MMC-HVDC系统换流器桥臂短路故障暂态特性分析

张 芳1,杜雪靓1,陈 堃2

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;2. 国网湖北省电力有限公司 电力科学研究院,湖北 武汉 430077)

摘要:桥臂短路故障是模块化多电平换流器型高压直流输电(MMC-HVDC)系统中的严重故障。在换流器不闭锁和闭锁这2种情况下对桥臂短路故障的暂态特性进行分析:针对换流器不闭锁的情况,对两端换流器的桥臂电气量暂态特性进行较为全面的阐述,重点分析了桥臂短路电流的组成;针对换流器的闭锁情况,建立 了桥臂短路电流通路的电路模型,推导了桥臂短路电流的解析表达式,分析了系统交直流侧电压电流的动态 变化过程并给出了桥臂短路故障的保护配置方案。基于 PSCAD / EMTDC 搭建双端 MMC-HVDC 仿真模型, 仿真结果验证了理论分析的正确性和保护配置的有效性。对桥臂短路故障暂态特性进行分析可为 MMC-HVDC 系统换流器保护区的保护配置方案提供参考。

关键词:MMC-HVDC;故障分析;桥臂短路;换流器闭锁;暂态特性

中图分类号:TM 721.1;TM 46 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202004026

0 引言

模块化多电平换流器(MMC)作为一种开关频 率低、无换相失败问题且波形质量高的电压源型换 流器,能够通过改变子模块数目满足不同的电压和 功率要求^[1-3]。MMC型高压直流输电(MMC-HVDC) 技术在电能传输领域得到了较多应用^[4-5]。近年来, MMC-HVDC系统故障特性的研究受到了广泛关注。

目前,针对MMC-HVDC系统故障特性的研究主要集中于交流侧故障、直流侧故障和联接变压器阀侧故障3个方面。文献[6-7]针对MMC-HVDC系统交流侧单相接地故障进行研究。文献[6]以鲁西换流站为例研究了MMC-HVDC系统交流侧发生单相接地故障时的故障特性,提出了针对换流单元的控制策略;文献[7]分析了交流系统故障下MMC-HVDC系统三相电网电压不平衡特性,建立了数学模型并设计了抑制交流侧负序电流的控制器。文献[8]研究了MMC-HVDC系统交流侧发生三相短路故障后的暂态和稳态特征,分析了MMC-HVDC控制系统对短路电流的影响。

文献[9-12]研究了 MMC-HVDC 系统直流侧发 生故障时的故障特性。文献[9]分析了 MMC-HVDC 系统发生直流单极接地故障时的暂态特性,设计了 加速故障后子模块电容电压再平衡的控制器;文献 [10]建立了真、伪双极 MMC-HVDC 系统发生单极接 地故障时的等效电路,对比分析了 2 种拓扑结构的 单极短路电流对桥臂换流阀的影响;文献[11]研究 了全桥型 MMC-HVDC 系统在换流器闭锁前后直流 双极短路故障的故障机理和故障清除策略;文献 [12]详细研究了 MMC-HVDC 系统在启动过程中发 生直流双极短路和单极接地短路的故障现象,分析 了启动过程与正常运行时直流极保护特征量的差异。

文献[13-15]对联接变压器阀侧故障进行了研究。文献[13]对MMC-HVDC系统联接变压器阀侧 交流母线故障进行了分类,并定性分析了联接变压 器阀侧发生单相接地故障对系统的影响;文献[14] 针对双极柔性直流输电系统阀侧单相接地故障进行 了定性分析并提出相应的保护控制策略;文献[15] 建立了MMC-HVDC联接变压器阀侧母线单相接地 故障时交流侧和直流侧的等效电路,推导了联接变 压器阀侧母线和直流侧电压电流的暂态公式。

文献[16]研究了单相变压器分区互联装置发生 桥臂短路故障时的故障特性,针对桥臂短路故障提 出了相应的保护控制策略,但是缺乏对桥臂短路电 流的深入研究,未能给出系统交流侧以及直流侧暂 态故障现象的明确解释。目前,国内外针对 MMC-HVDC系统桥臂短路故障暂态特性的研究较为缺 乏,但桥臂短路故障会给 MMC-HVDC系统带来严重 后果,针对其故障特性的研究对于系统换流器保护 区的保护设计有重要意义。

桥臂短路故障为不对称故障,故障发生时的暂态特性较为复杂,本文针对换流器不闭锁和闭锁2 种情况对故障特征进行分析:详细分析换流器不闭 锁时桥臂短路电流的组成及桥臂电流和子模块电容 电压的暂态特性;针对换流器闭锁的情况,建立桥臂 短路电流通路的电路模型并推导电流的解析表达 式,深入分析闭锁后两侧换流器上下桥臂电流及交 直流侧电压电流的暂态特性。同时,本文根据桥臂 短路故障的暂态特性提出了相应的保护配置方案。 最后应用PSCAD / EMTDC建立仿真模型,验证了理 论分析的正确性。

