

DOI: 10.7667/PSPC171303

基于信号复杂度衰减的特高压直流输电线路 雷电暂态识别方法

齐国强¹, 王增平¹, 袁愉涛², 应鸿³, 蓝益军⁴

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007;
3. 浙江华云清洁能源有限公司, 浙江 杭州 310008; 4. 国网浙江省电力有限公司检修分公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 特高压直流输电线路雷击引起的暂态信号高频分量是行波保护和暂态保护误动的主要因素之一。发生线路雷击故障和普通接地短路故障时, 电压信号的幅值因故障电流入地通道的存在快速衰减, 信号复杂度低。雷击未故障时, 不存在故障电流入地通道, 信号衰减慢, 复杂度高。基于小波变换分析电压信号频率分量的衰减, 采用突变时刻前、后两个数据窗内小波奇异熵的比值表征信号复杂度的变化。再结合电压信号高频分量的含量分析, 实现雷电暂态信号的识别, 并通过能量相对熵实现故障极的选择。在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型, 结果表明, 该方案能很好地进行暂态信号的识别, 受故障距离、过渡电阻等因素的影响小。

关键词: 特高压直流输电; 雷电干扰; 信号复杂度; 小波奇异熵

Transient identification method of lightning strokes based on the attenuation of signal complexity for UHVDC transmission lines

QI Guoqiang¹, WANG Zengping¹, QIU Yutao², YING Hong³, LAN Yijun⁴

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Hangzhou 310007, China; 3. Zhejiang Huayun Clean Energy Company Limited, Hangzhou 310008, China; 4. Maintenance Company of State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Hangzhou 310007, China)

Abstract: The high-frequency component caused by lightning strokes on UHVDC transmission lines is the main factor of the mis-operation of travelling wave protection and transient protection. Due to the existence of fault current pathway to the earth, when lightning strokes failures and the common earth faults occur on the transmission lines, the voltage amplitude of the signal attenuates quickly, thus with a low signal complexity. While lightning strokes occur without forming faults, there is no fault current pathway to the earth, the signal attenuates slower, thus with a high signal complexity. Based on the wavelet transform analysis of the attenuation of voltage signal, this paper shows the ratio of data-windows before and after the mutation moment to describe the change of signal complexity. With the combination of high-frequency component content analysis of the voltage signal, the identification of lightning transient signal is achieved, and the faulted line is selected by the energy relative entropy. Based on the model built on PSCAD/EMTDC, the results show that the scheme identifies the transient signals effectively with less influence by the fault distance and the transition resistance, etc.

This work is supported by National Key Research and Development of China (No. 2016YFB0900604) and State Grid Zhejiang Corp Science and Technology Project (No. 5211MR160006).

Key words: UHVDC power transmission; lightning disturbance; complexity of signal; wavelet singular entropy

0 引言

特高压直流(UHVDC)输电线路长, 通常要跨越

恶劣的地理环境, 因此输电线路更容易发生雷击故障。输电线路遭受雷击时, 雷电流通常是负极性的, 以行波的形式从雷击点向线路两端传播, 引起的暂态信号中含有大量高频分量。对于行波保护和暂态保护而言, 保护装置很可能捕捉到雷电行波, 从而造成保护误动作^[1-5]。因此, 必须能够正确对故障性

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900604);
国网浙江省电力有限公司科技项目(5211MR160006)

雷击、雷击干扰和普通短路故障信号进行有效识别。

国内外学者对雷电信号的识别进行了大量的研究。文献[6-8]主要分析了发生雷击时保护安装处电压、电流的暂态过程。文献[9]对雷电故障、雷电干扰和短路故障的暂态特性进行了分析,并结合雷击和故障时的时域和暂态能量特征进行识别,但保护整定较困难。文献[10]利用暂态量的线模和零模特征差异构成判据,但只能识别感应雷击和短路故障,有局限性。文献[11]分析了暂态信号的附加电流分量特征,采用基波电流相量变化率识别雷击干扰。文献[12]对暂态电流波形进行积分运算,但交流母线结构会影响识别结果。文献[13]基于暂态信号的波性特征,提出短时窗电压均值的雷击干扰识别算法,可靠性较高。

