

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2022.0006.015

基于电压信息的 MMC 直流电网直流侧保护方案

童 威

(安徽理工大学 电气与信息工程学院,安徽 淮南 232001)

摘要:针对柔性直流输电系统运行时线路发生短路故障,识别故障线路所在以及解决电网短路电流快速上升产生的过能量难题,提出利用输电线两端加装电感的电压信息作为故障判据的线路保护方法。该方法利用短路发生后电流上升,使得电感感应电压的极性发生变化的原理确定故障线路并启动直流断路器,此为主保护;主保护拒动时,启动后备保护,通过检测电感感应电压是否超过整定值以确定故障线路并断开,利用设计的 BPI(Buffer Protection Identification)将线路中的过电流缓冲吸收以保护整个故障线路;在 PSCAD/EMTDC 上搭建三端环状柔性直流输电系统,模拟线路发生单极短路、双极短路,仿真结果表明:线路发生故障时,主保护可以快速识别故障线路所在并切开线路,提高了故障识别的灵敏性,主保护拒动时,后备保护启动识别故障线路,提高了线路整个保护方法的可靠性。

关键词:直流电网;电压信息;BPI;保护方法

中图分类号:TM77

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2022)06-0112-06

0 引 言

近年来,直流输电技术一直是电力系统研究的重要方向,这符合解决全球对能源日益增长需求的问题。一直以来,各国政府致力于可再生能源的发掘,虽然可再生能源资源丰富,但是将其转化为电能接入电网却是一个难点,而直流输电技术的优势是可以大规模将可再生能源接入电网,并且维持电网运行的稳定性。

在直流输电技术的发展上,模块化多电平换流(Modular Multilevel Converter)具有很好的应用前景。围绕 MMC 建立的链式、两端式、环式电力系统结构,由于技术不成熟,运行时的故障检测以及系统保护一直是个难点。文献[1]提出利用线路正常运行和故障时的电流动态偏差值来检测直流侧的故障线路,能够准确定位故障位置,但是处理数据时,函数计算步骤复杂,降低了整个保护措施的速动性;文献[2]提出利用换流器闭锁释放电流,检测电流的变化率作为保护判据,能够快速检测到线路故障的具体位置,提高了检测速度,但是没有考虑线路中过

渡电阻的影响;文献[3]提出利用直流电压变化率实现故障检测,当线路的电压变化率超过线路的整定值时,就会触发线路的保护装置,快速识别故障位置,但是线路中电压的时刻采集容易受到其他频率波段以及线路过渡电阻的影响,降低了故障识别的可靠性;文献[4]提出利用混合式直流断路器对线路实施保护,实现自动、快速、有选择性地隔离故障,但是现在直流技术不够完善,线路中大量装备混合式直流断路器会提高整个工程的成本和后期维护成本;文献[5]提出换流器闭锁时,换流器电容放电,通过分析放电曲线的特征,来判断线路的区内外故障以及线路故障的具体位置以确保故障检测的准确性,但是没有考虑换流器不能正常闭锁时,线路的保护措施,降低了保护措施的可信性。

针对已有故障检测和保护方案,本文提出利用在线路两端安装电感的方法。当短路发生时,线路故障电流上升,电感感应电压极性突变,以此确定故障线路位置并快速切开故障路线,提高主保护的灵敏性;其次,当主保护拒动时,启动后备保护,设定电压整定值,检测电感电压是否超过整定值,确定故障线路并切开故障线路,提高保护方法的可靠性;最后

收稿日期:2021-11-14;修回日期:2022-05-18.

作者简介:童威(1998—),男,安徽合肥人,硕士研究生,从事电力系统研究.

