

基于能量分布的特高压直流输电线路雷电暂态识别方法

黄然¹, 束洪春², 龚振², 王辉春³, 于宗俊³

(1. 云南电网电力研究院, 云南 昆明 650217; 2. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051;

3. 云南电网有限责任公司普洱供电局, 云南 普洱 665000)

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。输电线路在雷击故障和普通过接地短路故障下, 因有故障电流入地通路, 保护安装处检测到的电压信号的幅值会快速衰减, 信号复杂度低; 在雷击未故障情况下, 不存在故障电流入地通路, 保护安装处检测到的电压信号的幅值衰减较慢, 信号复杂度高。研究基于多尺度小波变换分析了电压信号频率分量的衰减, 用小波能谱熵反映电流或电压频率空间的能量分布信息, 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 EMTP/PSCAD 中搭建了 ± 800 kV 直流输电模型, 仿真结果表明, 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; 能量分布信息; 小波能谱熵; EMTP/PSCAD

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2018.06.018

[中图分类号] TM773 [文献标识码] A [文章编号] 1000-3886(2018)06-0059-04

Lightening Transient Identification Method for Ultra High Voltage Direct Current Power Transmission Lines Based on Energy Distribution

Huang Ran¹, Shu Hongchun², Gong Zhen², Wang Huichun³, Yu Zongjun³

(1. Yunnan Power Grid Electric Power Research Institute, Kunming Yunnan 650217, China;

2. College of Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650051, China;

3. Pu'er Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Pu'er Yunnan 665000, China)

Abstract: Transient signal high-frequency component caused by lightning strokes on ultra high voltage direct current transmission lines is one of the main causes for the malfunction of travelling wave protection and transient protection. In the case of lightening stroke fault or normal grounding short circuit fault of the transmission line, as the fault current has a grounding passage, the voltage amplitude detected at the protection installation attenuates quickly and the signal complexity remains at a low level. If the lightening stroke does not cause any failure, there is no grounding passage for the fault current, the voltage amplitude detected at the protection installation will attenuate slowly, and the signal will have a high complexity. This paper analyzed the attenuation of the frequency component of the voltage signal on the basis of multi-scale wavelet transform. Energy distribution information of current or voltage frequency space was reflected by the wavelet energy entropy to realize identification of lightening transient signal, and faulty poles were selected through relative entropy of energy. A ± 800 kV DC power transmission model was set up in EMTP/PSCAD. Simulation results indicated that the proposed approach could make good identification of transient signal, under little influence of fault distance, transition resistance and other factors.

Keywords: ultra high voltage direct current power transmission; lightning disturbance; energy distribution information; wavelet energy entropy; EMTP/PSCAD

0 引言

由于特高压直流输电的输送容量大、输电距离远、输电线路长, 常需跨越恶劣的地理环境, 面对更为严酷的自然条件, 因此在特高压直流输电线路更容易发生雷击故障。当输电线路遭到雷击时, 通常会产生负极性的雷电流, 该雷电流以行波的形式从雷击点向线路两端传播, 这就导致暂态信号中存在着大量的高频分量。在行波保护以及暂态保护中, 保护装置可能由于捕捉到雷电行波, 造成了保护误动作, 从而危及输电线路、保护装置以及整个电力系统的安全运行稳定性。这就要求维护人员必须对故障性雷击、雷击干扰和普通短路故障信号能够进行正确有效的

识别^[1-4]。

在此之前, 国内外许多学者已经对雷电信号的识别进行了大量的研究。文献[5-7]主要分析了在发生非故障性以及故障性绕击时保护安装处电压、电流的暂态特性, 对雷击误动进行了优化。文献[8]对雷击故障和接地短路故障时的时域和暂态能量特征进行分析, 以此对两种故障进行识别, 并通过仿真验证其有效性, 但该方法保护整定较困难。文献[9]利用暂态量的线模和零模特征差异构成判据, 以此感应区分雷击和短路故障, 但该方法只能识别感应以上两种故障, 有其局限性。文献[10]分析了暂态信号的附加电流分量特征, 利用雷击故障起始时刻后基波电流的相量变化率对雷击干扰进行识别。文献[11]分别对线路扰动后时间轴上方和下方的暂态电流波形进行积分运算, 以此

定稿日期: 2018-01-12

识别雷击干扰和短路故障,但在此方法中交流母线的结构会对识别结果造成影响。文献[12]基于暂态信号的波性特征,提出一种计算速度快、抗噪能力强的短时窗电压均值雷击干扰识别算法,其可靠性较高。

