

基于本地信息的多端柔性直流电网故障定位方法

张明,和敬涵,罗国敏,王小君

(北京交通大学 电气工程学院 电力系统保护与控制实验室,北京 100044)

摘要:故障定位技术是保障多端柔性直流电网安全可靠运行的关键技术。由于直流网络之间的相互连接导致其故障暂态特征十分复杂,故障定位往往要依靠通信手段,同时技术难度也会大幅提升。以基于两电平电压源型变流器的多端柔性直流电网为研究对象,提出一种基于本地信息的多端柔性直流电网的故障定位方法。利用限流电抗器作为直流线路边界,分析了限流电抗器类型的选取及其对断路器开断和保护动作时间的影响,从保护识别的准确性和动作的可靠性角度讨论了限流电抗器的容量和位置配置;对直流行波保护的电压变化率判据进行改进,通过比较限流电抗器两端电压变化率的比值和差值设定故障区间的判别方法及逻辑,利用本地信息确定故障位置;基于 MATLAB/Simulink 进行了大量仿真测试,验证了所提故障定位方法的可行性和有效性。

关键词:多端柔性直流电网;故障定位;本地信息;行波保护;限流电抗器

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.021

0 引言

随着城市化建设的不断推动,城市负荷的不断增长对传统交流电网的供电可靠性以及电能质量要求越来越高。与此同时,新一代的电力电子变流器的不断创新以及高渗透率分布式能源并网的需求等都大力推动着柔性直流技术的发展。柔性直流电网具有供电容量大、线路损耗小、电能质量高、控制灵活、更加适合分布式电源的多点接入等优点^[1]。多端柔性直流电网具有供电可靠性高、便于实现区域电网互联等优点,因此在实际工程中应用较为广泛。但是直流电网之间的互联将导致线路发生故障时各个换流站均会向故障点馈入能量,故障电流很大,故障特征十分复杂,对整个电网运行会造成很大的影响。因此故障发生后,快速准确的故障定位方法有利于提高运行检修效率、减少停电时长、提高电网的安全性和可靠性。

对于多端柔性直流电网的故障定位方法,国内相关文献较少,国外已有部分文献提出多端柔性直流电网的故障定位方法^[2-3],但是大多需要依靠通信采集全网信息,可靠性依赖通信设备,同时经济性不好,在工程实现上有较大困难。目前交流电网的故障定位技术从原理上可以分为故障分析法、行波法和注入法^[4-5]。高压直流输电在工程上大多采用基于小波变换的行波法进行故障定位^[6-8]。为了解决

多端柔性直流电网的故障定位问题,文献[2]提出一种基于电流测量单元的故障定位算法。该方法从行波到达母线的时间角度采用一种状态评估的排除法来排除非故障区段,确定最大概率发生故障的线路后,再针对这些线路分别计算,最终确定准确的故障区段及位置,该方法的定位精度较高,但是依靠通信手段,经济性不高,同时算法复杂、计算量较大、定位所需时间较长。文献[3]提出了一种基于交流断路器的握手法确定多端柔性直流电网故障区段的方法,该方法可以准确地确定故障区段,同时其利用方向性电流选择预跳闸开关的思想有较大的借鉴意义,但是该方法可能会导致整个直流区以及互联的交流系统停电,降低了多端柔性直流电网的供电可靠性。文献[9]提出了一种向故障回路投入一个带初始电压的电容,根据特征频率分析得到故障距离的方法,该方法理论上不受过渡电阻的影响,但是测距时需要附加线路电容,成本较高。对于直流电网的继电保护研究,文献[10-11]针对高压直流输电网提出了以电气量的变化率、变化量为动作方程的行波保护,并采用电压变化率确定区内区外故障;文献[12]针对高压直流输电网采用限流电抗器设置物理边界,提高行波保护动作可靠性的同时兼具了故障限流的作用。

综上所述,为了保证多端柔性直流电网的经济安全可靠运行,研究基于本地信息的多端柔性直流电网的故障定位方法已经迫在眉睫。本文以两电平电压源型变流器(VSC)所组成的四端柔性直流电网为研究对象,对现有的直流线路行波保护判据及动作逻辑进行了改进,同时在直流线路的端口处配置限流电抗器及电压互感器,通过比较限流电抗器两端电压变化率的比值及差值来设置故障区间的判别

收稿日期:2017-02-15;**修回日期:**2017-11-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900600);国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050101)
Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900600) and the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA050101)