本文在分析雷击故障、雷电干扰和普通接地短路故障信号暂态特性的基础上,通过小波变换分析了 3 ms 内不同暂态信号频率分量的衰减程度。暂态信号的复杂程度用小波奇异熵刻画,采用突变时刻前、后两个数据窗内小波奇异熵的比值表征信号复杂度的变化,可实现故障和雷电干扰信号的识别,进一步结合电压信号小波变换高频分量的含量分析,实现普通短路故障和雷电故障的识别。在识别出暂态信号的基础上,通过能量相对熵进行故障极的选择。基于 PSCAD/EMTDC 搭建了特高压直流输电仿真模型,分析结果表明,本方案在不同雷电流水平、故障距离和过渡电阻情况下,均能对暂态信号有效识别。

1 小波变换奇异熵介绍

小波奇异熵是基于奇异值分解理论,将信号经小波变换后的系数矩阵分解为一系列能反映原系数矩阵基本特征的奇异值,再利用信息熵的统计特性对奇异值集合进行不确定度分析,从而对原始信号的复杂程度给出一个确定的量度^[14]。

奇异值分解(SVD)理论中,任何 $m \times n$ 阶矩阵 A 的奇异值分解可表示为

$$A = U \Lambda V^T \quad (1)$$

式中: U 和 V 分别是 $m \times n$ 阶矩阵和 $n \times n$ 阶正交矩阵; $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_p)$ 是对角矩阵,其对角元素为矩阵 A 的奇异值^[15]。

将这 p 个奇异值归一化处理为

$$q_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^p \lambda_i \quad (2)$$

定义 p 阶小波奇异熵为

$$w = \frac{-\sum_{i=1}^p q_i \ln q_i}{\ln p} \quad (3)$$

由以上分析可知,小波奇异熵是小波变换、奇异值分解和信息熵的有机结合,能对具有不同时频分布特征的暂态信号进行定量区分。被分析信号越简单,熵值则越小;相反,信号越复杂,熵值则越大^[14]。因此,小波奇异熵可用于本文雷电暂态信号的复杂度分析。

2 雷电暂态特性及信号复杂度分析

雷电流多为负极性,根据同性相斥、异性相吸的原理,直流输电线路以雷击正极线路为主。雷击输电线路分为绕击和反击^[16],绕击是雷电流绕过避雷线击中导线,反击包括雷击杆塔顶部和雷击避雷线档距中央。

根据保护安装处测得的两极电压数据,采用 Karenbauer 相模变换进行电磁解耦,如式(4)。

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

取线模电压与正极轴线电压差的标么值进行暂态分析,即

$$u(t) = (u_{m1} - U_+) / U_+ = \frac{u_+(t) - u_-(t)}{2U_+} - 1 \quad (5)$$

式中: $u_+(t)$ 为正极电压; $u_-(t)$ 为负极电压; U_+ 为正极轴线电压,等于 800 kV。

2.1 雷击故障

直流输电线路发生雷击故障时,绝缘子闪络,形成故障电流入地通道,保护安装处的故障极电压出现电压幅值骤降。为节省篇幅,以绕击故障为例进行分析。绕击故障时正、负极电压波形如图 1。

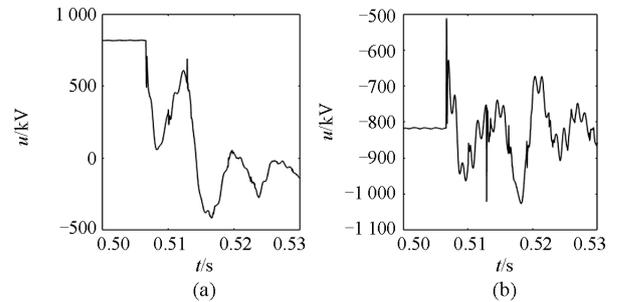


图 1 绕击故障时两极电压波形

Fig. 1 Voltage waveforms from two poles when shielding failure occurred with forming fault

绝缘子闪络后,发展为短路故障,高频能量快速衰减。由于雷电干扰通常持续 3 ms 左右^[17],因此按式(5)计算的暂态电压,在雷击发生后以每 1 ms

的数据窗进行小波分解求出频率含量, 分析高频信号的衰减程度, 取部分结果如表 1 所示。

表 1 绕击故障时频率含量

Table 1 Frequency components when shielding failure occurred with forming fault

频率/kHz	第 1 ms	第 2 ms	第 3 ms
5~10	0.123 6	0.000 0	0.000 0
2.5~5	0.078 2	0.000 1	0.000 0
1.25~2.5	0.011 0	0.001 4	0.000 6

