

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181460

基于突变量能量波形特征的特高压直流输电线路 单端保护方法

王永进¹, 樊艳芳¹, 李自乾²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网甘肃电力公司平凉供电公司, 甘肃 平凉 744000)

摘要: 从提高特高压直流输电线路保护可靠性的角度出发, 提出一种基于突变量能量波形特征的特高压直流输电线路单端保护方法。利用叠加原理分析故障后突变量能量, 发现系统正常运行时, 突变量能量为零。直流输电线路发生故障后, 突变量能量具有明显变化, 据此构造直流输电线路保护启动判据。进一步分析直流滤波器和平波电抗器对突变量能量波形的影响, 发现二者的平滑作用使能量分散造成波形变缓, 利用标准差系数刻画突变量能量波形的波动特性, 据此构造直流输电线路区内、外故障识别判据。利用正、负极标准差系数之比构造故障选极判据, 进而实现故障极全线速动保护。仿真结果表明, 该保护方法能可靠地区分直流线路区内、外故障, 实现故障选极, 保护特高压直流线路全长。

关键词: 叠加原理; 突变量能量; 标准差系数; 区内外故障; 故障选极

Single-end protection method for UHVDC transmission line based on characteristics of sudden energy waveform

WANG Yongjin¹, FAN Yanfang¹, LI Ziqian²

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Pingliang Power Supply Company, State Grid Gansu Electric Power Company, Pingliang 744000, China)

Abstract: From the perspective of improving the reliability of UHVDC transmission line protection, a single-ended protection method for UHVDC transmission line based on the characteristics of sudden energy waveform is proposed. The superposition principle is used to analyze the energy of the sudden change after the fault. It is found that the sudden energy of the system is zero when the system is in normal operation. After the fault occurs in the DC transmission line, the sudden change energy has obvious changes, and the starting criterion of the protection of the DC transmission line is constructed accordingly. Further analysis of the influence of the DC filter and the smoothing reactor on the sudden energy waveform is done, it is found that their smoothing effect causes the energy dispersed and the waveform flat. The standard deviation coefficient is used to characterize the fluctuation characteristics of the sudden energy waveform, and the distinguishing criterion of internal area fault and external area fault for DC transmission line is constructed accordingly. The fault pole selection criterion is constructed by using the ratio of the standard deviation coefficients of the positive and negative poles, thereby realizing the full-line quick-action protection of the fault pole. The simulation results show that the protection method can reliably distinguish inner and outer faults of the DC line, select fault pole, and protect the full length of UHVDC lines.

This work is supported by Joint Project of Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2017D01C028).

Key words: superposition principle; mutation energy; standard deviation coefficient; internal area fault and external area fault; fault pole selection

0 引言

特高压直流输电具有线路造价低、可大规模传

输电能及在长距离输电情况下线损率小等一系列优点, 决定了我国“强直弱交”的电力发展战略^[1-3]。特高压直流输电线路距离长, 穿越地形及周边环境据统计, 直流线路故障占整个直流输电系统故障的50%, 而线路保护正确动作率却只占50%^[4-5]。因此, 亟需研究可靠性高、响应速度快且具有绝对选择性

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金联合项目资助 (2017D01C028)

的特高压直流输电线路暂态保护。

目前国内外学者针对特高压直流输电线路保护已进行了一定的研究。文献[6-8]利用小波变换分析法提出改进型行波保护方案。然而该保护方案未考虑雷击干扰的影响,保护的适应性仍存在一定的问題。文献[9]利用线路两侧暂态能量差值实现线路保护,但对直流线路通信通道及双端信息同步要求较高,保护速动性受到一定影响。文献[10]利用区内、外故障时保护安装处高、低频暂态电压信号能量的不同区分直流输电线路区内、外故障。该保护方法没有深入考虑长直流输电线路对高频分量的衰减将大于物理边界的衰减,当直流线路末端故障时保护将拒动,不能保护直流线路全长。针对上述保护原理中存在的问题,文中利用单端突变量能量波形的波动特性,提出一种新型直流线路保护方法。

文中在分析直流滤波器和平波电抗器对行波影响的基础上,提取整流侧保护安装处的突变量能量作为保护所需电气量,分析在直流输电线路区内、外故障时突变量能量的波形特征,发现直流线路区内、外故障时,突变量能量波形的波动特性差异明显,据此引入标准差系数构造区内、外故障识别判据,进一步利用正、负极标准差系数的比值进行故障选极,实现故障极线路保护。通过 PSCAD 搭建云广±800 kV 双极直流输电系统模型提取故障信息,利用 Matlab 实现保护算法,仿真验证原理有效性。