1 MMC-HVDC系统的拓扑结构

MMC-HVDC系统的拓扑结构如图1所示。图中,MMC-HVDC换流变压器参考渝鄂直流输电工程,采用YN/yn型接线方式,变压器阀侧绕组中性点经高电阻 R_g 接地^[17];MMC有三相,每相有上、下2个桥臂,共6个桥臂,每个桥臂中有N个子模块与桥臂电感串联,子模块用SM_j($j=1,2,\dots,N$)表示; L_m 为桥臂电感(m=A,B,C); L_s 和 R_s 分别为电抗器电感和电阻; E_n (n=1,2)为交流系统等效电压源; Z_n 为交流系统等效阻抗; u_{cn} 为联接变阀侧电压; P_n+jQ_n 为公共连接点n(PCC_n)处的功率; i_{mn} 为流入MMC_n的三相电流; U_{d_mn} 为MMC_n三相上桥臂正极直流电压; i_{dp} 和 i_{dn} 分别为直流正、负极母线电流; i_{mnup} 和 i_{mndown} 分别为上、下桥臂电流; i_{de} 为流经两侧变压器中性点的大地电流。

本文研究 MMC 发生桥臂短路故障后的暂态特性,以 MMC₁中A相上桥臂短路为例(如图1所示), 对换流器不闭锁和闭锁2种情况进行分析。

2 换流器不闭锁时暂态特性分析

发生桥臂短路故障之后,子模块电容 C_{SM1} 经过 IGBT(T_{11})和二极管 D_{N2} 向短路点处迅速放电,等效 电路如图2所示。图中, i_{am} 为 C_{SM1} 放电电流,回路① 为 C_{SM1} 的放电回路。

由于MMC₁中A相上桥臂发生桥臂短路故障,A 相上桥臂电压降为0,忽略桥臂电感上的压降,A相 极间电压降为A相下桥臂电压。为保持直流侧极间 电压相等,故障相下桥臂将通过子模块电容充电,使



图 2 故障相上桥臂不闭锁子模块电容放电电流通路 Fig.2 Discharging circuit of invested submodule capacitor of upper bridge arm at fault phase

下桥臂电压升高,实现直流侧极间电压的动态平衡。

由于A相直流电压降低,非故障相(以C相为 例)上、下桥臂子模块的电容电压均降低,非故障相 放电回路如图3所示。图中,回路②为非故障相上、 下桥臂的子模块电容向故障相的放电回路,可维持 极间电压平衡;回路③为联接变压器阀侧电流回路, 由于MMC,非故障相的桥臂电流为相间电流与联接 变压器阀侧电流的叠加,联接变压器阀侧电流使得 非故障相上、下桥臂电流不相等,在故障发生后的短 时间内,上桥臂放电电流大于下桥臂放电电流,因此 上桥臂子模块的电容电压下降更为明显。

另一方面,故障侧直流极间电压迅速降低, MMC₂为保持直流侧极间电压平衡,上、下桥臂子模 块电容经图1中回路④迅速向短路点处放电,导致 故障初期直流电流反向并出现很大的冲击电流。由 于MMC₁侧和MMC₂侧三相不平衡,两端交流侧变压 器中性点电压不再为0,两端换流变压器中性点的









182

图3 MMC₁非故障相放电回路

Fig.3 Discharging circuit of non-fault phase of MMC₁

对地电流见图1中回路⑤。因此,发生桥臂短路故障后换流器不闭锁时,桥臂短路电流很大,由回路 ①-⑤中的电流构成。

3 考虑换流器闭锁的暂态特性分析及保护 配置

3.1 考虑换流器闭锁的暂态特性分析

MMC-HVDC系统 MMC₁发生 A 相上桥臂短路故 障时,换流器一般在几毫秒内闭锁。闭锁后,故障相 子模块电容放电回路变为桥臂电感续流回路,电感 续流电流*i*_{*i*}流经二极管 D₁₂,续流回路见图4中回路 ⑦。其等效电路见图5,为已知初始条件的 RL一阶 电路。



图4 MMC₁故障相上桥臂电感续流回路

Fig.4 Inductance freewheeling current circuit of upper bridge arm at MMC₁ fault phase



