

一种基于 FT3 光纤通信的新型避雷器监测方案

路光辉¹, 邓宇², 周钟¹, 曾国辉¹, 王胜辉¹, 王志成¹

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网河南永城市供电公司, 河南 永城 461670)

摘要: 针对现有避雷器在线监测系统可靠性低且不能适用于电子互感器应用场合的问题, 提出一种基于光纤传输的避雷器在线监测方案。通过光纤实现数据通信和同步采样, 提升系统抗电磁骚扰水平。利用 FT3 标准通信规约替代私有 RS-485 规约, 提高系统开放性。通过采样点传送取代相量传送, 为分析计算提供可靠有效的基础数据来源。借助具有合并单元功能的监测 IED 实现电流数据和电压数据的聚合, 兼容电子式 PT 和常规 PT 的工程应用。设计开发了相应的避雷器监测装置, 试验及现场运行结果表明, 装置工作可靠, 性能稳定, 具有广阔的应用前景。
关键词: 避雷器; 在线监测; 泄漏电流; FT3; 采样同步

A new solution of lightning arrester monitoring system based on FT3 optical fiber communications

LU Guanghui¹, DENG Yu², ZHOU Zhong¹, ZENG Guohui¹, WANG Shenghui¹, WANG Zhicheng¹

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. State Grid Yongcheng Power Supply Company, Yongcheng 461670, China)

Abstract: Because the traditional lightning arrester monitoring system has low reliability and it can't be applied to electronic transformer, a new type of lightning arrester on-line monitoring solution based on optical fiber transmission is presented. Using the optical fiber for data communication and synchronized sampling, it enhances the level of system resistance to electromagnetic disturbance. Using FT3 replacing private RS-485 communication protocols, it improves the system openness. Using sampling point transmission instead of the current and voltage phasor, it provides reliable and effective basis data source for analysis and calculation. Using monitoring IED with the function of merging unit, it realizes current and voltage data aggregation, and is compatible with electronic PT and conventional PT. The result of testing and field operation shows that the lightning arrester monitoring device based on the solution is reliable to work and has a broad application prospect.

Key words: lightning arrester; on-line monitoring; leakage current; FT3; synchronized sampling

中图分类号: TM73

文章编号: 1674-3415(2015)20-0119-06

0 引言

避雷器是电网中保护电力设备免受过电压危害的重要电气设备, 其运行的可靠性将直接影响电力系统的安全^[1-4]。近年来, 变电站运行中的交流无间隙氧化物避雷器由于阀片老化、电气性能变坏而引起的爆炸事故时有发生, 这给国民经济带来了巨大的经济损失, 给电网安全运行带来了严重的威胁。对避雷器实施在线监测, 可有效及时地检测避雷器内部缺陷, 及早发现和排除故障, 避免发生避雷器爆炸, 保障电力系统安全运行。

为了监测阀片的非线性电阻特性(反应避雷器劣化程度)最好的办法是监测阻性电流^[5]。要获得精确的阻性电流, 需要同步采集避雷器泄漏电流和母

线电压, 图 1 给出了目前常用的两种避雷器电流电压采集方案: 在图 1(a)的方案中, 避雷器泄漏电流和母线电压同时接入避雷器监测 IED 的采样回路实现泄漏电流和母线电压的采样、数据分析和评估处理。该方法由安装于避雷器本体附近的监测 IED 依靠装置内部电路实现同步采样, 但需将远方电压量通过电缆引到各监测 IED, 运维不方便, 现场实际应用不多; 在图 1(b)的方案中, 采用安装于计量端子箱附近的电压采集装置从端子箱采集 PT 二次侧电压信号, 电压采集装置通过同步脉冲对系统中各泄漏电流传感器进行采样同步, 并将计算出母线电压相量以 RS485/RS422 方式送到各泄漏电流传感器。各避雷器泄漏电流传感器计算出泄漏全电流相量, 接收经过同步采样和计算好的电压相量, 通过