1 直流输电系统故障特征分析

1.1 双极直流输电系统构成

参照文献[11]中云广特高压直流输电系统及各元件实际参数,搭建如图1所示的±800 kV 双极直流输电模型。该模型由两端交流系统、换流变压器、整流器、平波电抗器、直流滤波器、直流输电线路和逆变器构成。如图1所示。

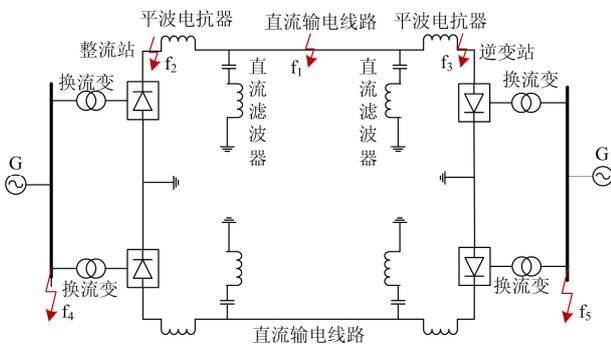


图1 特高压直流输电系统图

Fig. 1 UHVDC transmission system diagram

图1中, f_1 表示直流输电线路区内故障, f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 表示直流线路区外故障, 分别为整流侧出口故障、逆变侧出口故障, 整流侧交流母线三相故障、逆变侧交流母线三相故障。

1.2 直流输电线路故障特性分析

直流系统故障时, 利用叠加原理可将发生故障的网络等效成正常运行系统和故障附加分量网络的叠加, 正常运行系统无暂态量, 故障时出现暂态量, 因此文中仅对故障附加分量进行分析研究, 以突出故障后暂态量的突变特性^[12]。

直流系统故障时, 直流线路电压下降, 相当于在正常运行系统网络叠加一个负电压源。

1.2.1 直流线路区内 f_1 处故障

文中采用实际电流方向作为正方向。当直流线路区内 f_1 处发生故障时, 其故障附加分量网络如图2所示, 图中, M 为整流侧, N 为逆变侧, U_f 为故障附加电压源, ΔI_M 和 ΔI_N 为整流侧和逆变侧突变电流, ΔU_M 和 ΔU_N 为整流侧和逆变侧突变电压, I_f 为故障支路总电流, I_{Rr} 为故障回路电流在右侧支路的分流, I_{Ll} 为故障回路电流在左侧支路的分流, R_{sm} 、 R_{sn} 为两侧系统等效电阻, R_f 为故障支路接地电阻。

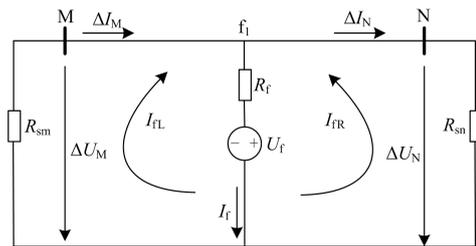


图2 正极直流系统 f_1 故障附加网络

Fig. 2 Positive DC system f_1 fault additional network

由图2实际电流方向可得, 在故障附加电压源作用下, 流过整流侧的突变电流 ΔI_M 为正值, 流过逆变侧的突变电流 ΔI_N 为负值。如表达式(1)所示。

$$\begin{cases} \Delta U_M < 0 \\ \Delta U_N < 0 \\ \Delta I_M > 0 \\ \Delta I_N > 0 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)分析可知, 直流输电线路发生内部故障时, 整流侧和逆变侧突变电压为负极性, 整流侧突变电流为正极性, 逆变侧突变电流为负极性。

1.2.2 整流侧区外 f_2 处故障

当整流侧 f_2 处发生故障时, 其故障附加分量网络如图3所示。

由图3实际电流方向可得, 在故障附加电压源作用下, 流过整流侧的突变电流 ΔI_M 和流过逆变侧的突变电流 ΔI_N 均为负值, 如式(2)所示。

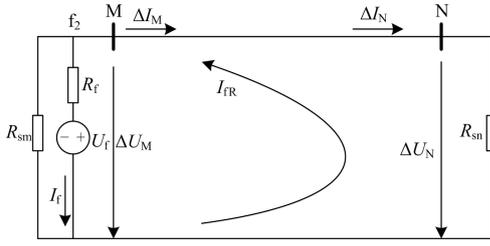

 图3 正极直流系统 f_2 故障附加网络

 Fig. 3 Positive DC system f_2 fault additional network

$$\begin{cases} \Delta U_M < 0 \\ \Delta U_N < 0 \\ \Delta I_M > 0 \\ \Delta I_N > 0 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)分析可知, 整流侧 f_2 处故障时, 整流侧和逆变侧突变电压和突变电流均为负极性。

