不需要无功补偿和滤波装置、可向无源系 统供电等优点而愈发受到学术界与工业界的青睐, 并且已逐步具备应用在远距离大容量输电场合的潜 力^[7-10]。相比于传统的直流输电,目前基于半桥子模 块 HBSM(Half Bridge Sub-Module)的常规柔性直流 输电技术仍存在运行损耗较大、投资成本高、技术成

收稿日期:2019-02-27;修回日期:2019-08-14

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(特高压混合级 联多端直流换流阀关键技术研究)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(Research on Key Technology of UHVDC Hybrid Cascaded Multi-terminal Converter Valve) 熟度低、无法实现直流故障自清除等缺陷,制约了其 在远距离大容量输电场合的应用。

为了充分发挥电网换相换流器 LCC(Line Commutated Converter)和 MMC 各自的优势,目前国内外 很多学者提出了多种基于 LCC 和 MMC(LCC-MMC) 的混合直流输电系统。此类混合系统在送端使用 LCC,能够充分发挥其损耗低和技术成熟度高的优 势;在受端采用具有直流故障自清除能力的改进型 MMC,能够发挥 MMC 不会发生换相失败、独立控制 有功功率和无功功率等优势^[11-15]。

针对我国西电东送的实际场景,目前比较具有 应用价值的混合直流系统有如下3种方案。

方案1:文献[16-18]提出了一种LCC-D-MMC混 合直流输电系统结构,该结构的送端采用LCC,受端 采用HBSM型MMC,可以解决受端换相失败的问 题,并利用串联在MMC直流侧出口处的大功率二极 管阀组清除直流侧故障。虽然这种方案中的MMC 只能运行在逆变状态,但是由于西电东送场合一般 不考虑潮流反转,因此该方案仍然具有较高的可 行性。

方案 2: 文献[19-21]提出了一种 LCC-FHMMC 混合直流输电系统结构,该结构的送端采用 LCC,受 端采用全桥子模块 FBSM(Full Bridge Sub-Module) 和 HBSM 混合构成的混合型 MMC(FHMMC),相比 于受端采用 FBSM 型 MMC,其损耗小且更经济。该 结构既可以解决逆变侧的换相失败问题,也发挥了 FBSM 的直流故障自清除能力^[22]。与方案1相比,该 方案由于引入了 FBSM,会造成直流系统损耗和造价 的升高。

方案3:文献[23-24]提出了一种LCC-MMC混合 级联型混合直流输电系统结构,该结构的送端采用

LCC,受端采用LCC和HBSM型MMC串联构成的混 合型换流器,有机结合了LCC和MMC两者的优点, 既充分发挥了MMC的无换相失败、有功功率与无功 功率独立控制和输出波形优良的特性,也充分利用 了LCC可以主动清除直流侧故障的特性。与方案1 和方案2相比,该方案具有损耗低以及投资成本低 等优势,但是由于存在LCC,受端依然存在换相失败 的问题。

本文基于上述3种混合直流输电系统,简单介 绍了各自的拓扑结构、数学模型和控制方式;然后在 PSCAD/EMTDC中分别搭建模型并进行仿真,具体 故障情景包括送端交流系统发生三相短路故障、受 端集中接入和分散接入方式下的交流系统发生三相 短路故障,对3种方案的交流故障特性进行详细对 比分析;最后,基于仿真结果,对交流故障下每种拓 扑结构的系统响应特性进行对比分析。

1 混合直流输电系统原理简介

1.1 系统拓扑结构

以单极系统为例,3种混合直流输电系统的基本拓扑结构如图1所示^[17,20,23],送端采用LCC,受端的MMCB表示采用多个相同的MMC单元通过串并联构成的组合式换流器,用以匹配直流系统的电压和功率等级。对于目前主流的特高压直流输电系统而言,方案1和方案2的受端采用2(串联)×3(并联)个MMC单元,如图2所示;方案3的受端低压阀组中需要并联3个MMC单元,如图2(c)所示。

MMC单元的拓扑结构如图 3(a) 所示,采用三相 六桥臂结构,每个桥臂串联一个桥臂电抗器 L_0 以抑 制环流和故障电流上升率。方案 2 的 FHMMC 的桥 臂结构如图 3(b) 所示,由 N 个 HBSM 和 M 个 FBSM 级联而成;方案 1 和方案 3 的 MMC 的桥臂由 N+M 个 HBSM 级联而成。图中, U_c 为子模块电容电压。