方法及逻辑,利用本地信息确定故障区段后再采用基于小波变换的单端行波测距来确定故障的准确位置。该方法具有如下优点:可以基于本地信息实现故障定位,不依赖通信设备,提高了经济性和可靠性;可以快速实现故障定位,定位误差小。本文首先介绍了基于本地信息的故障定位原理,然后对限流电抗器的选型及配置做了分析,最后以四端柔性直流电网的拓扑模型为例,对所提方法在 MATLAB/Simulink 中进行了大量仿真测试,结果验证了本文所提方法的可行性和有效性。

1 多端柔性直流电网的故障定位原理

为了确定故障的精确位置,故障发生后,需要在保护动作前确定故障所在区段,保护跳开故障区段后,再利用故障测距技术确定故障的精确位置。为了实现故障区段判别,可以在直流线路的端口处配置限流电抗器及电压互感器,同时对直流行波保护的原理进行改进,并以此确定故障所在区段。现有的直流行波保护主要依靠电压变化率实现区内、区外故障的判别,基本原理如式(1)所示。

$$\frac{du}{dt} > (\frac{du}{dt})_{set} \quad (1)$$

其中, $\frac{du}{dt}$ 为保护测量处的电压变化率; $(\frac{du}{dt})_{set}$ 为保护动作整定值。

高压直流输电系统的两极线路上均配有行波保护,行波保护的保护区为本极直流线路的全长,线路两侧的末端设备(平波电抗器、直流滤波器等)、换流器以及交流系统均属于区外范围^[13-15]。同样对于多端柔性直流电网而言,如果认为某条线路上所配置的行波保护用以保护本条线路全长,那么其他线路均可以类比为高压直流输电网中本线路之外的设备,即认为其他线路故障为该线路本保护的区外故障。因此,可以合理进行硬件配置,以行波保护的电压变化率为基准,通过设置合适的保护动作逻辑和整定值识别区内、区外故障,判定故障所在区段。

1.1 基于本地信息的柔性直流电网区段定位

由于行波的传播在经过限流电抗器后,电压变化率会有很大幅度的改变,因此可以通过设置合理的判定逻辑,跳开故障区间的断路器进而保证整个多端柔性直流电网的安全运行。图 1 为多端柔性直流电网的硬件设备安装示意图。根据图 1,当线路 L_a 发生正极短路故障时,对于断路器 QF_1 和 QF_2 而言,该故障属于保护范围内的区内故障;对于其余断路器而言,该故障属于区外故障。由于行波的传播会受到限流电抗器的抑制,因此电压互感器 PV_1 和 PV_2 处所采集的电压变化率远大于整个直流网络中其他电压互感器所采集的电压变化率,可以以此为判定逻辑来确定故障区间。

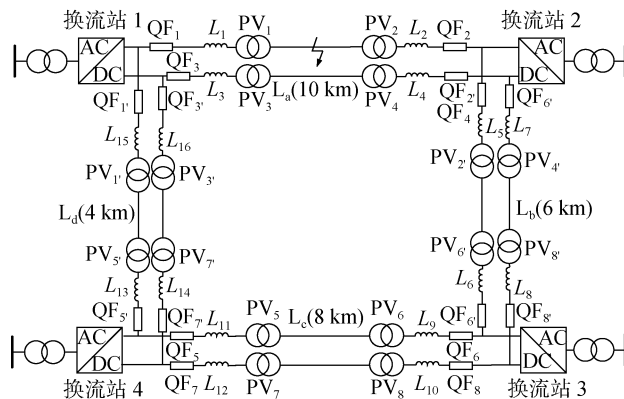


图 1 多端柔性直流电网硬件设备安装示意图

Fig.1 Hardware equipment installed in multi-terminal flexible DC grid

关于限流电抗器对行波传播的限制,以双端柔性直流电网为例进行分析。当其直流线路发生单极短路故障时,暂态过程分为 3 个阶段:直流电容放电阶段、二极管导通阶段和不控整流阶段^[16-20]。而由于故障行波在线路中传播的波速很快,在非常短的时间内可以引起电压迅速变化,行波波头传播到线路始端这一过程在故障暂态上属于直流电容的放电阶段,因此分析电压变化率时可以将故障后暂态电路等效如图 2 所示。