利用设计的 BPI,吸收故障回路中的过电流,提高了故障切除后线路的安全性。

1 拓扑结构与故障分析

1.1 直流配电网拓扑结构

电力系统的稳定运行中,系统的拓扑结构起着关键的作用,根据生产生活的需要,电力系统的拓扑结构主要有链式、两端式、环式,由于基本结构不同,其中的优缺点也有所差别。

链式结构简单,单一的电能只能从一条支路获取,系统中交流源和故障发生时的电压衰减问题会造成系统的不稳定,两端式在链式的基础上加装一个交流系统,有效解决了电力系统发生故障时的不稳定问题,提高电网的运行可靠性,环式系统,不仅提了高系统的稳定性,在发生故障时,也保证了所受影响的支路尽可能少,如图 1 所示,由于系统的器件增多,增加了线路的复杂程度,维修成本和造价高昂,但总体上更符合现在电力系统建设的要求。

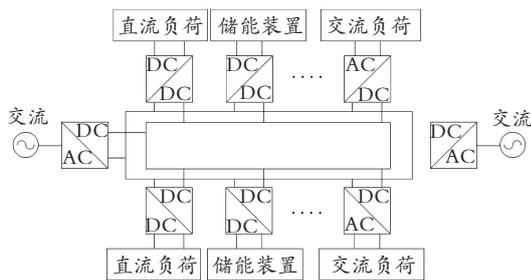


图 1 环式结构

Fig. 1 Ring structure

选择不同的结构会影响电力系统的不同工作特性。现代电力系统用电模式比较复杂,覆盖影响用户比较广,当故障发生时,需要尽可能保障系统其他部分的稳定性,以确保电力系统供电的可靠性,所以本文选择如图 2 所示的三端环式直流系统建模。

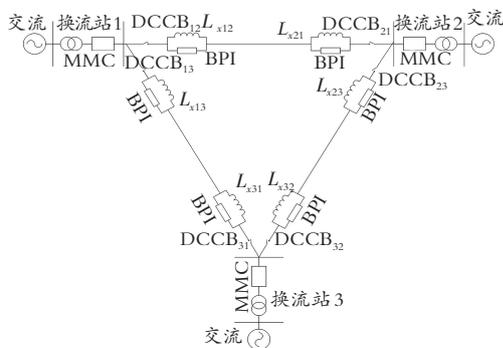


图 2 三端环式直流拓扑结构图

Fig. 2 Topological structure diagram of three-terminal ring DC

模型由换流站 1、2、3 构成,直流电源电压等级为 10 kV,每条线路两端由直流断路器(DCCB)连接,线路上两侧连接由电感 BPI 并联的结构,BPI 下文做具体分析。

1.2 基于 MMC 直流侧故障分析

直流电网直流侧故障主要是线路短路故障和断路故障,短路故障包括单极接地短路故障和双极短路故障,断路故障概率极低,这里不做分析。

基于 MMC 柔性直流电网,由于换流器结构的特性,在故障出现的时候换流器会发生闭锁,换流器中的电容会向故障形成的通路中放电,分析此时放电的暂态特征。

单极接地短路故障和双极短路故障发生时,由于故障的通路相同,因此分析单极接地短路故障即可。结合本文所使用的拓扑模型,当线路发生短路故障时,整个放电通路如图 3(a)所示,为了简化模型,其整个等值电路图如图 3(b)所示。

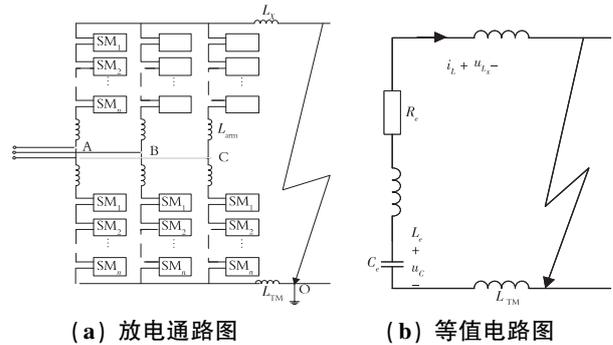


图 3 短路放电通路及等值电路图

Fig. 3 Short circuit discharge path and equivalent circuit diagram

从图 3(a)中可以看出:当线路发生短路故障时,故障侧换流器发生闭锁,换流器电容释放电流依次流过桥臂电感、线路电感,线路电感形成故障回路;正常工作线路两侧换流器释放电流,流过正常线路再达故障点。