图5 电感续流回路等效电路



等效电路的方程如式(1)所示。

$$L_{\rm A}\frac{{\rm d}i_L}{{\rm d}t} + R_{\rm A}i_L = 0 \tag{1}$$

换流器闭锁瞬间A相上桥臂电感电流值*I*_{A0}的初始条件如式(2)所示。

$$I_{\rm A0} = i_L(t_{\rm blk}^+) = i_L(t_{\rm blk}^-)$$
(2)

其中,t⁺_{blk}、t⁻_{blk}分别为闭锁前、闭锁后的时刻。

通过求解式(1)得到:

$$i_L(t) = I_{A0} e^{-\frac{R_A}{L_A}t}$$
(3)

由式(3)可知,桥臂电感续流回路电流在桥臂电 阻的作用下逐渐衰减至0。图6为桥臂电感续流电 流理论计算与仿真曲线的对比图,故障时刻为1s, 故障发生5ms后换流器闭锁。由图6可知计算值与 仿真值的误差较小,说明电感续流回路的理论分析 结果正确。



图6 电感续流电流计算与仿真曲线



由于 IGBT 关断, MMC₁ 非故障相的桥臂子模块 电容无法放电, 不存在非故障相对故障相子模块的 电容放电回路, 故 MMC₁下桥臂无电流流过, 仅上桥 臂有三相电流流过。以A、B两相为例, 换流器闭锁 后非故障相上桥臂馈入故障相上桥臂的电流回路如 图 3 中回路⑥所示, 等效电路如图 7 所示。图中, *L* 为故障通路等效电感, 包括 B 相桥臂电感和电抗器 电感; *R* 为 B 相桥臂等效电阻和电抗器电阻之和; *i*_B 为换流器闭锁后流经 MMC₁ 的 B 相上桥臂与 A 相短 路上桥臂的电流; *u*_B 为 A、B 两相联接变阀侧电压。



图7 等效电路图

Fig.7 Equivalent circuit diagram

等效电路的方程如式(4)所示。

$$u_{\rm BA} = L \frac{\mathrm{d}i_{\rm B}}{\mathrm{d}t} + Ri_{\rm B} \tag{4}$$

由于桥臂短路故障是不对称故障,将导致联接 变阀侧电压中出现直流分量,u_{BA}发生畸变。为研究 非故障相对故障相馈入电流的解析表达式,假设u_{BA} 在换流器闭锁后仍按正弦函数规律变化。经推导得 到非故障相电流的解析表达式如式(5)所示。

$$\begin{cases} i_{\rm B} = \frac{U_{\rm BA}}{\sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}} \sin\left(\omega t + \varphi_{\rm BA} - \arctan\frac{\omega L}{R}\right) - \\ \left[\frac{U_{\rm BA}}{\sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}} \sin\left(\varphi_{\rm BA} - \arctan\frac{\omega L}{R}\right) - I_{\rm B0}\right] e^{-\frac{R}{L}t} \\ i_{\rm C} = \frac{U_{\rm CA}}{\sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}} \sin\left(\omega t + \varphi_{\rm CA} - \arctan\frac{\omega L}{R}\right) - \\ \left[\frac{U_{\rm CA}}{\sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}} \sin\left(\varphi_{\rm CA} - \arctan\frac{\omega L}{R}\right) - I_{\rm C0}\right] e^{-\frac{R}{L}t} \end{cases}$$

$$(5)$$

其中, i_{B} 、 i_{C} 分别为闭锁后 MMC₁的 B、C 相上桥臂电流; U_{BA} 、 U_{CA} 和 φ_{BA} 、 φ_{CA} 分别为闭锁后 BA、CA 相线电压的幅值和相位; I_{B0} 、 I_{C0} 分别为闭锁瞬间 B、C 相电流初始值; ω 为系统角频率。

由于桥臂短路故障为不对称故障,联接变压器 阀侧电压发生畸变,其直流电压分量导致桥臂电流 中含有直流偏置电流。因此,故障后B、C相馈入短 路桥臂的电流由3个部分组成:第1、2部分分别为恒 定的基频分量与衰减的直流分量,如式(5)所示;第 3部分为直流偏置电流分量,其大小与联接变压器 阀侧电压直流分量和回路电阻有关,联接变压器阀 侧电压直流分量一定时,回路电阻越大,非故障相桥 臂中直流偏置电流越小。综上所述,桥臂短路电流 *i*_{mu}的表达式如式(6)所示。

$$i_{\text{fault}} = i_L + i_B + i_C + I_{\text{arm_dc}} + i_{\text{dc}}$$
 (6)
其中, $I_{\text{arm_dc}}$ 为B、C相桥臂中直流偏置电流之和。
式(6)可写为:

$$i_{\text{fault}} = I_{A0} e^{-\frac{R_A}{L_A}t} + \frac{U_{BA}}{\sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}} \sin\left(\omega t + \varphi_{BA} - \arctan\frac{\omega L}{R}\right) + \frac{U_{CA}}{\sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}} \sin\left(\omega t + \varphi_{CA} - \arctan\frac{\omega L}{R}\right) + I_{\text{arm}_{dc}} + i_{dc} - \left[\frac{U_{BA}}{\sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}} \sin\left(\varphi_{BA} - \arctan\frac{\omega L}{R}\right) - I_{B0}\right] e^{-\frac{R}{L}t} - \left[\frac{U_{CA}}{\sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}} \sin\left(\varphi_{CA} - \arctan\frac{\omega L}{R}\right) - I_{C0}\right] e^{-\frac{R}{L}t}$$
(7)

综上所述,换流器闭锁后,MMC₁下桥臂无电流 流过,故障相桥臂的短路电流由回路⑤—⑦中的电 流组成。特别说明的是,由于送受端联接变压器中 性点经高阻接地,故回路⑤中的电流数值很小,基本 可以忽略。桥臂短路故障将导致MMC₂联接变压器 阀侧的电压中性点偏移。换流器闭锁前,MMC₂三相 上下桥臂子模块电容通过回路④向短路点放电,子 模块电容电压降低,导致直流电流反向并出现很大 的冲击电流,与换流器不闭锁初期的故障现象相同; 换流器闭锁后,MMC₂子模块电容电压保持不变,子 模块电容放电电流无法流通,导致下桥臂无电流流 过,上桥臂仅有数值很小的大地回路电流流过,故 MMC₂侧联接变阀侧基本无电流流过,直流正负极母 线电流均降至0。

3.2 换流器桥臂短路保护配置

根据换流器的故障暂态特性,桥臂短路故障的 主要危害是换流器桥臂过流和交直流侧电压电流的 畸变,严重威胁系统的安全稳定运行。因此桥臂短 路故障发生后,应立即闭锁换流器。换流器差动保 护可作为桥臂短路的主保护,其原理简单可靠且动 作迅速;同时桥臂过流保护可作为主保护拒动时的 后备保护。

限于篇幅,本文以差动保护为例给出换流器桥 臂短路故障下保护的配置方案。换流器上、下桥臂 差动保护动作判据如式(8)所示。

$$\begin{cases} \left| I_{\rm bpA} + I_{\rm bpB} + I_{\rm bpC} - i_{\rm dp} \right| > \max \left(I_{\rm set}, K_{\rm set} I_{\rm resp} \right) \\ \left| I_{\rm bnA} + I_{\rm bnB} + I_{\rm bnC} - i_{\rm dn} \right| > \max \left(I_{\rm set}, K_{\rm set} I_{\rm resn} \right) \\ \left\{ I_{\rm resp} = \left| I_{\rm bpA} \right| + \left| I_{\rm bpB} \right| + \left| I_{\rm bpC} \right| + \left| i_{\rm dp} \right| \\ I_{\rm resn} = \left| I_{\rm bnA} \right| + \left| I_{\rm bnB} \right| + \left| I_{\rm bnC} \right| + \left| i_{\rm dn} \right| \end{cases}$$

$$\tag{8}$$

其中,*I*_{bpA}、*I*_{bpB}、*I*_{bpC}和*I*_{bnA}、*I*_{bnB}、*I*_{bnC}分别为上桥臂和下桥 臂三相电流有效值;*I*_{set}为保护整定值,以直流额定电 流*I*_{dc_nom}为基准值;*K*_{set}为制动系数;*I*_{resp}、*I*_{resn}分别为上、 下桥臂差动保护制动电流。式(8)中左侧分别表示 上、下桥臂差动电流表达式,右侧分别表示上、下桥 臂差动保护制动电流整定值。

考虑保护的可靠性和灵敏性等因素,换流器差动保护的告警段、差动 I 段和 II 段的整定值 I_{0_set} 、 I_{L_set} 和 I_{I_set} 分别取为 0.1 I_{dc_nom} 、0.2 I_{dc_nom} 和 0.5 I_{dc_nom} ;保护延时分别设为 5、0.01、0.0002 s; K_{set} 均为 0.3。

由于桥臂短路故障发生后桥臂电流中含有直流 偏置量,计算保护动作判据中桥臂电流有效值时需 考虑其带来的影响。特别说明的是,为了提高差动 保护 II 段的动作速度,计算差动保护 II 段动作判据 时各相桥臂电流取瞬时值^[19]。综上所述,差动保护 动作后,闭锁换流器,跳开并锁定交流断路器。

