

· 运行分析 ·

输电线路树木故障机理分析及试验研究

刘贞瑶¹, 谈发力², 康宇斌¹, 宋自强², 郭 嵘¹, 胡 枫²

(1. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211102;

2. 武汉三相电力科技有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 树木故障是输电线路一种非常典型的非雷击故障。目前已有的研究多针对树木故障的诊断及处置, 而关于树木故障的机理研究却比较少见。文章首先从理论上分析了树木故障的形成过程, 以及在不同高度树木高度阶段呈现出的典型放电特征, 然后在实验室环境下模拟了不同高度阶段树木-导线间隙放电过程。对放电电流进行监测, 结合波形特征、频谱特征分析, 给出了不同高度阶段树木放电的特征和规律, 对输电线路树木故障形成机理做了进一步阐述。

关键词: 树木故障; 放电; 频谱分析; 电流波形

中图分类号: TM85

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)06-0122-05

0 引言

随着我国电网建设规模的不断扩大, 超高压输电线路的数量越来越多, 各种输电线路安全隐患也在不断地影响电力系统的安全稳定运行, 其中因树木闪络而造成的输电线路接地故障跳闸, 被称为“树木故障”^[1-3]。形成树木故障的主要原因是架空输电线路经过的茂密树林地区树木生长过快、过高, 部分树木甚至超过架空输电线路杆塔的高度, 导致线路距离树木过近而对树木放电, 引起线路故障跳闸^[4]。

国内外对树木故障进行了一些研究并取得了相应的成果。文献[5]基于统计学自主开发数学模型获取树木生长高度, 并进行等级自动识别划分。文献[6-8]设计了一种基于超声波技术和无线网络技术的输电线路走廊超高树障的在线监控报警装置。文献[9-11]系统地研究了植被引起输电线路故障的几种案例, 并构建了一个简单的实验模型, 对植被在输电线路中的短路故障现象进行了研究和讨论。

目前已有的研究多针对树木故障的诊断及处置, 而关于树木故障的机理研究却比较少见。文章从树木故障的形成过程出发, 分析树障形成机理, 模拟不同阶段树木放电过程, 并监测放电电流信息。通过对放电波形及其频谱进行分析, 给出不同阶段树木放电的特征和规律, 进一步解释了树木故障形成机理。

1 树木故障形成过程理论分析

如图1所示, 当树木高度达到 h_1 时, 树木顶部表面场强达到 $20\sim 30\text{ kV/cm}$, 此时输电线路与树木之间会发生电晕放电^[12-14], 并伴随有轻微的滋滋声。当树木生长到 h_2 时, 由于树木与导线之间距离变小, 树木顶部电晕放电加剧, 形成断断续续的刷状放电, 并进一步发展成火花放电或者局部电弧放电。当树木达到 h_3 左右的高度后, 树线距离达到了闪络故障的极限值, 输电线路会发生闪络故障, 导致线路跳闸, 引起严重后果^[15]。不同阶段放电都会产生特定频率分量的电流, 并沿导线向两侧传播。

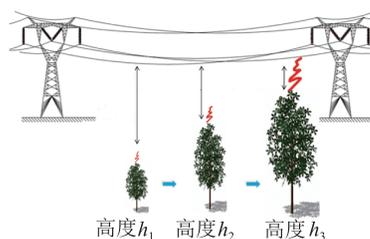


图1 树木放电发展趋势示意图
Fig.1 Sketch map of tree-wire discharge development trend

2 试验研究

2.1 试验系统设计

为对树木故障放电过程深入研究, 开展了不同阶段放电模拟试验。试验系统主要包括工频试验变压器、复合绝缘子、模拟导线、绝缘绳、高频电流在线监测终端(简称监测终端)以及相关连接导线、金具等。

收稿日期: 2017-06-02; 修回日期: 2017-07-12

基金项目: 国家电网公司科技项目(特高压交直流输电线路直升机吊索法和吊兰法带电检修作业的研究)

