

MMC-HVDC 直流极保护对启动过程故障的适应性研究

刘若平^{1,2}, 李银红^{1,2}, 肖浩^{1,2}, 陈朝晖³, 罗强^{1,2}

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 电气与电子工程学院 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510663)

摘要:目前国内外对基于模块化多电平换流器的高压直流输电(MMC-HVDC)直流极保护原理与保护定值的研究均针对系统正常运行方式,鲜有针对启动过程的适应性分析。对MMC-HVDC系统启动动态过程进行了理论描述,详细分析了启动过程发生直流双极短路和单极接地故障时的故障特性。针对MMC-HVDC系统典型直流极保护,研究了启动过程故障与正常运行阶段故障时保护特征量的差异以及典型保护对启动过程故障的适应性。基于MMC-HVDC的详细电磁暂态模型,仿真启动过程和正常运行阶段发生双极短路和单极接地故障,验证了启动过程故障特性分析及典型保护对启动过程适应性分析的正确性,并对保护整定计算提出了新的建议。

关键词:MMC-HVDC;启动过程;直流侧故障;故障特性;直流极保护

中图分类号:TM 46;TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.013

0 引言

基于模块化多电平换流器的高压直流输电(MMC-HVDC)系统的启动是其正常运行的前提和基础^[1-3],是系统运行过程中的重要环节。为了延长MMC-HVDC的运行寿命,必须定期地对其进行检修^[4],因此MMC-HVDC系统需要定期停启;MMC-HVDC系统在运行过程中可能发生各类故障,严重时会引起直流闭锁,因此系统会进行故障后再启动。而MMC-HVDC系统的启动过程时间较长,实际工程中系统的启动需人工合闸,启动时长为分钟量级,启动过程中发生故障的可能性不容忽视。同时,MMC-HVDC系统的启动又是一个较为复杂的暂态过程^[5],启动过程的电气量特性与正常运行时有所不同^[6-9]。因此,启动过程故障的故障特性可能与正常运行阶段故障有所不同,启动过程不同阶段发生故障时的故障特性也可能存在差异。

继电保护是MMC-HVDC系统安全稳定运行的重要保障,需适用于系统的多种运行方式,在各种运行工况下发生故障均应正确动作,包括系统启动过程。直流极保护是MMC-HVDC系统的重要保护,主要对直流母线与直流输电线路进行保护^[10-11],包括对系统危害最为严重的双极短路故障和在架空线路输电中最容易发生的单极接地故障。现有MMC-HVDC直流侧故障特性研究都仅针对系统在正常运行阶段发生故障的情况^[12-20],针对MMC-HVDC直流极保护原理与保护定值的研究尚未涉及对启动过程故障的适应性分析^[11,21]。MMC-HVDC系统在启动过程中发生故障会对直流极保护产生哪些新的影响,直流极保护整定计算时是否需要额外考虑启动

过程故障等问题有待进一步研究。

在此背景下,本文对MMC-HVDC启动动态过程进行了理论描述,对启动过程不控充电阶段和可控充电阶段发生直流双极短路和单极接地故障的故障特性进行了详细分析。针对MMC-HVDC系统典型直流极保护,分析了启动过程故障与正常运行阶段故障时保护特征量的差异,研究了典型保护对启动过程故障的适应性,指出直流低电压过电流保护和直流电压不平衡保护在启动过程故障时可能会拒动,建议在整定时考虑启动过程发生故障的情况。最后,基于MMC-HVDC的详细电磁暂态模型,利用PSCAD/EMTDC软件对在启动过程和正常运行阶段发生双极短路和单极接地故障进行仿真,验证了启动过程故障特性分析及典型保护对启动过程适应性分析的正确性。

1 MMC-HVDC 启动过程与继电保护

MMC-HVDC系统一般采用自励启动方式^[6],启动过程包括充电阶段和功率提升阶段,其示意图如图1所示。额定直流电压的建立是MMC-HVDC系统启动的中心环节,其实是电容器额定电压的建立^[6],即图1中的充电阶段,包括不控充电阶段和可控充电阶段。而功率提升阶段故障与正常运行阶段故障的故障特性类似,因此本文主要分析充电阶段故障。

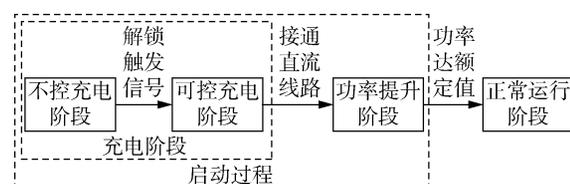


图1 MMC-HVDC系统启动过程

Fig.1 Start-up process of MMC-HVDC system

1.1 不控充电阶段

在不控充电阶段,MMC 所有子模块(SM)闭锁触发脉冲^[3],交流系统通过子模块反并联二极管整流对电容进行充电,其等效电路如图 2 所示。图中, u_{j0} 为换流变阀侧 j 相电压; u_{ab} 为当前最大线电压,其有效值为 U_1 ; L 为桥臂电感; T_1 和 T_2 为 IGBT; D_1 和 D_2 为反并联二极管; C 为子模块电容。当 $u_{a0} > u_{c0} > u_{b0}$ 时,ab 相相间充电电流路径如图 2 中虚线所示,ab 相相间充电回路的等效电路如图 3 所示。图中, i 为充电电流; R_s 为交流系统等值电阻; L_s 为交流系统等值电感; R_{st} 为带旁路开关的限流电阻,其作用是防止充电电流过大而损坏子模块二极管; C_0 为桥臂等效电容。其余相的不控充电情况类似,各桥臂根据线电压的大小轮流充电,每一桥臂的充电时间为工频周期的 $1/3$ ^[3]。