结合图 3(b)各部分的等值参数,计算出故障发生时电感 Lx 的电压 uLx 的暂态表达式:

$$\begin{cases} R = R_e = \frac{2}{3}R_{arm} \\ L = L_e + L_x + L_{TM} = \frac{2}{3}L_{arm} + L_x + L_{TM} \\ C = C_e = \frac{6C_{SM}}{n} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中:Rarm 和 Larm 是换流器桥臂等效电阻和电抗,LTM 为线路中的电抗,Csm 为换流器中每个子模块的电容量。

对图 3(b),有式(2):

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (2)$$

将式(2)求解,得特征根如式(3):

$$p_1 = -\sigma + i\omega, p_2 = -\sigma - i\omega \quad (3)$$

其中, $\sigma = R/2L, \omega = \sqrt{(1/LC) - (R/2L)^2}$ 。

当故障发生时,设 $u_c(0_+) = U_0, i_L(0_+) = I_0$, 计算电感 L_x 电压变化:

$$u_{L_x} = -L_x C \frac{d^2 u_c}{dt^2} = -AL_x C e^{-\sigma t} \sin(\omega t + \theta - 2\beta) \quad (4)$$

式(4)中: $A = \sqrt{U_0^2 + (U_0\sigma/\omega - I_0/\omega C)^2}, \theta = \arctan(U_0/(U_0\sigma/\omega - I_0/\omega C)), \beta = \arctan(\omega/\sigma)$ 。

经过计算得到 u_{L_x} 的瞬时值表达式如式(5):

$$u_{L_x}(0_+) = -AL_x C \sin(\theta - 2\beta) \quad (5)$$

利用式(5)求解的 u_{L_x} , 研究电感电压的动态变化, 为后文后备保护确定电压整定值。

2 保护原理和启动判据

2.1 基于电感电压方向的主保护

根据故障发生时,换流器闭锁电容放电导致的线路电感电压变化,识别电感电压方向,设计主保护。

正常运行时,由于线路中通过的是直流电,忽略线路中的波动,将电感视为通路处理。如图 2,假设正常运行时电流方向是由换流站 1 流向换流站 2,当换流站 1、2 之间线路 f_1 处发生故障时,由于换流器闭锁,各个换流器电容开始向故障点放电,形成如图 4(a)所示的故障电流走向。由于线路两端加装的电感受到突变的电流变化会感应出相反的电动势,图 4(a)中 u_{x12} 和 u_{x21} 感应的电压方向相对于正常运行时规定的电流正方向,分别为负方向和正方向。

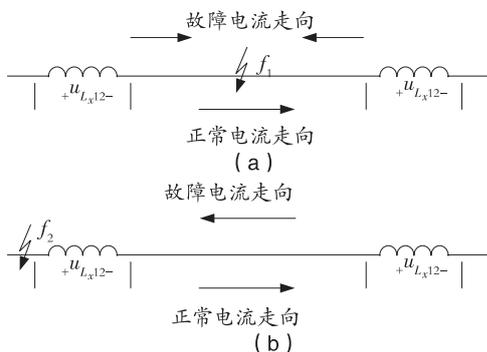


图 4 不同故障点换流站 1、2 之间电流走向图

Fig. 4 Current trend diagram between converter stations 1 and 2 at different fault points

当换流站 1、3 之间线路 f_2 处发生故障时,换流站 1、2 之间线路的电流走向如图 4(b)所示。换流站 1、2 电容放电会经过非故障区向故障区域放电,

此时由于故障电流的形成,电感电压发生突变,与所设正常电流的正方向相比, u_{x12} 和 u_{x21} 感应的电压方向都为正方向。

假设正方向为 1,负方向为 -1,通过比较可知:当 f_1 处发生故障时,线路中各个电感感应的电压方向如表 1 所示。

表 1 f_1 处故障各电感电压方向

Table 1 Each inductor voltage direction of the fault at f_1

电感方向	u_{x12}	u_{x21}	u_{x13}	u_{x31}	u_{x23}	u_{x32}
	-1	1	-1	-1	1	1

将线路两端电感电压分别设为 U_1 和 U_2 , 设正方向为 α , 负方向设为 β , 则有式(6):

$$U_1(x) = \begin{cases} 1, x = \alpha \\ -1, x = \beta \end{cases}, U_2(y) = \begin{cases} 1, y = \alpha \\ -1, y = \beta \end{cases} \quad (6)$$

