

利用 Teager 能量算子瞬时能量的模块化 多电平换流器多端柔性直流电网保护方法

高淑萍¹, 高悦¹, 宋国兵², 姜元月¹, 段必聪¹

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 710054, 西安; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为提高模块化多电平换流器多端柔性直流电网快速清除和隔离故障的能力, 提出了一种利用 Teager 能量算子提取电压故障分量瞬时能量的纵联保护方法。根据多端柔性直流电网故障后的电压故障分量瞬时能量的不同, 利用 Teager 能量算子对电压故障分量进行处理, 提取电压故障分量瞬时能量最大值, 构造保护判据, 给出整定原则。利用各保护测量安装处的电压故障分量瞬时能量最大值判定故障区间及区内外故障。利用同侧换流站正负极电压故障分量瞬时能量之比进行单双极故障判定, 并进行故障选极。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了 ± 500 kV 四端柔性直流电网模型进行验证, 结果表明, 所提方法可在 3 ms 内快速可靠动作, 耐过渡电阻能力强, 在不同的工况下都可准确进行故障区间及区内外故障判别, 并可实现故障选极。

关键词: 柔性直流电网; 模块化多电平换流器; 故障; Teager 能量算子; 纵联保护

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202009004 **文章编号:** 0253-987X(2020)09-0040-09



OSID 码

A Protection Method Based on Instantaneous Energy of Teager Energy Operator for Modular Multilevel Converter Multiterminal Flexible Direct Current Grid

GAO Shuping¹, GAO Yue¹, SONG Guobing², JIANG Yuanyue¹, DUAN Bicong¹

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the ability of quick clearing and isolating faults of modular multi-level converter (MMC) multi-terminal flexible DC grid, a new pilot protection method with instantaneous energy of voltage fault component extracted by Teager energy operator is proposed. According to the difference of the instantaneous energy of the voltage fault component in the multi-terminal flexible grid with a fault, the protection method chooses Teager energy operator to process the voltage fault component to obtain the maximum instantaneous energy of voltage fault component, then establishes the protection criterion by the maximum instantaneous energy of the voltage fault component, and gives the setting principle. The fault interval and the internal and external faults are determined by the maximum value of the instantaneous energy of the fault component at each protection measurement device, unipolar or bipolar fault is distinguished by the ratio of positive and negative pole fault components' instantaneous energy of converter station on the same side for fault pole selection. A ± 500 kV four-terminal flexible DC

收稿日期: 2020-03-23。 作者简介: 高淑萍(1970—),女,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777166);国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U1766209);国家留学基金资助项目。

网络出版时间: 2020-05-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200519.1551.006.html>

power grid model is constructed to verify the protection algorithm on PSCAD/EMTDC. Simulation shows that the proposed protection method can operate quickly and reliably within 3 ms, has strong capacity to resist transition resistance, and can accurately identify the fault interval, distinguish between internal and external faults, implement fault pole selection under different conditions.

Keywords: flexible direct current grid; modular multilevel converter; direct current fault; Teager energy operator; pilot protection

针对电网的并网与消纳问题,柔性直流输电技术凭借着其功率调节独立、运行能力灵活得以广泛应用^[1-3]。由于具有开关损耗小与扩展性强的优点,模块化多电平换流器(MMC)柔性直流输电技术倍受青睐^[4-6]。相较于其他直流输电系统,基于 MMC 的多端柔性直流电网在仿真建模和继电保护策略等方面更为复杂。直流系统发生故障的瞬间,电压暂态分量与电流暂态分量骤变,快速可靠地识别故障并使继电保护装置动作,成为 MMC 多端柔性直流电网亟待解决的问题^[7]。

MMC 多端柔性直流电网的稳定运行与快速可靠的直流线路保护息息相关。近年来,针对柔性直流输电线路保护,国内外学者做了大量的研究,例如:文献[8]提取故障时刻电压与电流的故障分量,利用二阶微分法区别各故障,但信号处理精度较低;文献[9]利用短时能量识别多端柔性直流单极接地故障,但未讨论其他类型故障;文献[10]选取线路两端反行波幅积分的比来识别区内外故障,该方法保护时间较长,实用性还有待进一步探讨;文献[11-12]运用小波变换与 S 变换等方法进行信号处理,提取故障初始行波波头信息,但采样频率要求较高;文献[13-14]讨论了基于电压变化率的高压直流电网保护方法,但其可靠性与速动性仍有待研究;文献[15]提出了纵联行波差动保护方法,分析了故障后 MMC 闭锁前的故障特征,但多端柔性直流电网能否达到速动性要求尚待研究;文献[16]分析了全故障电流信息,利用暂态电流方向差动保护进行直流线路短路故障的判别,但对于高阻故障情况还需进一步讨论;文献[17]针对有功功率极性进行保护方法的探索,但有功功率对于交流故障的识别更适用;文献[18]提出了利用特定频率下直流滤波器组 and 高压直流输电线路中的电流突变量比值来识别故障发生的位置;文献[19-20]分别对电能质量扰动和电压跌落进行讨论,提出了利用 Teager 能量算子进行检测,但并未将其应用于多端柔性直流电网继电保护中。针对多端柔性直流电网的继电保护方法,应运

