

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210016

一种线路避雷器隐患查找用高压直流恒流源研制

徐友刚¹, 沈晓峰¹, 杨欢红², 熊晋树¹, 曹基南¹

(1. 国网上海市电力公司青浦供电公司, 上海 201799; 2. 上海电力大学, 上海 200090)

摘要: 现有的 10 kV 配电网避雷器隐患查找易受接地电流大小影响且无法有效识别。针对避雷器隐患定位困难的问题, 着眼于直流信号对电缆电容电流的屏蔽能力和避雷器温升变化特点, 研制出一种应用于配电网线路无间隙避雷器隐患查找的高压直流恒流源。利用交流斩控调压电路的规律与漏磁变压器稳定电流特性, 同时采用霍尔传感器对信号进行检测并有效屏蔽磁场。结合避雷器温升与直流电流关系的试验结果, 根据故障点两侧故障电流方向关系, 实现避雷器隐患查找。通过 PSCAD 仿真及现场实际故障数据表明: 基于高压直流恒流源产生直流信号注入线路, 红外升温明显, 且不受避雷器隐患程度干扰, 提高了避雷器隐患查找的鲁棒性和准确性。

关键词: 避雷器隐患; 高压直流恒流电源; 信号注入; 温升试验

Research and development of a high voltage DC constant current source for hidden fault detection of line arrester

XU Yougang¹, SHEN Xiaofeng¹, YANG Huanhong², XIONG Jinshu¹, CAO Jinan¹

(1. Qingpu Power Supply Company, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 201799, China;
2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The fault location of lightning arrester with hidden fault in existing 10 kV distribution network is easily affected by the size of grounding current. Aiming at the difficulty of the fault location of lightning arrester with hidden fault, focusing on the shielding ability of DC signal to cable capacitance current and the temperature risen characteristics of lightning arrester, a high-voltage DC constant current source applied to the hidden danger detection of gapless lightning arrester in distribution network is developed in this paper. Using the law of AC chopping voltage regulation circuit and the stable current characteristics of magnetic flux leakage transformer, Hall sensor is used to detect the signal and effectively shield the magnetic field. Combined with the test results of the relationship between the temperature rise of the arrester and the DC current, according to the direction relationship of the fault current on both sides of the fault point, the hidden danger of the arrester can be found effectively. PSCAD simulation and field actual fault data show that the DC signal generated based on high-voltage DC constant current source is injected into the line, the infrared temperature rises obviously, and is not disturbed by the hidden danger degree of arrester, which improves the robustness and accuracy of hidden danger finding of arrester.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877135), the Science and Technology Project of State Grid Shanghai Electric Power Company "Research and Development of Safe Single Phase Grounding Fast Positioning System based on DC Constant Current Source" (No. SGSHQP00HBJS2001123).

Key words: lightning arrester with hidden fault; high voltage DC constant current source; signal injection; temperature rise test

0 引言

线路避雷器作为重要的保护设备, 在保障电网安全可靠中起着重要作用^[1-2], 随着氧化锌避雷器运

行时间的增加, 电阻片及其密封元件会逐渐劣化^[3]。单相接地故障发生时, 受制于配电网供电半径短、分支多以及中性点非有效接地的网架特点^[4], 大多数避雷器即使完全击穿失效, 通过肉眼也难以发现, 避雷器隐患给电力系统的故障查找定位带来不便。

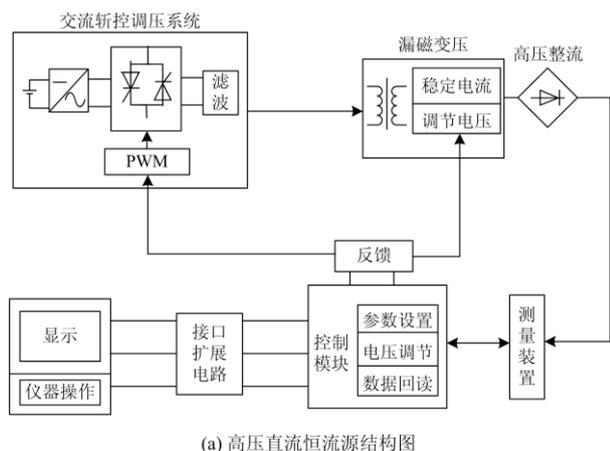
避雷器故障可用红外测温技术进行检测; 文献[5]通过对不同电压等级的交流无间隙金属氧化物避雷器的试验研究, 分析了氧化锌避雷器受潮程度