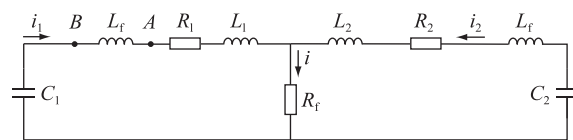


图 2 单极接地短路故障暂态电路

Fig.2 Transient circuit of pole-to-ground short circuit fault

以单极短路故障为例进行分析,对照图 1 中的换流站 1 和 2 之间的拓扑,可得到如图 2 所示的等效电路图,可通过对比分析图 2 中 A 点和 B 点处的电压变化率来验证限流电抗器对行波传播的限制。图中, C_1 和 C_2 为 VSC 换流站出口的直流电容,设定两端换流站出口处电容大小相同; R_f 为过渡电阻; L_f 为限流电抗器电感; R_1 和 R_2 为故障点距离两端变流器的线路电阻; L_1 和 L_2 为故障点距离两端变流器的线路电感。上述二阶 RLC 动态电路发生故障前电容初始电压为 U_0 ,电感初始电流为 I_0 ,根据基尔霍夫定律可以得到如下方程:

$$\begin{cases} L \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + R_f (i_1 + i_2) + u_{c1} = 0 \\ L \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + R_f (i_1 + i_2) + u_{c2} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} L = L_f + L_1 \\ i_1 = C_1 \frac{du_{c1}}{dt} \\ i_2 = C_2 \frac{du_{c2}}{dt} \\ C_1 = C_2 = C \end{cases}$$

文献[24]中给出了对应微分方程组的求解方

法,因此构造特征矩阵如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} LC\lambda^2 + (R_1 + R_f)C\lambda + 1 & R_f C\lambda \\ R_f C\lambda & LC\lambda^2 + (R_2 + R_f)C\lambda + 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

为了验证灵敏性,设定故障位于换流站1的末端,即换流站2的线路出口处,同时为了检验该算法对过渡电阻的耐受性,设置过渡电阻 $R_f = 100 \Omega$,其余各参数如下:直流极间电压为 20 kV,额定容量为 20 MV·A,交流电抗器电感为 0.03 H,直流电容为 0.04 F,限流电抗器电感为 0.004 H,直流线路电阻 r_0 为 $0.01 \Omega/\text{km}$,直流线路电感 l_0 为 $0.3183 \text{ mH}/\text{km}$,直流线路对地电容为 $10.45 \text{ pF}/\text{km}$,系统采样频率 f 为 100 kHz,IGBT 的开关频率为 2 kHz。求得特征值后可得 B 点电压表达式为:

$$u_B = u_{C1} = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} + c_3 e^{-\lambda_3 t} + c_4 e^{-\lambda_4 t} \quad (4)$$

其中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和 λ_4 为式(3)的特征值解; c_1, c_2, c_3 和 c_4 为解的常数。

根据基尔霍夫电压方程可以得到 A 点电压为:

$$u_A = i_1(R_f + R_1) + i_2 R_f + L_1 di_1/dt \quad (5)$$

根据推导出 A 点、B 点的电压公式,分别对其求导并将上述参数代入可求得电压变化率 du_A/dt 和 du_B/dt ,经计算 A 点电压变化率与 B 点电压变化率之间的比值约为 10^6 ,证明了限流电抗器两端电压变化率差异较大,可以此为判据进行故障区间的判别。

为了验证上述原理分析的正确性,在 MATLAB/Simulink 中搭建如图 1 所示的多端柔性直流电网拓扑。图 3 给出了线路 L_a 不同位置处发生正极接地短路故障时,全网正极线路电压互感器 PV₁、PV₂、PV₅、PV₆、PV_{1'}、PV_{2'}、PV_{5'}和 PV_{6'}处电压变化率的绝

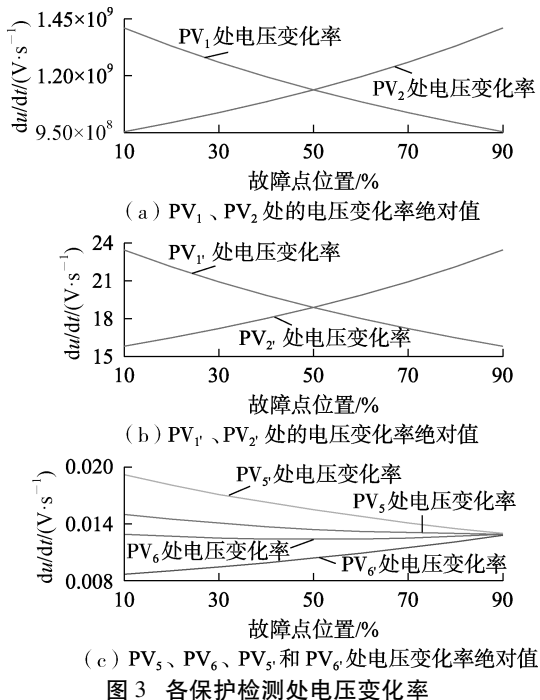


Fig.3 Voltage variation rate in each protection device

对值(图中故障点位置指故障点距离线路左端的长度占线路全长的比例)。

由图 3 可知:当线路 L_a 发生故障时,由于限流电抗器的作用,故障区间内电压互感器测量点处的电压变化率的峰值要远大于非故障区间内电压互感器测量点处的电压变化率,两者的比值约为 10^4 ,因此可以以此为判据进行故障区间的判别。