4 仿真结果

4.1 仿真系统说明

为了验证桥臂短路暂态特性理论分析结果的正确性,基于PSCAD / EMTDC 仿真平台搭建了图 1 所示的双端 21 电平 MMC-HVDC 系统,系统参数见附录中表 A1^[20]。MMC₁工作在整流状态,采用定有功和定无功功率控制;MMC₂工作在逆变状态,采用定直流电压和定无功功率控制。

4.2 换流器不闭锁时桥臂短路仿真结果分析

首先分析桥臂短路故障发生后换流器不闭锁时 各电气量的变化。系统稳定运行至1s时MMC₁中A 相上桥臂发生短路故障,故障持续时间为0.2s。

此时,子模块电容迅速放电,电容电压降为0。 故障相上桥臂子模块电容放电电流及子模块电容电 压的波形见附录中图A1。对于MMC₁非故障相,以 C相为例,MMC₁中C相上、下桥臂电流和子模块电 容电压见附录中图A2。由图A2可知,C相上桥臂的 放电电流大于下桥臂,上桥臂子模块电容电压下降 更为明显。这是由于上桥臂电流是相间放电电流与 阀侧电流的叠加,而下桥臂电流仅为相间放电电流与 阔侧电流的叠加,而下桥臂电流仅为相间放电电流, 仿真结果与前文理论分析结果一致。MMC₁侧联接 变压器阀侧电流及其直流分量见附录中图A3。由 图A3可见,故障后MMC₁侧联接变压器阀侧电流出 现直流偏置,与前文理论分析一致。

对于 MMC₂而言,以 MMC₂中 A 相为例, A 相上下 桥臂电流和子模块电容电压波形如附录中图 A4 所 示。由图 A4 可见,系统为保持直流电压平衡, MMC₂ 上下桥臂投入子模块电容放电,使得桥臂电流幅值 增大,与前文理论分析结果一致。随后在 MMC₂定 直流电压控制器的作用下, MMC₂向 PCC₂传输的功 率降低并反向, 作用于 MMC₂桥臂子模块电容充电, 使得子模块电容电压有所回升。

直流正负极电流和极间电压的波形见附录中图 A5。由图A5可见,桥臂短路故障发生初期,MMC₂三 相子模块电容向 MMC₁故障相迅速放电,极间电压 迅速降低发生畸变,正极电流反向并出现很大的冲 击电流。仿真波形验证了前文理论分析的正确性。

4.3 考虑换流器闭锁的桥臂短路仿真结果分析

当桥臂短路故障发生5 ms后,换流器闭锁,闭 锁后 MMC₁故障相(A相)上、下桥臂电流*i*_{Aup},*i*_{Adown}如 图 8 所示。由前文分析可知,短路故障发生后换流 器闭锁前 A 相上桥臂投入子模块电容迅速放电,电 压降至0,导致上桥臂流过很大的放电电流;为保持 极间电压平衡,A 相下桥臂子模块电容充电,电压迅 速升高,导致下桥臂电流升高。换流器闭锁后,A 相 上桥臂流过的电感续流电流在桥臂电阻的作用下逐 渐衰减至0。由于不存在非故障相子模块电容放电





回路,A相下桥臂无电流流过,仿真现象与前文理论 分析一致。

对于MMC,的非故障相,以C相为例进行分析。 C相上、下桥臂子模块电容电压 u_{Cup}、u_{Cdown}和上、下桥 臂电流 icm、icdown 如图9所示。由图可见, 换流器闭锁 前由于C相上、下桥臂子模块电容向故障相放电,因 而上、下桥臂子模块电容电压均下降。值得注意的 是,由图A2(b)中画圈部分可见,换流器不闭锁时, 故障初期C相下桥臂子模块电容电压率先下降,由 于换流器闭锁后子模块电容电压保持不变,故换流 器闭锁后C相下桥臂子模块电容电压小于上桥臂子 模块电容电压。换流器闭锁后C相上桥臂电流中衰 减的直流分量很快衰减至0.桥臂电流中仅含有恒 定的基频分量和直流偏置分量,且回路中二极管的 单向导电性使得桥臂电流流动方向与参考方向相 反,正向通路被截断,仿真结果验证了前文关于换流 器闭锁后非故障相桥臂电流解析表达式分析的正确 性;且闭锁后由于非故障相子模块电容放电回路不 存在,因此C相下桥臂无电流流过,仿真结果与前文 理论分析相符。





Fig.9 Upper and lower bridge arm submodule capacitor voltages and currents of phase C of MMC₁