分析计算出阻性电流等监测参量，以此判别避雷器的绝缘状态。该方法现场应用较普遍，但这种方法的缺陷在于：

- 1) 不能适用电子互感器的应用场合，局限性很大，不能适应智能电网发展的需求。
- 2) 泄漏电流等信号远程传输采用 RS485/RS422 通信的传输方式较光纤通信的抗干扰性较差，且为私有规约，运维困难。
- 3) 基于电同步信号的数据采集同步系统可靠性不高。
- 4) 基于 RS485 的异步串行通信提供的相量值传送，限制了很多基于采样值分析计算的算法应用。
- 5) 不直接支持智能化变电站要求的 DL/T 860 标准的信息交互，工程应用中需采用网关机或状态监测 IED 进行规约映射，增加成本，降低可靠性。

本方案的采用，解决了上述问题，提高了避雷器在线监测系统的通信可靠性和同步可靠性，提升了绝缘参数计算的准确性和灵活性。

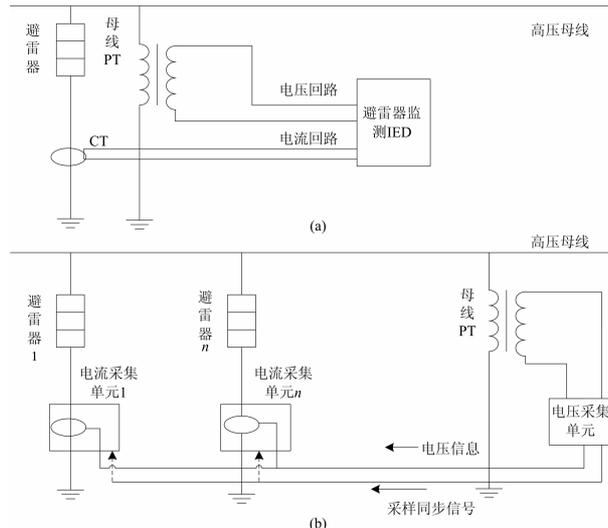


图 1 现有避雷器监测方法示意图

Fig. 1 Schematic of conventional arrester monitoring method

1 避雷器阻性电流计算

图 2 是避雷器阀片在单相小电流下的电路等效模型^[6]，它是由一个非线性电阻与线性电容并联而成，从等效电路可知，流过的总泄漏电流可分为阻性电流 I_R 和容性电流 I_C 两部分，容性电流分量产生的无功损耗并不会使阀片发热，导致阀片发热的是阻性分量产生了有功损耗。设 U_X 为设备运行电压， I_X 为避雷器总泄漏电流，其中 I_R 为阻性电流， I_C 为容性电流。满足 Dirichlet 条件的电力系统电压 U_X 、电流 I_X ，可按傅立叶级数分解为^[7]

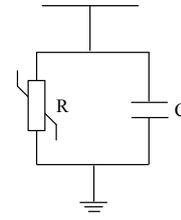


图 2 金属氧化物阀片小电流等效电路

Fig. 2 Small current equivalent circuit of metal oxide valve disc

$$U_X = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (1)$$

$$I_X = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \beta_k) \quad (2)$$

式中： U_0 为电压的直流分量； I_0 为电流的直流分量； U_{km} 为电压的各次谐波幅值； I_{km} 为电流的各次谐波幅值； α_k 为电压的各次谐波相角； β_k 为电流的各次谐波相角； $k=1,2,3,\dots$ 。

由图 2 可知：

$$I_X = I_C + I_R \quad (3)$$

由式(1)得到容性电流为

$$I_C = C \frac{dU_X}{dt} = \sum_{k=1}^{\infty} I_{Ck} \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad (4)$$

其中 $I_{Ck} = kC\omega U_{km}$ ，表示容性电流谐波幅值。

因第 k 次谐波阻性泄漏电流的相角与第 k 次谐波电压的相角相同，故阻性电流：

$$I_R = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{Rk} \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (5)$$

式中， I_{Rk} 表示阻性电流谐波幅值。

将式(2)、式(4)、式(5)代入式(3)，得

$$I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{Rk} \sin(k\omega t + \beta_k) = \sum_{k=1}^{\infty} I_{Ck} \cos(k\omega t + \alpha_k) + I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{Rk} \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (6)$$

根据三角函数的性质，可以得到以下公式：

$$I_{Rk} = I_{km} [\cos\alpha_k \cos\beta_k + \sin\alpha_k \sin\beta_k] \quad (7)$$

$$I_{Ck} = I_{km} [\cos\alpha_k + \sin\beta_k + \sin\alpha_k + \cos\beta_k] \quad (8)$$