对比图 3(a)、(b)可知:与故障线路直接相连的换流站所管控的保护设备对故障引起的电压变化率的响应也有很大差异,这是由于限流电抗器对行波的限制,导致故障后限流电抗器两侧的保护监测点处的电压变化率差别很大。因此,利用限流电抗器两侧的电压变化率来设置保护整定值及动作逻辑,通过本地信息确定故障区段是可行的,具体保护动作逻辑如图 4 所示。图中, k_1 和 k_2 为本保护所需要设置的保护整定值,根据本节的公式推导: k_1 可取限流电抗器两端电压变化率之比的中间值,约为 10^4 ; k_2 可取值为 10。

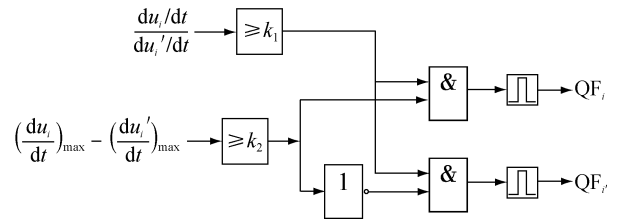


图 4 适用于故障定位的保护动作逻辑

Fig.4 Protection operating process available for fault location

综上:当单极短路故障发生在线路 L_a 的正极时,断路器 QF₁ 跳开, QF_{1'} 不动作;当单极短路故障发生在线路 L_d 的正极时,断路器 QF_{1'} 跳开, QF₁ 不动作;其余非故障区间换流站所连接的断路器均不动作,整个系统仍安全平稳运行。因此,换流站 1 处只需要根据与其直接相连的 4 个断路器 QF₁、QF_{1'}、QF₃ 和 QF_{3'} 的跳闸信息即可判别故障是否发生在线路 L_a 和线路 L_d 区间;同样的理论也适用于换流站 2—4。对于多端柔性直流电网的双极短路故障而言,其原理与单极短路故障相同,所不同的是双极短路故障后故障两极的断路器均要跳开,其分析方法参见单极短路故障的分析,本文不再赘述。因此采用本文所提方法,各个换流站都可以其管控的断路器跳闸信息为依据确定故障所在区间并且及时将故障区间跳开,保证电网运行的稳定性。

1.2 基于单端信息的行波测距

当直流线路发生短路故障后,可根据上述基于本地信息的故障定位思路确定故障区段;故障区段确定后,利用故障换流站直流侧所采集的单端行波信息进行故障测距。单端行波故障测距对于线路的瞬时性故障和永久性故障均有较好的适用性,同时该方法无需通信设备,工程上较容易实现^[21-23]。图

5 为利用单端行波进行故障测距的原理图。

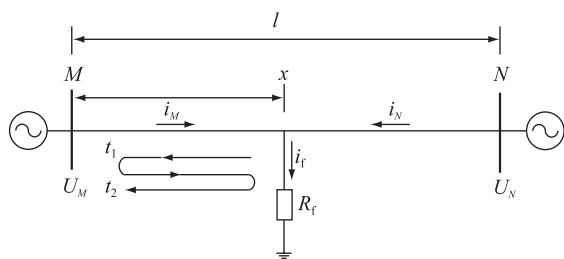


图 5 单端行波故障测距示意图

Fig.5 Schematic diagram of fault location based on single-ended traveling wave

单端行波故障测距法利用行波第一次到达测量端与其从故障点反射回到测量端的时间差来实现故障测距。如图 5 所示,在线路 x 点处发生故障,故障行波第一次到达线路 M 端的时刻为 t_1 ,故障行波经反射第二次到达线路 M 端的时刻为 t_2 ,线路全长为 l ,行波的传播速度为 v 。

单端行波故障测距的计算公式为:

$$lx = \frac{(t_2 - t_1)v}{2} \quad (6)$$

由于行波的波头识别较为困难,因此参考文献[25]引入小波分解识别行波波头。本文根据 MATLAB 小波分析工具包,采用离散小波变换(DWT)对所采集的直流电压进行小波变换,根据小波模极大的方法识别奇异点,根据所识别的奇异点的时间信息,利用式(6)实现故障测距。同时,本文选取故障前、后各 1 ms 作为数据窗,线路模型采用贝克隆线路模型,选取小波分析细节系数为 cd1,即第一层细节系数,对应频段为 12.5~25 kHz。

2 限流电抗器配置分析

多端柔性直流电网线路端口处配置限流电抗器,将会对电流和电压变化率、直流断路器的开断时间及保护动作时间产生一定的影响,因此选择合适参数的限流电抗器作为线路的物理边界^[26-27]至关重要。