MMC₁侧联接变压器阀侧线电压直流分量波形 如图 10 所示。桥臂短路故障产生的谐波分量和直 流分量造成了联接变压器阀侧电压畸变。由前文分 析可知,换流器闭锁后,A相桥臂短路电流由多种回 路电流构成,数值较大,因此包含故障相A相在内的 阀侧线电压直流分量值较大,该直流电压分量造成 MMC₁非故障相上桥臂电流中含有直流偏置电流。



transformer valve side of MMC₁

图11由上至下依次为MMC₁侧联接变压器阀侧 电流及其直流分量波形。由图可见,换流器闭锁后 故障相联接变压器阀侧电流直流分量最终稳定在 -6kA左右,B、C相联接变压器阀侧电流的直流分量 最终均稳定在3kA左右。故障相联接变压器阀侧 电流的直流分量约为非故障相的2倍,该直流偏置 分量使得阀侧故障相电流没有过零点,造成交流断 路器无法正常断开。



图 11 MMC₁联接变压器阀侧电流及其直流分量 Fig.11 Current and its DC component on transformer valve side of MMC₁

对于 MMC₂而言, MMC₂侧联接变压器阀侧电压 波形如图 12 所示。由图 12 可见, 换流器闭锁后联接 变压器阀侧电压的中心线向下偏移, 验证了前文理 论分析的正确性。





两侧换流器闭锁后 MMC-HVDC 系统直流正负 极母线电流见图 13。根据图 13,换流器闭锁前系统 直流电流反向并出现很大的冲击电流,与换流器不 闭锁时情况相同;换流器闭锁后 MMC₂非故障相上 桥臂流过较小的大地回路电流,下桥臂无电流流过, 故 MMC₁与 MMC₂之间基本无电流流过,直流正负极 母线电流降至0,仿真结果与前文理论分析相符。





4.4 桥臂短路换流器差动保护动作情况分析

由 3.2 节换流器差动保护配置可知,设保护整定值 的基准值为直流额定电流 $I_{dc_nom} = 400/400 = 1$ (kA)。 图 14 为差动电流与保护定值示意图。由图 14可知, 桥臂短路故障发生后, $I_{II_set} = 0.5$ kA > $I_{I_set} = 0.2$ kA > $I_{0_set} = 0.1$ kA,因此 0.2 ms 后,换流器差动保护 II 段率 先动作。



图 14 差动电流与保护定值示意图 Fig.14 Schematic diagram of differential current and setting values of protection

5 结论

本文以 MMC₁发生桥臂短路故障为例,分换流器不闭锁和换流器闭锁2种情况对桥臂短路故障的 暂态特性进行了详细分析,所得结论如下。

(1)桥臂短路故障发生后,换流器不闭锁时,桥 臂短路电流很大且由5种类型回路电流组成,分别 为故障相上桥臂投入子模块电容放电电流、故障侧 非故障相的放电电流、故障侧联接变压器阀侧回路 电流、非故障侧向故障相放电的电流以及大地回路 电流。

(2)桥臂短路故障发生后,换流器闭锁后,桥臂 短路电流由3种类型回路电流组成,分别为故障相 上桥臂的电感续流电流、故障侧非故障相对故障相 的馈入电流和流经两侧变压器中性点的大地回路 电流。

(3)换流器闭锁后,故障侧非故障相馈入故障相 的电流由3个部分组成,分别为恒定的基频分量、衰 减的直流分量以及直流偏置分量。直流偏置分量的 大小与联接变阀侧电压直流分量和馈入电流回路中 电阻的大小有关,联接变阀侧电压直流分量一定时, 回路电阻越大,馈入电流中直流偏置分量越小。

(4)换流器闭锁后,由于回路中直流偏置分量的 存在,MMC₁联接变阀侧故障相电流不存在过零点, 造成交流断路器无法正常断开。

(5)换流器闭锁后,MMC₁非故障相子模块电容 放电回路不存在使得故障相和非故障相下桥臂均无 电流流通;MMC₂下桥臂无电流流过,上桥臂和联接 变阀侧电流基本为0,MMC₁与MMC₂间无电流流过, 功率传输中止。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

186

 [1]杨立敏,李耀华,李子欣,等. MMC子模块故障下能量再平衡 控制与安全运行域分析[J].电力自动化设备,2018,38(4): 52-59.

YANG Limin,LI Yaohua,LI Zixin,et al. Energy rebalance control and safe operation region analysis of MMC with sub-module fault[J]. Electric Power Automation Equiment, 2018, 38 (4):52-59.