用新思路进一步探究。

本文提出了一种利用 Teager 能量算子瞬时能量的纵联保护方法,该方法在故障发生时刻提取电压故障分量,利用 Teager 能量算子提取故障时的电压故障分量的瞬时能量信号,利用瞬时能量进行故障区域选取,并实现区内外故障的判别和故障选极。大量仿真实验验证了本文方法的正确性。

1 模块化多电平换流器多端柔性直流电网的拓扑结构

针对张北四端环形柔性直流电网进行特性分析,该系统为四端对称双极 MMC 柔性直流输电线路,直流电压等级为 ± 500 kV,各线路长度均按实际长度标记,拓扑结构以及故障位置如图 1 所示。图 1 中,在各站直流侧附加串联小电感用以构造边界条件,根据实际情况,该参数取 0.3 H。

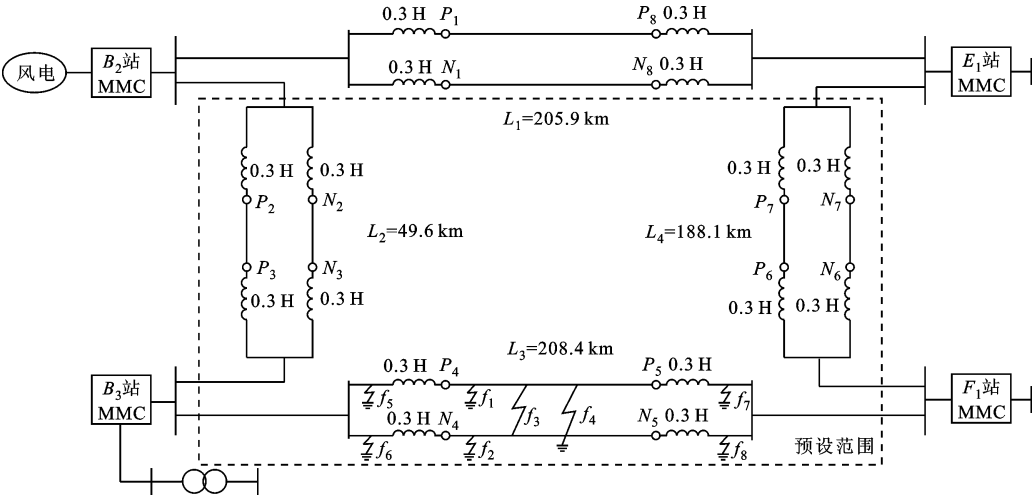
2 故障特性分析

2.1 多端直流电网故障区间判别

多端柔性直流电网拓扑结构较复杂,故障可能发生在电网中不同的换流站之间。为保证非故障线路上的保护不误动,应首先进行故障区间与非故障区间的区分。

以图 1 所示拓扑结构为例,假设正极接地故障(f_1)发生在 B_3 与 F_1 站之间,对故障线路(L_3)与非故障线路(L_2 、 L_4)电压故障分量瞬时能量进行分析。在虚线框预设范围内,故障线路等效图如图 2 所示。

由图 2 可知,当 f_1 发生在 B_3 与 F_1 站之间时,2~7 共 6 处保护测量安装点瞬时电压均会突变,保护均可能动作。但是,由于线路边界元件对暂态电压信号的变化率具有衰减作用^[21],非故障区间保护测量安装点(2、3、6、7)所得的电压故障分量瞬时能量较小,而故障线路保护测量安装点(4、5)所得的电压故障分量瞬时能量较大。可由此差异构造相应判据,判定故障发生在 L_3 上,即在 B_3 与 F_1 站之间。



$P_1 \sim P_8$ —正极两侧换流站保护测量安装点; $N_1 \sim N_8$ —负极两侧换流站保护测量安装点; f_1 —正极接地故障; f_2 —负极接地故障; f_3 —双极跨接故障; f_4 —双极短路接地故障; $f_5 \sim f_8$ —换流站直流线路出口处的区外故障。

图1 张北四端 MMC 柔性直流电网拓扑^[22]

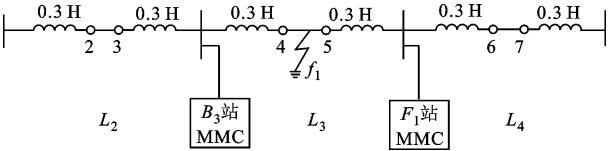
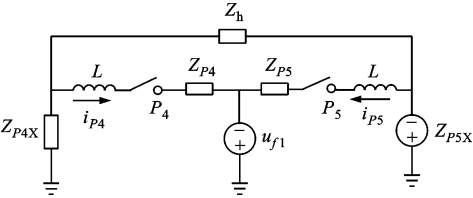