将线路两侧的电感电压方向相乘,如式(7),结果如为 -1,就是故障所在区段,线路两端断路器动作;结果如为 1,就是正常区段,线路两端断路器不动作。通过识别电感两端的电压方向作为线路的主保护判据。

$$U_1(x) \cdot U_2(y) = \begin{cases} 1 \\ -1 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 基于电感电压峰值的后备保护

当线路故障主保护拒动时,线路由于短路电流持续上升,加装在线路两端的电感感应电压会出现一个峰值,根据式(5)可知在某一时刻会出现峰值。

故障线路电感所流过的短路电流由故障线路两端的换流器所释放的电流和非故障线路换流器释放的电流构成;非故障线路电感所流过的电流只有非故障线路换流器所释放的电流。因此,当线路 f_1 处发生故障时,会有

$$|U_{MAX12}| > |U_{MAX13}|, |U_{MAX12}| > |U_{MAX23}|$$

设定整定值:

$$\begin{cases} |U_{MAX12}| > U_{TH} > |U_{MAX13}| \\ |U_{MAX12}| > U_{TH} > |U_{MAX23}| \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8),当故障发生时,断路器设定启动判据:

$$|u_L(t)| > U_{TH} \quad (9)$$

当断路器动作后,并联在电感两端的 BPI 动作将会吸收线路的过电流。图 5 是 BPI 的结构图,当断路器动作后,电感中储存的电能在(图 6) BPI 中形成回路,将过电流转化为热能散发掉。

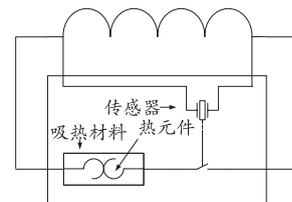


图 5 BPI 装置结构图

Fig. 5 Structure drawing of BPI device

通过主保护和后备的判据信息,得到线路保护策略的流程图(图 6)。

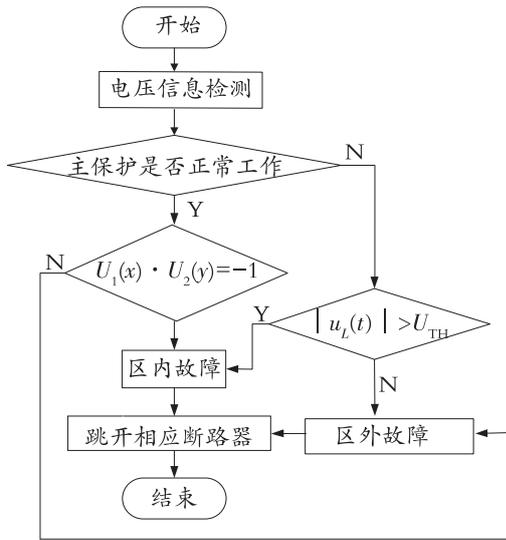


图 6 保护策略流程图

Fig. 6 Flow chart of protection policies

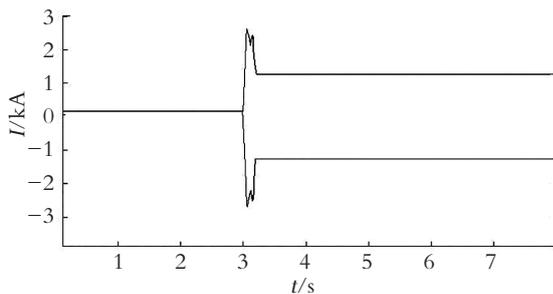
3 仿真验证

为验证方法的可行性,在 PSCAD/EMTDC 上搭建三端环状直流电网模型,每个换流站电压等级均为 20 kV,仿真步长为 8 s,3 s 为故障发生时刻。

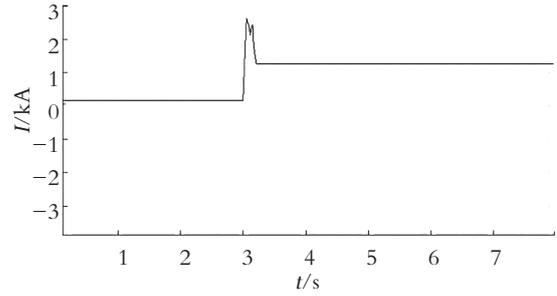
3.1 主保护电感电压极性仿真

设置故障点在换流站 1、2 之间 f_1 处,检测各个电感的电流变化,通过观察电感电流的突变情况,判断电感电压的方向,以上文正常运行时电流走向为规定正方向,进行仿真,仿真结果如图 7 所示。