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,利用小波变换对 3 ms 数据窗内暂态信号的衰减程度进行分析,总结出不同暂态信号在各频带上暂态能量的分布特征,并在此基础上分别提出了不同的识别方法。同时,本文还利用小波能谱熵来反映电流或电压频率空间的能量分布信息,实现对故障和雷电干扰信号的识别,进一步实现识别和区分普通短路故障和雷电故障。并在识别出暂态信号的基础上,采用能量相对熵对故障极进行了选择。基于 EMT/PSCAD 搭建了特高压直流输电仿真模型,大量仿真结果表明,本方案适用于不同的雷电流水平、故障距离和过渡电阻情况。

1 小波变换能谱熵的介绍

把量测端测得的电压信号经过小波变换后,设 $E = E_1, E_2, \dots, E_m$ 为信号 $x(t)$ 在 m 个尺度上的小波能谱,则在尺度域上 E 可以形成对信号能量的一种划分。在此作一个拓展,由正交小波变换的特性可知,在某一时间窗内(窗宽 $\omega \in N$) 信号总功率 E 等于各分量功率 E_j 之和,其中 $E_j = \sum_k |D_j(k)|^2$ 。设 $p_j = \frac{E_j}{E}$, 则 $\sum_j p_j = 1$, 于是定义相应的小波能谱熵为:

$$W_{EE} = - \sum_j p_j \ln p_j \quad (1)$$

随着窗的滑动,可以得到小波能谱熵随时间的变化规律。式(1)的定义中,尺度空间与频率空间具有一定的对应关系。对于电力系统采集的电流、电压暂态信号,式(1)定义的小波能谱熵能反映电流或电压频率空间的能量分布信息。因为小波函数在频域与时域上均不具有脉冲性质,而是具有一定的支撑空间,因此在尺度空间上对电流或者电压能量的划分,同时反映了电流或者电压在时域与频域上的能量分布特征。

2 雷电暂态特性及信号能谱熵分析

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,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:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

取线模电压与正极轴线电压差的标幺值进行暂态分析,即:

$$u(t) = (u_{m1} - U_+) / U_+ = \frac{u_+(t) - u_-(t)}{2U_+} - 1 \quad (3)$$

式中: u_{m1} 为线模电压; $u_+(t)$ 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 雷击未故障暂态特性分析

2.1.1 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。距离整流侧保护安装处 500 km 发生绕击未故障时,正、负两极电压波形如图 1 示。

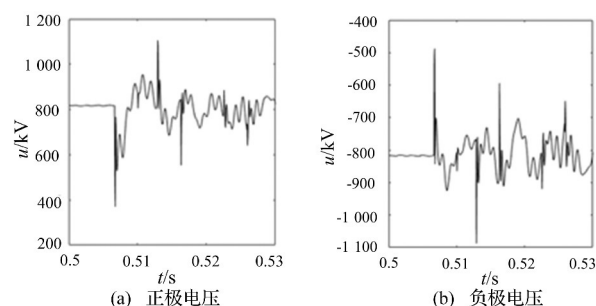


图 1 绕击未故障时两极电压波形

从图 1 可看出,绕击干扰时,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。由于电磁耦合的作用,两极直流线路中暂态电压波动呈现出相反极性。

由式(3)计算的暂态电压,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,其中小波分解采用的分解层数为 7,选择小波基为 db4。

结合表 1 可以看出,绕击未故障情况下,由于不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的衰减较慢。行波刚到达整流侧保护安装处时,高频分量的能量熵较大,低频部分较小。

表 1 绕击未故障时小波能谱熵

频率/kHz	1.60 ~ 3.21	0.80 ~ 1.61	0.40 ~ 0.80	0.20 ~ 0.40	0.10 ~ 0.20
能谱熵	1.59×10^{-17}	2.15×10^{-16}	1.13×10^{-17}	1.85×10^{-17}	6.62×10^{-18}

2.1.2 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。距离整流侧保护安装处 500 km 发生反击未故障时,正、负两极电压波形如图 2 示。

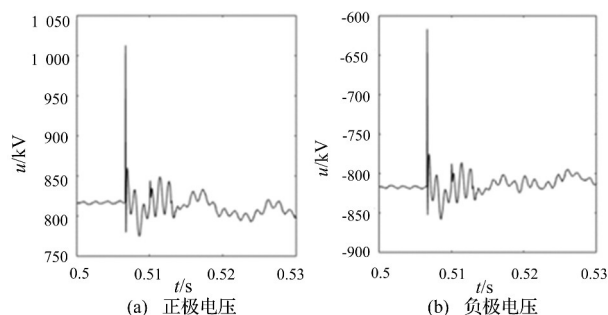


图 2 反击未故障时两极电压波形

从图 2 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。

由以上方法求得的小波能谱熵如表 2 所示。

结合图 2 和表 2 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(3)计算出的暂态电压幅值很小,高频分量被抵消,在反击干扰持续的时间内,暂态信号的复杂度变化不大。