图2 B_3 与 F_1 站之间发生故障 f_1 时的故障线路等效图

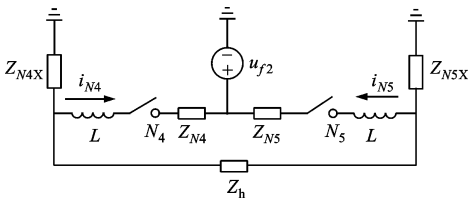
2.2 区内外故障特性分析

确定故障发生在某两换流站之间后,还需要判断故障是否发生输电线路。在故障发生瞬间($t=0$ 时刻),系统可近似看作线性,因此叠加定理仍可适用。

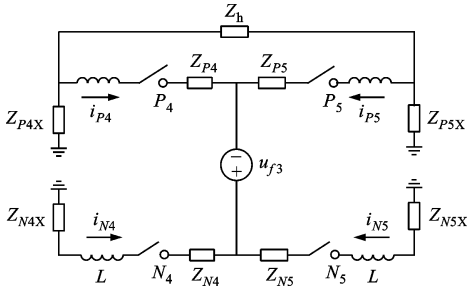
2.2.1 区内故障特性分析 当故障发生在高压直流线路区域内,可得故障附加网络,如图3所示。规定两侧换流站测量装置中电流的参考正方向为交流侧指向直流线路。



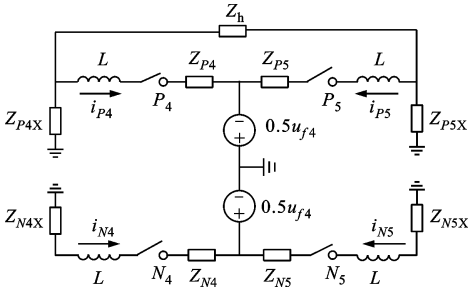
(a)故障 f_1 发生时的故障附加网络



(b)故障 f_2 发生时的故障附加网络



(c)故障 f_3 发生时的故障附加网络



(d)故障 f_4 发生时的故障附加网络

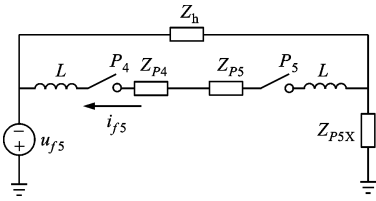
i_{P4} 、 i_{N4} —整流侧正极和负极故障电流; i_{P5} 、 i_{N5} —逆变侧正极和负极故障电流; Z_h —非故障线路等效阻抗; Z_{P4X} 、 Z_{P5X} 、 Z_{N4X} 、 Z_{N5X} —两换流站交流侧的正负极等效阻抗; Z_{P4} 、 Z_{P5} —故障点距保护安装处的等效阻抗。

图3 区内故障附加网络

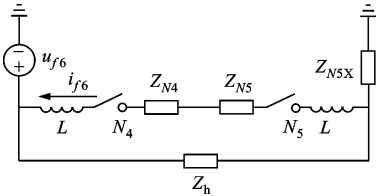
定义 U_{P4} 和 U_{P5} 分别为两侧保护测量安装点的正极暂态电压分量, U_{N4} 和 U_{N5} 分别为两侧保护测量安装点的负极暂态电压分量。由图3a可知,当线路故障状态为正极接地故障(f_1)时,可视为在正常网络上叠加负电源, U_{P4} 和 U_{P5} 骤降,电压故障分量的瞬时能量较大, U_{N4} 和 U_{N5} 变化微小,电压故障分量

的瞬时能量较小。由图 3b 可知,当线路发生负极接地故障(f_2)时,可视为在正常网络上叠加正电源, U_{N4} 和 U_{N5} 骤升,电压故障分量的瞬时能量较大, U_{P4} 和 U_{P5} 变化微小,电压故障分量的瞬时能量较小。由图 3c 和 3d 可知,当线路故障状态为双极故障(f_3 和 f_4)时, U_{P4} 和 U_{P5} 骤升, U_{N4} 和 U_{N5} 骤降,电压故障分量的瞬时能量均较大。

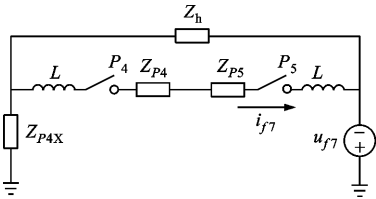
2.2.2 区外故障特性分析 当故障发生在高压直流线路区域外,可得故障附加网络,如图 4 所示。规定两侧换流站测量装置中电流的参考正方向为交流侧指向直流线路。



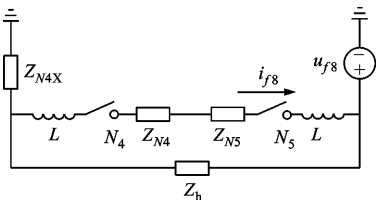
(a) 故障 f_5 发生时的故障附加网络



(b) 故障 f_6 发生时的故障附加网络



(c) 故障 f_7 发生时的故障附加网络



(d) 故障 f_8 发生时的故障附加网络

图 4 区外故障附加网络

当系统发生区外故障时,由于串联电感抑制波形突变,导致区内故障电压变化率与幅值均变化微小,故电压故障分量的瞬时能量较小。由图 4a~4d 可知,当线路发生区外故障 $f_5 \sim f_8$ 时,由于串联电感的存在, U_{P4} 、 U_{P5} 、 U_{N4} 、 U_{N5} 的变化皆微小,电压故障分量的瞬时能量均较小。

由 2.2 小节可知:发生区内故障时,故障线路整流侧与逆变侧的电压分量发生骤变,电压故障分量的瞬时能量均较大;发生区外故障时,由于串联电感的存在,整流侧与逆变侧的电压分量不会发生骤变,电压故障分量的瞬时能量均较小。