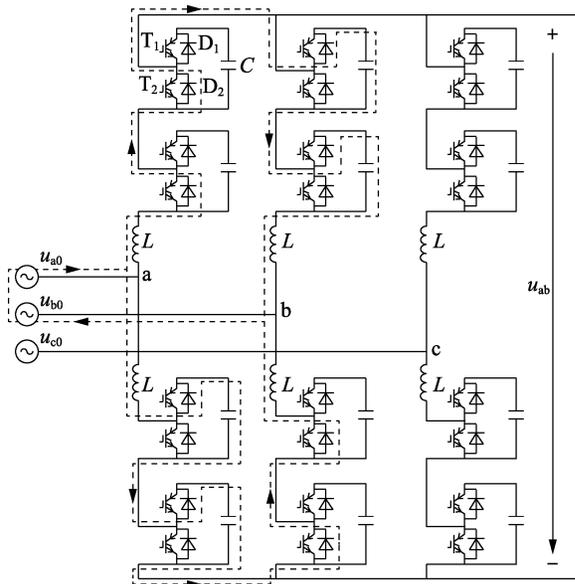


图 2 不控充电阶段中 MMC 的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of MMC in uncontrollable charging period

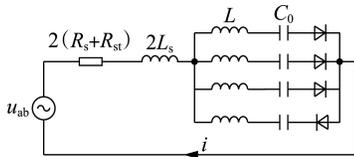


图 3 不控充电阶段中 MMC 的等效相间充电回路

Fig.3 Equivalent phase-to-phase charging circuit of MMC in uncontrollable charging period

由图 3 可以看出,不控充电阶段中电容能够达到的最高电压为 $\sqrt{2}U_1$,则直流端的最高电压为 $\sqrt{2}U_1$ ^[8],即交流侧线电压幅值,该幅值通常小于额定直流电压。

1.2 可控充电阶段

由于不控充电阶段无法将电容电压充至额定值,因此需要解锁换流器,采用控制策略对子模块电容进行可控充电直到充电至额定水平,此阶段称为可控充电阶段^[9]。在这一阶段,限流电阻被旁路,外

环控制器通常转入定直流电压控制^[22]。

1.3 MMC-HVDC 继电保护

MMC-HVDC 系统的保护配置可以分为 5 个保护区,包括交流保护区、换流变压器保护区、交流连接母线保护区、换流器保护区和直流极保护区^[10],其示意图如图 4 所示。

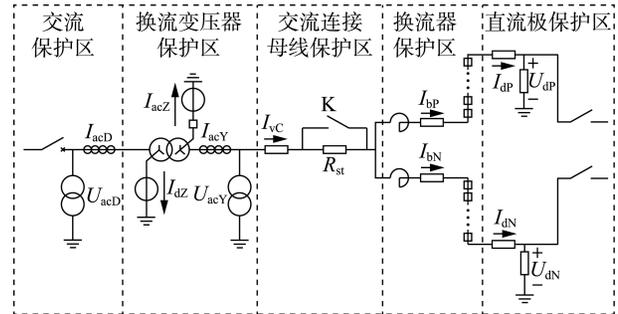


图 4 MMC-HVDC 系统保护分区示意图

Fig.4 Schematic diagram of protection partition for MMC-HVDC system

直流极保护包含直流低电压过电流保护、直流电压不平衡保护、直流过电压保护、直流场区接地过流保护等,其中直流低电压过电流保护是双极短路故障的主保护,直流电压不平衡保护是单极接地故障的主保护^[11]。下面针对以上 2 种保护,详细分析其对启动过程故障的适应性。

2 直流低电压过电流保护

直流低电压过电流保护主要反映直流双极短路故障,其保护判据为:

$$|U_{dp} - U_{dn}| < U_{set1} \ \& \ (|I_{dp}| > I_{set1} \ \text{or} \ |I_{dn}| > I_{set1}) \quad (1)$$

其中, U_{dp} 为直流正极母线电压; U_{dn} 为直流负极母线电压; U_{set1} 为直流低电压过电流保护电压整定值; I_{dp} 为直流正极母线电流; I_{dn} 为直流负极母线电流; I_{set1} 为直流低电压过电流保护电流整定值。

MMC-HVDC 双极短路故障示意图如附录中图 A1 所示。可见故障发生后,正、负极母线之间的电压差 $|U_{dp} - U_{dn}|$ 明显下降,正、负极母线电流的绝对值 $|I_{dp}|$ 和 $|I_{dn}|$ 迅速上升。此时直流侧电压与故障电流 i_1 之间的关系为:

$$U_{dp} - U_{dn} = U_{dc} = I_1 R_{f1} \quad (2)$$

$$I_{dp} = I_{dn} = I_1 \quad (3)$$

其中, U_{dc} 为直流电压; R_{f1} 为短路电阻。

则直流低电压过电流保护特征量与故障电流之间的关系为:

$$|U_{dp} - U_{dn}| = |I_1 R_{f1}| \quad (4)$$

$$|I_{dp}| = |I_{dn}| = |I_1| \quad (5)$$

因此在分析启动过程发生双极短路的故障特性时,应重点关注故障电流 i_1 的大小。

2.1 不控充电阶段故障

在不控充电阶段发生双极短路故障,MMC 子模块闭锁触发脉冲,子模块电容无放电通路,桥臂电感存储的能量通过子模块二极管向直流侧释放,同时交流系统通过二极管不控整流向直流侧馈入短路电流。文献[21]指出由于桥臂电感 L 的存在,不控整流桥可能出现上、下桥臂二极管同时导通,与故障点形成直流环流的情况。而短路电阻的大小决定了二极管同时导通的个数,短路电阻增大,二极管同时导通个数减小。考虑到继电保护需适应最严苛的情况,即短路电流较小时也不能拒动,因此本文选择二极管同时导通个数为 2 的情况进行分析,此时等效电路如图 5 所示。图中 u_s 为交流系统相电压。