由表 1 可以看出, 在雷击故障情况下, 行波刚到达整流侧保护安装处时, 由于大量高频信号的存在, 信号复杂度发生突变, 此后由于存在故障电流入地通路, 保护安装处检测到的高频电压信号在突变时刻之后快速衰减, 如图 2 所示。因此暂态信号在突变时刻前、后两个数据窗内复杂度的变化较大。

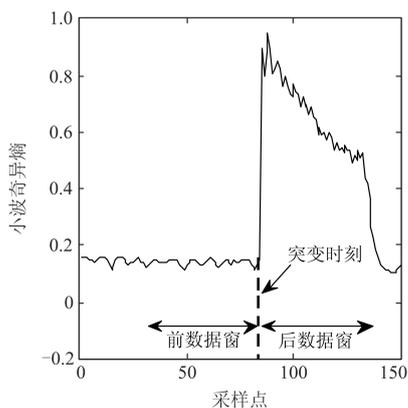


图 2 绕击故障时的信号复杂度

Fig. 2 Signal's complexity when shielding failure occurred with forming fault

2.2 普通接地故障

直流输电线路发生普通接地短路故障时, 由于存在故障电流入地通道, 保护安装处测量的暂态电压波形特征与雷击故障时类似, 如图 3 所示。

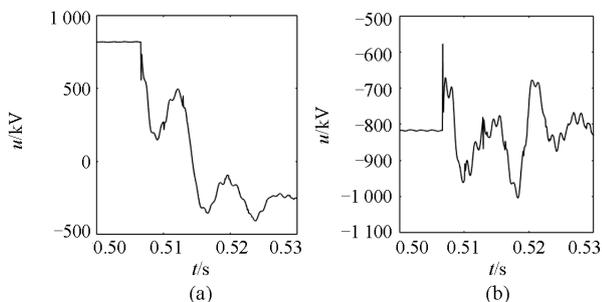


图 3 短路故障时两极电压波形

Fig. 3 Voltage waveforms from two poles when short circuit fault occurred

按式(5)计算的暂态电压, 在雷击发生后以每 1 ms 的数据窗, 进行小波分解求出频率含量, 分析高频信号的衰减程度, 取部分结果见表 2。

表 2 短路故障时频率含量

Table 2 Frequency components when short circuit fault occurred

频率/kHz	第 1 ms	第 2 ms	第 3 ms
5~10	0.148 0	0.000 0	0.000 0
2.5~5	0.013 6	0.000 1	0.000 0
1.25~2.5	0.008 9	0.001 0	0.000 5

结合图 3 和表 2 可以看出, 发生普通接地短路故障的情况下, 由于存在故障电流入地通路, 保护安装处检测到的高频电压信号在突变时刻之后的衰减较快, 暂态信号在突变时刻前、后两个数据窗内的复杂度变化较大, 与发生雷击故障时类似, 信号复杂度如图 4 所示。

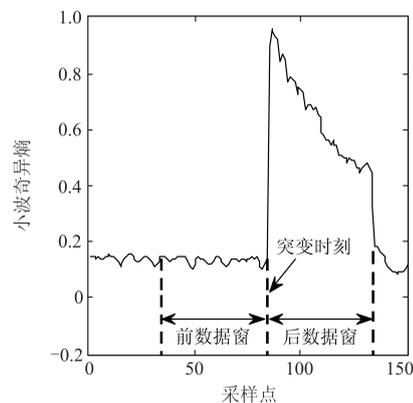


图 4 短路故障时的信号复杂度

Fig. 4 Signal's complexity when short circuit fault occurred

2.3 绕击未故障

直流线路发生绕击未故障时, 在雷击点处叠加了一个电流源, 但是由于未引起线路故障, 因此没有形成故障电流入地通道。整流侧保护安装处检测到的正、负两极电压波形如图 5 所示。

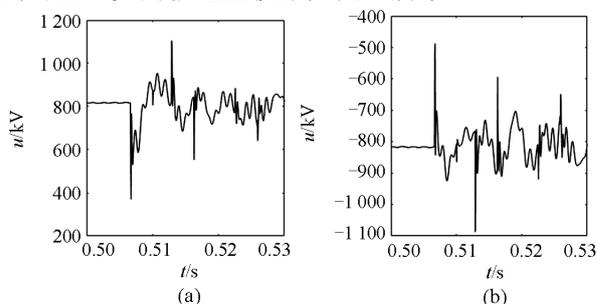


图 5 绕击未故障时两极电压波形

Fig. 5 Voltage waveforms from two poles when shielding failure occurred without forming fault