表2 反击未故障时小波能谱熵

频率/kHz	1.60 ~ 3.21	0.80 ~ 1.61	0.40 ~ 0.80	0.20 ~ 0.40	0.10 ~ 0.20
能谱熵	6.98×10^{-18}	9.45×10^{-17}	4.96×10^{-18}	8.14×10^{-18}	2.91×10^{-18}

2.2 雷击故障暂态特性分析

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。图3为绕击故障时两极电压波形。

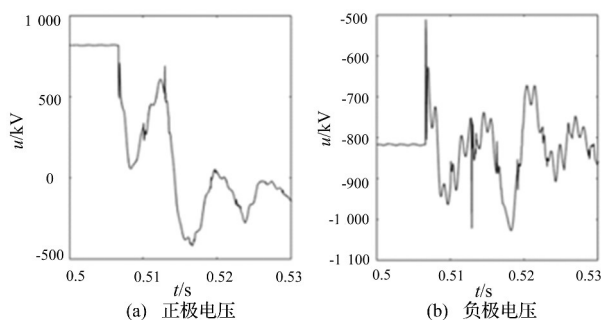


图3 绕击故障时两极电压波形

绝缘子闪络后,发展为短路故障,高频能量快速衰减。对式(3)计算的暂态电压,进行小波分解,求出频率含量,分析高频信号能量衰减程度,所得能谱熵如表3所示。

表3 绕击故障时小波能谱熵

频率/kHz	1.60 ~ 3.21	0.80 ~ 1.61	0.40 ~ 0.80	0.20 ~ 0.40	0.10 ~ 0.20
能谱熵	5.42×10^{-35}	4.70×10^{-34}	1.27×10^{-33}	1.02×10^{-33}	8.20×10^{-34}

由表3可以看出,在雷击故障情况下,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衰减较快。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,此后信号衰减加快。因此暂态信号中低频信号比高频信号能量所占成分更多。

2.3 普通接地故障暂态特性分析

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4所示。

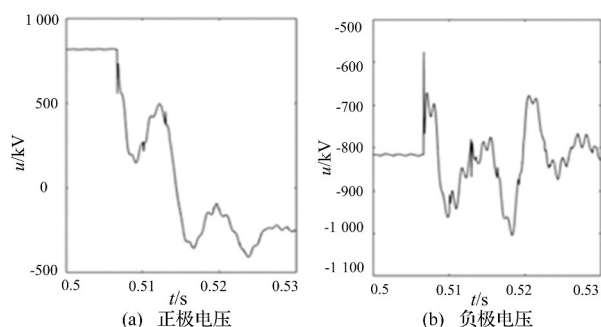


图4 短路故障时两极电压波形

对式(3)计算的暂态电压,在雷击发生后的小波能谱熵如表4所示,分析高频信号的能量占比。

表4 短路故障时小波能谱熵

频率/kHz	1.60 ~ 3.21	0.80 ~ 1.61	0.40 ~ 0.80	0.20 ~ 0.40	0.10 ~ 0.20
能谱熵	1.66×10^{-17}	2.24×10^{-16}	1.18×10^{-17}	1.93×10^{-17}	6.91×10^{-18}

结合图4和表4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的衰减较快,暂态信号中高频分量较少,中低频分量较多,与发生雷击故障时类似。

3 识别方案

根据以上分析,结合不同暂态信号小波能谱熵的差异构成保护判据,可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 $w=50$,步长 $\delta=1$,在尺度7下计算系统各区间的小波能谱熵。

设1.60 ~ 3.21 kHz、0.80 ~ 1.61 kHz、0.40 ~ 0.80 kHz、0.20 ~ 0.40 kHz、0.10 ~ 0.20 kHz 分别为WEE1、WEE2、WEE3、WEE4、WEE5,取

$$k = \frac{WEE1 + WEE2 + WEE3}{WEE4 + WEE5} \quad (4)$$

则雷电识别判据如式(5)、式(6)所示:

$$k_{set2} > k > k_{set1} \quad (5)$$

$$k < k_{set1} \quad (6)$$

当满足式(5)时,识别为雷击干扰信号;满足式(6)时,识别为雷击故障;否则,识别为短路故障信号。根据大量仿真分析结果并考虑一定的裕度,本文中 k_{set1} 取为1, k_{set2} 取为3.5。

