

基于单端电气量的多端柔性直流配电系统暂态保护

和敬涵¹,周琳¹,罗国敏¹,李蕊²

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 随着配电系统结构的发展与变化,传统交流配电系统、高压直流输电系统的保护原理无法适用于多端柔性直流配电系统。目前所提直流配电线路的保护方案有 2 种思路:基于线路两端信息和基于线路单端信息。前者需要通信通道,要求两端数据的同步,动作速度慢;后者需要构造保护边界,增加系统经济成本。基于此,提出了一种基于单端电气量、无需构造保护边界的多端柔性直流配电系统暂态保护方案。首先,分别计算线路一侧的正、负极暂态电压与其正常稳态电压的标准差系数识别故障极。然后,分析发生区内故障时各电气量的时域解析关系,分别推导出单、双极故障时的微分方程以计算故障距离,从而实现区内、外故障的快速、可靠识别。最后在 MATLAB/Simulink 中搭建了仿真模型。仿真结果表明,所提保护方案在各种故障情况下仅基于本地信息即可有效识别故障极和区内、外故障,有较强的抗过渡电阻及抗干扰能力,满足直流配电网对保护速动性与选择性的需求。

关键词: 多端柔性直流配电; 单端电气量; 故障距离; 保护方案; 故障识别

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.021

0 引言

分布式能源的大规模发展,使得可再生能源的广泛接入、就地消纳成为了配电网未来发展的主要方向。相比于传统交流能量传输网络,直流系统在降低线路损耗、减少分布式电源接入过程的变流能耗等方面均具有明显的优势^[1-2]。近年来随着电压源换流器 VSC(Voltage Sourced Converter)技术的飞跃式发展^[3],直流区域闭环组网运行已经成为现实。电力电子控制技术的提升和变流器制造成本的降低,进一步推动了直流配电网的技术革新。越来越多的国家将直流配电系统作为未来智能电网的重要组成部分^[4-6]。然而,作为一个新兴的研究热点,要实现直流配电系统的大规模实际运行,一些关键问题仍然需要解决。其中,直流配电网的保护作为直流系统,乃至与之相联的交流网络可靠稳定运行的关键,是直流配电网研究的重中之重。

现行投运的直流保护工程中,多以行波保护作为主保护,其动作速度快,但可靠性和灵敏性容易受干扰的影响^[7]。作为后备保护的电流差动保护,由于要躲过故障暂态过程的影响,保护的速动性较差^[8]。基于单端电气量的过流、欠压判据只能检测故障的发生^[9-10],不能识别具体的故障线路,并且受雷电干扰、故障距离、过渡电阻等多种因素的影响,其保护判据难以整定。因此,有必要研究快速、可靠的多端柔性

直流配电线路保护。

针对上述问题,国内外的学者对直流保护进行了研究,提出了一些有益的方法。

a. 通过识别线路两侧的电容值来区分区内、外故障,该方法不受过渡电阻等影响,计算简单,易于实现^[11]。但在多端柔性直流配电系统中,各端换流站电容的存在使得发生区内故障时也无法准确识别电容参数,该方法无法再适用。

b. 利用线路两端的边界元件,通过小波变换提取区内、外故障的高频暂态能量差异识别线路故障。该方法动作速度快,无需通信^[12]。但对于多端柔性直流配电网,需要在原有系统的直流线路两端安装直流电抗器,增加了系统成本,并且电抗器的选择与配置直接影响换流装置的稳定控制。

c. 利用 R-L 模型新型变量获取方法以及提高算法数值稳定性的测距式方法实现保护,其采用新的变量获取方法,具有良好的精度,耐噪声能力强^[13],但没有考虑发生单极短路故障时不同过渡电阻对测距误差的影响,保护动作时间较长,在某些系统中不能满足保护速动性的要求。

本文首先分析了柔性直流配电系统的故障暂态特征,在此基础上,提出了一种适用于多端柔性直流配电系统的暂态保护方案:分别计算线路一侧正、负极暂态电压的标准差系数识别故障极;利用发生区内故障时各电气量的时域解析关系计算故障距离实现区内、外的故障识别。本文方案无需构造保护边界,仅利用单端电流、电压量即可实现故障选极与区内、外故障判别。最后基于 MATLAB/Simulink 仿真平台,搭建了三端环状柔性直流配电系统,验证了所提保护方案的可行性。

收稿日期:2017-03-29;修回日期:2017-07-03

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2015AA-050101);国家电网公司科技项目(EPRIPDKJ[2016]2252)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA-050101) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(EPRIPDKJ[2016]2252)