1.2 系统数学模型

1.2.1 LCC的数学模型

混合直流输电系统的送端采用12脉动换流器, 其数学模型为^[1-2]:

$$U_{\rm der} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_{\rm vr} \cos \alpha - \frac{6}{\pi} X_{\rm rl} I_{\rm de}$$
(1)

$$P_{\perp} = U_{\perp} I_{\perp}$$
(2)

$$O = P \tan \phi \tag{3}$$

$$\cos\phi = \frac{1}{2} \left[\cos\alpha + \cos(\alpha + \mu) \right]$$
(4)

其中, U_{vr} 为送端换流器阀侧空载线电压有效值; U_{der} 为送端直流电压; I_{de} 为直流电流; P_{der} 为送端直流功率; Q_{er} 为换流器吸收的无功功率; X_{rl} 为换相电抗; α 为触发角;cos ϕ 为功率因数; μ 为换相重叠角。

正常运行时,送端LCC定直流电流 Ide、直流电压



 (a) MMCB
 (b) 高压阀组和
 (c) 高压/低压阀组

 低压阀组
 MMCB 结构





U_{der} 由受端换流站决定。当送端交流系统因发生故障导致交流电压U_{vr} 跌落时,送端LCC的定电流控制 需要通过减小α以维持直流电流不变。当α减小至 最小值5°时,LCC将失去触发角调节能力,输出的 直流电压由送端交流电压决定,不再由受端换流站 控制。发生故障后,LCC直流侧电压U'_{der}可表示为:

$$U'_{\rm der} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U'_{\rm vr} \cos 5^{\circ} - \frac{6}{\pi} X_{\rm rl} I'_{\rm de}$$
(5)

其中,U'_{vr}、I'_{de}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。

受端LCC的数学模型与之类似,此处不再赘述。



图3 MMC单元的拓扑结构示意图



1.2.2 MMC的数学模型

230

稳态运行时,MMC;单元的交流侧和直流侧之间 的功率传输、电压和电流存在如下关系^[7]:

$$\begin{cases} P_{i} + jQ_{i} = \sqrt{3} U_{aci} I_{aci} (\cos \varphi_{i} + j \sin \varphi_{i}) \\ P_{dci} = U_{dci} I_{dci} \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{pm} = \frac{1}{3} I_{dci} + \frac{1}{2} i_{m} + i_{circm} \\ i_{nm} = \frac{1}{3} I_{dci} - \frac{1}{2} i_{m} + i_{circm} \end{cases}$$

$$(7)$$

其中, P_i 、 Q_i 分别为MMC_i单元注入交流系统的有功 功率、无功功率; φ_i 为MMC_i单元的功率因数角; P_{dei} 为受端直流功率; U_{aei} 为MMC_i单元交流侧线电压有 效值; U_{dei} 为MMC_i单元直流侧正负极之间的直流电 压; I_{aei} 为MMC_i单元交流侧线电流有效值; I_{dei} 为 MMC_i单元输出的直流电流; i_m 为m相阀侧交流电 流; i_{pm} 、 i_{nm} 、 i_{cirem} 分别为m相的上桥臂电流、下桥臂电 流、环流; $m \in \{a, b, c\}$ 表示三相交流系统中的某 一相。

MMC 三相对称,下文将以 a 相为例分析 HBSM 型 MMC 和 FHMMC 的直流电压运行范围。

MMC 阀侧 a 相电压 u_{va}为:

$$u_{\rm va} = U_{\rm m} \cos(\omega t) \tag{8}$$

其中,*U*_m为换流器阀侧相电压幅值;ω为交流系统的 角频率。MMC的输出电压调制比*M*₁为^[7]:

$$M_{\rm U} = 2 \frac{U_{\rm m}}{U_{\rm deN}} \tag{9}$$

其中, U_{deN} 为MMC输出的额定直流电压。当MMC稳态运行时, a相上桥臂电压 u_{pa} 、下桥臂电压 u_{ma} 满足式(10)。

$$\begin{cases} u_{\rm pa} = \frac{U_{\rm dc}}{2} - u_{\rm va} \\ u_{\rm na} = \frac{U_{\rm dc}}{2} + u_{\rm va} \end{cases}$$
(10)