2.1.1 试验布置

试验设备布置如图 2 所示,模拟导线与绝缘子连接,并悬挂于实验室吊车挂钩上。为实现不同放电过程导线上放电电流的精确监测,将监测终端安装于模拟导线上。

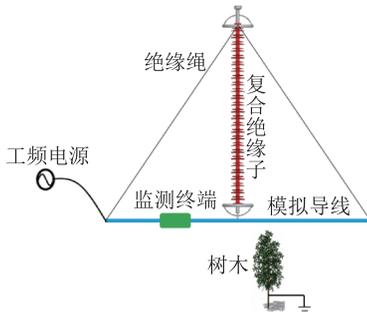


图 2 树木放电试验布置

Fig.2 Experiment arrangement diagram of tree-wire discharge

现场布置中,任一高压带电部件与任何地电位部件之间的距离皆满足每 100 kV 试验电压下不小于 0.5 m,并且在任何情况下不小于 1.5 m,对地高度约为 3 m,满足试验过程的绝缘和安全要求^[16]。

2.1.2 监测原理

采用高频响应良好的自积分罗氏线圈传感器来测量高频放电电流,该传感器具有线性度好、测量频带宽、抗干扰能力强等优点^[17]。利用罗氏线圈测量高频放电电流,其原理如图 3 所示。

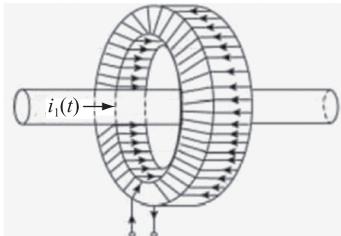


图 3 罗氏线圈测量电流原理

Fig.3 Principle of rogowski coil current measurement

图 3 中 $i_1(t)$ 为模拟导线上的电流。传感器输出为一个电压信号,也是监测装置的采集量,对于自积分罗氏线圈传感器来说,该值大小为:

$$e(t) = -M \frac{di_1(t)}{dt} = L_0 \frac{di_2(t)}{dt} + (R_0 + r)i_2(t) \quad (1)$$

式中: M 为罗氏线圈与模拟导线之间的互感系数; L_0, R_0, r 分别为罗氏线圈自感系数、内阻及终端采样电阻; $i_2(t)$ 为采样电阻上流过的电流^[17]。

由于自积分罗氏线圈传感器 $R_0 + r$ 很小,当被测电流 $i_1(t)$ 频率较高时,满足 $\omega L_0 \gg R_0 + r$, 则:

$$e(t) = i_2(t)r \approx -\frac{Mr}{L_0}i_1(t) \quad (2)$$

由此可见,传感器输出电压与模拟导线上的电流近似呈正比关系,采集该电压量,即可获取原始放电电流波形。

试验所采用的监测终端主要组成部分为高频电流传感器、调理电路、采集与高速处理电路、电池、GPS 时钟模块以及无线发射模块等。装置外壳为一个圆柱形铝合金容器,所有的模块均放置于其内部。试验时外壳与导线等电位连接,可以有效保护内部功能模块免受高压及电磁环境干扰。

监测装置实时采集模拟导线上高频暂态电流,并将电流信息通过 GPRS 方式发送至后台数据中心,数据中心对采集上传的电流信息进行分析并处理,最后输出处理结果。试验中监测终端采用电池供电方式,连续工作时长超过 4 h。

2.1.3 试品绝缘子参数

试验采用的试品型号为 FXBW4-500/160,其绝缘子参数如表 1 所示。

表 1 试品绝缘子参数

Table1 Parameters of test insulator		mm
名称	参数	
结构高度	4450±50	
盘径	180 / 125	
公称爬电距离	13 750	

2.1.4 监测终端参数

(1) 传感器单元:测量范围为 5 mA ~ 10 A,带宽为 10 Hz ~ 5 MHz;

(2) 信号调理单元:采集频率范围为 300 Hz ~ 5 MHz;