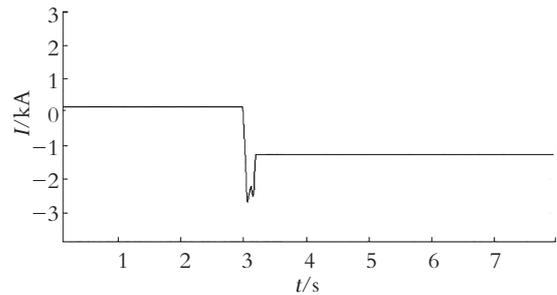
从图 7 仿真结果来看:当换流站 1、2 之间 f_1 处发生故障时,换流站 1、2 线路两端电感电流相反,这样感应的电压极性也会相反,所以电压乘积为 -1,根据表 1 判定故障发生在换流站 1、2 之间。而换流站 1、3 之间和换流站 2、3 之间线路电感电流均为同向,感应的电压乘积为 1,判定为区外故障;由于是电压极性突变,所以在 20 ms 内完成故障判断,保证了动作的灵敏性,提高了检测速度。



(a) 换流站 1、2 间线路两端电感电流



(b) 换流站 1、3 间线路两端电感电流



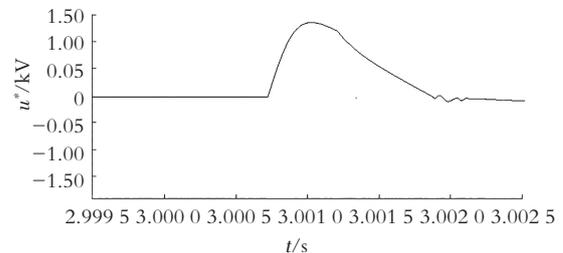
(c) 换流站 2、3 间线路两端电感电流

图 7 主保护仿真

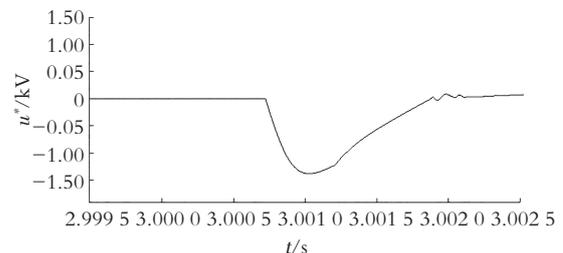
Fig. 7 Main protection simulation

3.2 后备保护电感电压动态变化仿真

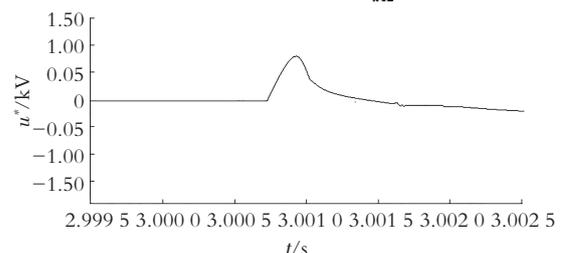
当系统的主保护不能正常动作时,后备保护启动。设置换流站 1、2 之间线路 f_1 处发生故障,基于电感电压的动态变化仿真结果如图 8。