1 柔性直流配电系统结构及故障暂态特征

1.1 系统结构

根据不同的适用场合以及直流线路的架设情况,直流配电网拓扑结构主要包括 3 种类型^[14]:两端直流配电网、多端辐射状直流配电网以及多端环状直流配电网。其中,多端环状直流配电网因能提高系统供电的可靠性,维持良好的电压水平,且能满足较大程度的负荷增长,具有更好的应用前景^[4]。本文以三端环状柔性直流配电网为研究对象,其拓扑结构如图 1 所示。

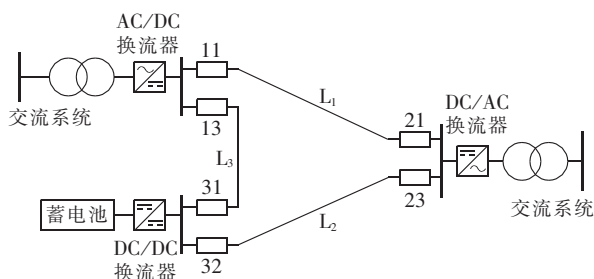


图 1 三端环状柔性直流配电网拓扑结构

Fig.1 Topology of three-terminal ring-type flexible DC distribution network

图 1 中,系统直流侧额定电压为 ± 10 kV,保护测量元件安装在直流环网中的每条直流线路两端,如图中位置 11、13、21、23、32、31 所示;系统中 2 个端口通过 AC/DC 换流器与交流主网相连,换流器采用两电平 VSC;另一个端口由 DC/DC 换流器与储能蓄电池相连,DC/DC 换流器采用双向半桥结构。

1.2 系统故障暂态特征分析

柔性直流配电系统直流线路故障的暂态特征是直流保护研究的理论基础。本节以两电平 VSC 单极接地短路故障(如图 2 中 f_1 所示)和双极短路故障(如图 2 中 f_2 所示)为例对其故障暂态特征进行分析,为后文保护方案的提出奠定基础。

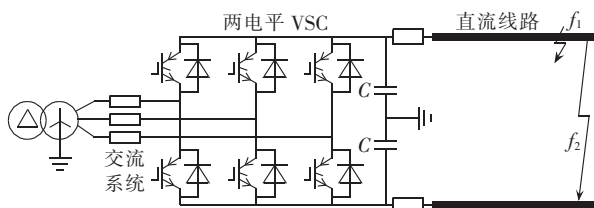


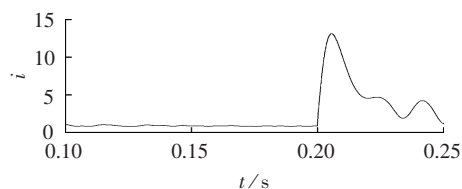
图 2 单、双极短路故障等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of single-pole or bipolar short circuit fault

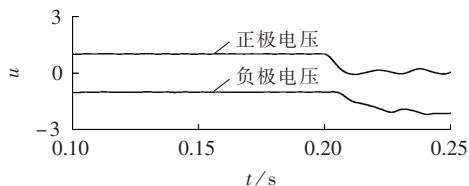
根据故障暂态发展过程,整个单极短路故障暂态过程可以分为电容放电阶段和交流侧馈入阶段这两个阶段;整个双极短路故障暂态过程可分为电容放电阶段、二极管自由导通阶段和交流侧馈入阶段^[15]这三个阶段。

发生单、双极短路故障的故障初期,直流电压大

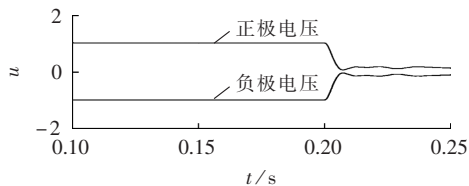
于交流侧线电压,直流侧以电容放电为主,交流侧仅为交流电抗续流。直流侧将承受电容放电产生的快速过流,该阶段内直流电流快速上升,0.2 s 发生故障时的电流(标幺值)波形如图 3(a)所示;发生单极短路故障(以正极故障为例)时,故障极侧的电容电压由 $U_{dc}/2$ 迅速下降为 0 左右,而非故障极两端的电压几乎等于故障前正常运行时的电压 U_{dc} ,故障波形如图 3(b)所示(图中电压为标幺值);发生双极短路故障时,直流侧正极电压由 $U_{dc}/2$ 迅速下降,负极电压由 $-U_{dc}/2$ 迅速上升,故障波形如图 3(c)所示(图中电压为标幺值)。



(a) 单极短路故障电流



(b) 单极短路故障两极电压



(c) 双极短路故障两极电压

图 3 单、双极短路故障电流、电压波形

Fig.3 Current and voltage waveforms of single-pole or bipolar short circuit fault