(3) 采集单元:采样频率为 20 MHz。

2.1.5 试验电源参数

试验变压器的额定输出电压为 1000 kV,额定电流为 1 A,额定容量为 1000 kV·A。满足实际试验中导线施加电压不超过 150 kV 的要求。

2.2 放电过程

由于施加电压较高,因此模拟导线上不可避免的出现了电晕放电,电晕放电一般为高频信号,这种放电也会产生放电电流,容易与树木放电产生的高频电流混淆,为此也需对电晕放电波形特征进行分析。试验内容包括电晕放电试验以及不同阶段树木放电试验。

2.2.1 电晕放电

按图 2 所示布置试验环境,电晕试验时不放置树木,导线两端以及复合绝缘子高压端部分加装均压装置,模拟导线上依次施加 40 kV, 80 kV, 120 kV 电压,每次加压时,均维持 1 min 左右,观察实验现

象并用上位机观测监测终端上传的电晕放电波形。

加压时,能听到比较明显的滋滋放电声音,且电压越高,放电越明显,电压达到 120 kV 时,在均压环上可以观察到细小的刷状电弧产生。在模拟电晕放电过程中,施加最大电压为 120 kV。

2.2.2 树木放电

树木与导线之间的间隙类似于极不均匀场,在一定间隙距离范围内,其击穿电压与间隙距离呈近似线性关系,击穿场强按 4 kV/cm 考虑^[7]。在模拟树木-导线放电过程时,为监测树木放电波形,应避免模拟导线本体强电晕产生的干扰,导线上施加电压不宜超过前面所述电晕模拟试验所施加电压。按 100 kV 施加电压考虑,树木-模拟导线最大净空距离为 25 cm,低于该距离则容易发生击穿。

在模拟导线下方放置试验用的树木,保持树木顶部与导线之间空气距离 25 cm 左右不变,逐渐升高电压至树木顶部出现明显放电电弧,此时施加电压在 60~80 kV,保持 1 min 左右,在黑暗情况下可看到明亮的放电斑点,听到明显放电嘶嘶声。

2.2.3 闪络放电

继续增加电压,当电压达到 95~105 kV 时,树木顶端电弧向模拟导线上蔓延,并很快形成稳定燃弧,持续一段短暂时间后,试验变压器保护动作,施压停止,电弧消失。拍摄到明显的放电燃烧现象,如图 4 所示。



图 4 闪络放电现象

Fig.4 Phenomenon of flashover

闪络发生时,形成稳定燃弧,并产生大量白烟,待试验完成后检查树木顶部,发现明显烧伤痕迹。

3 放电波形分析

3.1 电晕放电

为准确记录电晕放电弱电流波形,首先通过上位机对监测终端设定合理的触发参数,在不加压情况下,检测设备本身热噪声或者环境噪声带来的干扰波形,统计波形特征后,调整相应参数,使得无误触发发生;然后施加电压,保持耐压 1 min 左右,记录加压时刻,并跟上传波形 GPS 时标进行匹配,找

到每种情况下对应的放电电流。典型电晕放电波形如图 5 和图 6 所示。

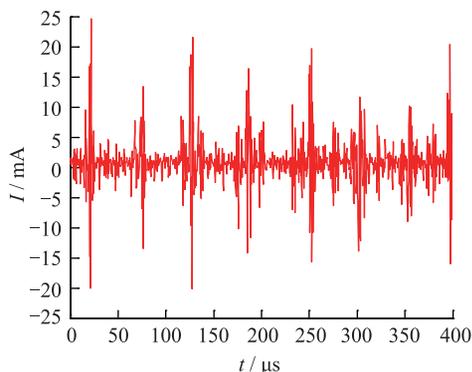


图 5 电晕放电波形 ($U = 40$ kV)