按式(5)计算的暂态电压,在雷击发生后以每1 ms的数据窗进行小波分解求出频率含量,分析高频信号的衰减程度,取部分结果见表3。

表3 绕击未故障时频率含量

Table 3 Frequency components when shielding failure occurred without forming fault

频率/kHz	第1 ms	第2 ms	第3 ms
5~10	0.625 9	0.000 2	0.000 0
2.5~5	0.114 8	0.004 1	0.000 3
1.25~2.5	0.061 3	0.073 1	0.002 5

结合图5和表3可以看出,绕击未故障情况下,行波刚到达整流侧保护安装处时,由于大量高频信号的存在,信号复杂度发生突变,此后由于不存在故障电流入地通路,保护安装处检测到的高频暂态电压信号在突变时刻之后的衰减较慢,如图6所示。暂态信号在突变时刻前、后两个数据窗内的信号复杂度变化程度最大。

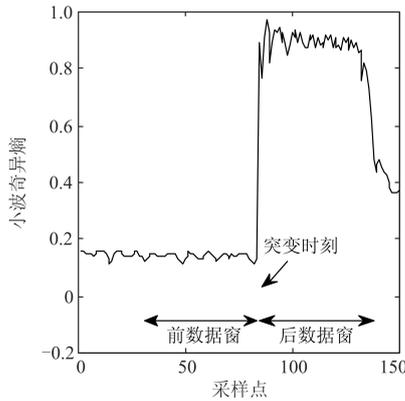


图6 绕击未故障时的信号复杂度

Fig. 6 Signal's complexity when shielding failure occurred without forming fault

2.4 反击未故障

直流线路发生反击未故障时,在雷击点处叠加了一个电流源,但是由于未引起线路故障,因此没有形成故障电流入地通道。整流侧保护安装处检测的正、负两极电压波形如图7所示。

从图7中可看出,反击干扰时,两极电压围绕各自极电压轴线上交替变化,包含大量的暂态分量。反击干扰在两极线路上呈现出相似的暂态电压波动。按式(5)计算的暂态电压,在雷击发生后以每1 ms的数据窗,进行小波分解求出频率含量,分析高频信号的衰减程度,取部分结果如表4。

结合图7和表4可以看出,由于反击干扰在两极线路上呈现出相似的电压变化,根据式(5)计算出的暂态电压幅值很小,高频分量被抵消,在行波到

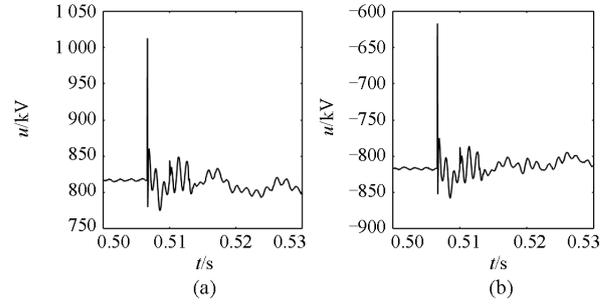


图7 反击未故障时两极电压波形

Fig. 7 Voltage waveforms from two poles when back striking occurred without forming fault

表4 反击未故障时频率含量

Table 4 Frequency components when back striking occurred without forming fault

频率/kHz	第1 ms	第2 ms	第3 ms
5~10	3.874e-4	1.794e-4	1.835e-4
2.5~5	3.071e-4	8.508e-5	1.116e-4
1.25~2.5	7.160e-5	5.382e-5	2.295e-4

达保护安装处时,不会产生类似图6的信号复杂度的突变。并且由于不存在故障电流入地通路,在反击干扰持续的时间内,暂态信号在突变时刻前、后两个数据窗内的信号复杂度基本不发生变化,变化程度最小,如图8所示。

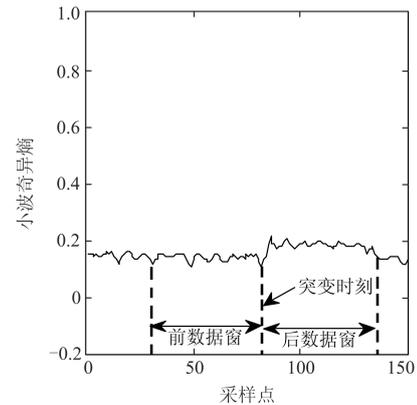


图8 反击未故障时的信号复杂度

Fig. 8 Signal's complexity when back striking occurred without forming fault

3 识别方案

3.1 雷电暂态信号识别

根据以上分析,用小波奇异熵刻画暂态信号的复杂度,结合不同故障类型下暂态信号在突变时刻前、后两个数据窗内复杂度变化程度的差异,可构成保护判据,实现特高压直流输电线路绕击未故障、反击未故障和故障信号的识别。