1.2.3 逆变侧区外 f_3 处故障

当逆变侧 f_3 处发生故障时, 其故障附加分量网络如图4所示。图中, M为整流侧, N为逆变侧, U_f 为故障附加电压源, ΔI_M 和 ΔI_N 为整流侧和逆变侧突变电流, ΔU_M 和 ΔU_N 为整流侧和逆变侧突变电压, I_f 是故障支路总电流, I_{fL} 为故障回路电流在左侧支路的分流, R_{sm} 、 R_{sn} 为两侧系统等效电阻, R_f 为故障支路接地电阻。

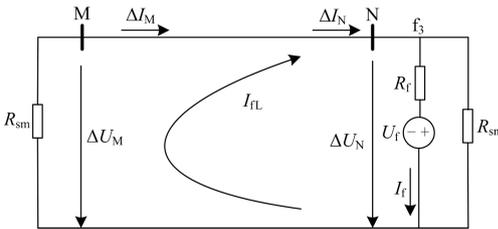

 图4 正极直流系统 f_3 故障附加网络

 Fig. 4 Positive DC system f_3 fault additional network

由图4实际电流方向可得, 在故障附加电压源作用下, 流过整流侧的突变电流 ΔI_M 和流过逆变侧的突变电流 ΔI_N 均为正值, 如表达式(3)所示。

$$\begin{cases} \Delta U_M < 0 \\ \Delta U_N < 0 \\ \Delta I_M > 0 \\ \Delta I_N > 0 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)分析可知, 逆变侧 f_3 故障时, 整流侧和逆变侧突变电压均为负极性, 整流侧和逆变侧突变电流均为正极性。

1.3 直流滤波器和平波电抗器对行波的影响

当单独研究直流滤波器时, 直流输电线路区外故障时彼德逊等值电路如图5所示。

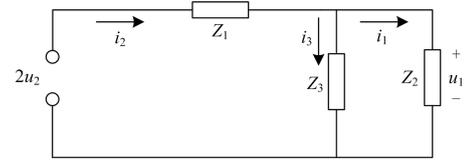


图5 考虑直流滤波器的彼德逊等值电路

Fig. 5 Peterson equivalent circuit considering DC filter

由图5得如下表达式成立:

$$\begin{cases} i_1 = \frac{2u_2}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-t/T}) \\ u_1 = \frac{2Z_2 u_2}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-t/T}) \\ T = \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{Z_1 + Z_2} \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)两端对时间求偏导得

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{2u_2}{Z_1 Z_2 Z_3} e^{-t/T} \\ \frac{du_1}{dt} = \frac{2u_2}{Z_1 Z_3} e^{-t/T} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_2 为区外暂态电压; u_1 为 u_2 经直流滤波器传变至直线路保护安装处的电压; i_1 为线路保护安装处检测到的电流; Z_1 为整流侧波阻抗; Z_2 为线路波阻抗; Z_3 表示直流滤波器阻抗。

由式(5)可得, 直流滤波器对电压电流行波有缓冲作用, 直流滤波器阻抗越大, 对行波的平缓作用越明显。

当单独研究平波电抗器时, 直流输电线路区外故障时彼德逊等值电路如图6所示。

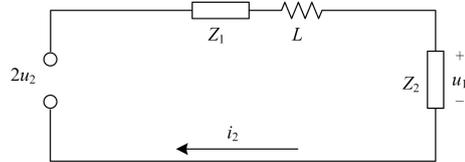


图6 考虑平波电抗器的彼德逊等值电路

Fig. 6 Peterson equivalent circuit considering smoothing reactor

由图6得如下表达式成立:

$$\begin{cases} i_1 = \frac{2u_2}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-t/T}) \\ u_1 = \frac{2Z_2 u_2}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-t/T}) \\ T = \frac{L}{Z_1 + Z_2} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)两端对时间求偏导得