Fig.5 Corona discharge waveform

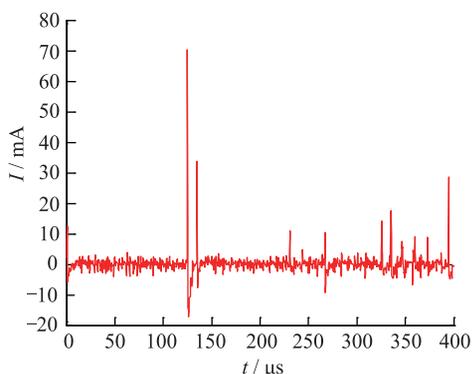


图 6 电晕放电波形 ($U = 120$ kV)

Fig.6 Corona discharge waveform

每次加压后,监测终端均上传大量放电波形,从波形特征上来看,电晕放电波形均为高频无规律的毛刺信号。随着施加电压的升高,放电电流幅值有增大趋势,且上传波形数量大幅增加。当电压为 40 kV 时,电晕电流幅值 20 mA 左右,施加电压为 120 kV 时,极限情况下幅值可达 70 mA。

3.2 树木放电

通过上位机对监测终端重新设定触发参数,调整其触发阈值为 80 mA 左右。在此条件下,当导线上施加电压不超过 120 kV 时,设备不会采集电晕放电波形,因此终端上传波形均为树木放电电流。典型波形如图 7 所示。