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877135); 国网上海市电力公司科技项目资助“基于直流恒流源的安全型单相接地快速定位系统的研发”(SGSHQP00HBJS2001123)

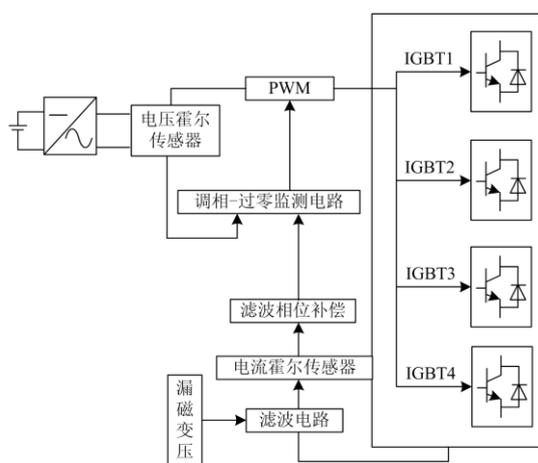
时的温度分布特性以及各电流分量反应灵敏性; 文献[6]设计了基于 10 kV 配电网真型实验场的系统方案; 文献[7]提出一种在特高压半波长输电系统沿线优化配置金属氧化物避雷器来抑制沿线工频过电压的方法。除此之外, 故障相电压极化关系^[8], 利用高频信号注入的定位方法^[9-15], 故障结果分析^[16-17], 带电测试与参数分析^[18-19], 对于配电线路避雷器隐形故障的查找仍具有局限性, 针对现有的接地查找技术和设备在线路避雷器隐形故障查找上的限制, 为此研制出了一种可用于配电网避雷器隐患现场查找的高压直流恒流源, 根据现场实际故障数据对恒流源的实用性进行了验证。

1 高压直流恒流源设计

高压直流恒流源设计总体方案如图 1 所示。直流信号将首先进入逆变电路模块, 以实现初步直流-交流转换; 交流电经过斩控调压和高频滤波, 由 PWM 信号控制开关管, 将信号加到漏磁变压器的



(a) 高压直流恒流源结构图



(b) 交流斩波调压系统结构设计

图 1 总体设计方案

Fig. 1 Overall design scheme of power supply

一次侧, 漏磁变压器的二次侧感应出的电压通过整流滤波输出到测量端。同时, 通过反馈电路将得到的输出信号反馈到控制电路, 通过控制调节 PWM 占空比, 实现稳定的输出结果。

基于对信号精度的高要求, 本文设计采用霍尔传感器, 对信号进行检测的同时具有极佳的外部电磁场和地磁场屏蔽能力; 对检测到的信号进行滤波和相位补偿, 经过响应调节输出检测后的信号; IGBT 与二极管进行反向并联组成的单向电力电子开关实现斩波和续流的功能; 最后按控制时序输出 PWM 控制信号, 实现本文所设计的交流斩波调压系统调压目的。

交流斩波调压是利用 PWM 控制脉冲的占空比, 利用高频周期矩形波函数对正弦波进行调制, 交流信号输入值可表示为

$$u_1(t) = U_m \sin(\omega t) \quad (1)$$

设脉冲宽度为 τ , 占空比 $D = \frac{\tau}{T_s}$, 则其开关函数的傅里叶展开式可表示为

$$S(t) = D + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \varphi_n}{n} \cos(n\omega_c t - \varphi_n) \quad (2)$$

式中: $\varphi_n = n\pi D$; $\omega_c = \frac{2\pi}{T_c}$ 为基波角频率。

输出电压的傅里叶展开式为

$$u_0(t) = DU_m \sin \omega t + \frac{U_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \varphi_n}{n} \left\{ \begin{aligned} &\sin[(n\omega_c + \omega)t - \varphi_n] - \\ &\sin[(n\omega_c - \omega)t - \varphi_n] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