两电平 VSC 故障电流上升速度快且不受控的问题将在多端柔性直流配电系统中由于多站的叠加而进一步加剧;随着电压容量等级、线路参数、故障距离等参数的变化,故障发生至电压过零的这一过程的持续时间会有所不同^[16],但基本仅为几毫秒;而且直流配电系统要求保护动作完成时间尽量控制在 5 ms 以内,所以有必要研究快速的多端柔性直流配电系统保护方案。

2 多端柔性直流配电网保护原理及判据

2.1 保护启动原理及判据

根据直流线路在故障初期处于电容放电阶段的特点,该阶段内线路电流明显增大,因此,可以利用故障电流的大小作为保护启动判据,判据表达式为:

$$I_t > I_{op_set} \quad (1)$$

其中, I_t 为保护安装处在 t 时刻发生故障时的电流幅

值; I_{op_set} 为启动整定值,取 $I_{op_set}=K \times 0.1 I_N$, I_N 为直流配电系统额定运行电流, K 为可靠系数。为防止采样值抖动而导致保护频繁误启动,当 I_i 连续 3 个点大于 I_{op_set} 时,保护启动判据动作。

2.2 故障极选极原理及判据

为使保护能够准确地动作于故障极线,保证非故障极仍能正常输送功率,快速选出故障极对于直流系统的稳定运行有重要作用。

由上文柔性直流配电系统故障暂态特征分析可知,短时窗内,当发生正极接地故障时,正极电压波远离正常稳态电压轴线值的程度远大于负极电压波;发生负极接地故障时,负极电压波远离正常稳态电压轴线值的程度大于正极电压波;发生双极短路故障时,正、负极电压波远离正常稳态电压轴线值的程度基本一致。为刻画两极电压暂态波形的变化特征,引入两极电压与稳态电压轴线值的标准差系数 CV(Coefficient of Variance),即标准差与平均数的比值,用于描述或衡量单位均值上的离散程度,它也是反映标志变动度的相对指标。在 2 ms 时窗内,分别计算正极电压和负极电压与其稳态电压轴线值的标准差系数。

$$\begin{aligned} CV_+ &= \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N [u_+(k) - U_+(k)]^2}{N-1}} \\ CV_- &= \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N [u_-(k) - U_-(k)]^2}{N-1}} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, CV_+ 、 CV_- 分别为正、负极电压与其稳态电压轴线值的标准差系数; $u_+(k)$ 、 $u_-(k)$ 分别为正、负为极电压采样值; $U_+(k)$ 、 $U_-(k)$ 分别为正、负极正常稳态电压的轴线值, $U_+(k)=10\text{ kV}$, $U_-(k)=-10\text{ kV}$ 。

定义 K_p 为正极电压的标准差系数 CV_+ 与负极电压的标准差系数 CV_- 的比值:

$$K_p = \frac{CV_+}{CV_-} \quad (3)$$

若对故障后 2 ms 内的两极电压与其稳态电压轴线值进行标准差系数计算,则发生正极故障时,正极电压标准差系数要远远大于负极电压标准差系数,即 $K_p \gg 1$;发生负极故障时,负极电压标准差系数要远远大于正极电压标准差系数,即 $K_p < 1$;发生双极短路故障时,正极电压标准差系数与负极电压标准差系数相差不大,即 K_p 接近于 1。故可以利用故障后短时窗内的正、负极电压标准差系数的比值 K_p 来识别故障极。

为提高防拒动的裕度,选择可靠系数 $K_{rel}=1.3$,构造如下判据:

$$\begin{cases} \text{若 } K_p \geq 1.3, \text{ 则发生正极短路故障} \\ \text{若 } K_p < 0.77, \text{ 则发生负极短路故障} \\ \text{若 } 0.77 \leq K_p < 1.3, \text{ 则发生双极短路故障} \end{cases} \quad (4)$$

2.3 区内、外故障识别原理及判据

在交流线路保护中,距离保护具有保护范围稳定、不受系统运行方式影响等优良性能。本文所提距离保护方法只要求能够可靠判别故障处于保护区内还是区外,并不需要在全线范围内准确测距。故本节将距离保护的思想应用于多端柔性直流配电系统的区内、外故障识别中。

2.3.1 区内、外故障识别原理

a. 单极接地短路故障(以正极为例)。

一般配电线路的供电距离很短,线路模型采用集中参数等值线路。采用 π 型等值电路来模拟正极接地短路故障,如图 4 所示。图中, u_p 、 i_1 分别为在保护安装处测得的正极电压、电流; R 、 L 、 C 分别为线路单位长度的电阻、电感、电容; i_2 为流经电容的电流; i_3 为流经电阻和电感的电流。