2.3 故障选极

由于线路之间具有耦合作用,健全极会受到故障极的影响感应出电气量,因此需要进一步进行故障选极。当直流线路发生单极故障时,故障极电压分量骤变,瞬时能量较大,而非故障极则与之相反;当直流线路发生双极故障时,故障极与非故障极电压分量均骤变,瞬时能量均较大。由此特性即可清晰地识别故障极与健全极。

3 保护方法实现流程

3.1 故障分量提取

由 2.2 节故障特性分析可知,故障发生瞬间的电压分量会发生突变,由叠加定律可提取电压故障分量,即

$$\Delta U_m(i) = U_m(i) - U_m(i-k) \quad (1)$$

式中: i 为采样窗内各采样点的标记,取为 $1 \sim 20$; $\Delta U_m(i)$ 为 m 处保护测量安装点在 i 处采样点所提取的电压故障分量; $U_m(i)$ 为 m 处保护测量安装点在 i 处采样点的实测电压; k 为选取的故障前采样点标记,一般选用故障发生前 $1 \sim 2$ 个采样周期的采样点,计及系统存在一定的频率偏差,本文取 k 为 200。为避免保护判据发生误判,根据实际精度需要,选取采样频率为 10 kHz,对 i 个采样点数据进行处理分析。

3.2 Teager 能量算子提取瞬时能量

非线性信号分析算子 Teager 能量算子由美国科学家 Teager 提出^[19-20],具有提取信号瞬时能量简单、跟踪信号变换迅速、时间分辨率高的优点。相较于传统能量算子,电压故障分量经 Teager 能量算子处理后,瞬时能量与幅值和频率均有关,局部特性明显,可快速进行直流线路故障分析。

非线性信号 $\alpha(t)$ 的 Teager 能量算子定义为

$$\Psi[\alpha(t)] = \dot{\alpha}^2(t) - \alpha(t)\ddot{\alpha}(t) \quad (2)$$

当信号为离散信号时,Teager 能量算子定义为

$$\Psi_d[\alpha(i)] = \alpha^2(i) - \alpha(i-1)\alpha(i+1) \quad (3)$$

Ψ 与 Ψ_d 的映射关系为

$$\Psi[\alpha(t)] = \Psi_d[\alpha(i-1)]/T^2 \quad (4)$$

式中 T 为两采样点时间间隔。

当直流故障发生后,选取合适的采样频率与时

间窗,利用式(1)提取电压故障分量。所提取的电压故障分量为离散信号,用离散后向差分方程代替时间变量的一、二阶导数,即

$$\dot{\Delta U}(t) = [\Delta U(i) - \Delta U(i-1)]/T \quad (5)$$

$$\ddot{\Delta U}(t) = [\Delta U(i) - 2\Delta U(i-1) + \Delta U(i-2)]/T^2 \quad (6)$$

直流线路区内外发生故障的瞬间,电压故障分量 U_{P4} 、 U_{P5} 、 U_{N4} 和 U_{N5} 会发生骤变,此时电压故障分量频率高、幅值变化大。电压故障分量瞬时能量经 Teager 能量算子处理后,表现出明显的瞬态阶跃特性,更易于检测与判定。

3.3 保护判据

3.3.1 保护启动 直流线路发生异常时,提取各保护测量安装处的电压故障分量变化率,构造保护启动判据为

$$|d(\Delta U)/dt| > K_{\text{set1}} \quad (7)$$

故障发生瞬间,电压故障分量发生较大突变,变化率大于0。式(7)中, K_{set1} 取为 1×10^{-5} 。若满足判据式,则进一步区分故障区间与非故障区间。

提取各保护测量安装处的电压故障分量瞬时能量最大值 T_x ,构造判别故障区间与非故障区间的判据为

$$|T_x| > K_{\text{set1}} \quad (8)$$

式中: $x=1, 2, \dots, 8$ 为各保护测量安装点的标记; K_{set1} 为判别故障区间与非故障区间的整定值。

由2.1小节分析可知,当故障发生在不同区间时,由于平波电抗器对电气量具有衰减作用,所以故障区间所测的 T_x 大于非故障区间的。考虑系统运行控制方式及其环形拓扑结构, K_{set1} 最终取为 1×10^{12} 。若保护测量安装点同时满足式(7)和式(8),则保护启动,否则不启动。根据式(7)和式(8)可以实现故障区间的判别。

3.3.2 区内外故障识别判据 在实现故障区间的判别之后,为保证非故障线路保护不误动,需进一步判别故障是否发生在直流输电线路,即进行区内外故障判别。由2.2小节分析可知,由于边界元件的抑制作用,区内故障的电压故障分量瞬时能量较大,区外故障的电压故障分量瞬时能量较小。提取线路两侧换流站电压故障分量瞬时能量最大值,即

$$K_1 = \max(|T_a|, |T_b|) \quad (9)$$

式中 T_a 和 T_b 分别为整流侧和逆变侧测量保护安装处的电压故障分量瞬时能量。根据区内外故障的差异性,构造判别区内外故障的判据为

$$K_1 > K_{\text{set2}} \quad (10)$$

式中 K_{set2} 为判别区内外故障的整定值。为可靠区

分区分外故障,应针对最严重的故障情况选取 K_{set2} ,即整定原则为区内高阻接地故障躲过区外金属性接地故障。通过大量仿真实验可知,故障发生在区内和区外时, K_1 差异较大,因此在计及一定裕度的情况下, K_{set2} 取为 2×10^{12} 较为合理。若满足式(10),判定为故障位置在直流输电线路,即为区内故障,否则故障位置不在直流输电线路,即为区外故障,保护不动作。