输出电压由基波和高次谐波所组成, 利用低通滤波器可完全滤除高次谐波, 获得 $u_0(t) = DU_m \sin \omega t$, 改变占空比调节电压。

经交流调压处理得到的低压交流信号仍然不符合直流输出要求, 因此需要通过变压器转换, 本文设计选取具有电流稳定特性的漏磁变压器, 当变压器开始工作时, 负载电压趋近于副边电压值, 副边漏抗很小; 当稳定工作后, 负载压降下降, 漏抗压降上升, 趋于允许的限定值。改变原边电压, 副边的电流在负载变化时基本保持不变。变压器升压后电压为

$$u_2(t) = nu_0(t) \quad (4)$$

式中, n 为变压器变比, 其空载电压可达 10 kV 以上。

高压整流模块是整个系统的最后一级, 目的是为了输入交流电到相对稳定的直流信号的转

换,为后面电路结构提供可靠的直流输入,二极管接成电桥形式进行信号引导。

$$I_d = \frac{\int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t)}{\pi R} \quad (5)$$

利用电感滤波,最终在模块输出端实现平滑直流电流。

2 红外成像技术

2.1 避雷器发热原理

我国 10 kV 配网线路多采用无间隙氧化锌避雷器,氧化锌避雷器的全电流由阻性电流及容性电流组成。正常运行时,阻性电流仅为全电流的 10%~20%,总泄漏电流正常主要为容性电流^[20]。运行时消耗一定的功率,整体特征表现为轻度发热。

配电型无间隙氧化锌避雷器老化后,阻性电流增大,因配电网保护线路电缆分支的避雷器没有串联间隙,电阻片将长期承受工作电压。氧化锌避雷器的电阻片在小电流区域存在负温度系数。对于多元件电阻片串联结构的氧化锌避雷器,当击穿电阻片增多时,阻性电流增大、容性电流基本不变,在故障电阻片温升增加的同时,正常电阻片因分摊的电压增大、荷电率升高,功率损耗和发热开始明显,甚至超过击穿电阻片的发热值。

2.2 氧化锌避雷器温升与直流电流关系试验

分析故障避雷器温度变化与直流电流的关系,对 10 kV 配电型无间隙氧化锌避雷器施加不同的直流电流,检测避雷器外表面或接头发热情况,温度变化曲线如图 2 所示。配电型氧化锌避雷器型号为 HY5W-17/50,根据国标 GB 11032-89《交流无间隙金属氧化物避雷器》规定,配电型避雷器直流 1 mA 参考电压应小于 2.4 倍的系统额定电压。控制参考电压在 15 kV 内,每 1 min 进行一次温度统计。

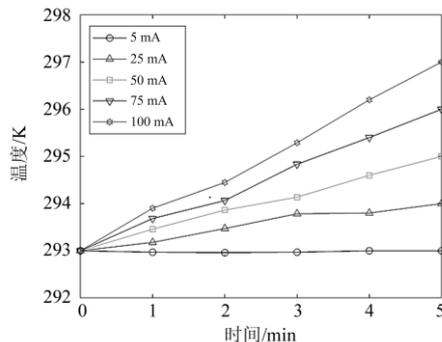


图 2 避雷器温度变化曲线

Fig. 2 Temperature variation curve of arrester

同时为了避免试验的偶然性,选取 3 个故障程度不同的避雷器,样品 1 为失效的避雷器,其参考电压低于系统运行电压,样品 2 电阻片老化程度小于样品 3,但在系统运行电压下均能够勉强运行,在不同参考电压下进行重复试验,读取避雷器外表面最高处温度。最终温升数据结果见表 1。

表 1 避雷器温升试验数据

实验样品序号	1	2	3
直流 1mA 参考电压/kV	3	12	15
通入直流/mA	5	无	无
5 min 后最高温升/K	25	0.5	0.8
	50	1.4	1.7
	75	1.5	2.8
	100	1.9	3.8
		3.8	4.0