(a) 换流站 1、2 间线路 L_{x21} 电压



(b) 换流站 1、2 间线路 L_{x12} 电压



(c) 换流站 2、3 间线路 L_{x23} 、 L_{x32} 电压

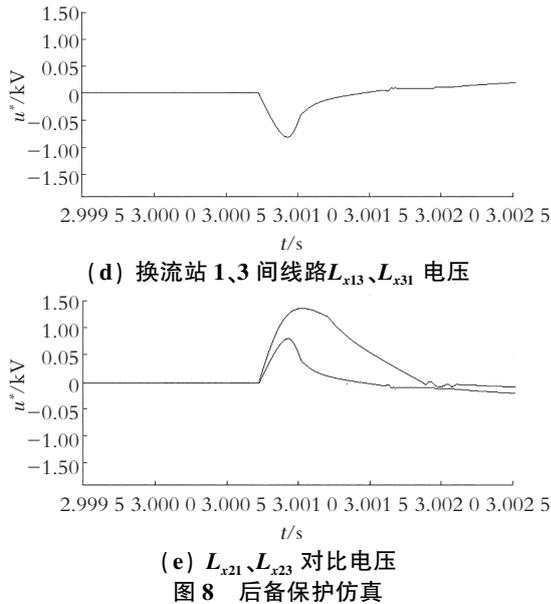


图 8 后备保护仿真

Fig. 8 Backup protection simulation

图 8 仿真结果表明:换流站 1、2 之间电感电压峰值大于非故障路线电感电压的绝对值,根据式 (9) 所设定的电压判据整定值,启动阈值 $U_{MAX12} > U_{TH} > U_{MAX13}$, $U_{MAX12} > U_{TH} > U_{MAX23}$, 检测出换流站 1、2 之间线路发生故障,换流站 1、2 之间线路两端断路器动作,断开故障线路;在主保护不能正常工作的情况下动作,提高了整个保护方法的可靠性。

4 结 论

传统交流输电技术与直流输电技术相比,还不够成熟,随着直流输电技术的发展,直流系统的故障检测和保护也需要不断完善。本文提出的基于电感电压极性方向突变的主保护能够迅速判断线路的故障所在,并在 20 ms 内完成保护动作,保证了主保护的灵敏性;基于检测电感电压整定值的后备保护,能够在主保护不能正常动作的情况下完成故障判断并动作,提高了整个保护方法的可靠性;在完成故障切除的同时,通过将故障线路的过电流流向 BPI 装置,降低了线路所受冲击电流的影响,保护了线路,提高了整个线路的安全性。本文所提出的保护方法基于换流器正常闭锁的情况,当换流器不能正常闭锁时,这种情况还有待研究。

参考文献 (References):

[1] 谭阳红, 蒋鹏, 罗研彬, 等. 基于电流动态偏差值的 MMC-MTDC 直流侧故障识别[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 11(31): 1—9.
TAN Yang-hong, JIANG Peng, LUO Yan-bin, et al. Fault identification of MMC-MTDC DC side based on current dynamic deviation value [J]. Journal of Electric

Power Systems and Automation, 2019, 11(31): 1—9.

[2] 康保林, 高亮, 屈子程. 基于 MMC 的直流电网故障分析和保护方案研究[J]. 电测与仪表, 2020, 13(57): 130—136.
KANG Bao-lin, GAO Liang, QU Zi-cheng. Research on DC power grid fault analysis and protection scheme based on MMC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 13(57): 130—136.

[3] 张峻樾, 林卫星, 文劲宇. 基于直流电压变化率的直流电网直流故障保护[J]. 南方电网技术, 2017, 1(11): 14—22.
ZHANG Jun-yu, LIN Wei-xing, WEN Jin-yu. DC fault protection of DC power grid based on DC voltage change rate[J]. China Southern Power Grid Technology, 2017, 1(11): 14—22.

[4] 金涛, 苏见桑, 张明扬. 基于混合式断路器的直流电网保护方案研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 3(24): 106—113.
JIN Tao, SU Jian-shen, ZHANG Ming-yang. Research on DC network scheme based on hybrid circuit breaker[J]. Electric Machines and Control, 2020, 3(24): 106—113.

[5] 张明, 和敬涵, 张义志, 等. 多端柔性直流电网的故障定位方法[J]. 电力建设, 2017, 8(38): 24—32.
ZHANG Ming, HE Jing-han, ZHANG Yi-zhi, et al. Fault location technique for multi-terminal VSC-HVDC system[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 24—32.

[6] 陈小军, 靳一林, 顾博川, 等. 基于电流微分量的多端直流配电网保护策略研究[J]. 广东电力, 2019, 32(2): 95—99.
CHEN Xiao-jun, JIN Yi-lin, GU Bo-chuan, et al. Research on protection strategy of multi-terminal DC distribution network based on current micro-component[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(2): 95—99.