3.3.3 故障极识别判据 若故障发生在区内,还需进一步识别故障是发生在直流输电线路的正极还是负极线路上,即需要判别故障极。提取同换流站双极电压故障分量瞬时能量的比值,即

$$K_2 = |T_{Pa}| / |T_{Na}| \quad (11)$$

式中 T_{Pa} 和 T_{Na} 分别为整流侧正极和负极的瞬时能量。虽然健全极在耦合作用下会感应出电气量,但其幅值与故障极的相差较大,因此保护测量安装处的正负两极电压故障瞬时能量比值也随之变化。正极故障时, K_2 较大;负极故障时, K_2 较小;双极故障时, K_2 约为1。因此,构造识别故障极的判据为

$$\begin{cases} K_2 > 1.2, & \text{正极故障} \\ 0.8 < K_2 \leq 1.2, & \text{双极故障} \\ K_2 \leq 0.8, & \text{负极故障} \end{cases} \quad (12)$$

式中整定值1.2和0.8可根据实际可靠性进行调整。

本文所提的柔性直流电网保护方法流程如图5所示。

4 仿真结果验证

参考张北四端柔性直流输电系统的实际参数,利用PSCAD/EMTDC仿真平台搭建对应模型。仿真时长为4.5 s,故障均设置在 B_3 与 F_1 站之间,故障时刻为3.5 s,故障持续0.1 s,故障采样窗口长度为2 ms,采样频率为10 kHz。

4.1 故障线路与非故障线路的区分

假设线路故障 f_1 发生在 B_3 与 F_1 站之间,提取各保护测量安装点的正负极电压故障分量,计算并比较该点两极的瞬时能量,1~8处正极电压的 T_x 如表1所示。

由表1可得, B_3 站4处与 F_1 站5处两测量点所得的 T_x 均大于整定值 $K_{\text{set1}} = 1 \times 10^{12}$,相反其他6个测量点所得 T_x 均小于 $K_{\text{set1}} = 1 \times 10^{12}$,故由式(8)判定故障发生在 B_3 与 F_1 站之间。大量仿真验证表明,当故障设置不同类型和故障设置在不同站间时,本文方法皆可有效地区别故障区间与非故障区间。

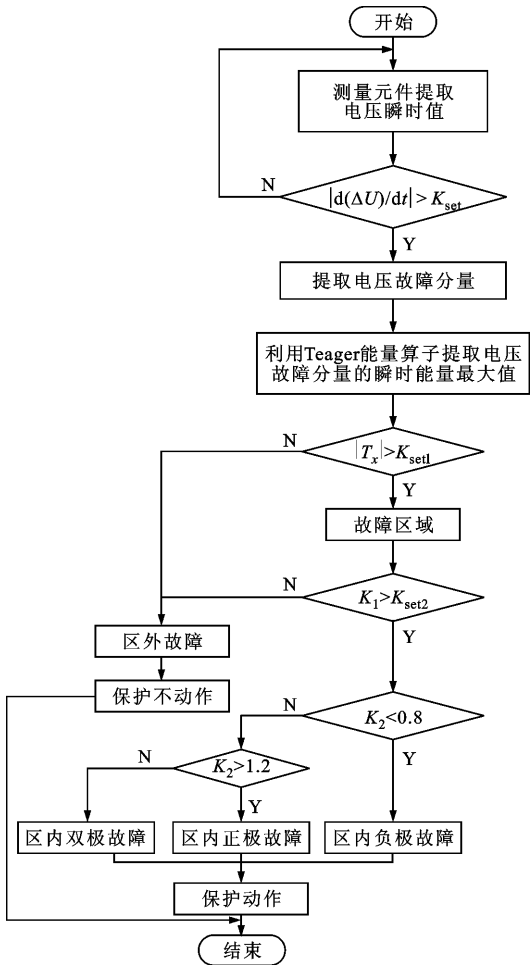


图 5 本文所提的柔性直流电网保护方法流程

表 1 故障 f_1 发生时 1~8 处正极电压的 T_x

保护测量安装处	T_x	保护测量安装处	T_x
1	3.01×10^{11}	5	3.63×10^{13}
2	5.00×10^{11}	6	3.18×10^5
3	5.41×10^{11}	7	5.05×10^{11}
4	6.56×10^{13}	8	2.00×10^{11}

4.2 区内外故障仿真结果

在进行区内外故障判别时,应考虑最严重的故障情况,整定原则为区内高阻接地故障躲过区外金属性接地故障。当直流故障发生在区外时,换流器出口的直流故障与区内故障仅隔一个边界元件,难以识别,易与区内故障混淆。因此,本文选取换流器出口处设置区外金属性接地故障($f_5 \sim f_8$),接地电阻为 0.01Ω ,模拟金属性接地。针对不同故障位置、过渡电阻及故障类型进行区内故障仿真。