根据图表中数据,通入 5 mA 电流,各避雷器温度均无明显变化;通入大于 50 mA 电流,温升明显;10 kV 以上参考电压下温升情况相差不超过 5%。

从微观来说,氧化锌电阻片的质量决定了避雷器的质量^[21],注入大的能量会使电阻片晶界氧解吸附,原本吸附在氧上的电子随之流走,造成界面态密度降低,势垒高度下降,体现在宏观上为温度升高。

试验结果表明,无论避雷器老化程度如何,注入足够的直流电流,便可使得红外测温温升明显^[22-23],但是试验的直流电流源有电压限制,只要将电压限制值设定在正常系统电压以下,无故障的避雷器不导通,基本不会产生温升;由于故障避雷器的参考电压下降,直流电流源的试验电流几乎全额流过该故障避雷器,从而产生显著的温升效应。

除此之外,在线路故障避雷器查找过程中,由于同一区域设备污秽程度基本一致,不必考虑普遍性的污秽问题对温升检测产生干扰。

3 避雷器隐患循迹方案

与传统的交流信号^[24]相比,直流信号无电容效应,具备先天的电缆电容电流屏蔽能力和抗干扰能力;直流信号不产生电容电流,因此对于电容较大的线路元件,可直接用较小的功率产生较高的电压,进而利用兆欧表等对线路直接进行绝缘检测,同时击穿故障避雷器,使避雷器隐患难以藏匿。

利用高压直流恒流源产生直流信号注入故障线路,其原理如图 3 所示,选取一个检测点,对已隔离的故障线路的故障相与地之间施加信号,电源注入直流信号,通过故障点的接地与装置形成电流回路,测量电流的流向即可判断故障点的方位。

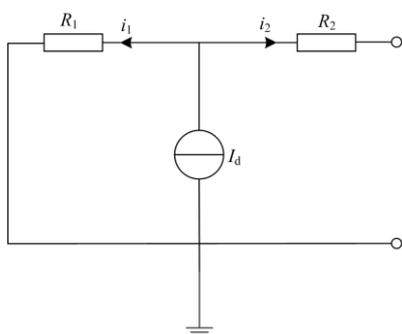


图3 直流信号注入等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of DC signal injection

故障查找的具体流程如图4所示。

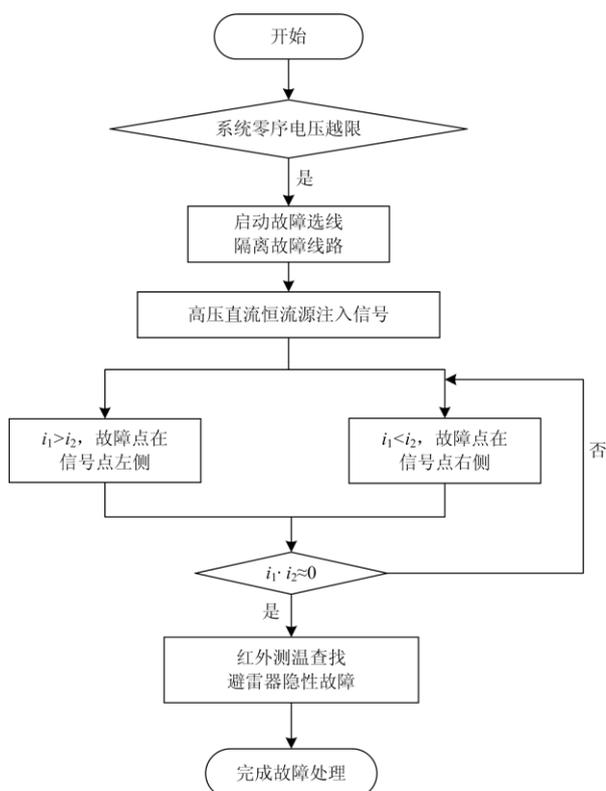


图4 隐患循迹流程图

Fig. 4 Hidden fault tracing flow chart

1) 当母线零序电压大于阈值后, 立即进行故障选线隔离。

2) 当直流高压信号源接入故障系统后, 首先通过使用无线直流钳表选取检测点, 登杆检测线路中的直流信号电流, 确认故障方位与大致区段[*left*, *right*]。