其中, U_{de} 为MMC输出的直流电压。不考虑冗余,子 模块电容的额定电压 U_{cx} 为:

$$U_{\rm CN} = \frac{U_{\rm deN}}{N_{\rm sm}} \tag{11}$$

$$K_{\rm U} = \frac{U_{\rm dc}}{U_{\rm deN}} \tag{12}$$

根据式(8)—(12),可得:

$$\begin{cases}
u_{pa} = \frac{K_{U} - M_{U}\cos(\omega t)}{2} N_{sm} U_{CN} \\
u_{na} = \frac{K_{U} + M_{U}\cos(\omega t)}{2} N_{sm} U_{CN}
\end{cases}$$
(13)

HBSM 能够输出 U_c 、0这2种电平。忽略子模块 电容之间的电压差,则HBSM型MMC的桥臂输出的 电压范围为:

$$\begin{cases} 0 \leq u_{\rm pa} \leq N_{\rm sm} U_{\rm CN} \\ 0 \leq u_{\rm na} \leq N_{\rm sm} U_{\rm CN} \end{cases}$$
(14)

根据式(13)和式(14),可得 HBSM 型 MMC 的直 流电压运行范围为:

$$M_{\rm u} \leq K_{\rm u} \leq 2 - M_{\rm u} \tag{15}$$

FBSM能够输出 U_c 、0、- U_c 这3种电平。忽略子 模块电容之间的电压差,则FHMMC的桥臂输出的 电压范围为:

其中,*N*_{FB}为桥臂中FBSM的个数。根据式(13)和式 (16),可得FHMMC的直流电压运行范围为:

$$M_{\rm U} - 2K_{\rm FB} \le K_{\rm U} \le 2 - M_{\rm U} \tag{17}$$

其中,K_{FB}为桥臂中FBSM的占比。

在实际工程中, MMC 的输出电压调制比 $M_{\rm u}$ 一般为 0.85, FHMMC 的桥臂中 FBSM 的占比 $K_{\rm FB}$ 一般为 0.8。根据式(15)和式(17), HBSM 型 MMC 的直流电 压运行范围为 $[0.85U_{\rm den}, 1.15U_{\rm den}]$, FHMMC 的直流

电压运行范围为[-0.75U_{deN},1.15U_{deN}]。因此,HBSM 型 MMC 不具有降直流电压运行的能力,FHMMC 具 有降直流电压运行的能力。

1.2.3 混合直流输电系统

3种方案的送端均采用双12脉动换流器串联, 其直流电压和功率可以表示为单12脉动换流器的2 倍。方案1和方案2的受端通常采用2(串联)×3(并 联)个相同的MMC单元,受端的有功功率和无功功 率可以表示为6个MMC单元的叠加。方案3的受端 由LCC和MMCB串联构成,受端的有功功率和无功 功率分别为LCC和MMC有功功率和无功功率的叠 加,并分别满足12脉动换流器、MMC的数学模型。

送端交流系统发生故障后,当送端交流电压跌 落到一定的程度后,送端直流电压会下降,受端需要 主动降低直流电压以维持有功续传。由于HBSM型 MMC不具备降直流电压运行的能力,方案1的直流 电流会中断;FHMMC和LCC都具备降直流电压运 行的能力,故方案2和方案3的直流电流不会中断。

受端交流系统发生故障后,受端需要主动降低 直流电压以减少能量吸收,避免受端换流器过电压。 由于 HBSM 型 MMC 不具备降直流电压运行的能力, 方案 3 的受端 LCC 会换相失败,故方案 1 和方案 3 的 MMC 需要承受较高水平的过电压;FHMMC 具备降 直流电压运行的能力,故方案 2 的 MMC 承受过电压 的水平更低。

1.3 系统控制策略

通常情况下,3种方案的整流侧LCC采用定直 流电流/定直流功率控制,逆变侧换流器采用定直 流电压控制。方案1采用的就是该控制策略^[25]。

针对送端交流系统的严重故障,对于方案2而 言,其受端子模块FHMMC具有降直流电压运行的 能力,因此整流侧LCC采用定直流电流/定直流功 率控制,逆变侧MMC采用定直流电压控制+后备定 直流电流控制^[30-21];对于方案3而言,考虑到逆变侧 LCC具有降直流电压运行的能力,因此整流侧LCC 采用定直流电流/定直流功率控制,逆变侧LCC采 用定直流电压控制+后备定直流电流控制,逆变侧 MMC采用定直流电压控制^[23]。