4.2.1 直流线路金属性短路故障 为说明整定原则,选用区内故障 f_1 与距其最近的区外故障 f_5 进行比较,仿真结果分别如图 6 和图 7 所示。

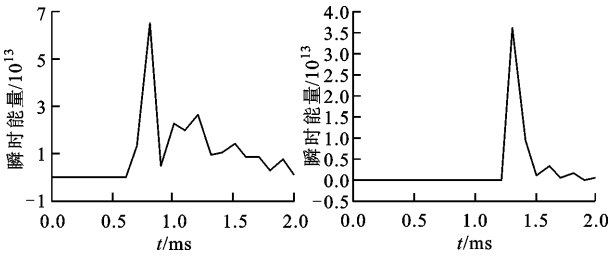


图 6 故障 f_1 仿真结果

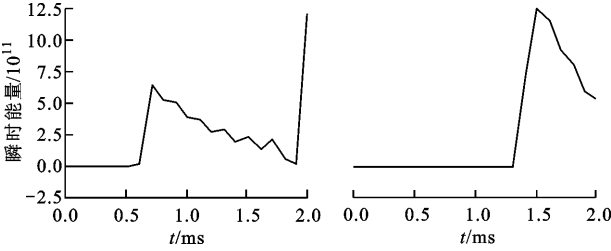


图 7 故障 f_5 仿真结果

结合区内外故障识别判据式(9)(10),提取线路两侧换流站电压故障分量瞬时能量最大值。由图 6 可知 $K_1 = 6.65 \times 10^{13} > K_{set2} = 2 \times 10^{12}$,故判定为区内故障,由图 7 可知 $K_1 = 1.26 \times 10^{12} < K_{set2} = 2 \times 10^{12}$,故判定为区外故障。为探究线路末端保护的灵敏性,针对不同故障位置及故障类型分别进行仿真验证,结果如表 2 所示。

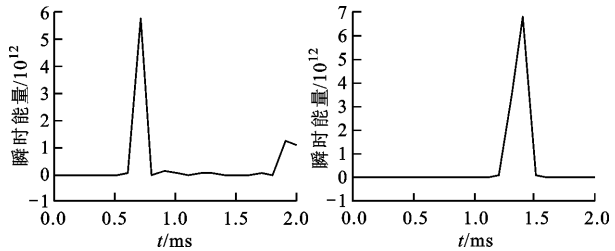
表 2 区内外金属性短路故障识别结果

故障类型	故障位置	$K_1/10^{12}$	区内外判定结果
f_1	距整流侧保护安装处 10%	66.51	区内
	距整流侧保护安装处 90%	70.02	
f_2	距整流侧保护安装处 10%	66.49	区内
	距整流侧保护安装处 90%	70.52	
f_3	距整流侧保护安装处 10%	83.57	区内
	距整流侧保护安装处 90%	83.43	
f_4	距整流侧保护安装处 10%	75.86	区内
	距整流侧保护安装处 90%	76.32	
f_5	整流侧换流器出口	1.26	区外
f_6	整流侧换流器出口	1.27	区外
f_7	逆变侧换流器出口	1.38	区外
f_8	逆变侧换流器出口	1.35	区外

由表 2 可知,故障 $f_1、f_2、f_3、f_4$ 是金属性短路故障时,各自的 K_1 均大于 $K_{set2} = 2 \times 10^{12}$,故障 $f_5、f_6、f_7、f_8$ 是金属性接地故障时,各自的 K_1 均小于 $K_{set2} = 2 \times 10^{12}$ 。由此可见,本文方法可准确有效地

进行区内外故障判别。

4.2.2 直流线路高过渡电阻短路故障 由于过渡电阻的限制作用,电压故障分量与过渡电阻的阻值成反比。以故障 f_1 为例,过渡电阻设为 $500\ \Omega$,其他各参数均不变,仿真结果如图 8 所示。



(a) B_3 站 4 处正极瞬时能量 (b) F_1 站 5 处正极瞬时能量
图 8 过渡电阻为 $500\ \Omega$ 时故障 f_1 的仿真结果

结合区内外故障识别判据式(9)(10),由图 8 可知, $K_1=6.87\times10^{12}>K_{set2}=2\times10^{12}$,故判定为区内故障。为探究发生其他高阻故障时保护是否可以可靠速动,分别针对 250 、 500 、 $1\ 000\ \Omega$ 的过渡电阻进行仿真验证,结果如表 3 所示。由表 3 可知,当发生

表 3 区内外高过渡电阻故障识别结果

故障类型	故障位置	故障接地电阻/ Ω	$K_1/10^{12}$	区内外判定结果
f_1	距整流侧保护安装处 10%	250	9.97	区内
		500	6.87	
		1 000	4.65	
	距整流侧保护安装处 90%	250	11.8	
		500	7.23	
		1 000	5.78	
f_2	距整流侧保护安装处 10%	250	11.1	区内
		500	6.78	
		1 000	4.97	
	距整流侧保护安装处 90%	250	11.4	
		500	7.29	
		1 000	5.43	
f_3	距整流侧保护安装处 10%	250	25.9	区内
		500	9.77	
		1 000	6.49	
	距整流侧保护安装处 90%	250	24.7	
		500	9.13	
		1 000	6.52	
f_4	距整流侧保护安装处 10%	250	26.4	区内
		500	9.83	
		1 000	6.77	
	距整流侧保护安装处 90%	250	25.6	
		500	9.42	
		1 000	6.49	