3) 检测点两端电流乘积趋近 0, 若 $i_1 > i_2$, 则故障发生在大号侧, 即检测点左侧, 反之同理。配电网同一时刻多点故障概率极低, 因此故障点均仅存在一处, 对于[*left*, *right*]上连续的 $i = f(x)$, 通过不断地把函数 $f(x)$ 的零点所在的区间一分为二, 使其逼近零点, 进而得到零点近似值。

4 仿真实验

利用 PSCAD 仿真软件, 将直流信号注入对金属氧化物避雷器^[25]隐患的测试过程进行仿真分析, 搭建了仿真电路, 如图5所示。采用直流电压源和断路器^[26]相结合产生高压直流信号, 直流电源设置为 10 kV, 断路器 BRK 初始处于断开状态, 在第 0.1 s 时闭合接通直流电源, 50 μ s 后 BRK 再次断开, 产生一个脉宽为 50 μ s, 幅值为 10 kV 的直流信号。

在 PSCAD 中选用压敏电阻器(避雷器)实现对故障点击穿放电过程的模拟。设置其阈值电压为 3 kV, 将避雷器模型与 10 k Ω 的电阻并联接入线路模拟故障点, 当外部电压小于阈值电压 3 kV 时, 压敏电阻呈高阻状态, 此时故障点阻抗约为 10 k Ω , 故障点为高阻接地故障; 当外部电压高于 3 kV (高压直流信号为 10 kV) 时, 避雷器击穿放电, 线路电压波形^[27-28]如图6所示。

根据仿真数据, 施加 10 kV 以上的高压直流信号, 避雷器击穿放电, 电压升高至 14.58 kV。基于上述温度变化试验分析, 对于击穿的避雷器, 施加小功率高压直流电流, 其电流被电阻片吸收, 电阻片以热能形式释放能量^[29], 可短时间在避雷器瓷外套上产生明显的温升, 利用红外热像仪在远距离检测温度数据。

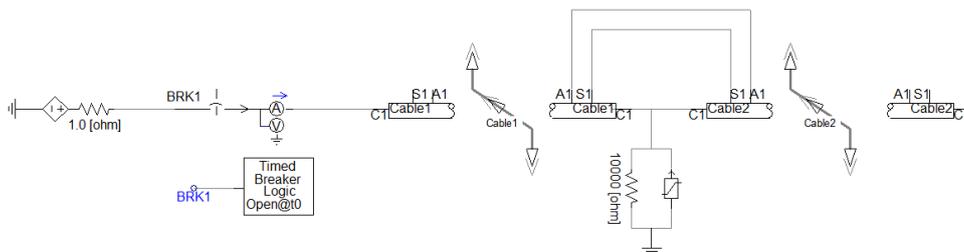


图5 仿真电路图

Fig. 5 Simulation circuit diagram

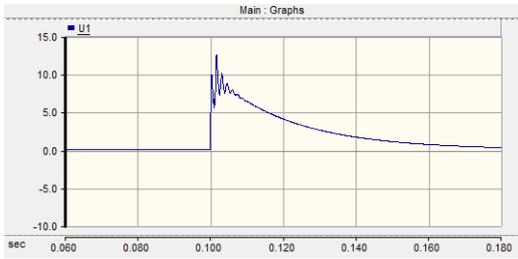


图 6 线路电压波形图

Fig. 6 Line voltage waveform

本文设计的高压直流恒流源样机如图 7 所示，由 IGBT 和二极管制成斩波调压系统的斩波主电路，并满足续流的要求。LC 滤波电路和漏磁变压器完成电源电路升压。同时加入电容与电阻，构成与实际负载近似的阻感性负载。在设计过程中结合 IGBT 基本参数，采用 TLP250 作为 IGBT 驱动电路的 IGBT 栅极驱动器；考虑整流模块二极管的反向击穿电压需要具有一定的耐压性，在设计时要满足参数要求，尽可能按照耐压值越高越好的选取原则。整体样机参数如表 2 所示，规避了高压恒流电源控制上的复杂性，最终输出超低频的近似直流信号，实现了无极可调、无惧短路近似恒流的高压小电流直流电源的设计。