针对受端交流系统的严重故障,对于方案2而 言,利用FHMMC的降直流电压运行能力,逆变侧 MMC采用后备降直流电压的附加控制,减小送端直 流功率,降低受端MMC承受的过电压;对于方案3 而言,逆变侧LCC在故障期间会发生换相失败,并且 HBSM型MMC不具备降压运行能力,因此无法采用 后备降压控制。

综上所述,3种混合直流输电系统的控制方式如表1所示,其中,方案3中换流器间的协调控制采用的是文献[23]的控制策略。受端并联MMC单元

均采用定直流电压控制,该控制方式具有良好的均 流特性,能够避免交流系统发生故障后并联 MMC 的 电流振荡问题^[23]。

表1 3种混合直流输电系统的控制方式 Table 1 Control modes of three hybrid HVDC systems

方案	控制目标	控制方式		
		LCC	MMC	
1	送端	定直流电流		
1	受端	—	定直流电压	
	送端	定直流电流	—	
2	受端	定端 _ 定1	定直流电压+后备定直流 电流+后备降直流电压	
3	送端	定直流电流	—	
	受端	定直流电压+ 后备定直流电流	定直流电压	

2 测试系统介绍

在 PSCAD / EMTDC 中搭建的 3 种混合直流输 电系统均为两端单极结构, 拓扑结构如图 1 所示。 整流侧均采用双 12 脉动换流器串联构成, 逆变侧的 高 / 低压阀组 MMCB 均采用 3 个相同的 MMC 单元 并联构成, 拓扑结构如图 2 所示。3 种方案采用的控 制方式如表 1 所示。详细的系统参数如表 2 所示。3 种方案的换流阀控制器参数如表 3 、表 4 所示^[25] (表 3

表2 系统主回路参数

Table 2 Parameters for main loop of system

	会粉		数值			
	参奴	方案1	方案2	方案3		
	额定容量 / MW	5 0 0 0	5000	5000		
#*	额定直流电压 / kV	800	800	800		
	额定直流电流 / kA	6.25	6.25	6.25		
29 XX	交流电压有效值 / kV	525	525	525		
	平波电抗器电感 / mH	150	5 525 525) 150 150 3 833 833) 40 200 160 — 8 13.8 13.8 5 36.5 36.5 Y, Y_0/Y , Y_0/Y , $\Delta Y_0/\Delta Y_0/\Delta$ 525 kV/ 175 kV V/ 525 kV/ 175 kV 175 kV 175 kV 175 kV			
	额定容量 / MW	833	833	833		
MMC 会物	桥臂HBSM个数	200	40	200		
	桥臂FBSM个数	—	160			
沙奴	子模块电容 / μF	13.8	13.8	13.8		
	桥臂电感 / mH	36.5	36.5	36.5		
	绕组类型	$\begin{array}{c} \mathrm{Y}_{0}/\mathrm{Y}, \ \mathrm{Y}_{0}/\Delta \end{array}$	$\begin{array}{c} \mathrm{Y}_{0} / \mathrm{Y}, \\ \mathrm{Y}_{0} / \bigtriangleup \end{array}$	$\begin{array}{c} \mathbf{Y}_0 \ / \ \mathbf{Y}, \\ \mathbf{Y}_0 \ / \ \bigtriangleup \end{array}$		
LCC 联结 变压器 参数	变比	525 kV / 175 kV	525 kV / 175 kV	525 kV / 175 kV (送端), 525 kV / 162 kV (受端)		
	容量 / (MV・A)	1 500	1 500	1 500		
	短路阻抗 <i>u_k</i> /%	18	18	18		
	绕组类型	Y_0 / Δ	Y_0 / \triangle	Y_0 / Δ		
MMC 联结	变比	525 kV / 205 kV	525 kV / 205 kV	525 kV / 205 kV		
参数	容量 / (MV・A)	1 0 0 0	1 0 0 0	1 000		
_ ,,,,	短路阻抗 <i>u_k</i> /%	205 kV 205 kV 205 kV 1000 1000 1000 15 15 15	15			
直流 线路	线路长度 / km	2100	2100	2100		
参数	直流电阻/Ω	6.4	6.4	6.4		