限流电抗器可以配置在直流线路端口处作为人为设置的阻抗物理边界,不仅可以使行波在传播过程中遇到阻抗不连续点,易于找到行波突变点来辨识行波波头;而且限流电抗器可以限制直流故障的过电流水平,降低直流故障保护方案的设计难度;同时可以防止发生故障时所产生的陡波冲击波进入换流阀,使换流阀免于遭受过电压而损害。本文采用电感型限流电抗器作为阻抗物理边界,虽无法改善回路的阻尼特性,但是对于多端柔性直流电网而言电感相当于短路,不会产生功率损耗,提高了柔性直流电网的传输效率,经济性较好。

限流电抗器的安装将会改变发生故障时暂态电气量的变化,这些变化将会对变流器的闭锁、断路器的

的开断以及保护判断时间产生一定的影响。从变流器闭锁角度来看,限流电抗器可降低故障发生后的桥臂电流值,延长变流器保护的闭锁动作时间,保证故障期间变流器不闭锁;从断路器的开断角度来看,限流电抗器可降低多端柔性直流电网对直流断路器动作速度和开断容量的要求,解决了目前大容量直流断路器应用尚不成熟的难题;从保护装置响应时间角度来看,以直流电网中配置的行波保护为例,限流电抗器降低了直流电压变化率,给行波保护装置足够的反应时间,提高了保护装置动作的可靠性。

对于限流电抗器的参数取值大小,目前国内外文献并无相关研究,实际工程中大多根据厂家的实验数据应用。因此,本文主要通过对直流断路器与系统保护,特别是换流阀闭锁保护之间的配合问题,研究现有系统的故障处理机制和闭锁时间,然后分析为了保证两者之间的配合需要调整限流电抗器的参数范围。针对不同大小的限流电抗器做了大量仿真验证,仿真参数同 1.1 节,部分结果如表 1 所示。表中, t_0 为断路器识别故障时刻; $i_{L1.5}$ 为 $t_0 + 1.5$ ms 时刻直流线路电流; $i_{q1.5}$ 为 $t_0 + 1.5$ ms 时刻桥臂电流; i_{L3} 为 $t_0 + 3$ ms 时刻直流线路电流; i_{q3} 为 $t_0 + 3$ ms 时刻桥臂电流; $i_{L3.5}$ 为 $t_0 + 3.5$ ms 时刻直流线路电流; $i_{q3.5}$ 为 $t_0 + 3.5$ ms 时刻桥臂电流; di/dt 为主开关跳开前电流上升率; i_{L5} 为 $t_0 + 5$ ms 时刻直流线路电流; i_{q5} 为 $t_0 + 5$ ms 时刻桥臂电流; t_{max} 为最大开关电流时刻。

表 1 限流电抗器参数配置

Table 1 Parameter configuration of current limiting reactor

限流电抗器参数/ (mH·极 ⁻¹)	t_0 / ms	$i_{L1.5}$ / kA	$i_{q1.5}$ / kA	i_{L3} / kA	i_{q3} / kA	$i_{L3.5}$ / kA
4	0.184	2.520	1.664	3.854	2.307	4.271
8	0.320	1.936	1.480	2.698	1.974	2.940
15	0.870	—	—	1.859	1.714	1.968

限流电抗器参数/ (mH·极 ⁻¹)	$i_{q3.5}$ / kA	di/dt / (kA·ms ⁻¹)	i_{L5} / kA	i_{q5} / kA	t_{max} / ms
4	2.491	0.883	5.418	2.874	2.01
8	2.093	0.499	3.497	2.279	3.67
15	1.771	0.224	2.112	1.817	>5

根据系统故障保护参数设置,直流线路发生故障时,在故障被识别后系统换流阀闭锁前大约有 10 ms 的时间;如果进一步考虑到故障可能引起换流阀保护等导致的换流阀闭锁时间提前,在故障被识别后系统换流阀闭锁前大约有 5 ms 的时间。因此,为了避免与目前使用的故障保护方法(闭锁换流器及跳开交流断路器)产生时序方面的冲突,至少应该保证直流断路器开断故障时间在 5 ms 以内并且在故障判断为直流线路故障时动作优先级最高。因此直流断路器开断时间上限设定为 5 ms。

根据表 1 所示结果,可以选取限流电抗器为

4 mH/极,以保证直流断路器能够有效地断开短路电流,保证整个直流电网稳定运行。

3 仿真验证

柔性直流电网中常见的线路故障主要包括单极接地短路故障、双极短路故障以及断线故障^[28]。本文研究柔性直流电网的短路故障定位技术,在MATLAB/Simulink中搭建四端柔性直流电网的模型,就不同线路、不同位置的单极接地短路和双极短路故障进行了大量仿真测试,具体仿真参数同1.1节。