- [2] TU Q, XU Z, XU L. Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (3):2009-2017.
- [3] DEBNATH S,QIN J C,BAHRANI B,et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 37-53.
- [4]张建坡,田新成,尹秀艳.模块化多电平换流器直流输电控制 策略[J].电力自动化设备,2015,35(11):103-108.
 ZHANG Jianpo,TIAN Xincheng,YIN Xiuyan. Control strategy of MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(11):103-108.
- [5] 韦延方,卫志农,孙国强,等. 一种新型的高压直流输电技术—— MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):1-9.
 WEI Yanfang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. New HVDC power transmission technology: MMC-HVDC[J] Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):1-9.
- [6] 王坤,杨跃辉,王磊,等.交流侧故障时MMC-HVDC换流单元 的控制策略探讨[J]. 广西电力,2017,40(1):1-4.
 WANG Kun,YANG Yuehui,WANG Lei, et al. Discussion on control strategy of MMC-HVDC convertor unit for AC side fault[J]. Guangxi Electric Power,2017,40(1):1-4.
- [7]马世强,余利霞,郑连清. MMC-HVDC交流侧不对称故障特性 分析与保护策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015,42(6):35-42,63.

MA Shiqiang, YU Lixia, ZHENG Lianqing. Characteristics analysis of MMC-HVDC AC asymmetric fault and protection strategy[J]. Journal of North China Electric Power University, 2015, 42(6): 35-42, 63.

 [8] 卜广全,李英彪,王姗姗,等. MMC对交流系统三相短路故障 短路电流影响的机理研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37 (21):6303-6312.
 BU Guangquan,LI Yingbiao,WANG Shanshan, et al. Analysis

of the short-circuit current of MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21):6303-6312.

[9]赵成勇,李探,俞露杰,等. MMC-HVDC 直流单极接地故障分析与换流站故障恢复策略[J].中国电机工程学报,2014,34 (21):3518-3526.

ZHAO Chengyong, LI Tan, YU Lujie, et al. DC pole-to-ground fault characteristic analysis and converter fault recovery strategy of MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(21): 3518-3526.

- [10] 陈继开,孙川,李国庆,等. 双极 MMC-HVDC系统直流故障特 性研究[J]. 电工技术学报,2017,32(10):53-60.
 CHEN Jikai,SUN Chuan,LI Guoqing, et al. Study on characteristics of DC fault in bipolar MMC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(10):53-60.
- [11] 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.
- [12] 刘若平,李银红,肖浩,等. MMC-HVDC 直流极保护对启动过 程故障的适应性研究[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):

84-91.

LIU Ruoping,LI Yinhong,XIAO Hao,et al. Research on adaptability of DC pole protection to fault occurred during start-up process for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7):84-91.

[13] 裘鹏,章姝俊,黄晓明,等. MMC-HVDC系统中阀侧交流母线 故障保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(19): 150-154.

QIU Peng,ZHANG Shujun,HUANG Xiaoming, et al. Research on the protection strategies of internal AC bus fault based on MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014,42(19):150-154.

- [14] 周杨,贺之渊,庞辉,等.双极柔性直流输电系统站内接地故障 保护策略[J].中国电机工程学报,2015,35(16):4062-4069.
 ZHOU Yang,HE Zhiyuan,PANG Hui,et al. Protection of converter grounding fault on MMC based bipolar HVDC systems
 [J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(16):4062-4069.
- [15] 袁义生,唐喆. MMC-HVDC系统阀侧故障特性分析[J]. 华东 交通大学学报,2018,35(1):82-89.
 YUAN Yisheng,TANG Zhe. Analysis of internal side fault characteristics based on MMC-HVDC[J]. Journal of East China Jiaotong University,2018,35(1):82-89.
- [16] 尹昌新,李蕴,陈平,等. 分区互联装置桥臂闪络故障保护策略 设计[J]. 电力建设,2017,38(2):100-105.
 YIN Changxin,LI Yun, CHEN Ping, et al. Protection scheme design for interconnecting device under arm flashover fault [J]. Electric Power Construction,2017,38(2):100-105.
- [17] 张群,赵倩,郝俊芳,等.渝鄂直流背靠背联网工程最后断路器 跳闸功能配置[J].中国电力,2017,50(9):72-76.
 ZHANG Qun, ZHAO Qian, HAO Junfang, et al. Configuration of last breaker trip function for Chongqing-Hubei back-toback HVDC project[J]. Electric Power,2017,50(9):72-76.
- [18] MESHRAM P M, BORGHATE V B. A simplified Nearest Level Control(NLC) voltage balancing method for Modular Multilevel Converter(MMC)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(1):450-462.
- [19] 李洁,黄凯漩,陈志伟,等.南澳柔性直流输电工程换流阀保护 拒动原因分析[J].广东电力,2017,30(11):114-119.
 LI Jie, HUANG Kaixuan, CHEN Zhiwei, et al. Reason analysis on protective action resistance of converter valve of Nan'ao flexible HVDC project[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30 (11):114-119.
- [20] 张芳,张光耀,李传栋. MMC-HVDC的二阶线性自抗扰控制策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):98-104.
 ZHANG Fang,ZHANG Guangyao,LI Chuandong. Second-order linear active disturbance rejection control strategy of MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(11): 98-104.