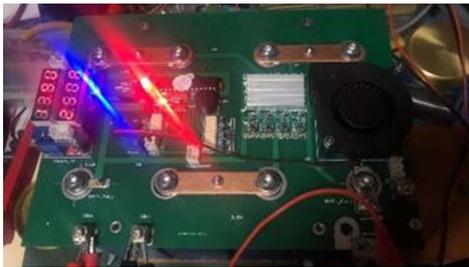


图 7 电源样机实物图

Fig. 7 Picture of power prototype

表 2 高压直流恒流源样机基本参数

Table 2 Basic parameters of HVDC constant current source prototype

参数	数值
最高输出电压/kV	10
最大输出电流/mA	60
短路电流/mA	80
电池容量/m·Ah	120
整机重量/kg	4

5 现场试验结果

为验证本文设计的直流源在现场检测的可行性，本文以避雷器隐患发生在上海某 110 kV 变电站 10 kV 的 II 段母线为实例，对所提技术方案现场

验证。

1) 选线与隔离

10 kV II 段母线在 22:00 左右发生故障，经当值调度拉路确认为 10 kV 拼开线单相接地。通知运维班现场巡线，故障点在 1 至 39 号段；39 号杆后段当晚经拉手线路操作转至拼镇线供电，隔日上午未查明明显故障，试送电后配电网单相接地故障^[30]仍然存在。

2) 避雷器隐患查找

经高压直流恒流源注入直流信号测试发现在 20 号杆大号侧，通过无线钳表缩小范围于 22 号和 28 号杆测试后发现故障依旧在大号侧，随后利用美胜 D600 红外测温装置，反射率 $E=0.92$ ，环境温度 21℃，检测发现 7 号配电变压器 A 相避雷器上端明显发热，温升 3 K 左右，如图 8 所示，故障隐蔽地面巡视发现困难，更换避雷器后恢复送电正常。