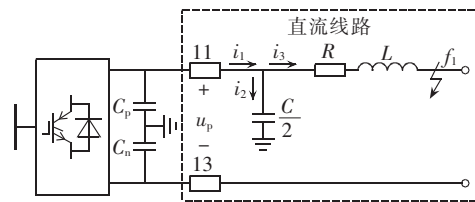


图 4 正极线路接地短路故障示意图

Fig.4 Schematic diagram of positive line grounding fault

当距保护安装处 l 远处发生单极接地短路故障时,根据基尔霍夫定律可列时域方程:

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3 \\ u_p = R l i_3 + L l \frac{di_3}{dt} \\ i_2 = \frac{1}{2} C l \frac{du_p}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中保护安装处测得的电压 u_p 、电流 i_1 以及线路参数为已知量,在 3 个不同的时刻,分别建立 3 个独立的微分方程,即可求解故障距离 l ,如式(6)所示。

$$l = \frac{R i_1 + L \frac{di_1}{dt} - A}{RC \frac{du_p}{dt} + LC \frac{d^2 u_p}{dt^2}} \quad (6)$$

$$A = \sqrt{\left(R i_1 + L \frac{di_1}{dt} \right)^2 - 2 u_p \left(RC \frac{du_p}{dt} + LC \frac{d^2 u_p}{dt^2} \right)} \quad (7)$$

b. 双极短路故障。

双极短路故障示意图如图 5 所示,图中,通过保护安装处测得的负极电压、电流分别为 u_n 、 i_4 ,其他参数含义均与图 4 中相同。

当距保护安装处 l 远处发生双极短路故障时,

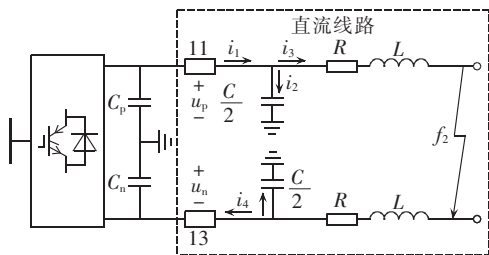


图 5 直流线路双极短路故障示意图

Fig.5 Schematic diagram of DC line bipolar short circuit fault

同样可根据基尔霍夫定律得到相似的时域方程:

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3 \\ u_p = 2Rli_3 + 2Ll \frac{di_3}{dt} + u_n \\ i_2 = Cl \frac{du_p}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中保护安装处测得的正极电压 u_p 、电流 i_1 、负极电压 u_n 、电流 i_4 以及线路参数均为已知量,在 3 个不同的时刻,分别建立 3 个独立的微分方程,即可求解故障距离 l ,如式(9)所示。

$$l = \frac{Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} - B}{2RC \frac{du_p}{dt} + 2LC \frac{d^2u_p}{dt^2}} \quad (9)$$
$$B = \sqrt{\left(Ri_1 + L \frac{di_1}{dt}\right)^2 - 2(u_p - u_n) \left(RC \frac{du_p}{dt} + LC \frac{d^2u_p}{dt^2}\right)} \quad (10)$$

由于配电线路供电距离短、电压等级低,本文分析主要针对 π 型等值电路。本文所用线路模型参数 $R = 0.127 \Omega/\text{km}$ 、 $L = 1.93 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$ 、 $C = 6.74 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{km}$ 均根据现有深圳多端柔性直流配电示范工程及文献中所选参数而得。由于线路分布电容参数相比于电阻和电感值小很多,合理的分布电容参数变化对于式(6)和式(9)的影响较小,不会对本文方法的准确性造成较大影响。

2.3.2 保护判据

取 2 ms 内测量数据代入式(6)或(9)计算故障距离,当满足 $l \leq l_{\text{set}}$ 时,保护动作,保护定值 l_{set} 设为所保护线路全长的 90%。

基于上述距离保护的区内、外故障识别方法首先需要进行方向性判断。以图 6 所示的保护 11 为例,其背侧故障包括背侧换流站出口故障、背侧交流系统故障和背侧直流线路故障^[12],这些故障情况下直流线路的保护 11 不应误动作。

将直流线路两端的电流正方向定义为由母线指向线路,反方向定义为由线路指向母线。如图 6 所示,直流线路两端安装保护测量装置,当故障发生在 L_1 时,保护 11 检测到的正极直流线路电流为正方向、负极电流为反方向时,说明相对于保护 11 的正方向保护区域内发生故障;同时,保护 21 检测到的正极

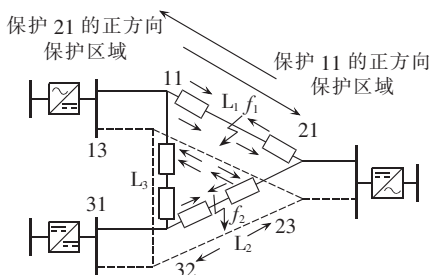


图 6 直流线路区内、外故障示意图

Fig.6 Schematic diagram of DC line in-zone and out-zone faults

直流线路电流为正方向、负极电流为反方向时,说明相对于保护 21 的正方向保护区域内发生故障。保护 11 和 21 再根据故障选极判据判断出的不同故障类型代入不同故障测距公式即可进行区内、外故障判断。