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{2u_2}{L} e^{-t/T} \\ \frac{du_1}{dt} = \frac{2u_2 Z_2}{L} e^{-t/T} \end{cases} \quad (7)$$

式中： u_2 为区外暂态电压； u_1 为 u_2 经直流滤波器传变至直流线路保护安装处的电压； i_1 为线路保护安装处检测到的电流； Z_1 为整流侧波阻抗； Z_2 为线路波阻抗； L 表示平波电抗器的感抗。

由式(7)可得，平波电抗器对电压电流行波有缓冲作用^[13]，平波电抗器感抗越大，对行波的平缓作用越明显。

2 保护方案

2.1 突变能量引入

基于1.3节分析可知，直流滤波器和平波电抗器对电压电流行波具有平滑作用。从能量角度分析，当直流输电线路区内故障时，能量集中在某一点，保护安装处检测到的行波波头很陡；区外故障时，由于平波电抗器和直流滤波器的平滑作用使能量分散到相邻点，行波波头变缓。为更好地利用故障后暂态量的突变特性，引入文献[9]中突变能量来描述波头变化趋势，如图7所示，其表达式如式(8)。

$$\Delta E = \Delta U \times \Delta I \quad (8)$$

式中： ΔE 为突变能量； ΔU 和 ΔI 为保护安装处检测到的突变电压和突变电流。

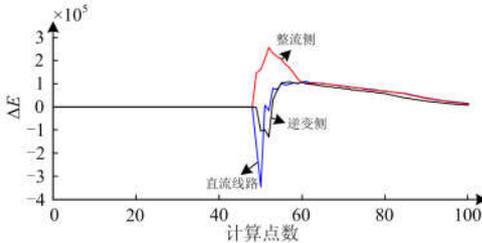


图7 区内外暂态能量波动图

Fig. 7 Regional and external transient energy fluctuations

2.2 保护启动判据

结合式(8)和第1.2节分析可知：系统正常运行时，整流侧保护安装处检测到的突变能量为零；直流线路区内故障和逆变侧区外故障时，整流侧 ΔE 小于0，极性为负；整流侧区外故障时，整流侧 ΔE 大于0，极性为正。为降低干扰影响并提高数据分析的稳定性，采用突变能量在一段时间内积分的平均值与设定阈值比较构成启动判据，如式(9)所示。

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta E(k) < E_{\text{set1}} \quad (9)$$

式中， E_{set1} 为启动整定值且为负数，可按实际系统高阻接地时对应的故障极最小暂态能量为基础，再考虑一定裕度进行整定。整定方法如式(10)所示。

$$E_{\text{set1}} = \frac{\Delta E_{\text{min}}}{K_{\text{rel}}} \quad (10)$$

式中： ΔE_{min} 为高阻接地时故障极最小突变能量值； K_{rel} 为可靠系数，本文取1.2。直流线路保护普遍缺乏整定依据，需结合大量仿真分析并考虑一定的裕度，本文取 $E_{\text{set1}} = -100 \text{ MW}\cdot\text{ms}$ 。

2.3 区内、外故障识别判据

数理统计中，标准差系数能很好地反映不同水平总体的标志变动度，表达式如式(11)所示。

$$V_{\sigma} = \frac{\sigma}{x} \quad (11)$$

式中： V_{σ} 为标准差系数； σ 为标准差； x 为平均数。

由2.1节分析可知，直流线路区内、外故障时，突变能量波形的波动特性差异明显。为了刻画直流线路区内、外故障时突变能量的波动特性，文中以突变能量标准差系数的大小构造区内、外故障识别判据，将式(11)写为

$$V_{bm} = \left| \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\Delta E(k) - \overline{\Delta E})^2}}{\overline{\Delta E}} \right| \quad (12)$$

式中： m 取1、2分别表示正、负极； V_{bm} 为 m 极波动系数； n 为5ms时间窗口内的采样个数； $\Delta E(k)$ 为突变能量采样幅值； $\overline{\Delta E}$ 为5ms时间窗口内突变能量采样幅值的平均值。

特高压直流输电系统具有强非线性，其保护整定值难以通过解析计算求取，目前实际工程中多采用仿真模拟结合经验值的方法确定整定值^[14-16]。文中参照云广特高压直流输电系统及各元件实际参数，仿真模拟图1所示不同故障情况，计算整流侧保护安装处的标准差系数，如表1所示。