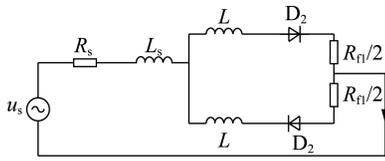


图 5 不控充电阶段中双极短路等效电路

Fig.5 Equivalent circuit under bipolar short circuit in uncontrollable charging period

在电感电流衰减至 0 之前,直流侧电感续流通路如图 6 所示,其为 RL 串联放电回路。直流侧放电电流 i_d 为:

$$i_d = I_L e^{-t/\tau_2} \quad (6)$$

其中, I_L 为故障前上桥臂电感电流; τ_2 为时间常数,且 $\tau_2 = 2L/R_n$ 。

由式(6)可以看出,直流侧放电电流 i_d 与故障瞬间桥臂电流 I_L 的大小有关, I_L 越大,则 i_d 的值越大。在电感电流衰减至 0 后,部分子模块二极管将反向截止,表现出单向导电性,此时故障电流全部由交流系统提供。

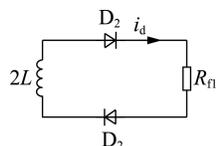


图 6 不控充电阶段中双极短路直流电流通路

Fig.6 DC current path under bipolar short circuit in uncontrollable charging period

2.2 可控充电阶段故障

在可控充电阶段发生双极短路故障,换流器闭锁前,故障电流主要包含两部分:子模块电容放电电流和交流系统注入电流。其中电容放电是造成过电流的主要原因^[17],其放电回路如图 7 所示。图中, R_L 和 L_L 分别为换流站与故障点之间直流线路的等

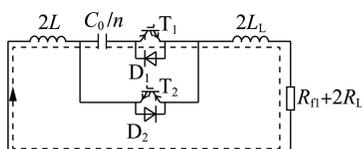


图 7 子模块电容放电电流通路

Fig.7 Discharging current path of sub-module capacitance

值电阻和等值电感。此时直流侧单端单相等值电路如图 8 所示。图中, $L_1 = 2L + 2L_L$, 为双极短路等效电感; $C_1 = C_0/n$, 为等效电容, n 为子模块个数; $R_1 = R_n + 2R_L$, 为等效电阻。

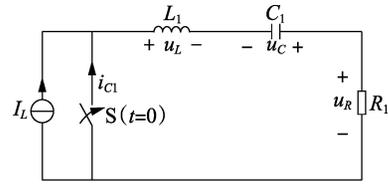


图 8 可控充电阶段中双极短路等效电路

Fig.8 Equivalent circuit under bipolar short circuit in controllable charging period

由于 $R_1 < 2\sqrt{L_1/C_1}$, 此时电容放电过程是一个振荡放电过程,其初始条件为:

$$\begin{cases} U_C(0+) = U_C(0-) = U_{dc} \\ I(0+) = I(0-) = I_L \end{cases} \quad (7)$$

子模块电容放电电流 i_{C1} 为:

$$i_{C1} = \frac{U_{dc}}{\omega L_1} e^{-\delta_1 t} \sin(\omega t) + \frac{\omega_0 I_L}{\omega} e^{-\delta_1 t} \sin(\omega t - \beta) \quad (8)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\delta_1^2 + \omega^2} \quad (9)$$

$$\beta = \arctan \frac{\omega}{\delta_1} \quad (10)$$

$$\delta_1 = \frac{R_1}{2L_1} \quad (11)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1} - \delta_1^2} \quad (12)$$

再考虑交流系统注入电流,文献[17]分析了交流系统馈入短路电流后故障电流峰值为:

$$I_{1m} = \sqrt{\frac{C_0}{nL} U_{dc}^2 + I_L^2} + \frac{\hat{I}_{3\text{-fault}}}{2} \quad (13)$$

其中, $\hat{I}_{3\text{-fault}}$ 为在系统发生三相短路故障时的短路故障电流峰值。由式(13)可以看出,可控充电阶段发生直流双极短路,故障电流峰值与故障前直流电压 U_{dc} 和桥臂电流 I_L 有关, U_{dc} 和 I_L 越大,则故障电流峰值 I_{1m} 越大。

2.3 与正常运行阶段故障对比

在不控充电阶段发生双极短路故障,MMC 所有子模块闭锁触发脉冲,故障特性与正常运行阶段故障时换流器闭锁后的情况类似,故障电流 i_1 远小于正常运行时故障的情况。

在可控充电阶段发生双极短路故障,故障特性与正常运行阶段故障类似。正常运行时发生故障,换流器闭锁前,电容放电回路亦如图 7 所示,故障电流峰值亦如式(13)所示,但初始条件与式(7)不同。由于可控充电阶段直流电压 U_{dc} 和桥臂电流 I_L 的值分别小于正常运行阶段 U_{dc} 和 I_L 的值,因此故障电