3.1 单极接地短路故障定位

发生单极接地短路故障时,设置故障发生时刻为0.1 s,单极接地短路故障的交流侧和直流侧电压变化见图6。分别设置过渡电阻为0.1 Ω 、10 Ω 、100 Ω ,采用基于本地信息的方法识别故障区段,确定故障区段后,利用单端行波法进行故障测距。对于单极接地短路故障,以距离线路 L_a 左端5 km处发生故障为例,图7给出了直流电压的小波变换结果,可以根据小波模极大选定连续2个奇异值之间的时间差来实现故障测距。本文所涉及的误差分析用式(7)计算,故障定位的结果见表2。

$$\text{误差率} = \frac{|\text{实际故障位置} - \text{故障定位结果}|}{\text{线路全长}} \quad (7)$$

由表2可知,本文所提故障定位算法可以准确确定故障所在区段以及故障的具体位置,误差率可以维持在2%以内,定位结果比较精确。

3.2 双极接地短路故障定位

发生双极接地短路故障时,设置故障发生时刻为1 s,故障前后直流侧电压变化如图8所示。将故障设置于不同线路的不同位置,分别取故障电阻为

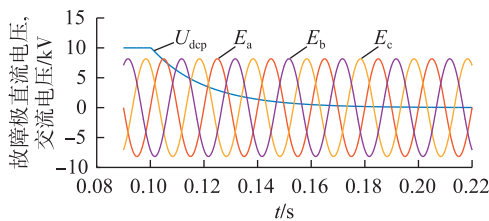


图6 单极接地短路故障暂态仿真结果

Fig.6 Transient simulation results of pole-to-ground short circuit fault

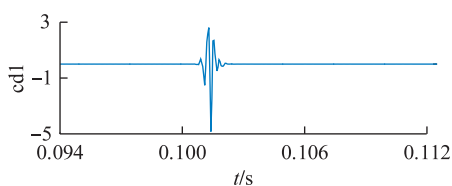


图7 直流电压小波分析结果

Fig.7 Wavelet analysis result of DC voltage

表2 多端柔性直流电网单极接地短路故障定位结果

Table 2 Fault location results of pole-to-ground short circuit fault in multi-terminal flexible DC grid

过渡电阻/ Ω	故障位置	定位区段	测距结果/km	误差/%
0.1	L_a 左端 3 km 处	L_a	2.947 0	1.77
10			2.944 2	1.86
100			2.940 9	1.97
0.1	L_a 左端 5 km 处	L_a	4.932 7	1.35
10			4.924 8	1.50
100			4.922 1	1.56
0.1	L_a 左端 7 km 处	L_a	6.939 9	0.86
10			6.934 9	0.93
100			6.920 4	1.14
0.1	L_b 左端 2 km 处	L_b	1.975 4	1.23
10			1.969 9	1.51
100			2.038 9	1.95
0.1	L_b 左端 5 km 处	L_b	5.932 4	1.13
10			5.914 2	1.43
100			5.903 9	1.60
0.1	L_c 左端 3 km 处	L_c	2.953 6	1.55
10			3.052 5	1.75
100			3.059 8	1.99
0.1	L_c 左端 7 km 处	L_c	6.920 3	1.14
10			6.918 5	1.16
100			7.138 1	1.97
0.1	L_d 左端 1 km 处	L_d	0.989 3	1.07
10			0.986 9	1.31
100			0.984 2	1.58
0.1	L_d 左端 3 km 处	L_d	2.961 9	1.27
10			2.958 2	1.39
100			2.951 7	1.61

10 Ω 、100 Ω 进行验证。表3为双极短路故障下的故障定位结果。

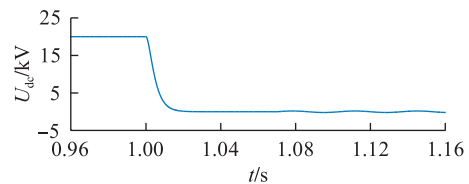


图8 双极接地短路故障直流电压

Fig.8 DC voltage of pole-to-pole short circuit fault

由表3可知,本文所提故障定位方法可以准确确定故障区段及故障位置,定位误差可以维持在1.5%以内,故障定位结果比较精确。

4 结论

本文基于对直流行波保护以及故障限流电抗器的分析,通过合理硬件配置提出一种基于本地信息的多端柔性直流电网的故障定位方法。理论分析和大量的仿真结果表明:

a. 所提方法仅利用换流站本地的信息即可完成准确的故障区段的判定,故障区段确定后,采用单端行波故障测距法判断故障的准确位置,故障定位结

表3 多端柔性直流电网双极短路故障定位结果

Table 3 Fault location results of pole-to-pole short circuit fault in multi-terminal flexible DC grid