树木放电波形一般为单脉冲波形,主波脉宽较大,多数为 6~20 μ s,且幅值也大于电晕放电波形,一般为 150~400 mA,因此比较容易跟电晕波形进行区分。

3.3 闪络放电

当电压达到 95~105 kV 时,闪络发生。闪络时刻产生了大量幅值更大、脉宽更宽的电流波形,闪络时刻波形如图 8 所示。

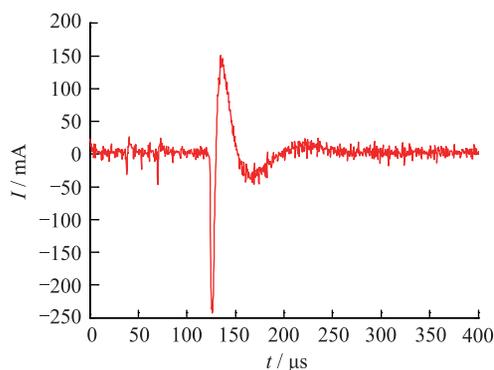


图7 树木放电波形

Fig.7 Tree-wire discharge waveform

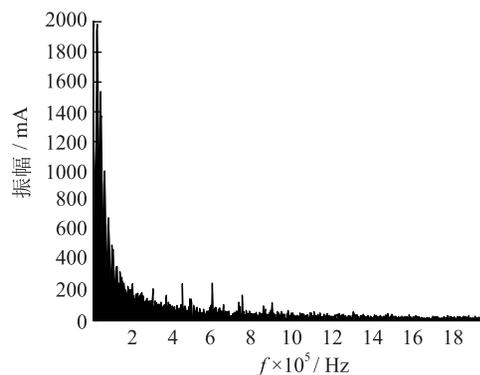


图10 树木放电波形频谱

Fig.10 Tree-wire discharge spectrum

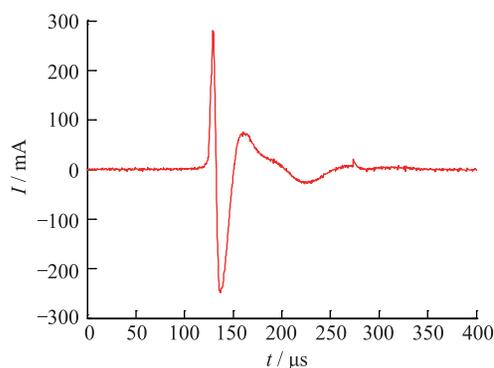


图8 闪络放电波形

Fig.8 Flashover discharge waveform

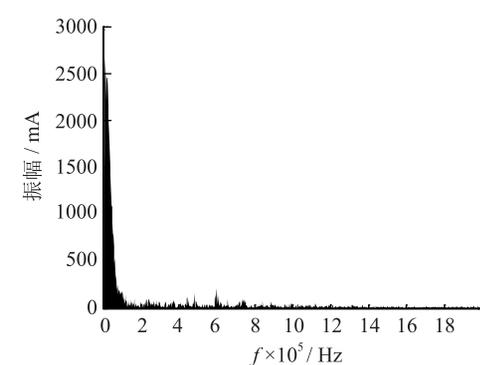


图11 闪络放电波形频谱

Fig.11 Flashover discharge spectrum

3.4 不同阶段放电波形频谱分析

从波形直观来看,从电晕放电到树木放电再到闪络放电,不同阶段产生的放电电流特征不同,幅值逐渐增大。为进一步区分这几个阶段电流,各选取了一组电流波形,利用 Matlab 软件自带快速傅式变换(fast fourier transformation, FFT)功能对波形进行频谱分析,结果如图9—11所示。

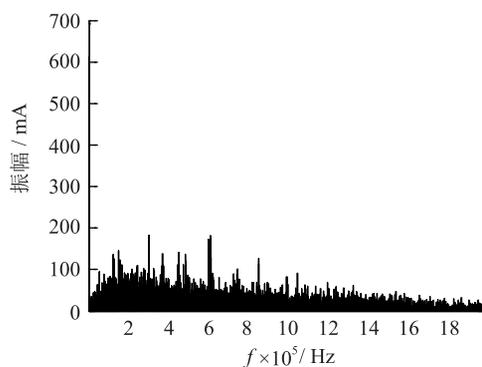


图9 电晕放电波形频谱

Fig.9 Corona discharge spectrum

对比图9—11可知,电晕放电波形在0~2 MHz内均有分布,树木放电波形主要集中在0~600 kHz以内,而闪络放电波形则在0~200 kHz内,且频率呈下降趋势。综合来看,不同阶段放电过程产生的

电流特征不同,随着放电程度加剧,设备采集到的电流呈现出平均幅值增大,而频率降低的趋势。

4 结语

文章对树木故障形成机理进行了分析,并通过试验模拟了树木故障形成过程,通过高频电流监测终端监测了不同放电阶段放电波形,并对系列波形特征及频率分布进行了综合分析,得到如下观点:

(1) 随着树木生长,当高度达到一定值时,树木顶部开始形成电晕放电,若树木-导线净空距离进一步减小,电晕放电发展成间歇性电弧放电,形成较明显电弧时,仍不加以控制,任由树木继续长高,则闪络发生,输电线路跳闸。

(2) 从不同阶段放电过程产生的波形来看,电晕放电幅值最低,但频率最高,闪络放电波形幅值最高,但频率最低,而中间过程产生的放电则介于两者之间。

(3) 树木在临近故障前的放电过程会产生150~400 mA高频电流,对该电流进行检测分析,理论上可以用行波定位理论实现树木故障监测及预警。

参考文献:

[1] 刘怀东,陈伟,高晓辉,等. 从大停电观点分析一类输电线

- 路树木故障[J]. 电网技术,2007,31(1):67-69.
- LIU Huaidong, CHEN Wei, GAO Xiaohui, et al. Analysis of the tree flashover fault along the transmission lines from the respective of blackout[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 67-69.
- [2] 林力辉, 闫航瑞, 岳鑫桂, 等. 输电线路树木故障的行波信号分析[J]. 南方电网技术, 2014, 8(3): 47-52.
- LIN Lihui, YAN Hangrui, YUE Xinrui, et al. Traveling wave signal analysis of tree flashover fault along the transmission lines [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(3): 47-52.
- [3] 胡海斌, 黄康裕, 钟建勇. 输电线路通道树木隐患点预警平台的研发[J]. 广西电力, 2015, 38(1): 50-52.
- HU Haibin, HUANG Kangyu, ZHONG Jianyong. Research and development of transmission Line tree passage hidden spot early warning platform[J]. Guangxi Electric Power, 2015, 38(1): 50-52.
- [4] Gnther Beck, Dusan Povh, Dietmar Retzmann, et al. 全球大停电的经验教训[J]. 中国电力, 2007(10): 75-81.
- BECK G, POVH D, RETZMANN D, et al. Lessons from the global blackout [J]. China Electric power, 2007(10): 75-81.
- [5] 周义罡, 王瑞辉, 谢裕宏, 等. 架空线下速生超高树木生长规律研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(2): 75-78.
- ZHOU Yigang, WANG Ruihui, XIE Yuhong, et al. The research on the growth regularity of ultra-fast-growing tree height under overhead wire [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(2): 75-78.
- [6] 刘雯静, 张童飞, 胡志珍, 等. 基于超声和无线组网的超高树障在线监测装置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 97-103.
- LIU Wenjing, ZHANG Tongfei, HU Zhizhen, et al. The online monitoring system of ultra-high tree barrier based on the ultrasonic and the wireless networking[J]. Automation and Electric Power System, 2013, 37(10): 97-103.
- [7] 赵增华, 石高涛, 韩双立, 等. 基于无线传感器网络的高压输电线路在线监测系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 80-84.
- ZHAO Zenghua, SHI Gaotao, HAN Shuangli, et al. A heterogeneous wireless sensor network based remote district high-voltage transmission line on-line transmission system [J]. Automation of Electric Power System, 2009, 33(19): 80-84.
- [8] AJAYI A, OSAYI FS, JEROME DK, et al. Investigating vegetation induced faults on power transmission line; A case study of the irrua-auchi-agenebode 33kV transmission line Edo State Nigeria[J]. Global Journal Of Advanced Research, 2016, 3(3): 177-183.
- [9] 刘亚新. 输电线路常见故障特征及判别方法[J]. 山西电力, 2004(6): 44-46.
- LIU Yaxin. Common faults characters and distinguished method of transmission Line [J]. Shanxi Electric Power, 2004(6): 44-46.
- [10] 刘通, 代洲, 王颂, 等. 架空输电线路的故障模式及相关故障树分析[J]. 南方电网技术, 2013(06).
- LIU Tong, DAI Zhou, WANG Song, et al. Failure mode overhead transmission line and associated fault tree analysis [J]. Southern Power System Technology, 2013(06).
- [11] SPOOR D J, ZHU J. Frequency considerations when employing traveling wave fault location algorithms[C]// Universities Power Engineering Conference. Bristol, UK: 2004: 1116-1120.
- [12] 隋晓杰, 松守信. 高压输电线路电晕放电分析[J]. 电力建设, 2006, 27(3): 37-38.
- SUI Xiaojie, SONG Shouxin. Analysis on corona discharge of high-voltage transmission lines [J]. Electric Power Construction, 2006, 27(3): 37-38.
- [13] 郑亚利, 俞集辉, 汪泉弟, 等. 电晕放电对超高压输电线路工频电场的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 872-876.
- ZHEN Yali, YU Jihui, WANG Quandi, et al. Corona discharge frequency electric fields on EHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 872-876.
- [14] LI S, RUSSELL B D. Optimal arcing fault detection using signal processing techniques [J]. Electric Power Systems Research, 1991, 21(2).
- [15] 胡毅. 输电线路运行故障的分析与防治[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 1-8.
- HU Yi. Analysis on operation faults of transmission line and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 1-8.
- [16] GB/T 4585—2004. 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S], 2004.
- GB/T 4585—2004. Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. Systems[S], 2004.
- [17] 申焯, 王士敏, 朱明均, 等. 一种电子式电流互感器的研制[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 41-44.
- SHEN Zhu, WANG Shimin, ZHU Mingjun, et al. A study on the development of electronic current transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(18): 41-44.