本文所提的UHVDC线路雷电暂态信号识别方案流程图如图5所示。

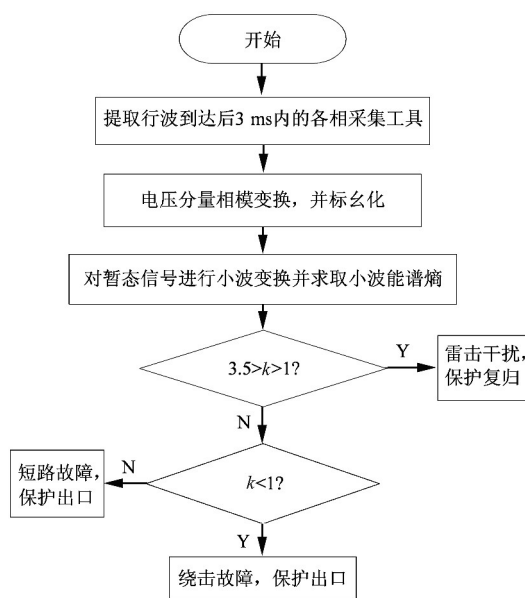


图5 雷电暂态信号识别原理框图

4 仿真验证

为验证本文所提雷电暂态识别方案的有效性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 ± 800 kV 特高压直流输电系统仿真模型,对多种故障和干扰情况进行了仿真分析。

4.1 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 所示。

表 5 绕击故障仿真结果

雷电流幅值/kA	故障距离/km	k
50	300	0.92
	500	0.89
	1000	0.79
100	300	0.93
	500	0.95
	1 000	0.96
150	300	0.76
	500	0.89
	1 000	0.99

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 H_E 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。

4.2 反击故障仿真

反击故障仿真如表 6 所示。

表 6 反击故障仿真结果

雷电流幅值/kA	故障距离/km	k
50	300	0.99
	500	0.82
	1 000	0.76
100	300	0.89
	500	0.96
	1 000	0.96
150	300	0.84
	500	0.88
	1 000	0.91

4.3 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,仿真计算结果如表 7 所示。

表 7 短路故障仿真结果

过渡电阻/ Ω	故障距离/km	k
0	300	3.92
	500	4.05
	1 000	3.99
50	300	9.05
	500	6.23
	1 000	3.95
100	300	4.05
	500	4.66
	1 000	8.99

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 H_E 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。

4.4 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,仿真计算结果如表 8 所示。

表 8 绕击未故障仿真结果

故障距离/km	雷电流幅值/kA		
	10	20	30
	k	k	k
300	1.99	2.56	2.03
500	2.02	2.36	2.33
800	3.03	3.21	2.65
1 000	1.98	1.95	2.45

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 k 均满足保护判据,可将暂态信号识别为绕击未故障信号。

4.5 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,仿真计算结果如表 9 所示。

表 9 反击未故障仿真结果

故障距离/km	雷电流幅值/kA		
	50	100	140
	k	k	k
300	3.23	2.32	2.69
500	3.89	1.127	2.49
800	2.45	3.41	3.50
1 000	3.44	3.47	3.46

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 均满足保护判据,可将暂态信号识别为反击未故障信号。

5 结束语

本文在分析故障暂态信号不同频率的能量分布的基础上,提出了基于不同频率的信号能量分布不同的识别方法。通过小波能谱熵值将绕击干扰、反击干扰与故障信号区分。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。大量仿真结果表明,本方案受故障位置、过渡电阻和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. 智能电网继电保护研究的进展(一):故障甄别原理[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 1-6.
- [2] 韩昆仑,蔡泽祥,贺智,等. 高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 20-25.

(下转第 66 页)

高频段的谐振点位置偏移方向是相反的。

当绕组出现外凸以及内陷幅向变形的时候,绕组的自感大小变化是相反的,但是反应在脉冲频率响应曲线上,谐振点的偏移并没有明显的规律,这可能是由于等效电感的变化,同时,相应的等效电容也发生了变化,并不能在频率响应曲线上直接反映出电感的变化。