流 i_1 小于正常运行时故障的情况。若在功率提升阶段发生故障,则故障电流 i_1 介于充电过程故障和正常运行时故障之间。

2.4 保护适应性

由于启动过程发生双极短路故障时,故障电流 i_1 小于正常运行阶段故障的情况,因此直流低电压过电流保护电压特征量 $|U_{dP}-U_{dN}|$ 和电流特征量 $|I_{dP}|$ 、 $|I_{dN}|$ 也小于正常运行时故障的情况。可见启动过程发生双极短路故障,依然满足直流低电压过电流保护电压判据,但不一定满足电流判据。若直流低电压过电流保护电流整定值不合理,则在启动过程发生双极短路时保护可能会拒动。

因此,直流低电压过电流保护在整定计算时应考虑启动过程发生故障的情况,在启动过程和正常运行阶段设置 2 套电流保护定值,启动阶段电流定值 I_{set1} 应小于启动过程发生双极短路时正、负极母线电流绝对值的最小值,避免保护拒动。

3 直流电压不平衡保护

直流电压不平衡保护主要针对直流极或直流线路发生单极接地等不对称故障,其保护判据分为电压判据和电流闭锁电压判据,电压判据为:

$$|U_{dP}+U_{dN}|>U_{unb_set} \quad (14)$$

电流闭锁电压判据为:

$$|U_{dP}+U_{dN}|>U_{unb_set} \ \& \ I_{acZ}>I_{unb_set} \quad (15)$$

其中, U_{unb_set} 为直流电压不平衡保护电压整定值; I_{acZ} 为换流变阀侧中性点接地电流; I_{unb_set} 为直流电压不平衡保护电流整定值。

MMC-HVDC 系统发生单极接地故障时直流侧故障点与交流侧接地点形成故障回路^[12],其示意图如图 9 所示。图中, R_g 为交流系统接地电阻; R_{l2} 为单极接地故障电阻; i_2 为单极接地故障电流。

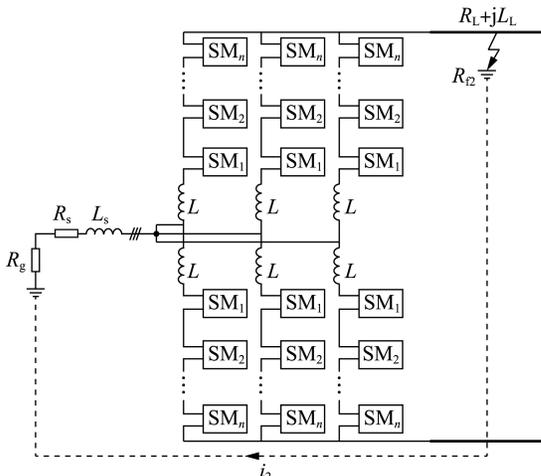


图 9 单极接地故障时的示意图

Fig.9 Schematic diagram under unipolar grounding fault

此时故障极电压绝对值下降,非故障极电压绝对值上升。故障极电压为:

$$U_{dP}=-I_2R_{l2} \quad (16)$$

非故障极电压为:

$$U_{dN}=U_{dP}-U_{dc}=-I_2R_{l2}-U_{dc} \quad (17)$$

故有:

$$|U_{dP}+U_{dN}|=|U_{dc}+2I_2R_{l2}| \quad (18)$$

$$I_{acZ}=I_2 \quad (19)$$

因此在分析启动过程阶段故障特性时,应重点关注故障电流 i_2 的大小。

3.1 不控充电阶段故障

在不控充电阶段发生单极接地故障,由于 MMC 所有子模块闭锁触发脉冲,子模块电容被旁路而无法放电,交流系统通过子模块二极管形成的三相半波整流电路向故障点注入短路电流,同时由桥臂电感提供的衰减直流分量流经交流系统接地电阻 R_g 和上桥臂二极管 D_2 注入故障点,此时等效电路如图 10 所示。

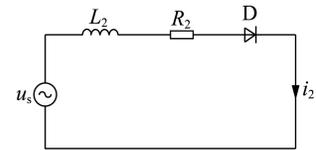


图 10 不控充电阶段中单极接地故障的等效电路

Fig.10 Equivalent circuit under unipolar grounding fault in uncontrollable charging period

图中, L_2 为单极接地故障等效电感,且 $L_2=L+L_s+L_l$; R_2 为单极接地故障等效电阻,且 $R_2=R_g+R_s+R_{l2}+R_{l1}$ 。

此时故障电流 i_2 包含两部分:一部分是由交流电源提供的周期分量 i_{2a} ,另一部分是由桥臂电感提供的衰减直流分量 i_{2d} 。其表达式为:

$$i_2=i_{2d}+i_{2a}=\frac{I_L e^{-(R_2/L_2)t} + \frac{R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} U_s \sin(\omega t) - \frac{\omega L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} U_s \cos(\omega t)}{\quad} \quad (20)$$

由式(20)可以看出,故障瞬间交流系统馈入电流的大小与故障前上桥臂电感电流 I_L 有关, I_L 的值越大,则 i_2 越大。

3.2 可控充电阶段故障

在可控充电阶段发生直流正极接地短路,直流侧故障点与交流侧接地点形成回路,换流器闭锁之前,MMC 上桥臂子模块电容通过此回路放电,电容放电回路等效电路如图 11 所示。图中, $C_2=2C_0/n$, 为单极接地故障等效电容; i_{c2} 为电容放电电流。

由于交流系统接地电阻 R_g 较大,所以有 $R_2 > 2\sqrt{L_2/C_2}$ 。因此在换流站闭锁之前,电容放电是一个非振荡放电过程,其初始条件为:

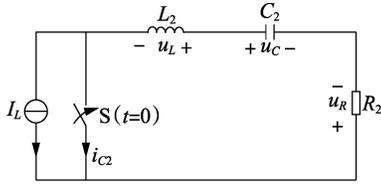


图 11 可控充电阶段中单极接地故障的等效电路

Fig.11 Equivalent circuit under unipolar grounding fault in controllable charging period

$$\begin{cases} U_c(0+) = U_c(0-) = \frac{U_{dc}}{2} \\ I(0+) = I(0-) = I_L \end{cases} \quad (21)$$

则电容放电电流 i_{C2} 为:

$$i_{C2} = \frac{nI_L(p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}) + C_0 p_1 p_2 U_{dc}(e^{p_1 t} - e^{p_2 t})}{n(p_1 - p_2)} \quad (22)$$

$$p_1 = -\delta_2 + \sqrt{\delta_2^2 - \varepsilon} \quad (23)$$

$$p_2 = -\delta_2 - \sqrt{\delta_2^2 - \varepsilon} \quad (24)$$

$$\delta_2 = R_2 / (2L_2) \quad (25)$$

$$\varepsilon = 1 / (C_2 L_2) \quad (26)$$

由式(22)可以看出,在可控充电阶段发生单极接地故障,电容放电电流 i_{C2} 的大小与故障前桥臂电感电流 I_L 以及直流电压 U_{dc} 有关,故障前 I_L 和 U_{dc} 越大,则 i_{C2} 的值越大。

3.3 与正常运行阶段故障对比

在不控充电阶段发生单极接地故障,MMC 所有子模块闭锁触发脉冲,故障特性与正常运行阶段故障时换流器闭锁后的情况类似,故障电流 i_2 的值远小于正常运行阶段故障的情况。

在可控充电阶段发生单极接地故障,故障特性与正常运行阶段故障类似。正常运行时发生故障,换流器闭锁前,电容放电回路亦如图 11 所示,故障电流峰值亦如式(22)所示,但初始条件与式(21)不同。由于可控充电阶段直流电压 U_{dc} 和桥臂电流 I_L 的值小于正常运行阶段 U_{dc} 和 I_L 的值,因此故障电流 i_2 小于正常运行时故障的情况。若在功率提升阶段发生故障,则故障电流 i_2 介于充电过程故障和正常运行时故障之间。

3.4 保护适应性

由于启动过程发生单极接地故障时,故障电流 i_2 小于正常运行阶段故障的情况,因此直流电压不平衡保护电压特征量 $|U_{dp} + U_{dn}|$ 和电流特征量 I_{acz} 也小于正常运行时故障的情况。可见启动过程发生单极接地故障,不一定满足直流电压不平衡保护电压判据和电流判据。若直流电压不平衡保护整定值不合理,则在启动过程发生单极接地故障时保护可能会拒动。

因此,直流电压不平衡保护在整定时应考虑启

动过程发生故障的情况,在启动过程和正常运行阶段设置 2 套电流保护定值,启动阶段电压整定值 U_{unb_set} 和电流整定值 I_{unb_set} 应分别小于启动过程中发生单极接地故障时 $|U_{dp} + U_{dn}|$ 和 I_{acz} 的最小值,避免保护拒动。

4 仿真分析

基于 PSCAD/EMTDC 软件,利用某实际柔性直流输电系统模型对启动过程与正常运行阶段发生双极短路和单极接地故障进行仿真,其主要参数见附录中表 A1。系统在 $[0.65, 1)$ s 处于不控充电阶段, $[1, 1.2)$ s 处于可控充电阶段, $[1.2, 4.3)$ s 处于功率提升阶段, 4.3 s 进入正常运行阶段。选取故障时刻为 0.65 s、0.8 s、1.1 s、3 s、4.3 s 及 5 s,故障持续时间为 0.3 s,对比分析不同阶段故障时的故障特性以及相应保护的動作情况。改变直流低电压过电流保护和直流电压不平衡保护的整定值,进一步验证启动过程故障时保护的動作情况。

4.1 故障特性

4.1.1 双极短路故障

在启动过程不同阶段和正常运行阶段发生双极短路故障,直流低电压过电流保护迅速动作,部分故障特性如图 12 所示。图中, t_1 为故障发生时刻; t_3 为交流断路器跳闸时刻。

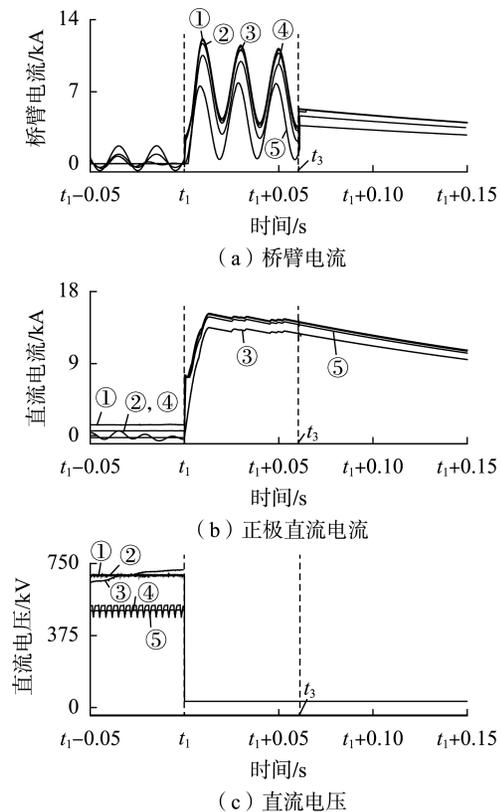
① $t_1=5$ s, ② $t_1=3$ s, ③ $t_1=1$ s, ④ $t_1=0.8$ s, ⑤ $t_1=0.65$ s