表3 LCC换流站控制器参数

Table 3 Parameters of LCC converter station controller

控制器	控制器 参数	
	PI 控制器比例环节系数	10
	PI 控制器积分环节时间常数 / s	0.05
达 喻 正 且 流 由 流 妨 知 界	PI 控制器输出上限	3.054(175°)
电机压制和	PI 控制器输出下限	0.52(30°)
	直流电流参考值 I_{deref}	1
	PI 控制器比例环节系数	1.2
ᅑᄴᅉᆂᄽ	PI 控制器积分环节时间常数 / s	0.018
交 师 正 且 流 由 圧 妨 判 異	PI 控制器输出上限	1.57(90°)
电压压间和	PI 控制器输出下限	$0.4363(25^{\circ})$
	直流电压参考值 U _{dcref}	1

表4 MMC换流站控制器参数

Table 4 Parameters of MMC converter station controller

控制器	参数	数值
	锁相环 PI 控制器比例环节系数	100
凶侧电压对称 公县公留 B	锁相环 PI 控制器积分环节时间常数 / s	0.0045
万重万 <u></u> 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	一阶惯性环节比例系数	1
BATH-1	一阶惯性环节时间常数 / s	0.0045
阀侧电流对称 比例系数		1
分量分解一阶 惯性环节	时间常数/s	0.00045
	PI 控制器比例环节系数	10
ウナントア	PI 控制器积分环节时间常数 / s	0.01
正且沉电压 均則與	PI 控制器输出上限	1.2
ካተ በባ ተተ	PI 控制器输出下限	-1.2
	直流电压参考值	0.925
	PI 控制器比例环节系数	0.21
白玉市市家	PI 控制器积分环节时间常数 / s	0.029
定儿切切伞 控制器	PI 控制器输出上限	1.2
11111	PI 控制器输出下限	-1.2
	无功功率参考值	0
由环由运	PI 控制器比例环节系数	1.1
控制器	PI 控制器积分环节时间常数 / s	0.5
111 641 444	等效联结电抗	0.2653

中的直流电流参考值 *I*_{deref}、直流电压参考值 *U*_{deref} 以及表4中的直流电压参考值、无功功率参考值、等效联结电抗均为标幺值)。

3 送端交流系统故障

本节对送端交流系统故障响应特性进行对比分析。3种方案的送端均接入一个相同的交流系统, 其短路比为10。1.5 s时,在图4的母线*B*₁处施加持续0.1 s的三相短路故障,母线*B*₁的电压跌至50%。 仿真结果如附录中图A1所示(图中的直流电压、直 流电流和有功功率均为标幺值,其基准值分别为 800 kV、6.25 kA和5000 MW,后同)。

仿真结果表明,送端交流系统发生故障后,3种 方案下的送端直流电压均大幅度下降。故障期间, 方案1因没有附加任何控制使受端直流电压高于送 端直流电压,导致直流电流中断,功率也相应中断; 方案2的受端通过后备定直流电流控制器主动降低 故障期间的直流电压,方案3的受端通过后备定直



图4 送端交流系统故障示意图



流电流控制器主动降低LCC直流电压,如附录中图 A1(a)—(c)所示,因此,方案2和方案3的直流电流 不断流,有功功率能持续传输。

综上所述,方案2和方案3在送端交流系统发生 严重故障期间依然可以保持功率传输不中断,对受 端交流系统的冲击更小。

4 受端交流系统故障

本节对受端不同接入方式下的交流系统故障响 应特性进行对比分析。受端接入交流系统的形式如 图5所示,分为集中接入和分散接入2种方式(2种 方式的区别在于高/低压阀组是否接入同一个交流 系统)。