过渡电阻/ Ω	故障位置	定位区段	测距结果/km	误差/%
10	L_a 左端 1 km 处	L_a	1.012 5	1.25
100			1.014 1	1.41
10	L_a 左端 4 km 处	L_a	3.964 3	0.89
100			3.960 1	1.00
10	L_a 左端 7 km 处	L_a	6.928 4	1.02
100			6.917 5	1.18
10	L_b 左端 3 km 处	L_b	3.020 8	0.69
100			2.977 1	0.76
10	L_b 左端 5 km 处	L_b	5.056 2	1.12
100			5.061 6	1.23
10	L_c 左端 2 km 处	L_c	1.973 9	1.31
100			1.970 5	1.48
10	L_c 左端 5 km 处	L_c	4.955 1	0.90
100			4.951 2	0.98
10	L_c 左端 7 km 处	L_c	6.928 4	1.02
100			6.917 5	1.18
10	L_d 左端 1 km 处	L_d	0.987 7	1.23
100			0.985 2	1.48
10	L_d 左端 3 km 处	L_d	2.965 3	1.16
100			2.958 6	1.38

果的误差可以维持在2%以内;

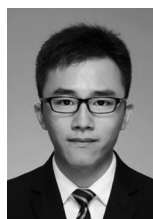
b. 所提方法不需要采用通信设备,利用本地信息即可以完成精确的故障定位,工程实现较为简单经济。

参考文献:

- [1] 李斌,何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(12):3026-3036.
LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [2] AZIZI S, AFSHARNIA S, SANAYE-PASAND M. Fault location on multi-terminal DC systems using synchronized current measurements[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63(7): 779-786.
- [3] TANG L, OOI B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [4] 陈玥云,覃剑,王欣,等. 配电网故障测距综述[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 89-93.
CHEN Yueyun, QIN Jian, WANG Xin, et al. A survey on fault location for distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 89-93.
- [5] 唐金锐,尹项根,张哲,等. 配电网故障自动定位技术研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):7-13.
TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Survey of fault location technology for distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 7-13.
- [6] ANDO M, SCHWEITZER E O, BAKER R A. Development and field-data evaluation of single-end fault locator for two-terminal HVDC transmission lines-II: algorithm and evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(12): 3531-3537.
- [7] 蔡新雷,宋国兵,高淑萍,等. 利用电流固有频率的 VSC-HVDC 直流输电线路故障定位[J]. 中国电机工程学报,2011,31(28):112-119.
CAI Xinlei, SONG Guobing, GAO Shuping, et al. A novel fault-location method for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequency of current[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 112-119.
- [8] DEWE M B, SANKAR S, ARRILLAGA J. Application of satellite time references to HVDC fault location[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1295-1302.
- [9] 徐铭铭,肖立业,王海风,等. 一种基于 Prony 算法的直流配电网电缆故障定位方法[J]. 电工电能新技术,2015,34(4):1-5.
XU Mingming, XIAO Liye, WANG Haifeng, et al. Novel method of locating cable fault in DC distribution based on Prony algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(4): 1-5.
- [10] 李爱民,徐敏,蔡泽祥,等. 小步长采样的新型直流输电线路行波保护[J]. 电网技术,2015,39(1):90-96.
LI Aimin, XU Min, CAI Zexiang, et al. A small sampling interval based new traveling wave protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 90-96.
- [11] 韩昆仑,蔡泽祥,徐敏,等. 直流线路行波保护特征量动态特性与整定研究[J]. 电网技术,2013,37(1):255-260.
HAN Kunlun, CAI Zexiang, XU Min, et al. Dynamic characteristics of characteristic parameters of traveling wave protection for HVDC transmission line and their setting[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 255-260.
- [12] 束洪春,田鑫萃,董俊,等. ± 800 kV 直流输电线路边界保护的模型匹配时域算法[J]. 电工技术学报,2013,28(10):320-327.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. ± 800 kV DC transmission line boundary protection using model matching algorithms in time-domain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 320-327.
- [13] 宋国兵,李德坤,褚旭,等. 基于参数识别原理的 VSC-HVDC 输电线路单端故障定位[J]. 电网技术,2012,36(12):94-99.
SONG Guobing, LI Dekun, CHU Xu, et al. One-terminal fault location for VSC-HVDC transmission lines based on principles of parameter identification[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 94-99.
- [14] 李猛,贾科,毕天姝,等. 适用于直流配电网的测距式保护[J]. 电网技术,2016,40(3):719-724.
LI Meng, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Fault distance estimation-based protection for DC distribution networks[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 719-724.
- [15] PARK J D, CANDELARIA J, MA L, et al. DC ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2574-2584.
- [16] 胡竟竞,徐习东,裘鹏,等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电网技术,2014,38(4):844-851.
HU Jingjing, XU Xidong, QIU Peng, et al. A review of the protection methods in DC distribution system[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 844-851.
- [17] 薛士敏,陈超超,金毅,等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3114-3122.
XUE Shimin, CHEN Chaochao, JIN Yi, et al. A research review of