图 12 发生双极短路故障特性对比

Fig.12 Comparison of fault characteristics under bipolar short circuit

可以看出,当系统发生双极短路时,桥臂电流与直流电流上升,直流电压下降;在不控充电阶段发生故障,故障后桥臂电流和直流电流明显小于正常运行时故障的情况;在可控充电阶段和功率提升阶段发生故障,换流器闭锁前,桥臂电流和直流电流小于正常运行时故障的情况。

4.1.2 单极接地故障

在启动过程不同阶段和正常运行阶段发生单极接地故障,部分故障特性如图 13 所示。图中, t_2 为直流电压不平衡保护动作时刻,对于在可控充电阶段、功率提升阶段和正常运行阶段发生的故障, t_2 即为换流器闭锁时刻。

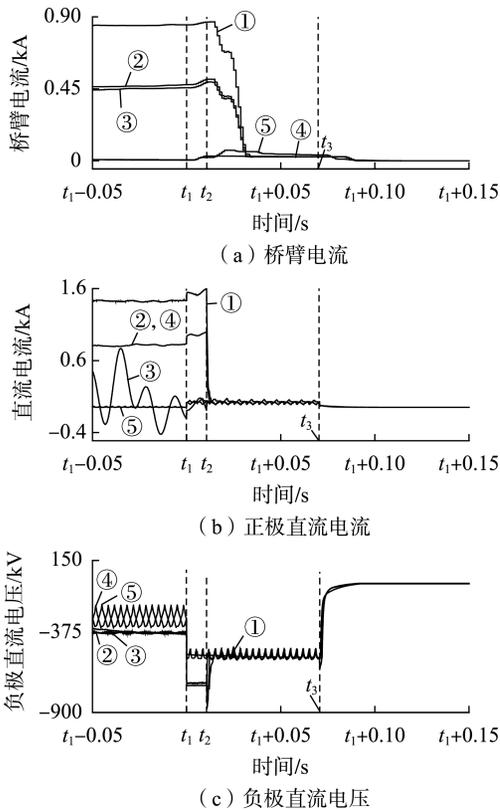


图 13 发生单极接地故障特性对比

Fig.13 Comparison of fault characteristics under unipolar grounding fault

可以看出,系统发生直流正极接地短路,换流器闭锁前,桥臂电流与正极直流电流上升,负极直流电压下降,其绝对值约为故障前的 2 倍;在不控充电阶段发生正极接地短路,故障后桥臂电流与正极直流电流很小,负极直流电压高于正常运行时故障的情况;在可控充电阶段和功率提升阶段发生单极接地短路,故障后桥臂电流与正极直流电流明显小于正常运行阶段故障的情况,负极直流电压与正常运行时故障相近。

由以上分析可知,启动过程发生双极短路故障和单极接地故障,故障电流小于正常运行阶段发生

故障的情况,与理论分析相符。

4.2 保护动作情况

4.2.1 直流低电压过电流保护

在不同故障时刻发生双极短路,仿真得到故障后直流低电压过电流保护的表征量 $|U_{dP}-U_{dN}|$ 的最小值和 $|I_{dP}|$ 、 $|I_{dN}|$ 的最大值如表 1 所示。

表 1 直流低电压过电流保护特征量

Table 1 DC low-voltage over-current protection quantities

| 故障时刻/s | $ U_{dP}-U_{dN} _{\min}/kV$ | $ I_{dP} _{\max}/kA$ | $ I_{dN} _{\max}/kA$ |
|--------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| 0.65 | 0.002 | 13.509 | 13.509 |
| 0.80 | 0.002 | 13.512 | 13.512 |
| 1.10 | 0.020 | 15.022 | 15.022 |
| 3.00 | 0.011 | 15.109 | 15.109 |
| 4.30 | 0.006 | 14.961 | 14.961 |
| 5.00 | 0.012 | 15.111 | 15.111 |
| 无故障 | 683.506 | 1.590 | 1.590 |

可以看出,在不控充电阶段发生双极短路, $|I_{dP}|_{\max}$ 和 $|I_{dN}|_{\max}$ 小于正常运行时发生故障的情况,直流低电压过电流保护存在拒动风险。

设置不同电流定值,仿真得到不同定值 I_{set3} 下直流低电压过电流保护在不同时刻发生故障的动作情况如表 2 所示。

表 2 直流低电压过电流保护动作情况

Table 2 DC low-voltage over-current protection action

| 故障时刻/s | 保护动作情况 | | | |
|--------|--------|--------|---------|---------|
| | 1.7 kA | 3.4 kA | 12.0 kA | 14.0 kA |
| 0.65 | 动作 | 动作 | 动作 | 拒动 |
| 0.80 | 动作 | 动作 | 动作 | 拒动 |
| 1.10 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 |
| 3.00 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 |
| 4.30 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 |
| 5.00 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 |

可以看出,由于不控充电阶段发生双极短路时 $|I_{dP}|_{\max}$ 和 $|I_{dN}|_{\max}$ 小于正常运行时故障的情况,若直流低电压过电流保护的电流整定值设置得过大,则在不控充电阶段故障时会发生拒动。因此,直流低电压过电流保护的整定应校验启动过程故障的情况,避免保护拒动。