图 5 受端接入交流系统的方式



4.1 受端集中接入交流系统

集中接入方式下,3种方案的受端均接入一个 相同的交流系统,如图5(a)和5(c)所示。1.5 s时, 在图5(a)的母线 B_{II}和图5(c)的母线 B_{I4}处分别施加 持续0.1 s的三相短路故障,受端交流母线电压跌落 至50%。当受端短路比为6时的仿真结果如附录中 图 A2 所示,当受端短路比为12时的仿真结果如附 录中图 A3 所示。 仿真结果表明,在故障期间,3种方案的受端功 率传输均受阻,方案1和方案3的受端MMC均承受 超过1.3倍额定电压的过电压。方案1的受端MMC 功率输送被抑制,累计的多余能量导致直流电压上 升,进而导致送端运行到定α_{min}状态,直流电流下降 至较低水平;方案2的受端主动降低直流电压,进而 减小故障期间受端吸收的能量,直流电流波动较小; 方案3的受端LCC发生换相失败导致其功率传输中 断,交流电压降低也抑制了MMC的功率输送,使得 MMC两端的电压升高,直流电流的波动较大。相比 于受端短路比为6时的故障响应特性,当受端短路 比为12时,方案1和方案3的MMC承受的过电压水 平更低,方案2的MMC直流电压降落幅度更小,3种 方案的有功功率降低幅度更小。

综上所述,当受端的交流系统采用集中接入方 式时,受端交流系统故障会影响整个逆变站的运行。 在故障期间,方案1和方案3的受端MMC会出现较 大的过电压水平,因此需要耐压能力强的IGBT或者 额外的保护装置以有效保护MMC;方案2的安全稳 定性更高。

4.2 受端分散接入交流系统

分散接入方式下,3种方案的受端高/低压阀 组均接入一个相同的交流系统,如图5(b)和5(d)所 示。下文分别对高压阀组、低压阀组的受端交流系 统故障响应特性进行分析。

4.2.1 高压阀组受端交流系统故障响应特性

1.5 s时,在图 5(b)的母线 B₁₂和图 5(d)的母线 B₁₅处分别施加持续 0.1 s的三相短路故障,受端母线 B₁₂和 B₁₅的电压跌至 50%。当受端短路比为6时的 仿真结果如附录中图 A4 所示,当受端短路比为12 时的仿真结果如附录中图 A5 所示。

仿真结果表明,受端短路比为6和12时的故障 响应特性基本一致。在故障期间,3种方案下低压 阀组的功率传输仅受到微弱的影响。方案1受端高 压阀组的功率输送被抑制,累计的多余能量导致直 流电压上升,进而导致直流电流下降至较低水平;方 案2受端的高压阀组在故障期间主动降低直流电 压,减小故障期间受端高压阀组吸收的能量,直流电 流波动较小;方案3的受端LCC发生换相失败,直流 电流会有短暂的上升过程,但是振幅不大,发生故障 的瞬间受端 MMC承受超过1.3 倍额定电压的过 电压。

4.2.2 低压阀组受端交流系统故障响应特性

假设受端短路比为12。1.5s时,在图5(b)的母 线 B_{13} 和图5(d)的母线 B_{16} 处分别施加持续0.1s的三 相短路故障,受端母线 B_{12} 和 B_{15} 的电压跌至50%。

仿真结果如附录中图A6所示。

仿真结果表明,方案1和方案2的低压阀组交流 故障响应特性和高压阀组交流故障响应特性基本一 致。在故障期间,方案3的低压阀组交流电压降低 导致 MMC 功率输送能力被抑制,MMC 两端的电压 上升,造成直流电流减小;受端的 LCC 受到较小的 影响。

相比于集中接入方式,分散接入方式下3种方 案在故障期间的有功功率传输能力、电压变化幅度 和直流电流波动均有明显的改善,缩小了故障的影 响范围;方案1的MMC依然承受较高的电压;方案3 由于受端LCC发生换相失败,相比于方案1和方案 2,其功率传输能力受到的影响较大。

5 结论

(1)在送端交流系统发生故障期间,3种方案的送端直流电压均大幅度下跌,但是方案2和方案3由 于受端采取了附加控制,依然可以维持功率传输。

(2)从交流故障对整个直流系统和交流系统的 冲击来看,分散接入方式比集中接入方式更优。相 比于集中接入方式,分散接入方式从物理上有效地 隔离了受端交流系统的影响范围,从而减小了受端 高/低压阀组之间或LCC与MMC之间的耦合影响, 对功率传输能力的影响更小,直流电流波动更小。

(3)对于方案1而言,受端交流系统集中接入和 分散接入方式下,交流系统发生故障期间由于功率 传输受限,MMC承受的直流过电压水平更高;对于 方案2和方案3而言,受端MMC所承受的直流过电 压水平更低。

(4)由于方案3的受端使用LCC,依然存在换相 失败问题。相比于方案1和方案2,方案3在故障期 间的功率输送能力更差,受端MMC承受超过1.3倍 额定电压的过电压。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

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,2004:4.
- [2]浙江大学发电教研组直流输电科研组. 直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社,1982:180-186,256-265.
- [3] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004:11-19.
- [4]赵成勇,郭春义,刘文静. 混合直流输电[M]. 北京:科学出版 社,2014:5-10.
- [5] 罗汉武,乐健,毛涛,等. 扎鲁特一青州 ±800 kV 特高压直流输 电工程运行特性分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(1): 53-59.