作者简介:



张 芳(1972—),女,内蒙古呼和浩特 人,副研究员,博士,研究方向为柔性高压 直流输电及灵活交流输电系统控制方法、 电力系统电压稳定性分析与控制(E-mail: zhangfang@tju.edu.cn);

杜雪靓(1995—), 女, 安徽滁州人, 硕 士研究生, 主要研究方向为高压直流输电 技术(**E-mail**: duxuejing@tju.edu.cn);

张芳扎

陈 堃(1986—),男,湖北武汉人,工

程师,博士,主要研究方向为高压直流控制与保护、逆变器控制(E-mail:294933037@qq.com)。

Transient characteristic analysis of converter bridge arm short circuit fault in MMC-HVDC system

ZHANG Fang¹, DU Xuejing¹, CHEN Kun²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: Bridge arm short circuit is a severe fault in MMC-HVDC (Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current) system. Transient characteristics of bridge arm short circuit fault are analyzed when the converter is unblocked or blocked. Aiming at the case that the converter is unblocked, the transient characteristics of bridge arm electrical quantity of the converter at both ends are given, and the composition of the bridge arm short circuit current is analyzed. For the other case that the converter is blocked, the circuit model of bridge arm short circuit current is established. Meanwhile, the analytical equation of bridge are analyzed. The protection configuration scheme of bridge arm short circuit fault is also given. A two-terminal MMC-HVDC simulation model is built based on PSCAD / EMTDC. The simulative results validate the correctness of transient characteristic analysis and the effectiveness of the protection configuration. The transient characteristic analysis of the bridge arm short circuit fault can provide references for converter protection strategies of MMC-HVDC system.

Key words: MMC-HVDC; fault analysis; bridge arm short circuit; converter blocking; transient characteristic

(上接第149页 continued from page 149)

Method for single-phase electric meter phase identification based on multiple linear regression

ZHANG Liqiang¹, CONG Wei¹, DONG Gang², MIAO Qingqing³, SUN Haibin³, SUN Yun³

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education,

Shandong University, Jinan 250061, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China;

3. Jining Power Supply Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Jining 272100, China)

Abstract: The phase information of single-phase electric meter is crucial to improve the level of load management, the quality of modeling, as well as the quality and the reliability of power supply. According to the relationship between the electric quantities collected by the single-phase electric meter and the gateway meter in the power supply region, a method for single-phase electric meter phase identification based on multiple linear regression is proposed. The multiple linear regression equation takes the single-phase electric meter voltage as the dependent variable. Meanwhile, it takes the gateway meter voltage, the gateway meter current and the single-phase electric meter current as the independent variables. Each single-phase electric meter forms three regression equations with the gateway meter phase A, B and C respectively. The determination coefficients of the three regression equations are calculated. According to the value of the coefficients, the phase of single-phase electric meter is determined. An example is given to analyze the proposed method with actual energy meter reading data. The analysis results show that the proposed method has higher accuracy and reliability.

Key words: single-phase electric meter; phase identification; multiple linear regression; determination coefficient; advanced metering infrastructure

附录

表 A1 MMC-HVDC 系统参数 Table A1 Parameters of MMC-HVDC system

参数	参数值	参数	参数值
系统基准容量/(MV A)	400	MMC ₂ 侧联结变压器变比	200/525
直流电压/kV	±200	子模块个数	20
直流线路电阻/Ω	1.04	子模块电容 C/μF	3100
直流线路电感/H	0.012	桥臂电阻 R_a/Ω	0.03
直流线路额定有功功率/MW	400	桥臂电感 L _a /H	0.04
送端交流系统短路容量/(MV A)	8500	相电抗器电阻 $R_{\rm s}/\Omega$	1.5
受端交流系统短路容量/(MV A)	9000	相电抗器电感 L _s /H	0.048
MMC ₁ 侧联结变压器变比	525/200	变压器接地电阻 R_{g}/Ω	1000





Fig.A1 Discharge current of upper bridge arm and submodule capacitor voltage of fault phase



图 A2 MMC₁中 C 相上、下桥臂电流和子模块电容电压 Fig.A2 Upper and lower bridge arm currents and submodule voltage of phase C of MMC₁



图 A3 MMC₁联接变阀侧电流及其直流分量 Fig.A3 Current and its DC component on transformer valve side of MMC₁





Fig.A4 Upper and lower bridge arm currents and submodule capacitor voltage of phase A of MMC₂



Fig.A5 DC current of positive and negative poles and DC voltage