4.2.2 直流电压不平衡保护

在不同故障时刻发生单极接地故障,仿真得到闭锁前直流电压不平衡保护特征量最大值如附录中表 A2 所示。可以看出,在不控充电阶段发生直流单极接地故障, $|U_{dP}+U_{dN}|_{\max}$ 和 $I_{acZ_{\max}}$ 的值小于正常运行时故障的情况,存在拒动风险。

不同电压整定值 $U_{unb_{set}}$ 下直流电压不平衡保护对不同时刻发生故障的动作情况如表 3 所示。

可以看出,由于不控充电阶段发生单极接地故障时 $|U_{dP}+U_{dN}|_{\max}$ 和 $I_{acZ_{\max}}$ 的值小于正常运行时故障的情况,若直流电压不平衡保护定值过大,则在不控充电阶段故障时会发生拒动。因此,直流电压不

表3 直流电压不平衡保护动作情况

Table 3 DC voltage unbalance protection action

| 故障时刻/s | 保护动作情况 | | | | | |
|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 52.5 kV | 105 kV | 245 kV | 380 kV | 525 kV | 550 kV |
| 0.65 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 | 拒动 | 拒动 |
| 0.80 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 | 拒动 |
| 1.10 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 |
| 3.00 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 |
| 4.30 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 |
| 5.00 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 | 动作 |

平衡保护的整定应考虑启动过程故障的情况,避免保护拒动。

5 结论

MMC-HVDC 的启动是系统运行的重要环节,启动过程中发生故障的问题不容忽视。本文对 MMC-HVDC 系统启动过程发生直流双极短路与单极接地的故障特性进行了详细分析,研究了启动过程故障与正常运行故障时系统典型直流极保护特征量的差异,分析了典型保护对启动过程故障的适应性,并进行了仿真验证。分析结果表明:

(1) 启动过程发生直流双极短路和单极接地短路,其故障特性与正常运行时故障存在一定差异,主要体现在故障电流比正常运行时故障小;

(2) 由于启动过程故障和正常运行时故障下保护特征量存在差异,直流低电压过电流保护和直流电压不平衡保护在启动过程故障时可能会拒动,因此在整定时应考虑启动过程故障的情况,建议设置2套保护定值,针对启动过程进行专门整定。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] WANG P Y, ZHANG X P, COVENTRY P F, et al. Start-up control of an offshore integrated MMC multi-terminal HVDC system with reduced DC voltage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2740-2751.
- [2] 裘鹏, 黄晓明, 唐庚, 等. 一种新的柔性直流输电系统远端启动策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 100-105.
QIU Peng, HUANG Xiaoming, TANG Geng, et al. A new remote start-up strategy for flexible DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 100-105.
- [3] 裘鹏, 杨美娟, 章妹俊, 等. MMC-MTDC 系统协调启动控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1800-1807.
QIU Peng, YANG Meijuan, ZHANG Shujun, et al. Coordinated start-up strategy for MMC-MTDC system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1800-1807.
- [4] 张哲任, 徐政, 许烽, 等. 模块化多电平换流器型高压直流输电系统停运控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2670-2680.
ZHANG Zheren, XU Zheng, XU Feng, et al. Shut-down control scheme for modular multilevel converter based HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2670-2680.
- [5] 周月宾, 江道灼, 郭捷, 等. 模块化多电平换流器型直流输电系统的启停控制[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 204-209.
ZHOU Yuebin, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. Start/stop control of modular multilevel converter based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 204-209.
- [6] 孔明, 邱宇峰, 贺之渊, 等. 模块化多电平式柔性直流输电换流器的预充电控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 67-73.
KONG Ming, QIU Yufeng, HE Zhiyuan, et al. Pre-charging control strategies of modular multilevel converter for VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 67-73.
- [7] 李超, 唐志军, 林国栋, 等. 模块化多电平换流器子模块均压电阻参数设计方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 146-152.
LI Chao, TANG Zhijun, LIN Guodong, et al. Parameter optimization strategy of sub-module balancing resistor in MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 146-152.
- [8] 阎发友, 汤广福, 孔明, 等. 基于模块化多电平换流器的直流电网预充电控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5147-5154.
YAN Fayou, TANG Guangfu, KONG Ming, et al. Pre-charging control strategy for MMC-based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5147-5154.
- [9] 肖晔庆, 徐政, 薛英林, 等. 多端柔性直流输电系统的启动控制策略[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2550-2557.
XIAO Huangqing, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. Start control strategy of MMC-MTDC system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2550-2557.
- [10] 胡文旺, 唐志军, 林国栋, 等. 柔性直流控制保护系统方案及其工程应用[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 27-33.
HU Wenwang, TANG Zhijun, LIN Guodong, et al. Scheme and engineering application of flexible DC control and protection system automation of electric power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 27-33.
- [11] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [12] 杨海倩, 王玮, 荆龙, 等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 40-46.
YANG Haiqian, WANG Wei, JING Long, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 40-46.
- [13] 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.
- [14] 张建坡, 赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 32-37.
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong. Simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 32-37.
- [15] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 柔性直流输电线路故障处理与保护技术评述[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 158-167.
LIU Jian, SHAO Nengling, FAN Chunju, et al. Comments on fault han-