表1 不同故障距离和过渡电阻的波动系数

Table 1 Fluctuation coefficient of different fault distance and transition resistance

故障类型	V_{b1}	V_{b2}
直流输电线路首端区内故障($f_1=0 \text{ km}$)	5 321	1 226
直流输电线路末端区内故障($f_1=1 418 \text{ km}$)	1 875	521.5
整流侧出口区外故障	180	53.52
逆变侧出口区外故障	140.7	51.7
整流侧交流系统区外三相短路故障	180.2	41.96
逆变侧交流系统区外三相短路故障	85.24	32.84

由表 1 标准差系数统计规律知, 区内故障时的标准差系数明显大于区外故障。据此构造区内、外故障识别判据, 如式(13)所示。

$$V_{bm} > V_{set1} \quad (13)$$

式中, V_{set1} 为整定值, 其值应为直流线路区内故障时最小波动系数并大于区外故障可能出现的最大波动系数, 同时为保证判据在干扰下(如雷击、功率波动)具有一定可靠性, 适当地提高裕度。如表 1 所示, 区外故障时波动系数最大值为 180, 直流线路区内故障时波动系数最小值为 1 875。为保证判据在干扰下(如雷击等干扰)具有一定的可靠性, 文中选取 $V_{set1}=1 300$ 。

2.4 故障选极判据

由于双极间电磁耦合的作用, 单极故障时, 健全极突变量能量随故障极变化而变化, 但相比于故障极, 健全极突变量能量波形波动较小, 即标准差系数较小, 故以双极突变量能量标准差系数的比值构成如式(14)所示的故障选极判据。理想情况下, 双极直流输电系统对称运行, 当 $V_{b1}/V_{b2} > 1$ 或 $V_{b1}/V_{b2} < 1$ 时, 即判定正极或负极故障, 当 $V_{b1}/V_{b2}=1$ 时, 则判为双极故障。然而, 在工程运行需要时, 双极直流输电系统将采用不对称运行方式, 如某一极的冷却系统有问题^[17-19], 则需要降低该极能量供给, 因此对于直流线路故障选极需要考虑一定的裕度, 以保证选极判据具有一定的可靠性。

$$\begin{cases} \frac{V_{b1}}{V_{b2}} > 1.2 & \text{正极故障} \\ 0.8 < \frac{V_{b1}}{V_{b2}} < 1.2 & \text{双极故障} \\ \frac{V_{b1}}{V_{b2}} < 0.8 & \text{负极故障} \end{cases} \quad (14)$$

式中, V_{b1} 、 V_{b2} 分别为正、负极标准差系数。

2.5 保护逻辑

当整流侧保护安装处突变量能量小于启动整定值时, 整流侧保护装置启动。直流线路整流侧突变量能量标准差系数小于 1 300 时, 判为区外故障, 保护不动作; 标准差系数大于 1 300 时, 判为区内故障。发生区内故障后, 根据正、负极突变量能量标准差系数的比值选择故障极, 实现故障极保护动作。保护方案的流程图如图 8 所示。

3 仿真验证

文中参照文献[11]中云广特高压直流输电系统和各元件实际参数, 在 PSCAD 中搭建如图 1 所示的±800 kV 双极直流输电模型提取故障信息, 利用

Matlab 实现保护算法。文中仿真采样频率为 20 kHz, 故障发生位置为图 1 中的 f_1-f_5 。

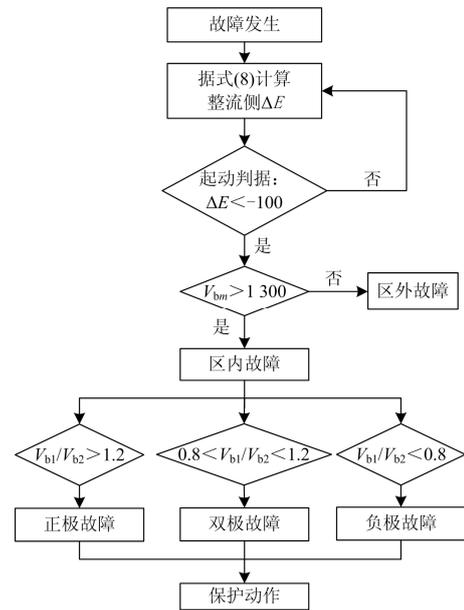


图 8 保护方案流程图

Fig. 8 Protection scheme flow chart

为验证所提保护方法的适用性, 延长线路长度至 2 500 km, 设置不同故障距离经不同过渡电阻接地的情况, 并考虑雷击干扰和故障性雷击的情况。仿真结果如表 2 所示。直流输电线路故障时电弧稳定, 无需考虑大过渡电阻可能性^[20-21], 因此保护方案中最大过渡电阻选取 300 Ω。