[7] 曾健, 顾丹珍, 崔勇, 等. 基于 PSCAD 的宜华 HVDC 系统建模及仿真[J]. 电测与仪表, 2018, 55(12): 125—130.
ZENG Jian, GU Dan-zhen, CUI Yong, et al. Modeling and simulation of Yihua HVDC system based on PSCAD[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(12): 125—130.

[8] 宁连营, 邵能灵, 郑晓冬. 基于单端暂态电流的 MMC-HVDC 输电线路保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5010—5017.
NING Lian-ying, TAI Neng-ling, ZHENG Xiao-dong. Research on MMC-HVDC transmission line protection scheme based on single-terminal transient current [J]. Proceedings of the Csee, 2017, 37(17): 5010—5017.

[9] 武健, 王蕊, 张彩红, 等. 并联型 MMC-MTDC 系统直流故障特性分析及保护策略[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(9): 103—109.
WU Jian, WANG Rui, ZHANG Cai-hong, et al. DC Fault characteristics analysis and protection strategy of parallel MMC-MTDC system[J]. Electrical Machines and

- Control, 2016, 20(9): 103—109.
- [10] 许士锦, 王毅, 景世良, 等. 基于VSC的多端直流环网系统故障分析与定位研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(16): 14—19.
XU Shi-jin, WANG Yi, JING Shi-liang, et al. Research on fault analysis and location of multi-terminal DC loop system based on VSC [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(16): 14—19.
- [11] 饶宏, 宋强, 刘文华, 等. 多端MMC直流输电系统的优化设计方案及比较[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 103—108.
RAO Hong, SONG Qiang, LIU Wen-hua, et al. Optimization design and comparison of multi-terminal MMC HVDC transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 103—108.
- [12] 李岩, 罗雨, 许树楷, 等. 柔性直流输电技术: 应用、进步与期望[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 7—13.
LI Yan, LUO Yu, XU Shu-kai, et al. Flexible HVDC transmission technology: application, progress and expectation[J]. China Southern Power Grid Technology, 2015, 9(1): 7—13.
- [13] 周琳. 多端环状柔性直流配电线路保护方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
ZHOU Lin. Research on multi-terminal ring flexible DC power distribution line protection method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [14] 彭涛, 江亚群, 黄纯. 基于电流相关性分析的高压直流输电线路保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(4): 16—21.
PENG Tao, JIANG Ya-qun, HUANG Chun. Protection for high voltage direct current transmission lines based on current correlation [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(4): 16—21.
- [15] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 多端柔性直流系统直流故障保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016(17): 4627—4637.
LI Bin, HE Jia-wei, LI Ye, et al. DC fault protection scheme for Multi-terminal flexible DC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016(17): 4627—4637.

DC Side Protection Scheme of MMC DC Power Grid Based on Voltage Information

TONG Wei

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Anhui Huainan 232001, China)

Abstract: Aiming at the problem of identifying the fault line and solving the over-energy caused by the rapid rise of short-circuit current when flexible DC transmission system is in operation, a line protection method using the voltage information of the inductor installed at both ends of the transmission line as the fault criterion is proposed. This method determines the fault line and starts the DC circuit breaker by using the change of inductance induced voltage polarity caused by the rise of current after the occurrence of short circuit. This is main protection. When the main protection is rejected, the backup protection is started to determine the fault line and disconnect the line by detecting the inductance induced voltage exceeding the setting value. Finally, BPI(Buffer Protection Identification) is used to buffer and absorb the over-current to protect the whole fault line. A three-terminal ring flexible DC transmission system was built on PSCAD/EMTDC to simulate the occurrence of unipolar short circuit and bipolar short circuit. The simulation results show that the main protection can quickly identify the location of the fault line and cut the line when the fault occurs, which improves the sensitivity of fault identification. When the main protection stops, the backup protection can start to identify the fault line. The reliability of the whole protection method has been improved.

Key words: DC power grid; voltage information; BPI; protection method

责任编辑:李翠薇

引用本文/Cite this paper:

童威. 基于电压信息的MMC直流电网直流侧保护方案[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2022, 39(6): 112—117.

TONG Wei. DC side protection scheme of MMC DC power grid based on voltage information [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2022, 39(6): 112—117.