作者简介:



刘贞瑶

刘贞瑶(1979—),男,江苏南京人,高级工程师,从事输电线路运检技术研究工作(E-mail: liuzhenyaolzy@163.com);

谈发力(1989—),男,湖北武汉人,硕士,从事输电线路外绝缘、故障智能诊断及预警工作;

康宇斌(1978—),男,四川冕宁人,工程硕士,从事输电线路外绝缘及电力系统带电作业

研究工作;

宋自强(1993—),男,湖南长沙人,硕士研究生,从事电磁兼容技术、输电线路多相体放电技术研究工作;

郭嵘(1985—),男,贵州贵阳人,工程师,从事输电线路运检技术研究工作;

胡枫(1983—),男,湖北武汉人,硕士,从事配网故障选线、接地故障快速隔离、输电线路故障诊断及辨识研究工作。

(下转第131页)

Analysis and Treatment of Partial Discharge Abnormal Signal in 252 kV GIS Equipment

SHI Jinglei¹, SONG Yunxiang², YANG Jinggang¹, WANG Chen¹, XIAO Lei¹

- (1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;
2. NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 211106, China)

Abstract: As an effective partial discharge detection technology, UHF detection technology has been widely used in GIS detection. In the live detection process, the UHF abnormal signal is detected on a 252 kV GIS basin-type insulator. An X-ray detection was performed to the basin-type insulator, and several centimeters long pores are found inside. The results are consistent with the detection and positing of UHF method. However, the power frequency withstand voltage test and partial discharge test by pulsed current method to the basin-type insulator can meet the requirement of the factory test, indicating that the traditional detection method has its own limitations. In view of this situation, some suggestions are put forward, such as the extra high frequency partial discharge detection of basin-type insulators before leaving the factory, so as to improve the outgoing quality of the basin-type insulators.

Key words: GIS; live detection; UHF; disintegration; defect analysis

(编辑 方 晶)

(上接第 89 页)

Fault-tolerant Control System of PWM Rectifier Based on NCAV and Circuit Equivalent Replacement

QIN Wei, FENG Yanhui, HUANG Kai, QIU Yingning

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Three-phase pulse width modulation (PWM) rectifier is widely used in motor control, wind power generation, flexible HVDC and micro grid due to the controllable power factor, sinusoidal grid side three-phase current waveform, stable DC side voltage and so on. In order to improve the reliability of three-phase PWM rectifier, a PWM fault-tolerant control system based on NCAV fault detection method is proposed in this paper. The control system can implement fault-tolerant control in a short time in the case of an open circuit fault has occurred on a single power switch, reduce the impact to the system caused by the single open circuit fault. This system can effectively improve the three-phase current waveform, reduce the output voltage ripple and enhance the overall system performance and reliability when an open circuit fault has occurred on a single power switch. The usefulness of this paper is verified through simulation results.

Key words: rectifier; open-circuit fault; fault diagnosis; fault-tolerant control

(编辑 钱 悦)

(上接第 126 页)

Mechanism Analysis and Experimental study of Transmission Line Tree-related Failures

LIU Zhenyao¹, TAN Fali², KANG Yubin¹, SONG Ziqiang², GUO Rong¹, HU Feng²

- (1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Nanjing 211102, China;
2. Wuhan SunShine Power Science&Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: Tree-related failure is a typical non lightning fault on transmission lines. Current researches mainly focus on the diagnosis and treatment, while the mechanism study is seldom reported. Firstly, the formation process of tree-related failure and the typical discharge characteristics in different stages of tree height are analyzed, and then different phases of tree-wire gap discharge process are simulated in the lab environment. The discharge current is monitored, and the characteristics of the waveform and the frequency spectrum are analyzed. Characteristics and rules of tree-wire discharge at different stages are obtained, and the mechanism of transmission line tree-related failures is further expounded.

Key words: Tree-related failure; discharge; spectrum analysis; current waveform

(编辑 江 林)