文中提取整流侧突变量能量作为保护判据所需电气量。若某一极线路启动判据未出口, 则不计算整流侧突变量能量的标准差系数 V_{bm} ; 若判为直流输电线路区外故障, 则不计算 V_{b1}/V_{b2} 。

表 2 中, “-”表示相应的启动判据未出口, 而未进行后续计算。由表 2 可知, 在直流输电线路区内接地故障和区内故障性雷击情况下, 保护能可靠动作; 在直流输电线路区外故障和非故障性雷击情况下, 保护可靠不动作。文中所提保护方案受长线路的影响小, 耐过渡电阻能力和抗雷击干扰能力强, 具有绝对选择性。

4 结论

文中通过对直流输电线路区内、外故障时, 突变量能量波形的波动特性进行分析, 提出一种利用单端突变量能量实现特高压直流输电线路保护的方法, 该方法仅利用整流侧突变量能量标准差系数便能辨识区内、外故障并实现准确选极。经理论分析和仿真验证, 得出以下结论:

表 2 保护性能验证
Table 2 Protection performance verification

故障类型	故障距离	过渡电阻/ Ω	启动判据是否出口		V_{b1}	V_{b2}	V_{b1}/V_{b2}	保护动作结果	
			正极	负极					
线路接地故障	f_1 点, 0 km	0	是	是	4 578	1 008.5	4.54	正极保护动作	
		100	是	是	3 633	985	3.69	正极保护动作	
		300	是	否	5 361	-	-	正极保护动作	
	f_1 点, 1 500 km	0	是	是	4 124	1 105	3.73	正极保护动作	
		100	是	是	3 856	843	4.57	正极保护动作	
		300	是	否	3 741	-	-	正极保护动作	
	f_1 点, 2 500 km	0	是	是	2 426	819	2.96	正极保护动作	
		100	是	否	2 011	-	-	正极保护动作	
		300	是	否	1 531	-	-	正极保护动作	
		0	否	否	-	-	-	保护不动作	
		f_2 点	100	否	否	-	-	-	保护不动作
			300	否	否	-	-	-	保护不动作
	f_3 点	0	是	是	195.4	62.58	-	保护不动作	
		100	是	是	150.6	51.2	-	保护不动作	
		300	是	否	120.1	-	-	保护不动作	
故障性雷击(2.6/50 μ s)	f_1 点, 200 km	-	是	是	3 157	949	3.33	正极保护动作	
	f_1 点, 1 500 km	-	是	是	2 786	743	3.75	正极保护动作	
	f_1 点, 2 000 km	-	是	是	1 379	358.4	3.85	正极保护动作	
雷击干扰(2.6/50 μ s)	f_1 点, 200 km	-	是	是	53.05	45.67	-	保护不动作	
	f_1 点, 1 500 km	-	是	是	90.2	89.8	-	保护不动作	
	f_1 点, 2 000 km	-	是	是	64.23	64.31	-	保护不动作	

1) 利用故障附加分量网络, 实现故障判别, 无需考虑系统正常运行状态对故障判别的影响。

2) 仅需单端电气量便能可靠地实现区内、外故障判别与故障选极, 无需考虑通信通道和双端数据同步等问题。

3) 原理简单, 受直流输电线路长度变化影响小, 对采样率要求低, 具有良好的抗雷击干扰能力和耐过渡电阻能力。

参考文献

[1] 李自乾, 樊艳芳, 胡剑生. 不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 142-148.
LI Ziqian, FAN Yanfang, HU Jiansheng. Single-ended fault location method for UHV DC transmission lines unaffected by wave velocity[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 142-148.

[2] 魏德华, 苗世洪, 刘子文, 等. 基于边界特征的高压直流输电长线路故障判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 75-82.
WEI Dehua, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. Fault identification method for high voltage direct current transmission line based on boundary feature[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 75-82.

[3] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点和工程应用[J].

电力系统自动化, 2005, 29(24): 5-6.
LI Lizhen. Technical features and engineering application of UHVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 5-6.