当故障发生在 L_2 时,保护 11 检测到的正极直流线路电流为正方向、负极电流为反方向时,说明相对于保护 11 的正方向保护区域内发生故障;同时,保护 21 检测到的正极直流线路电流为反方向,负极电流为正方向时,说明相对于保护 21 的反方向保护区域内发生故障。只有保护 11 根据不同故障测距公式进行区内、外故障判断。

3 单端电气量暂态保护方案

根据上述分析,可设计出多端柔性直流配电线路单端电气量暂态保护方案,其框图如图 7 所示。该保护方案由启动元件、方向元件、故障选极元件以及区内外故障识别元件等构成。通过检测直流线路过电流构成保护启动元件;计算正极暂态电压与 10 kV 的标准差系数和负极暂态电压与 -10 kV 的标准差系数,构造故障选极元件;利用直流线路电流的正负极性及其距离保护方法构造区内外故障识别元件。

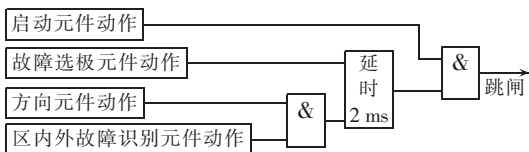


图 7 多端柔性直流配电线路单端电气量暂态保护方案逻辑框图

Fig.7 Logic block diagram of transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system

4 仿真实验

利用在 MATLAB/Simulink 中搭建的三端环状柔性直流配电网仿真系统对所提单端电气量暂态保护方案的有效性进行验证,仿真系统如图 8 所示。每段直流线路长度设置为 5 km,采用 π 型等值电路。系统采样频率为 200 kHz,保护所需数据窗长度为 2 ms。仿真中,分别考虑 3 种情况:图 8 中的区内正

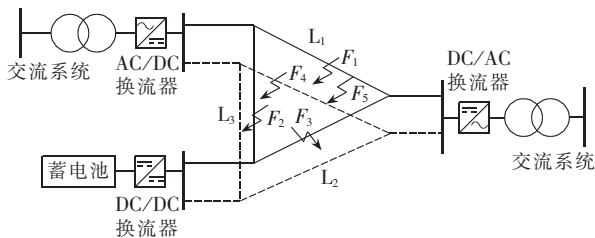


图 8 仿真系统示意图

Fig.8 Schematic diagram of simulation system

极线的点 F_1 处发生单极接地故障;区内负极线的点 F_4 处发生单极接地故障;区内点 F_5 处发生双极短路故障;区外正极线的点 F_2 、点 F_3 处发生单极接地故障。

4.1 故障选极仿真

以图 8 所示系统为算例进行暂态仿真,以验证本文故障选极算法的有效性。仿真中:点 F_1 、点 F_4 、点 F_5 与距离保护设备安装处的距离考虑 0.5、2.5、4.5 km 3 种情况,即故障点分别位于直流线路的始端、中点和末端;接地故障过渡电阻考虑 0.1、1、10 Ω 3 种情况。仿真结果如表 1 所示。

表 1 故障选极仿真结果
Table 1 Simulative results of faulty line selection

故障	过渡电阻/ Ω	故障距离/km	K_p	判断结果
点 F_1 处 发生 单极故障	0.1	0.5	14.27	正极故障
		2.5	14.14	正极故障
		4.5	15.09	正极故障
	1	0.5	14.59	正极故障
		2.5	16.02	正极故障
		4.5	15.77	正极故障
	10	0.5	17.42	正极故障
		2.5	18.97	正极故障
		4.5	25.63	正极故障
	0.1	0.5	0.071	负极故障
		2.5	0.077	负极故障
		4.5	0.066	负极故障
点 F_4 处 发生 单极故障	1	0.5	0.068	负极故障
		2.5	0.062	负极故障
		4.5	0.057	负极故障
	10	0.5	0.053	负极故障
		2.5	0.038	负极故障
		4.5	0.023	负极故障
	0.1	0.5	0.993	双极故障
		2.5	0.986	双极故障
		4.5	0.994	双极故障
点 F_5 处 发生 双极故障	1	0.5	0.997	双极故障
		2.5	0.985	双极故障
		4.5	0.992	双极故障
	10	0.5	0.998	双极故障
		2.5	0.983	双极故障
		4.5	0.991	双极故障

仿真结果表明,发生正极故障时,正、负极电压标准差系数的比值 K_p 远大于 1.3;发生负极故障时,正、负极电压标准差系数的比值 K_p 远小于 0.77;发生双极短路故障时,其比值 K_p 接近于 1。故本文设计的故障选极方法能够正确判断故障极,且具有较强的