当绕组出现轴向下和轴向上弯曲变形故障时,绕组频率响应曲线中谐振点的偏移方向不是相反的,因此由频率响应曲线不能由谐振点的偏移情况直接判断不同的轴向故障类型。

4 结束语

本文对纳秒脉冲频率响应法用于检测绕组故障进行了仿真分析。首先基于理论分析了纳秒脉冲的参数选择依据,选择上升沿和下降沿均为 50 ns、脉宽 200 ns 的脉冲作为仿真的激励源;然后建立了 110 kV 单相变压器 10 饼绕组的等效电路模型,通过扫描频率和脉冲频率响应两种方法获得了绕组的频率响应曲线,证明了由脉冲频率响应法获取绕组频率响应曲线的可行性;最后分析了幅向变形故障、轴向变形故障以及短路故障对于脉冲频率响应曲线的影响,发现对于此电路模型,短路故障会引起曲线的整体偏移,且在高频和低频段谐振点位置的偏移方向是不一样的,而幅向变形故障和轴向变形故障不会引起曲线的整体变化,但在局部[200 kHz, 300 kHz]会出现谐振点的偏移及出现新的谐振点,频率响应曲线无法直接判断不同幅向变形或轴向变形的类型。这些结论可以为绕组变形的模式识别提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 刘剑,刘开培,周仕杰,等.基于 LS-SVM 的变压器最优维护周期研究[J].中国电机工程学报,2012,32(22):94-103.
- [2] 孙翔,何文林,詹江杨,等.电力变压器绕组变形检测与诊断技术的现状与发展[J].高电压技术,2016,42(4):1207-1220.
- [3] WANG M, VANDERMAAR A, SRIVASTAVA K D. Review of condition assessment of power transformers in service [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6): 12-25.
- [4] WANG M. Winding movement and condition monitoring of power transformers in service [D]. Vancouver: The University of British Columbia, 2003.
- [5] 中国电力科学研究院. 国家电网公司变压器抗短路研究报告[R]. 北京:中国电力科学研究院,2006.

(上接第 62 页)

- [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.
- [4] 陶瑜.直流输电控制保护系统分析及应用[M].北京:中国电力出版社,2015:17-19.
- [5] 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.
- [6] 胡振华,李海峰,武霖阳.特±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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李海峰,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.
- [10] 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

- [6] 王开成,王昕,任树杰,等.变压器绕组变形测试技术的应用[J].黑龙江电力,2004,26(2):143-145.
- [7] 张燕秉,胡晓岑.阻抗法检测电力变压器绕组状况的分析与尝试[J].华北电力技术,1999(12):46-49.
- [8] 秦少臻.检测变压器绕组变形的低压脉冲法的研究[J].变压器,1997,34(7):24-29.
- [9] DICK E, ERVEN C. Transformer diagnostic testing by frequency response analysis [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978(6): 2144-2153.
- [10] GOMEZ-LUNA E, MAYOR G A, GONZALEZ-GARCIA C, et al. Current status and future trends in frequency-response analysis with a transformer in service [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 1024-1031.
- [11] 夏珩轶.检测变压器绕组轻微变形的纳秒级脉冲响应分析法研究[D].重庆:重庆大学,2010.
- [12] LEIBFRIED T, FESER K. Monitoring of power transformers using the transfer function method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(4): 1333-1341.
- [13] BAGHERI M, NADERI M S, BLACKBURN T. Advanced transformer winding deformation diagnosis: moving from off-line to on-line [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 1860-1870.
- [14] LAVRINOVICH V A, MYTNIKOV A V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 2041-2045.
- [15] HASHEMNIA N, ABU-SIADA A, ISLAM S. Improved power transformer winding fault detection using FRA diagnostics-part 1: axial displacement simulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 556-563.
- [16] HASHEMNIA N, ABU-SIADA A, ISLAM S. Improved power transformer winding fault detection using FRA diagnostics-part 2: radial deformation simulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 564-570.
- [17] SIADA A A, ISLAM S. High frequency transformer computer modeling [C] // Proceedings of the Power Engineering Conference 2007, Piscataway: IEEE, 2007: 1-5.
- [18] GOPALAKRISHNA S, JAYASHANKAR V, JAGADEESH K V, et al. Online assessment of winding deformation based on optimised excitation [C] // Proceedings of the Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Aachen: IEEE International Workshop, 2010: 84-89.

【作者简介】张延寿(1982-),男,河南荥阳人,助理工程师,从事电气自动化控制等相关工作。

中雷击干扰[J].电力自动化设备,2015,35(2):55-61.

- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.

【作者简介】黄然(1986-),女,四川人,硕士,工程师,主要研究方向为输电线路在线监测、线路防雷、电力设备外绝缘研究。束洪春(1961-),男,江苏人,教授,博士生导师,研究方向为新型继电保护。龚振(1993-),男,云南人,硕士生,通信作者,主要研究方向为电力系统行波测距、线路防雷。王辉春(1986-),男,天津宁河人,工程师,普洱供电局变电管理所继电保护专责。余宗俊(1989-),男,云南宜良人,助理工程师,研究方向为线路运行。