LUO Hanwu, LE Jian, MAO Tao, et al. Analysis of operation

characteristics of Zhalute-Qingzhou ± 800 kV UHVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):53-59.

- [6] 付蓉,孙万钱,汤奕,等.特高压直流分层接入方式下稳态特性 研究[J].电力自动化设备,2017,37(1):81-86.
 FU Rong,SUN Wanqian,TANG Yi,et al. Steady-state characteristics of UHVDC hierarchical connection mode[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):81-86.
- [7] 徐政,肖晃庆,张哲任,等.柔性直流输电系统[M].2版.北 京:机械工业出版社,2016:7-9.
- [8] 孔明,汤广福,贺之渊,等. 模块化多电平 HVDC 输电系统功率 运行区间的优化方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21): 45-52,192.

KONG Ming, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Optimization methods of operation region for modular multilevel converter based HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21):45-52, 192.

 [9] 缪惠宇,梅军,张宸宇,等.一种新型的n+1混合式模块化多电
 平换流器拓扑结构及其控制策略[J].电力自动化设备,2018, 38(3):88-95.

MIAO Huiyu, MEI Jun, ZHANG Chenyu, et al. A novel topology of n+1 hybrid modular multilevel converter and its control strategy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3):88-95.

- [10] 薛英林,徐政,张哲任,等.采用不同子模块的 MMC-HVDC 阀 损耗通用计算方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):20-29.
 XUE Yinglin, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. General method of valve loss calculation for MMC-HVDC with different submodules[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1):20-29.
- [11] 程启明,孙伟莎,程尹曼,等. 电网电压不平衡下 MMC的无源 控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):78-85.
 CHENG Qiming,SUN Weisha, CHENG Yinman, et al. Passive control strategy of MMC under unbalanced grid voltage [J].
 Electric Power Automation Equipment,2019,39(4):78-85.
- [12] 张帆,徐鹏,贾秀芳,等. 混联式直流电网的协调控制策略[J].
 电力自动化设备,2017,37(1):137-143.
 ZHANG Fan, XU Peng, JIA Xiufang, et al. Coordinated control strategy for hybrid HVDC grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):137-143.
- [13] 许烽,徐政,刘高任,等. 基于F-MMC和LCC的混合型三极直 流系统及其控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(10): 102-109.

XU Feng, XU Zheng, LIU Gaoren, et al. Hybrid tripole HVDC system based on F-MMC and LCC, and its control strategy [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):102-109.

[14] 赵文强,宣佳卓,陆翌,等.适用于常规直流改造的混合直流输 电系统主电路拓扑研究[J].电力自动化设备,2018,38(12): 186-193.

ZHAO Wenqiang, XUAN Jiazhuo, LU Yi, et al. Research on circuit topology of hybrid HVDC system suitable for refurbishing existing LCC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12):186-193.

[15] 孙栩,朱晋,刘文龙,等. 一种具有故障隔离能力的 MMC-HVDC 换流站子模块拓扑研究[J]. 电力自动化设备,2017,37 (3):120-125.

SUN Xu,ZHU Jin,LIU Wenlong, et al. Fault-isolated sub-module topology of MMC-HVDC converter station [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(3):120-125.

[16] 徐政, 唐庚, 薛英林. 一种混合双极直流输电系统:

201210431652.1[P]. 2012-11-02.