本文设置采样频率为 20 kHz, 选用 db4 小波, 移动窗参数 $\alpha = 50$, 步长 $\delta = 1$, 在尺度 3 下计算系统各区间的小波奇异熵值。

取

$$k = \sum_i^{i+50} w_i / \sum_j^{j+50} w_j \quad (6)$$

式中, $\sum_j^{j+50} w_j$ 和 $\sum_i^{i+50} w_i$ 分别为检测到行波信号时刻前、后一个数据窗内的小波奇异熵之和。显然按式(6)计算的 k 值可以表明暂态信号在突变时刻前、后两个数据窗内复杂度的变化程度。

在检测到突变时刻之前, 本文选取的暂态信号 $u(t)$ 不含故障分量, 因此前数据窗内的信号复杂度值较低, 如图 6 所示在 0.15 附近; 绕击干扰信号到达保护安装处时, 信号复杂度突变至 1 附近, 而后由于不存在故障电流对地通道, 复杂度衰减很慢, 维持在 1 左右一段时间, 因此后数据窗内的信号复杂度值较高, 故绕击干扰信号按式(6)计算的 k 值较大。而反击干扰时根据式(5)计算出的暂态电压 $u(t)$ 高频分量被抵消, 不产生类似图 6 的复杂度突变, 因此, 后数据窗内的信号复杂度值也较低, 故反击干扰信号按式(6)计算的 k 值较低。

则雷电识别判据可设定为如式(7)、式(8)所示。

$$k > k_{set1} \quad (7)$$

$$k < k_{set2} \quad (8)$$

当满足判据(7)时, 识别为绕击干扰信号; 满足判据(8)时, 识别为反击干扰信号; 否则, 识别为故障信号。根据以上分析, 可整定 k_{set1} 为 5, k_{set2} 为 2。

在 2.3 和 2.4 分析的基础上, 根据暂态信号高频含量的差异特征, 取暂态信号在高频段 d1~d3 尺度所含能量的百分比差异, 可进一步识别出雷击故障和普通短路故障。但是由于所求能量的百分比数值较小, 为使整定值差异更容易刻画, 本文取 d1~d3 尺度能量百分比的倒数, 构成的识别判据如式(9)。

$$\eta > k_{E_set} \quad (9)$$

式中, η 为暂态信号 d1~d3 尺度所含能量百分比的倒数。当满足判据(9)时, 识别为普通短路故障信号; 否则, 识别为雷击故障信号。对多种故障情况下的暂态信号进行仿真分析, 本文取 k_{E_set} 为 100。

3.2 故障极识别

根据以上对故障暂态信号的分析可以看出, 发生故障时, 故障极电压波形波动较大并最终远离轴线电压; 非故障极电压发生较小波动并最终稳定在轴线电压上。因此, 发生故障后, 故障极和非故障极电压相对其各自轴线电压的差异程度不同。

能量相对熵可以表征两信号能谱概率分布的差异情况。相对熵值越大, 则两信号之间的能谱分别差异越大; 反之, 两信号之间的能谱分布差异就越小。

正极电压 $u_+(t)$ 和正极轴线电压 U_+ 的能量相对熵表示为 M_+ , 负极电压 $u_-(t)$ 和负极轴线电压 U_- 的能量相对熵表示为 M_- 。定义故障后正、负极能量相对熵的比值为

$$\gamma = \frac{M_+}{M_-} \quad (10)$$

据此构成故障极识别判据, 如式(11)所示。

$$\gamma > \gamma_{set} \quad (11)$$

由以上分析显然可知, 当发生正极线路故障时, 正极电压 $u_+(t)$ 和正极轴线电压 U_+ 的能量相对熵 M_+ 较大, 负极电压 $u_-(t)$ 和负极轴线电压 U_- 的能量相对熵 M_- 较小, 即发生正极线路故障时 M_+ 大于 M_- ; 而发生负极线路故障时, M_- 较大, M_+ 较小, 此时 M_+ 小于 M_- 。因此本文可整定 γ_{set} 值为 1。当满足式(11)时, 识别为正极线路故障, 反之识别为负极线路故障。