耐受过渡电阻能力。

4.2 区内、外故障仿真

4.2.1 仿真结果

以图 8 所示系统为算例进行暂态仿真,以验证本文区内、外故障识别算法的有效性。仿真中:点 F_1 、点 F_5 考虑距离保护 11 安装处 0.5、2.5、4.5 km 3 种情况,即分别位于直流线路 L_1 的始端、中点和末端;点 F_2 考虑距离保护 11 安装处 5.5、7.5、9.5 km 3 种情况,即分别位于直流线路 L_2 的始端、中点和末端;点 F_3 考虑距离保护 11 安装处 10.5、12.5、14.5 km 3 种情况,即分别位于直流线路 L_3 的始端、中点和末端;各点的故障过渡电阻考虑了 0.1、1、10 Ω 3 种情况。仿真结果如表 2 所示。

表 2 区内、外故障仿真结果

Table 2 Simulative results of in-zone and out-zone faults

故障	工况	样本组数	判断结果
点 F_1 处发生 区内故障	不同过渡电阻	3	区内单极故障
	不同故障距离	3	区内单极故障
点 F_5 处发生 区内故障	不同过渡电阻	3	区内双极故障
	不同故障距离	3	区内双极故障
点 F_2 处发生 区外故障	不同过渡电阻	3	区外单极故障
	不同故障距离	3	区外单极故障
点 F_3 处发生 区外故障	不同过渡电阻	3	区外单极故障
	不同故障距离	3	区外单极故障

由表 2 可见,当故障发生在保护区内时,2 ms 采样数据计算出的故障距离满足保护判据。当故障发生在保护区外时,由于区外故障已不符合区内故障时的测距模型,计算结果没有规律,甚至不能计算出实数解。

由仿真结果可知,本文所提距离保护方案在不同过渡电阻、不同故障距离下仍能可靠识别线路的区内、外故障。

4.2.2 保护性能分析

a. 过渡电阻影响。

图 9、10 分别给出了点 F_1 处发生单极短路故障和点 F_5 处发生双极短路故障后 2 ms 内的测距结果。由图 9、10 可知,故障发生在保护区内时,在 ± 10 kV 直流系统中,即使存在 10 Ω 的过渡电阻(配电系统过渡电阻一般最大仅为十几欧姆),所设计的保护方案仍能可靠识别区内故障。故障发生在区内近端及区内远端时,考虑可靠系数,本算例中设置为 $l_{set}=1.3l_{rel}$ (l_{rel} 为线路全长的 90%,即 $l_{rel}=90\% \times 5=4.5$ (km)),所设计的保护方案能够可靠识别区内故障。

b. 白噪声的影响。

区、内外故障识别方法中采用了微分方程计算故障距离,由于微分运算的固有特性使采用变化率为判据的保护对噪声敏感。表 3 给出了点 F_1 处发生单极接地故障后 2 ms 内信号无噪声和分别加入 30