- ding and protection technology for VSC-HVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 158-167.
- [16] 郭晓茜,崔翔,齐磊. 架空线双极 MMC-HVDC 系统直流短路故障分析和保护[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2177-2184.
GUO Xiaoqian, CUI Xiang, QI Lei. DC short-circuit fault analysis and protection for the overhead line bipolar MMC-HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2177-2184.
- [17] 王姗姗,周孝信,汤广福,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.
- [18] 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.
- [19] ALBALATE R V, BELTRAN H, ROLAN A, et al. Analysis of the performance of MMC under fault conditions in HVDC-based offshore wind farms [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 839-847.
- [20] 孙吉波,王宇,刘崇茹,等. 基于 MMC 的多端直流电网双极短路故障电流计算[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 72-78.
SUN Jibo, WANG Yu, LIU Chongru, et al. Faulty line selection method using mutual correlation cluster of grounding fault waveforms based on improved DTW method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 72-78.
- [21] LAN T K, LI Y H, DUAN X Z, et al. Simplified analytic approach of

- pole-to-pole faults in MMC-HVDC for AC system backup protection setting calculation [J]. Energies, 2017, 31(4): 1-16.
- [22] 李探,赵成勇,王朝亮,等. 用于电网黑启动的 MMC-HVDC 系统换流站启动策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 117-122.
LI Tan, ZHAO Chengyong, WANG Zhaoliang, et al. A commutation station start strategy of MMC-HVDC system for black start [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 117-122.

作者简介:



刘若平

刘若平(1995—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为柔性直流输电系统保护与控制等(**E-mail**: liuruoping1995@163.com);

李银红(1976—),女,湖北荆门人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护整定计算理论、电力系统直流保护整

定计算及可再生能源等(**E-mail**: liyinhong@hust.edu.cn);

肖浩(1989—),男,湖南岳阳人,博士研究生,主要研究方向为高压直流输电系统保护与控制、交直流系统动态交互作用机理等(**E-mail**: xiaohao@hust.edu.cn);

陈朝晖(1979—),男,辽宁本溪人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护、高压直流输电系统控制与保护等(**E-mail**: chenzh@csg.cn);

罗强(1994—),男,四川资阳人,硕士研究生,主要研究方向为柔性直流输电系统保护与控制等(**E-mail**: luoqiang@hust.edu.cn)。

Research on adaptability of DC pole protection to fault occurred during start-up process for MMC-HVDC

LIU Ruoping^{1,2}, LI Yinhong^{1,2}, XIAO Hao^{1,2}, CHEN Zhaohui³, LUO Qiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory,

School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. CSG Power Dispatching & Control Centre, Guangzhou 510663, China)

Abstract: At present, the research on the principle and settings of DC pole protection for MMC-HVDC (Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current) is concerned about the normal operating conditions of the system, there is little adaptability analysis of DC pole protection during start-up process. The dynamic start-up process of MMC-HVDC is described theoretically, and the characteristics of DC pole-to-pole short circuit fault and monopolar grounding fault are analyzed in detail. The difference of related quantities of typical DC pole protection between fault occurred during start-up process and normal operating stage is analyzed, and the adaptability of the typical protection to fault occurred during start-up process is also studied. Based on detailed electromagnetic transient model of MMC-HVDC system, the DC pole-to-pole short circuit fault and monopolar grounding fault occurred during both start-up process and normal operating stage are simulated, which verifies the analysis on fault characteristics during start-up process and the adaptability of typical protection to start-up process. New suggestions are put forward for the protection setting calculation.

Key words: MMC-HVDC; start-up process; DC fault; fault characteristics; DC pole protection

附录

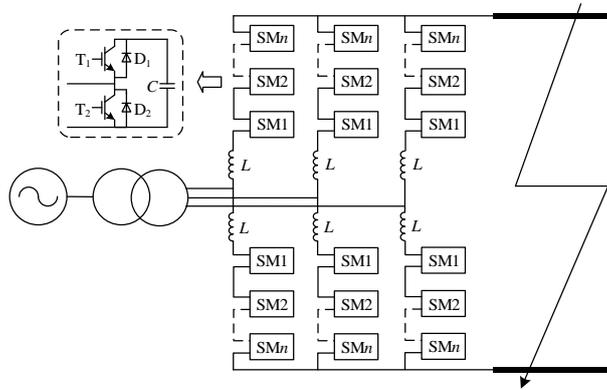


图 A1 MMC-HVDC 双极短路故障示意图
Fig.A1 MMC-HVDC bipolar short circuit fault diagram

表 A1 仿真系统主要参数
Table A1 Main parameters of simulation system

| 参数名 | 参数值 |
|-----------------------|---------|
| 交流系统额定电压/kV | 525 |
| 变压器变比/kV | 525/375 |
| 变压器漏抗/p.u. | 0.14 |
| 交流侧额定容量/MW | 1044 |
| 直流侧额定容量/MW | 1000 |
| 直流侧额定电压/kV | ±350 |
| 直流侧额定电流/kA | 1.429 |
| 桥臂子模块数 n | 76 |
| 子模块电容 $C/\mu\text{F}$ | 8000 |
| 桥臂电感 L/mH | 105 |

表 A2 直流电压不平衡保护特征量仿真数据
Table A2 DC voltage unbalance protection related quantities

| 故障时刻/s | $ U_{dP}+U_{dN} _{\text{max}}/\text{kV}$ | $I_{\text{acZ_max}}/\text{kA}$ |
|--------|--|---------------------------------|
| 0.65 | 507.367 | 38.345 |
| 0.80 | 526.396 | 35.406 |
| 1.10 | 697.562 | 49.963 |
| 3.00 | 695.063 | 49.839 |
| 4.30 | 695.377 | 49.799 |
| 5.00 | 700.079 | 49.936 |
| 无故障 | 0 | 0 |