本文所提的 UHVDC 线路雷电暂态信号识别方案流程图如图 9 所示。

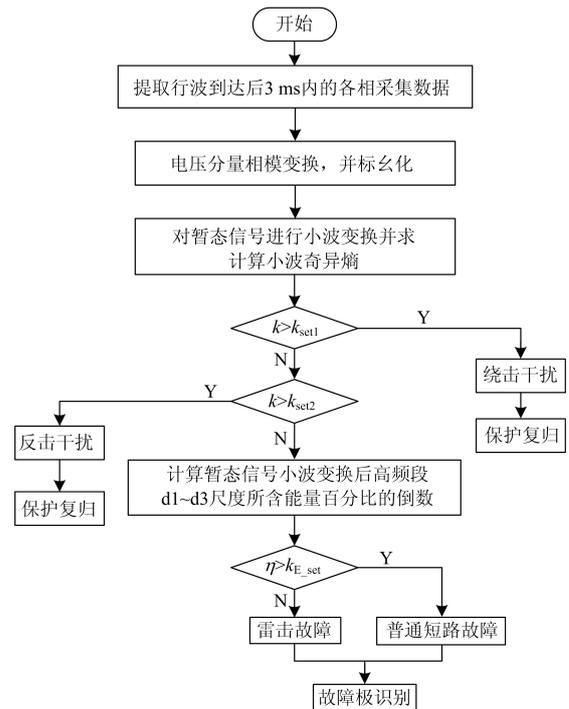


图 9 雷电暂态识别原理框图

Fig. 9 Block diagram for the transient identification of lightning strokes

4 仿真验证及可行性分析

4.1 仿真模型建立

为验证本文所提雷电暂态识别方案的有效性, 仿真模型采用云广±800 kV 特高压直流输电系统的参数, 每极两组 12 脉动换流器。在 PSCAD/EMTDC 中搭建的仿真模型如图 10 所示, 对多种故障和干扰情况进行了仿真分析。

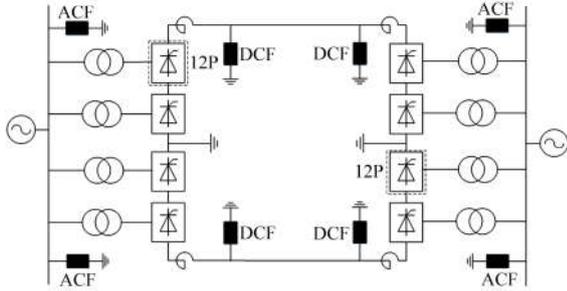


图 10 ±800 kV 特高压直流输电系统仿真模型

Fig. 10 Simulation model of ±800 kV UHVDC system

4.2 绕击故障仿真

直流输电线路发生正极雷电绕击故障时, 按本文所提方案, 仿真计算结果如表 5。

表 5 绕击故障仿真结果

Table 5 Simulation result when shielding failure occurred with forming fault

雷电流幅值/kA	故障距离/km	k	η	故障极
50	300	3.926	88.496	正极
	500	3.552	69.444	正极
	1 000	4.015	64.516	正极
100	300	4.090	63.694	正极
	500	3.627	57.804	正极
	1 000	4.056	56.818	正极
150	300	4.157	50	正极
	500	3.771	44.843	正极
	1 000	4.084	43.860	正极

由表 5 可以看出, 发生绕击故障时, 保护方案在不同的故障距离和雷电流水平下, 计算得到的 k 和 η 均满足保护判据, 可将暂态信号识别为绕击故障信号, 并可进行故障极的正确选择。

4.3 反击故障仿真

直流输电线路发生正极雷电反击故障时, 按本文所提方案, 仿真计算结果见表 6。

由表 6 可以看出, 发生反击故障时, 保护方案在不同的故障距离和雷电流水平下, 计算得到的 k 和 η 均满足保护判据, 可将暂态信号识别为反击故障信号, 并可进行故障极的正确选择。

表 6 反击故障仿真结果

Table 6 Simulation result when back striking occurred with forming fault

雷电流幅值/kA	故障距离/km	k	η	故障极
200	300	4.187	43.668	正极
	500	3.854	37.037	正极
	1 000	4.139	33.898	正极
250	300	4.209	38.911	正极
	500	3.856	32.895	正极
	1 000	4.245	25	正极
300	300	4.224	36.496	正极
	500	3.847	28.902	正极
	1 000	4.269	20.877	正极