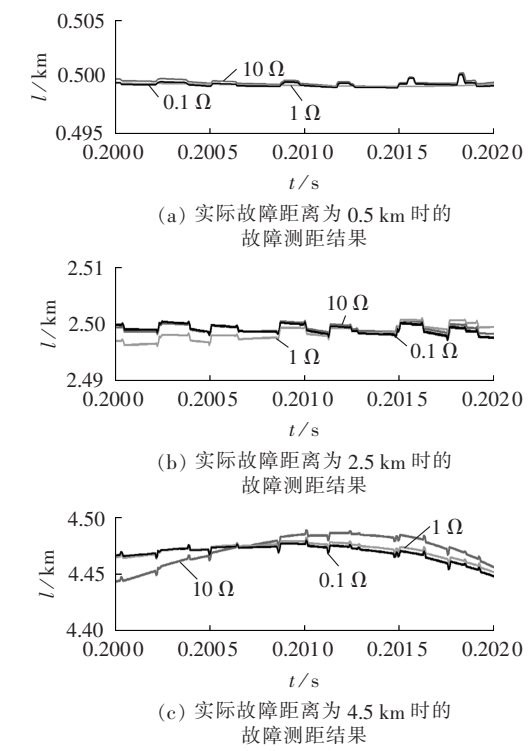


图 9 点 F_1 的故障测距结果
Fig.9 Results of fault locating for F_1

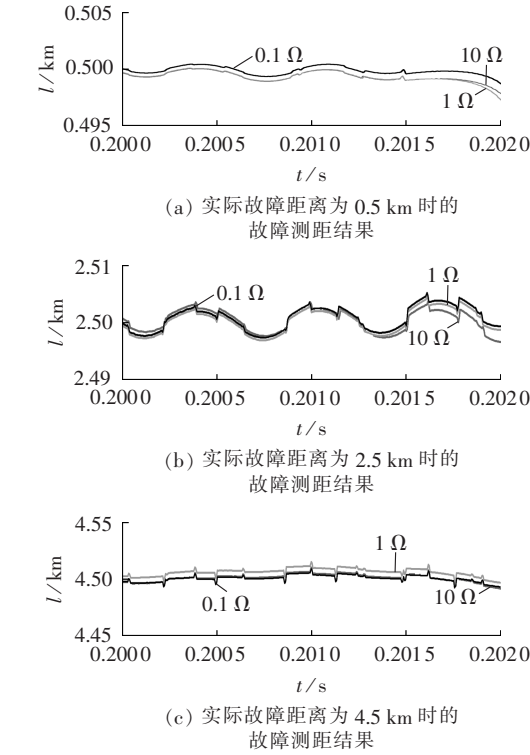


图 10 点 F_5 的故障测距结果
Fig.10 Results of fault locating for F_5

dB、40 dB、50 dB 白噪声情况下的测距结果。由表 3 可知,加入白噪声的情况下,采用本文故障测距算法达到了本算例所设置的保护动作条件,保护能够可靠动作。因此,本文所提保护方案在有白噪声干扰的情况下仍能进行可靠判别。

表 3 有无白噪声情况下的故障测距结果 Table 3 Results of fault locating,with and without white noise				
信噪比/dB	故障距离/km	测距最大值/km	测距最小值/km	判断结果
无噪声	0.5	0.4995	0.499	区内故障
	2.5	2.5020	2.498	区内故障
	4.5	4.4800	4.450	区内故障
30	0.5	0.5200	0.490	区内故障
	2.5	2.7200	2.310	区内故障
	4.5	4.9300	4.110	区内故障
40	0.5	0.5040	0.495	区内故障
	2.5	2.5800	2.450	区内故障
	4.5	4.6500	4.280	区内故障
50	0.5	0.5010	0.498	区内故障
	2.5	2.5300	2.480	区内故障
	4.5	4.5300	4.410	区内故障

c. 线路分布电容影响。
由于本文所提测距算法采用的线路模型考虑了线路分布电容,高频时高次谐波电流流过电缆线路,流过分布电容的电流会占电缆载流容量的一部分,可能会对本文保护方案产生影响。表 4 给出了不同数量级线路分布电容下点 F_1 处发生单极接地故障后的测距结果。由表 4 可知,在不同线路分布电容下,采用本文故障测距算法达到了本算例所设置的保护动作条件,保护能够可靠动作。因此,本文所提保护方案受线路分布电容的影响较小。

表 4 不同线路分布电容下的测距结果 Table 4 Results of fault locating for different line distributed capacitances				
电容值/ (F·km ⁻¹)	故障距离/km	测距最大值/km	测距最小值/km	判断结果
6.74×10^{-9}	0.5	0.4995	0.499	区内故障
	2.5	2.5020	2.498	区内故障
	4.5	4.4800	4.450	区内故障
5.83×10^{-8}	0.5	0.5150	0.493	区内故障
	2.5	2.5500	2.450	区内故障
	4.5	4.6540	4.310	区内故障
3.21×10^{-7}	0.5	0.5370	0.471	区内故障
	2.5	2.6300	2.382	区内故障
	4.5	4.7780	4.115	区内故障

5 结论

多端柔性直流配电系统直流线路故障的快速、可靠识别是直流配电网安全可靠运行的重要保障。本文设计了一种基于本地信息、无需构造保护边界的新型多端柔性直流配电系统直流线路快速保护方案;通过计算正、负极暂态电压的标准差系数进行故障选极;同时利用区内故障时各电气量的时域解析关系计算故障距离实现区内、外的故障识别。该方案仅利用直流配电线路单端的电气量便可识别故障极与区内外故障,动作速度快,可靠性高。

本文所提保护方案具有以下优点。
a. 保护方案无需边界。本文保护方案不需要在

系统中配置直流电抗器,不会增加系统经济成本,同时也不会对多端柔性直流环网的稳定性造成影响。

b. 动作速度快。本文所提保护方案所需的保护时窗长仅为 2 ms,在相同的断路器开断时间条件下,具有更好的速动性。

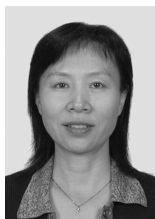
c. 基于单端电气量。本文所提保护方案基于本地测量信息即可实现保护功能,不依赖通信,在快速动作的条件下也能保证保护的可靠性。

d. 具有较强的抗过渡电阻能力和耐噪声能力。在多种过渡电阻及噪声干扰条件下,本文所提保护方案仍能可靠动作,能够耐受较强的过渡电阻和噪声干扰。

参考文献:

- [1] 宋强,赵彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.
SONG Qiang,ZHAO Biao,LIU Wenhua,et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(25):9-19.
- [2] BARAN M E,MAHAJAN N R. DC distribution for industrial systems:opportunities and challenges[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2003,39(6):1596-1601.
- [3] FLOURENTZOU N,AGELIDIS V G,DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems:an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(3):592-602.
- [4] 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.
- [5] 李斌,何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):87-95.
LI Bin,HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(1):87-95.
- [6] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):98-104.
JIANG Daozhuo,ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(8):98-104.
- [7] 束洪春,田鑫萃,董俊,等. ± 800 kV 云广直流输电线路保护的仿真及分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(31):179-188.
SHU Hongchun,TIAN Xincui,DONG Jun,et al. Simulation and analyses for Yun-Guang ± 800 kV HVDC transmission line protection system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(31):179-188.
- [8] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等. 高压直流输电线路差动保护新原理[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):45-49.
GAO Shuping,SUONAN Jiale,SONG Guobing,et al. A new current differential protection principle for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(17):45-49.
- [9] BARAN M E,MAHAJAN N R. Overcurrent protection on voltage-source-converter-based multiterminal DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(1):406-412.
- [10] 吕延洁,张保会,哈恒旭,等. 基于暂态量超高速线路保护的发展与展望[J]. 电力系统自动化,2001,25(5):56-61.
LÜ Yanjie,ZHANG Baohui,HA Hengxu,et al. Development and prospect of ultra-high speed protection for EHV transmission systems based on fault-generated transients[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(5):56-61.
- [11] 宋国兵,靳幸福,冉孟兵,等. 基于并联电容参数识别的 VSC-HVDC 输电线路纵联保护[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):76-82.
SONG Guobing,JIN Xingfu,RAN Mengbing,et al. Pilot protection for VSC-HVDC transmission lines based on shunt capacitance parameter identification[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(15):76-82.
- [12] 李斌,何佳伟,李晔,等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5741-5749.
LI Bin,HE Jiawei,LI Ye,et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(21):5741-5749.
- [13] 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.
- [14] AGUSTONI A,BORIOLI E,BRENNNA M,et al. LV DC distribution network with distributed energy resources:analysis of possible structure[C]//18th International Conference on Electricity Distribution. Turin,Italy:IEEE,2005:1-5.
- [15] YANG Jin,FLETCHER J E,O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2012,59(10):3827-3837.
- [16] 李斌,何佳伟,冯亚东,等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化,2016,40(21):2-12.
LI Bin,HE Jiawei,FENG Yadong,et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(21):2-12.

作者简介:



和敬涵

和敬涵(1964—),女,河北唐县人,教授,博士,主要研究方向为电力系统在线监测、保护与控制、电能质量、新能源及智能电网、轨道交通电气化等;

周琳(1993—),女,河北沧州人,硕士研究生,主要研究方向为直流配电网故障识别及保护等;

罗国敏(1983—),女,四川内江人,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(E-mail:gmluo@bjtu.edu.cn);

李蕊(1978—),女,吉林磐石人,高级工程师,硕士,主要研究方向为直流配电、微电网及分布式电源、配电网规划。

Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system

HE Jinghan¹,ZHOU Lin¹,LUO Guomin¹,LI Rui²

(1. School of Electrical Engineering,Beijing Jiaotong University,Beijing 100044,China;

2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: With the development of distribution system structure,the protection principles of AC systems and conventional DC transmission systems are not applicable to the multi-terminal flexible DC distribution system. At present,there are two concepts of protection schemes proposed for DC distribution systems;one is based on the information of both line ends,which requires communication channel for synchronizing the information of both line-ends,resulting in slow speed;the other is based on the information of single line-end,which has to construct the protection boundary,resulting in increased cost. A protection scheme is proposed for the multi-terminal flexible DC distribution system,which is based on the single-end electrical transient signals and does not need protection boundary. The coefficients of variances between transient voltages and normal steady-state voltages are calculated for the positive and negative poles of one side to identify the faulty pole. The time-domain analytical relationships among electrical signals during an in-zone fault are analyzed to derive the differential equations of single-polar or bipolar fault for calculating the fault distance to quickly and reliably identify the in-zone and out-zone faults. A MATLAB/Simulink simulation model is built and the simulative results show that,the proposed scheme can effectively identify the faulty pole,in-zone fault and out-zone fault only based on the local information in different fault conditions;it is immune to transition resistance and has better anti-interference ability;and it can satisfy the requirements of DC distribution network for the protection rapidity and selectivity.

Key words: multi-terminal flexible DC distribution; single-end electrical variable; fault distance; protection scheme; fault identification