高阻故障时,故障 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 的 K_1 均大于 $K_{set2}=2\times10^{12}$,故判定为区内故障。

结合分析表 2 和表 3 可知,本文方法可有效区分区内外故障,保证保护不误动。发生区内故障时,线路末端经高过渡电阻($1\ 000\ \Omega$)保护可以可靠动作,快速切除高阻故障;发生区外故障时,保护可靠不动作。

4.3 故障选极仿真结果

故障判定为区内后,进一步进行故障极识别。求取整流侧正负极电压故障分量瞬时能量之比 K_2 ,结果如表 4 所示。

表 4 故障极识别结果

故障类型	故障接地电阻/ Ω	K_2	故障类型	故障接地电阻/ Ω	K_2
f_1	0.01	6.63	f_3	0.01	1.00
	250	4.86		250	0.98
	500	5.57		500	1.02
	1 000	5.87		1 000	0.99
f_2	0.01	0.14	f_4	0.01	1.01
	250	0.20		250	0.97
	500	0.18		500	1.00
	1 000	0.17		1 000	0.98

由表 4 可知:当正极区内发生单极接地故障(f_1)时,在不同接地故障情况下,各自的 K_2 均大于 1.2;当负极区内发生单极接地故障(f_2)时,在不同接地故障情况下,各自的 K_2 均小于 1.2;当发生双极跨接故障(f_3)与双极跨接接地故障(f_3)时,在不同接地故障电阻情况下,各自的 K_2 均在 $0.8\sim1.2$ 之间,满足式(12)的要求。由此可知,根据故障选极判别式式(12),可以实现故障极的识别。

4.4 故障仿真验证结果

结合 4.2 与 4.3 小节,得到故障仿真保护动作情况,如表 5 所示。可以看出:发生区内单极故障时,对应故障极保护动作,健全极保护不会误动;发生区内双极故障时,双极保护均动作;发生区外故障时,保护均不会误动。

电压故障分量发生骤变,保护启动时间短,约为 $0.5\ \text{ms}$ 。故障区内外和识别故障极的采样时间为 $2\ \text{ms}$ 。多端直流电网由于其结构特性,普遍采用光纤传输通道。计及双端通信时间在 $7\ \mu\text{s}$ 以下,本文方法的可靠动作时间在 $3\ \text{ms}$ 内,可靠性与速动性均满足要求。

表 5 故障仿真保护动作情况

故障类型	识别结果	保护动作情况
f_1	区内正极接地故障	P_4 、 P_5 动作
f_2	区内负极接地故障	N_4 、 N_5 动作
f_3	区内双极短路故障	P_4 、 P_5 、 N_4 、 N_5 动作
f_4	区内双极短路接地故障	P_4 、 P_5 、 N_4 、 N_5 动作
f_5	整流侧区外正极接地故障	不动作
f_6	整流侧区外负极接地故障	不动作
f_7	逆变侧区外正极接地故障	不动作
f_8	逆变侧区外负极接地故障	不动作

5 结 论

本文分析了 MMC 多端柔性直流电网的相关故障特性,提出了一种基于 Teager 能量算子瞬时能量的纵联保护方法,经分析可得结论如下。

(1)故障发生时刻,由于边界元件的存在,线路暂态电压产生骤变,所提取的电压故障分量瞬时能量明显大于非故障线路的,该特性可用于构造保护方法。

(2)Teager 能量算子对信号变换高度敏感,利用该算子可迅速提取故障时刻的电压故障分量瞬时能量。

(3)当系统发生区内外故障时,所提取的电压故障分量瞬时能量可有效反映故障信息。选取两侧换流站瞬时能量的最大值,准确判定区内外故障,并利用同一换流站双极瞬时能量比进行故障极识别。

(4)本文方法具有强的耐过渡电阻能力,时间窗选取为 2 ms,在 3 ms 内即能可靠动作。本文方法具有耐高阻能力与快速性。

综上所述,本文所提的纵联保护方法易于实现,可靠性高,适应性强。后续将针对不同实际需要,结合实际数据,进一步探究故障暂态关联信息,提升保护性能。

参考文献:

[1] 索南加乐,孙成,杨钺,等. 双端带并联电抗器的输电线路纵联保护 [J]. 西安交通大学学报,2009,43(10): 99-103.
SUONAN Jiale, SUN Cheng, YANG Cheng, et al. Novel pilot protection for transmission line with shunt reactor at double terminal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(10): 99-103.

[2] 宋国兵,靳幸福,李德坤,等. 识别模型参数的电压源换流器型直流输电线路纵联保护 [J]. 西安交通大

学学报,2013,47(8): 110-114.

SONG Guobing, JIN Xingfu, LI Dekun, et al. Novel pilot protection for voltage source converter high voltage direct current transmission lines by identifying model parameters [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(8): 110-114.