图 8 现场红外图谱

Fig. 8 On-spot infrared spectrum

现场实际应用表明，通过直流高压恒流源信号注入，利用红外热像仪检测发热情况，对于避雷器隐患，检测定位的效率高，具有较好的实用价值。

6 结论

线路避雷器隐患的辨识与查找对配电网的安全稳定运行起着至关重要的作用。本文提出一种线路避雷器隐患查找用高压直流恒流源研制方法：

1) 红外成像技术是确定避雷器隐患的有效方法之一。

2) 10 kV 配电型无间隙氧化锌避雷器老化击穿后，通入 50 mA 以上直流电温升情况明显。

3) 直流信号具备电缆电容电流屏蔽能力；基于直恒流源可以利用较小的功率产生较高的电压击穿避雷器，通过红外成像技术确定避雷器隐患。

通过仿真及现场试验结果验证了该方法的可行性，同时该电源操作方便、切换灵活并且有效提高了操作人员的安全性，隐患查找精确，具有很高的实际使用价值。

参考文献

- [1] 赵国伟, 白洁, 李承, 等. 微地形环境下 10 kV 配网雷害分析及防护措施优化配置[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 112-118.
ZHAO Guowei, BAI Jie, LI Cheng, et al. Lightning analysis & prevention measures optimal configuration of 10 kV distribution network under micro-topography[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 112-118.
- [2] 俞胜, 梁晖, 马恒瑞. 考虑环境因素影响的配电线路雷电绝缘防护失效概率计算[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 106-110.
YU Sheng, LIANG Hui, MA Hengrui. Lightning insulation failure probability calculation of distribution line considering environmental factors[J]. Smart Power, 2020, 48(5): 106-110.
- [3] 李春茂, 陈子宣, 杨雁, 等. 基于修正 Cole-Cole 模型的氧化锌压敏电阻老化状态评估[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 91-98.
LI Chunmao, CHEN Zixuan, YANG Yan, et al. Aging state evaluation of ZnO varistor based on Cole-Cole modified model[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 91-98.
- [4] 刘健, 张志华, 吴水兰, 等. 一二次配合的配电网故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 1-6.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, WU Shuilan, et al. Fault processing with coordination of primary equipment and secondary devices[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 1-6.
- [5] 张明龙, 钱健, 王健, 等. 基于配电避雷器全电流监测的系统过电压告警研究[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 256-260, 267.
ZHANG Minglong, QIAN Jian, WANG Jian, et al. Research on over-voltage alarm based on full current monitoring of distribution arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 256-260, 267.
- [6] 王鹏, 冯光, 韦廷方, 等. 10 kV 配电网的接地故障测试述评及真型实验场设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 184-193.
WANG Peng, FENG Guang, WEI Yanfang, et al. Review of grounding fault testing and design of real experiment field for 10 kV distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 184-193.
- [7] 易俊, 胡伟, 陈迅, 等. 抑制半波长输电系统工频过电压避雷器的优化配置[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2227-2234.
YI Jun, HU Wei, CHEN Xun, et al. Optimal configuration of arresters for suppressing power frequency overvoltage in half-wavelength transmission system[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2227-2234.
- [8] 管廷龙, 薛永端, 徐丙垠. 基于故障相电压极化量的谐振接地系统高阻故障方向检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 73-81.
GUAN Tinglong, XUE Yongduan, XU Bingyin. Method for detecting high-impedance fault direction in a resonant grounding system based on voltage polarization of the fault phase[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 73-81.
- [9] 戚振彪, 凌松, 刘文烨, 等. 基于高频测试信号注入的配电网故障节点在线识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 110-117.
QI Zhenbiao, LING Song, LIU Wenye, et al. On-line fault node identification method for distribution network based on high frequency test signal injection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 110-117.
- [10] 袁佳歆, 李响, 张哲维. 基于注入信号的有源配电网单相接地故障选线方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 44-49.
YUAN Jiixin, LI Xiang, ZHANG Zhewei. Research on distribution network fault location technology based on inverter injection signal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 44-49.
- [11] 周军, 刘娜, 李曙光. 基于等效半波注入法的小电流接地故障选线[J]. 电测与仪表, 2020, 57(4): 55-60.
ZHOU Jun, LIU Na, LI Shuguang. Small current grounding fault line selection based on equivalent half wave injection method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(4): 55-60.
- [12] 薛太林, 靳贰伟, 吴杰. 基于五次谐波和混沌系统的谐振接地系统故障选线[J/OL]. 电测与仪表: 1-7[2020-05-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20190826.1511.015.html>.
XUE Tailin, JIN Erwei, WU Jie. Fault line selection of resonant grounding system based on fifth harmonic and chaotic system[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-7[2020-05-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20190826.1511.015.html>.
- [13] 刘小卫, 唐凡, 陈晨, 等. 基于优化神经网络的 MOA 避雷器故障诊断系统[J]. 科学技术创新, 2019(13): 17-18.
LIU Xiaowei, TANG Fan, CHEN Chen, et al. MOA arrester fault diagnosis system based on optimized neural network[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2019(13): 17-18.
- [14] 鲍小峰, 肖开伟, 杨隽, 等. 基于主动注入信号法的单相接地故障定位方法[J]. 电工技术, 2018(17): 135-137.
BAO Xiaofeng, XIAO Kaiwei, YANG Jun, et al. Single-phase grounding fault location method based on