4.4 普通短路故障仿真

直流输电线路发生正极线路普通接地短路故障时, 按本文所提方案, 仿真计算结果见表 7。

表 7 短路故障仿真结果

Table 7 Simulation result when short circuit fault occurred

过渡电阻/ Ω	故障距离/km	k	η	故障极
0	300	3.068	333.333	正极
	500	3.692	232.558	正极
	1 000	3.927	227.273	正极
50	300	3.002	250	正极
	500	3.821	243.902	正极
	1 000	3.926	185.185	正极
100	300	2.983	243.902	正极
	500	3.855	243.902	正极
	1 000	3.962	149.254	正极

由表 7 可以看出, 发生普通接地短路故障时, 在不同的故障距离和接地电阻情况下, 计算得到的 k 和 η 均满足保护判据, 可将暂态信号识别为短路故障信号, 并可进行故障极的正确选择。

4.5 绕击未故障仿真

直流输电线路发生绕击未故障时, 按本文所提方案, 仿真计算结果见表 8。

由表 8 可以看出, 发生绕击未故障时, 保护方案在不同的故障距离和雷电流水平下, 计算得到的

表 8 绕击未故障仿真结果

Table 8 Simulation result when shielding failure occurred without forming fault

故障距离/km	雷电流幅值/kA		
	10	20	30
	k	k	k
300	5.939	5.921	5.668
500	5.504	5.343	5.247
800	5.463	5.441	5.252
1 000	5.988	5.947	5.640

k 较大, 均满足保护判据, 可将暂态信号识别为绕击未故障信号。

4.6 反击未故障仿真

直流输电线路发生绕击故障时, 按本文所提方案, 仿真计算结果见表 9。

表 9 反击未故障仿真结果

Table 9 Simulation result when back striking occurred without forming fault

故障距离/km	雷电流幅值/kA		
	50	100	140
	k	k	k
300	0.994	0.990	1.124
500	0.991	1.127	1.224
800	0.977	0.994	1.115
1 000	0.976	0.970	0.964

由表 9 可以看出, 发生反击未故障时, 保护方案在不同的故障距离和雷电流水平下, 计算得到的 k 接近 1, 满足保护判据, 可将暂态信号识别为反击未故障信号。

4.7 实际特高压直流工程的可行性分析

本文的仿真模型采用云广 ± 800 kV 特高压直流输电工程的实际运行参数, 额定功率为 5 000 MW, 额定电压为 ± 800 kV, 直流额定电流为 3 125 A。在 PSCAD/EMTDC 中搭建的仿真模型包括控制系统、雷电流模型、杆塔模型、绝缘子闪络模型等。对所建立的仿真模型, 以整流侧为例分析模型的仿真准确性, 整流侧的直流电压、电流波形如图 11 所示。

由图 11 可知, 直流电压、电流的稳定运行值分别约为 800 kV 和 3 125 A。本文建立的仿真模型得到的电压电流值与实际特高压直流工程的运行参数基本一致, 因此可以仿真模拟实际特高压直流工程的多种运行工况, 具有较高的准确度。结合以上 4.2—4.6 节的仿真验证, 本文所提出的方案对实际特高压直流工程具有很好的适用性, 可以进行暂态信号的准确识别。

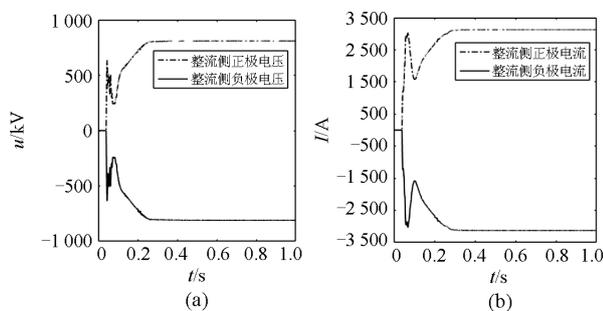


图 11 整流侧的直流电压、电流波形

Fig. 11 Voltage and current waveforms at the rectifier side

5 结论

本文在分析故障暂态信号频率衰减的基础上, 提出了基于信号复杂度衰减的识别方法。通过暂态信号突变时刻前、后两个数据窗内小波奇异熵的比值将绕击干扰、反击干扰与故障信号区分; 再结合小波变换高频能量含量计算, 进一步识别普通接地故障和雷击故障。整个暂态信号识别过程仿真计算方便, 整定简单, 仅利用 3 ms 的数据窗, 保护动作速度快。经过大量仿真结果表明, 本方案受故障位置、过渡电阻、雷电流水平等因素的影响小, 具有较好的适应性。