- protection technology for DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3114-3122.
- [18] 胡竞竞. 直流配电系统故障分析与保护技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- HU Jingjing. Fault analyse and protection technology of DC distribution system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [19] KWON Y J, KANG S H, LEE D G, et al. Fault location algorithm based on cross correlation method for HVDC cable lines[C] // IET International Conference on Developments in Power System Protection. Glasgow, UK: IET, 2008: 360-364.
- [20] 时伯年, 赵宇明, 孙刚. 柔性直流配电网保护方案研究及实现[J]. 南方电网技术, 2015, 9(9): 11-16.
- SHI Bonian, ZHAO Yuming, SUN Gang. Research and implementation of protection scheme for MMC DC distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(9): 11-16.
- [21] TANG G, HE Z, PANG H, et al. Basic topology and key devices of the five-terminal DC grid[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2015, 1(2): 22-35.
- [22] 孙棚, 王华伟, 雷霄, 等. 架空线柔性直流电网的直流短路电流限制研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 219-223.
- SUN Xu, WANG Huawei, LEI Xiao, et al. Restriction of DC short circuit current for overhead lines of flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 219-223.
- [23] 董云龙, 凌卫家, 田杰, 等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 169-175.
- DONG Yunlong, LING Weijia, TIAN Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 169-175.
- [24] 黄建吾. 二维二阶常系数齐线性微分方程组的一种解法[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2002, 30(1): 20-22.
- HUANG Jianwu. A solution of two dimensional linear homogeneous second order differential equation with constant coefficients[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science), 2002, 30(1): 20-22.
- [25] 唐晓初. 小波分析及应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006: 45-108.
- [26] 和敬涵, 周琳, 罗国敏, 等. 基于单端电气量的多端柔性直流配电系统暂态保护[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 158-165.
- HE Jinghan, ZHOU Lin, LUO Guomin, et al. Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 158-165.
- [27] 孙棚, 王华伟, 雷霄, 等. 架空线柔性直流电网的直流短路电流限制研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 219-223.
- SUN Xu, WANG Huawei, LEI Xiao, et al. Restriction of DC short circuit current for overhead lines of flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 219-223.
- [28] 和敬涵, 张明, 罗国敏, 等. 一种利用故障暂态过程的柔性直流配电网故障测距方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 985-992.
- HE Jinghan, ZHANG Ming, LUO Guomin, et al. A fault location method for flexible DC distribution network based on fault transient process[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 985-992.

作者简介:



张明

张明(1995—),男,陕西渭南人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为直流配电网保护与控制(E-mail: 956758551@qq.com);

和敬涵(1964—),女,北京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统保护与控制、智能电网、电动汽车等;

罗国敏(1983—),女,四川绵阳人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统故障诊断、在线监测、故障识别和定位等;

王小君(1978—),男,浙江绍兴人,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统连锁故障保护、电动汽车、智能配电网。

Local information-based fault location method for multi-terminal flexible DC grid

ZHANG Ming, HE Jinghan, LUO Guomin, WANG Xiaojun

(Power System Protection and Control Research Laboratory, School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Fault location is the key technology to ensure safe and reliable operation of multi-terminal flexible DC grid. The interconnections among DC grids result in complex fault transient characteristics, so fault location usually relies on means of communication, increasing technical difficulties dramatically. Taking the two-level voltage source converter-based multi-terminal flexible DC grid as a research object, a fault location method for multi-terminal flexible DC grid based on local information is proposed. With the current limiting reactors as physical boundaries of DC line, the type selection of current limiting reactors and their effects on the breaking of breakers and operation time of protections are analyzed, and the capacity and location configuration of current limiting reactors are discussed considering the accuracy of protection identification and the reliability of protection operation. The voltage variation rate of DC traveling wave protection is improved and the identifying method and logic of fault section are set by comparing the specific value and difference value of voltage variation rates between two ends of current limiting reactor, determining fault location based on local information. A large amount of simulations carried out in MATLAB/Simulink verify the feasibility and validity of the proposed fault location method.

Key words: multi-terminal flexible DC grid; electric fault location; local information; traveling wave protection; current limiting reactor