- active signal injection method[J]. *Electric Engineering*, 2018(17): 135-137.
- [15] 杨海生, 王先佐, 杨孟卓, 等. 小电流接地系统单相接地注入信号源协调控制策略研究[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(2): 66-69, 104.
YANG Haisheng, WANG Xianzuo, YANG Mengzhuo, et al. Research on strategy for coordinated control of single-phase-to-ground injection signal in small current grounding system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(2): 66-69, 104.
- [16] 曹娜, 李妍, 安春晖. 基于一起同塔双回线路大电流反击跳闸故障的线路避雷器防雷有效性仿真分析[J]. *电瓷避雷器*, 2020(4): 107-113.
CAO Na, LI Yan, AN Chunhui. Simulation analysis of lightning protection effectiveness of line arrester based on a large current counterattack trip fault of double-circuit on the same tower[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2020(4): 107-113.
- [17] 司文荣, 王逊峰, 莫颖涛, 等. 110 kV 复合瓷外套金属氧化物避雷器爆炸故障分析[J]. *电瓷避雷器*, 2018(1): 163-169.
SI Wenrong, WANG Xunfeng, MO Yingtao, et al. Analysis on an explosive failure of 110 kV polymer-housed MOA[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2018(1): 163-169.
- [18] 罗赞琛. 金属氧化物避雷器带电测试诊断技术探讨[J]. *电瓷避雷器*, 2014(5): 55-59.
LUO Zanchen. Discussion of diagnosis technology of on-site live testing of MOA[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2014(5): 55-59.
- [19] 史志强, 邓维, 罗日成, 等. 氧化锌避雷器受潮与电气参数的关系[J]. *高压电器*, 2019, 55(4): 233-238, 244.
SHI Zhiqiang, DENG Wei, LUO Richeng, et al. Relation between moisture and electrical parameter of zinc oxide arrester[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(4): 233-238, 244.
- [20] 孟祥海. 红外成像技术在氧化锌避雷器热故障中的研究与分析[J]. *电气应用*, 2019, 38(6): 100-105.
MENG Xianghai. Research and analysis of infrared imaging technology in thermal fault of zinc oxide arrester[J]. *Electrotechnical Application*, 2019, 38(6): 100-105.
- [21] 沙胜, 高锦锋, 李超, 等. 用于特高压的避雷器故障检测方法研究[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(7): 113-119, 146.
SHA Sheng, GAO Jinfeng, LI Chao, et al. Research on fault detection method for UHV surge arrester[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(7): 113-119, 146.
- [22] 卢彬, 朱海峰, 谷振富, 等. 基于红外图像的避雷器故障检测方法[J]. *红外*, 2018, 39(1): 19-23.
LU Bin, ZHU Haifeng, GU Zhenfu, et al. Detection method of arrester fault based on infrared images[J]. *Infrared*, 2018, 39(1): 19-23.
- [23] 王典浪, 刘晋孝, 蒋龙, 等. ± 500 kV 昭通换流站中性母线避雷器故障原因分析及对策[J]. *电瓷避雷器*, 2017(4): 132-135.
WANG Dianlang, LIU Jinxiao, JIANG Long, et al. Analysis and countermeasure of neutral-bus arrester fault in ± 500 kV Zhaotong converter station[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2017(4): 132-135.
- [24] 杨广华, 王胜辉, 陈维江, 等. 组合空气间隙交流击穿电压计算方法研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(3): 29-35.
YANG Guanghua, WANG Shenghui, CHEN Weijiang, et al. Study on the calculation method of ac breakdown voltage of complex air gap[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(3): 29-35.
- [25] KHAN A U. Modeling and simulation of a metal oxide lightning surge arrester for 132 kV overhead transmission lines[J]. *European Journal of Electrical Engineering*, 2020, 22(4-5).
- [26] LIU J, TAI N, FAN C, et al. A hybrid current-limiting circuit for DC line fault in multi-terminal VSC-HVDC system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(7): 5595-5607.
- [27] RAJU K, PRASAD V. Modelling and validation of metal oxide surge arrester for very fast transients[J]. *High Voltage*, 2018, 3(2): 147-153.
- [28] ELSEROUGI A A, MASSOUD A M, AHMED S. Arrester-less DC fault current limiter based on pre-charged external capacitors for half-bridge modular multilevel converters[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2017, 11(1): 93-101.
- [29] GENG Lina, CUI Juyong, HAO Shuang, et al. Calculation and analysis of DC surge arrester temperature field[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1550(3).
- [30] LIANG Y, LI K J, MA Z, et al. Typical fault cause recognition of single phase to ground fault for overhead lines in non-solidly earthed distribution networks[C] // 2020 IEEE/IAS 56th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), June 29-July 2, 2020, Las Vegas, NV, USA.

收稿日期: 2021-01-05; 修回日期: 2021-02-25

作者简介:

徐友刚(1985—), 男, 高级工程师, 从事设备运维检修管理工作。

(编辑 姜新丽)