参考文献

- [1] 张保会, 郝治国, BO Zhiqian. 智能电网继电保护研究的进展(一): 故障甄别新原理[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 1-6.
ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. Development of relay protection for smart grid (1): new principles of fault distinction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 1-6.
- [2] 裴岳, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 149-154.
- [3] 高艳丰, 黄晓胤, 闫红艳, 等. 输电线路雷击故障的综合识别研究[J]. 广东电力, 2016, 29(3): 93-98.
GAO Yanfeng, HUANG Xiaoyin, YAN Hongyan, et al. Study on synthetic identification of lightning fault of power transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(3): 93-98.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 李书勇, 郭琦, 崔柳, 等. 特高压直流输电线路雷击暂态过程与行波保护响应特性分析[J]. 电网技术, 2015,

- 39(10): 2830-2835.
- LI Shuyong, GUO Qi, CUI Liu, et al. Thunderstruck transient process of UHVDC transmission line and response characteristic of traveling wave protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2830-2835.
- [7] 胡振华, 李海锋, 武霁阳. ± 500 kV 同塔双回直流线路雷击暂态特性及行波保护响应[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 85-90.
- HU Zhenhua, LI Haifeng, WU Jiyang. Lightning transient characteristic and travelling wave protection response of ± 500 kV double circuit DC lines on the same tower[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 85-90.
- [8] 束洪春, 张斌, 张广斌, 等. 基于可拓融合的 ± 800 kV 直流输电线路雷击干扰识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 102-111.
- SHU Hongchun, ZHANG Bin, ZHANG Guangbin, et al. Identification of lightning disturbance in UHVDC transmission lines using extension theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 102-111.
- [9] 刘可真, 束洪春, 于继来, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路雷击暂态识别[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3007-3014.
- LIU Kezhen, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Transient identification of lightning strokes on ± 800 kV UHVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3007-3014.
- [10] 李海锋, 王钢, 赵建仓. 输电线路感应雷击暂态特征分析及其识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 114-119.
- LI Haifeng, WANG Gang, ZHAO Jiancang. Study on characteristics and identification of transients on transmission lines caused by indirect lightning stroke[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 114-119.
- [11] 刘兴茂, 林圣, 李小鹏, 等. 利用基波电流相量变化率识别行波保护中雷击干扰[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 55-61.
- LIU Xingmao, LIN Sheng, LI Xiaopeng, et al. Apply fundamental current phasor change rate to identify lightning disturbance to travelling wave protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 55-61.
- [12] 邹贵彬, 高厚磊, 朱峰, 等. 输电线路雷击与故障的积分识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 43-48.
- ZOU Guibin, GAO Houlei, ZHU Feng, et al. Integral identification method of lightning stroke and fault for transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 43-48.
- [13] 束洪春, 张斌, 张广斌, 等. ± 800 kV 直流输电线路雷击干扰短时窗电压均值识别方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2180-2186.
- SHU Hongchun, ZHANG Bin, ZHANG Guangbin, et al. Identification of lightning disturbance in UHVDC transmission lines using average voltage based on short window data[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2180-2186.
- [14] 何正友, 符玲, 麦瑞坤, 等. 小波奇异熵及其在高压输电线路故障选相中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 31-36.
- HE Zhengyou, FU Ling, MAI Ruikun, et al. Study on wavelet singular entropy and its application to faulty phase selection in HV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 31-36.
- [15] 乔记阳, 蒋大海, 胡欢, 等. 基于奇异值分解的直流输电电压缓冲装置 DCBM10A 缓冲时间的测试方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 151-154.
- QIAO Jiyang, JIANG Dahai, HU Huan, et al. Testing method of buffer time to the voltage buffer device DCBM10A based on singular value decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 151-154.
- [16] GATTA F M, GERI A, LAURIA S. Back flashover simulation of HV transmission lines with concentrated tower ground[J]. Electric Power System Research, 2005, 73(3): 373-381.
- [17] 邢鲁华, 陈青, 高湛军. 基于电压和电流突变方向的高压直流输电线路保护原理[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 107-113.
- XING Luhua, CHEN Qing, GAO Zhanjun. A new protection principle for HVDC transmission lines based on directions of fault components of voltage and current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 107-113.

收稿日期: 2017-08-31; 修回日期: 2018-03-19

作者简介:

齐国强(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电的保护与控制; E-mail: 985299720@qq.com

王增平(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统自动化、继电保护等方面的研究。

(编辑 葛艳娜)