- [17] 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.
- [18] TANG G, XU Z. A LCC and MMC hybrid HVDC topology with DC line fault clearance capability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 62:419-428.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 孔明,汤广福,贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿 越控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(30):5343-5351.
 KONG Ming, TANG Guangfu, HE Zhiyuan. A DC fault ridethrough strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmission systems [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(30):5343-5351.
- [22] 和敬涵,黄威博,李海英,等.FBMMC直流故障穿越机理及故障清除策略[J].电力自动化设备,2017,37(10):1-7.
 HE Jinghan, HUANG Weibo, LI Haiying, et al. FBMMC DC fault ride-through mechanism and fault clearing strategy [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):1-7.
- [23] 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.
- [24] XU Zheng, WANG Shija, XIAO Huangqing. Hybrid high-voltage direct current topology with line commutated converter and modular multilevel converter in series connection suitable for bulk power overhead line transmission[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(12):2307-2317.
- [25] 张哲任,徐政,徐雨哲,等. 高压直流输电基本测试系统[J]. 广东电力,2018,31(9):2-12.
 ZHANG Zheren,XU Zheng,XU Yuzhe, et al. Basic test systems for HVDC[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 2-12.

作者简介:



李晓栋(1994—),男,河南卢氏人,博士 研究生,主要研究方向为直流输电与柔性交 流输电(E-mail:sdu_lxd@126.com);

徐 政(1962—),男,浙江海宁人,教 授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方 向为大规模交直流电力系统分析、直流输电 与柔性交流输电、电力谐波与电能质量等 (E-mail;xuzheng007@zju.edu.cn);

李晓栋

胡四全(1976—),男,河南潢川人,高级工程师,硕士,主 要从事电力电子产品的研发和直流系统设计方面的工作

(**E-mail**:husiquan_xj@126.com);

张哲任(1988—),男,浙江杭州人,工程师,博士,主要从 事柔性直流输电领域的研究工作(E-mail:zhangzheren@zju. edu.cn);

韩 坤(1983—),男,江苏徐州人,高级工程师,硕士,研究

方向为柔性直流输电系统分析与控制(E-mail:hk20031009@ 163.com);

王帅卿(1990—),男,河南禹州人,硕士,主要从事常规 直流输电换流阀、柔性直流输电换流阀的研发和工程应用工 作(**E-mail**:yucitongshi@126.com)。

Comparison of AC fault characteristics among three types of hybrid HVDC system

LI Xiaodong¹, XU Zheng¹, HU Siquan², ZHANG Zheren¹, HAN Kun², WANG Shuaiqing²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Considering the advantages of LCC (Line Commutated Converter) and MMC (Modular Multilevel Converter), and aiming at the actual scenario of China's West-East Power Transmission Project, the following three types of hybrid HVDC (High Voltage Direct Current) system scheme are studied, which are currently of great application value. In Scheme 1, the sending end adopts LCC and the receiving end adopts half-bridge sub-module MMC with series diode valve; in Scheme 2, the sending end adopts LCC and the receiving end adopts the hybrid MMC composed of full-bridge sub-modules and half-bridge sub-modules; in Scheme 3, the sending end adopts LCC and the receiving end adopts LCC and the receiving end adopts the sending end adopts LCC and the receiving end adopts the hybrid WMC in series. Firstly, the topological structure, mathematical model and control mode of three types of hybrid HVDC system are introduced respectively. Then, three types of hybrid HVDC system are built in PSCAD / EMTDC, and their response characteristics under fault scenarios of AC system at sending and receiving ends are compared and analyzed. Finally, the advantages and disadvantages of each topological structure are summarized based on the simulative results. Simulative results show that the power interruption may occur in Scheme 1 when fault occurs in the AC system at sending end, and the fault response characteristics of Scheme 1 are better than those of the other two schemes when fault occurs in the AC system at the receiving end.

Key words: hybrid HVDC system; LCC; MMC; AC fault; fault characteristic



图 A1 送端母线 B1 发生故障的响应特性

Fig.A1 Response characteristics of bus B_1 fault at sending end



图 A2 集中接入方式下受端交流故障响应特性(短路比为 6)

Fig.A2 Response characteristics of AC fault at receiving end under centralized access mode(short circuit ratio is 6)





Fig.A3 Response characteristics of AC fault at receiving end under centralized access mode(short circuit ratio is 12)





Fig.A4 Response characteristics of AC fault at receiving end under decentralized access mode(short circuit ratio is 6)



图 A5 分散接入方式下受端交流故障响应特性(短路比为 12)

Fig.A5 Response characteristics of AC fault at receiving end under decentralized access mode(short circuit ratio is 12)





Fig. A6 AC fault response characteristics of low-voltage valve group at receiving end under decentralized access mode