[3] 王成山,李鹏,于浩. 智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用 [J]. 电力系统自动化,2018,42(10): 13-21.

WANG Chengshan, LI Peng, YU Hao. Development and characteristic analysis of flexibility in smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 13-21.

[4] 侯俊杰,宋国兵,常仲学,等. 基于暂态功率的高压直流线路单端量保护 [J]. 电力系统自动化,2019,43(21): 203-216.

HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. Transient power based single-end protection for HVDC transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 203-216.

[5] 汤广福,庞辉,贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用 [J]. 中国电机工程学报,2016,36(7): 1760-1771.

TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.

[6] 徐政. 柔性直流输电系统 [M]. 北京:机械工业出版社,2013: 175-180.

[7] 吴亚楠,吕铮,贺之渊,等. 基于架空线的直流电网保护方案研究 [J]. 中国电机工程学报,2016,36(14): 3726-3734.

WU Yanan, LÜ Zheng, HE Zhiyuan, et al. Study on the protection strategies of HVDC grid for overhead line application [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3726-3734.

[8] 高淑萍,胡振宇,张保会,等. 一种适用于 MMC-HVDC 直流输电线路的保护新原理 [J]. 电力系统保护与控制,2018,46(13): 13-20.

GAO Shuping, HU Zhenyu, ZHANG Baohui, et al. A new relay protection principle of MMC-HVDC transmission lines [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 13-20.

[9] 毕天姝,王帅,贾科,等. 基于短时能量的多端柔性直流单极接地故障线路识别方法 [J]. 电网技术,2016,40(3): 689-695.

BI Tianshu, WANG Shuai, JIA Ke, et al. Short-term energy based approach for monopolar grounding line

- identification in MMC-MTDC system [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 689-695.
- [10] 李小鹏, 汤涌, 滕予非, 等. 基于反行波幅值比较的高压直流输电线路纵联保护方法 [J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3095-3101.
- LI Xiaopeng, TANG Yong, TENG Yufei, et al. Pilot protection method based on amplitude comparison of backward traveling wave for HVDC transmission lines [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3095-3101.
- [11] 王帅, 毕天姝, 贾科. 基于小波时间熵的 MMC-HVDC 架空线路单极接地故障检测方法 [J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2179-2185.
- WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Wavelet entropy based single pole grounding fault detection approach for MMC-HVDC overhead lines [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2179-2185.
- [12] 张艳霞, 李多多, 张帅, 等. 基于广义 S 变换的高压直流输电线路边界保护 [J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3197-3206.
- ZHANG Yanxia, LI Duoduo, ZHANG Shuai, et al. Boundary protection of HVDC transmission lines based on generalized S-transform [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3197-3206.
- [13] SNEATH J, RAJAPAKSE A D. Fault detection and interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 973-981.
- [14] LI R, XU L, YAO L Z. DC fault detection and location in meshed multiterminal HVDC systems based on DC reactor voltage change rate [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1516-1526.
- [15] 薛士敏, 孙亚冰, 刘白冰, 等. 基于 Marti 模型的柔性直流输电系统纵联行波差动保护 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6288-6300.
- XUE Shimin, SUN Yabing, LIU Baibing, et al. Longitudinal travelling wave differential protection for flexible HVDC system based on Marti model [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6288-6300.
- [16] 时伯年, 李岩, 孙刚, 等. 基于全过程故障电流的多端柔直配电网直流故障保护策略 [J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3076-3083.
- SHI Bonian, LI Yan, SUN Gang, et al. DC fault protection strategy for multi-terminal flexible DC distribution network based on full fault current information [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3076-3083.
- [17] 刘星, 黄家凯, 高厚磊, 等. 基于故障分量的有功功率极性比较式纵联保护 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 206-211.
- LIU Xing, HUANG Jiakai, GAO Houlei, et al. Active power polarity comparison pilot protection based on fault components [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 206-211.
- [18] 李小鹏, 田瑞平, 罗先觉, 等. 基于电流突变量比值的高压直流输电线路纵联保护方案 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 33-38.
- LI Xiaopeng, TIAN Ruiping, LUO Xianjue, et al. Pilot HVDC line protection scheme based on ratio of superimposed current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 33-38.
- [19] 黄文清, 戴瑜兴. 基于 Teager 能量算子的电能质量扰动实时检测方法 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 154-158.
- HUANG Wenqing, DAI Yuxing. Real-time detection power quality of disturbances based on Teager energy operator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 154-158.
- [20] 李天博, 顾勇, 陈坤华. 基于复小波变换和 Teager 能量算子的电压跌落检测方法研究 [J]. 电测与仪表, 2020, 57(4): 43-48.
- LI Tianbo, GU Yong, CHEN Kunhua. Research of voltage sag detection method based on complex wavelet transform and Teager energy operator [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(4): 43-48.
- [21] 高淑萍, 胡振宇, 张保会, 等. 识别模块化多电平直流线路故障的保护新原理 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10): 1-9, 17.
- GAO Shuping, HU Zhenyu, ZHANG Baohui, et al. Novel protection principle for identifying the fault of modular multi-level DC line [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10): 1-9, 17.
- [22] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500 kV 直流电网关键技术与设备研究 [J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2097-2106.
- TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.

(编辑 陶晴)