[4] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Current status and development prospect of HVDC transmission technology[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.

[5] 王永进, 樊艳芳, 李自乾. 基于改进方向电流法的特高压直流输电线路故障识别[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 76-81.
WANG Yongjin, FAN Yanfang, LI Ziqian. Fault identification of UHVDC transmission lines based on improved directional current method[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 76-81.

[6] 付兆远. 基于小波变换的特高压直流线路保护研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
FU Zhaoyuan. Research on UHVDC line protection based on wavelet transform[D]. Jinan: Shandong University, 2011.

[7] 陈仕龙, 张杰, 毕贵红, 等. 基于小波分析的特高压直流输电线路双端电压暂态保护[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2719-2725.

- CHEN Shilong, ZHANG Jie, BI Guihong, et al. Current-voltage transient protection of UHVDC transmission lines based on wavelet analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2719-2725.
- [8] 李学鹏. 高压直流输电线路行波保护及其故障定位的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
LI Xuepeng. Research on traveling wave protection and fault location of HVDC transmission line[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [9] 王钢, 罗健斌, 李海锋, 等. 特高压直流输电线路暂态能量保护[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 28-31.
WANG Gang, LUO Jianbin, LI Haifeng, et al. Transient energy protection of UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 28-31.
- [10] 束洪春, 刘可真, 朱盛强, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 108-117.
SHU Hongchun, LIU Kezhen, ZHU Shengqiang, et al. Single-ended electrical quantity transient protection of ± 800 kV UHVDC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 108-117.
- [11] 陈仕龙, 李建平, 谢佳伟, 等. 利用模量传输时间差的特高压直流线路故障测距[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8): 20-24.
CHEN Shilong, LI Jianping, XIE Jiawei, et al. Fault location of UHVDC lines using modulus transmission time difference[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(8): 20-24.
- [12] 高效海, 苏晓龙. 一种新的单端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 87-91.
GAO Xiaohai, SU Xiaolong. A new method for single-ended traveling wave fault location[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 87-91.
- [13] 刘可真. 特高压直流输电线路暂态保护和故障测距问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LIU Kezhen. Research on transient protection and fault location of UHVDC transmission lines[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [14] 高本锋, 张学伟, 刘辛晔, 等. 高压直流输电保护定值整定流程的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 400-407.
GAO Benfeng, ZHANG Xuewei, LIU Xinye, et al. Research on setting process of HVDC transmission protection setting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 400-407.
- [15] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [16] BO Z Q, WELLER G, JIANG F, et al. Application of GPS based fault location scheme for distribution system[C] // 1998 International Conference on Power System Technology Proceedings, August 18-21, 1998, Beijing, China: 53-57.
- [17] 罗仕乾. 雷电波的频谱及能量分布[J]. 高电压技术, 1995, 21(1): 85-86.
LUO Shiqian. Spectrum and energy distribution of lightning waves[J]. High Voltage Technology, 1995, 21(1): 85-86.
- [18] 杨亚宇, 邵能灵, 刘剑, 等. 利用边界能量的高压直流线路纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5757-5767.
YANG Yayu, TAI Ningling, LIU Jian, et al. Longitudinal protection scheme for high voltage DC lines using boundary energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5757-5767.
- [19] 许小雪, 刘建锋, 江玉蓉. 基于多频带能量的高压直流输电线路单端暂态电流保护[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 32-39.
XU Xiaoxue, LIU Jianfeng, JIANG Yurong. HVDC transmission line protection based on single-ended transient current using multiband energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 32-39.
- [20] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-80.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Fault location method for HVDC transmission line based on distributed parameter model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.
- [21] 郝勇奇, 王倩, 周士琼, 等. 基于LMD与Teager能量算子的VSC-HVDC输电线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 81-88.
HAO Yongqi, WANG Qian, ZHOU Shiqiong, et al. Fault location for VSC-HVDC transmission lines based on LMD and Teager energy operator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 81-88.

收稿日期: 2018-11-21; 修回日期: 2019-01-02

作者简介:

王永进(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特高压直流输电线路保护与测距; E-mail: 949380203@qq.com

樊艳芳(1971—), 女, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源并网技术及电力系统保护与控制研究; E-mail: 410849062@qq.com

李自乾(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特高压直流输电线路保护与测距。E-mail: 1142217665@qq.com

(编辑 葛艳娜)