将式(7)、式(8)分别代入式(4)、式(5)中就得到各次阻性谐波电流和容性谐波电流的表达式，就可求得避雷器的总阻性泄漏电流 I_R 。

本算法的有效性依赖于对 PT 电压与泄漏电流相位差的准确测量以及傅立叶分解的快速运算。

2 方案阐述

本文提出的避雷器在线监测方案主要内容包

括: ① 通过光纤实现数据通信和同步采样触发, 提升系统抗电磁骚扰水平; ② 通过成熟且标准开放的 FT3 通信格式实现采样点传输, 为系统分析提供可靠有效的基础数据源; ③ 通过借助合并单元或具有合并单元功能的监测 IED 实现监测所需电流数据和电压数据的聚合, 方便地兼容电子式 PT 和常规 PT 的工程应用。

目前常用的 RS485 通信模式存在规约私有、通信速率低、阻抗匹配困难、数据传输距离受限和易受电磁骚扰影响等问题, 在工程应用中暴露的突出问题是现场受过电压作用造成的通信端口失效或损坏, 造成整个监测系统退出运行。基于电气连接的采样同步方式同样存在抗电磁骚扰能力差等问题, 成为监测系统运行的隐患。已经成为智能变电站通信首选介质的光纤通信具有电不敏感性, 数据传输安全可靠, 可大大降低基础噪声水平, 特别是其成本较低, 工程铺设简单, 完全可担当监测系统数据通信和数据同步的工作。

FT3 是一种链路层的传输帧格式, 是 IEC60044-8 电子式电流互感器标准里规定使用的帧格式, 它采用曼彻斯特编码, 数据帧的速率为 2.5 Mbit/s, 采用 FT3 格式的数据具有完整性, 并且能在高速数据处理中进行多点同步数据的链接, 也可由接收数据的间隔层设备差值再采样同步。本方案直接利用其模拟量通道进行泄漏电流和系统电压的采样值传送, 互操作性好, 工程实施和设备维护方便。

实际测量中获得的电压、电流均为有限长的采样序列, 只有当采样长度为工频周期的整数倍, 即整周期采样, 如式(9)所示, 前面所述的谐波分析法公式才能够严格成立。

$$T_0 / T_s = N / L \quad (9)$$

式中: N 为采样点数; L 为周期数; T_0 与 T_s 分别为信号周期和采样周期。如果不满足式(9)将会带来频谱泄漏效应与“栅栏效应”, 使算出的谐波参数不准, 尤其是相位参数有较大的误差^[8-10]。谐波分析法产生频谱泄漏现象的原因是由于理论的傅立叶变换与实际工程应用的傅立叶变换的不同而造成的。理论的傅立叶变换是对整个时域信号的变换, 而实际应用中, 离散傅立叶变换(DFT)算法所要处理的是经过采样和 A/D 转换得到的有限长的数字信号。有限长的信号在时域上相当于无限长信号与矩形窗信号的卷积运算, 因此利用 DFT 算法得到的傅立叶变换结果相当于实际信号的傅立叶变换与矩形窗傅立叶变换的卷积, 并不等于实际信号的傅立叶变换。

相对于传统的相量传送, 本方案采用电流/电压采样点传送, 使监测数据处理系统能够在更加丰富

的信息基础上进行数据分析和设备评估, 并可为许多新的算法提供真实可靠的采样点数据。依靠采样点数据可以克服了模拟滤波器滤波不彻底或零点漂移等影响, 且能有效抑制高次谐波、直流、白噪声, 将误差控制很小范围内; 基于采样点信息, 可利用相关算法较好地减少频谱泄漏, 还能在一定程度上消除“栅栏效应”; 采样点数据可作为公用数据源支撑多种监测算法, 从而可使系统采用多种判据互相补充, 解决单一判据不足, 提升故障预警的正确判率。实际上在线监测需要多种方法进行综合, 根据每种方法所能反映出设备缺陷的情况进行配合, 相互取长补短。因此, 相对于相量传输的局限性, SV 采样值传输能支持数字化滤波、各种分析计算, 并为多种监测方法的综合应用提供可靠有效的基础数据源, 从而有效提升计算参量准确度和设备评估正确判率, 有良好的工程实用价值。表 1 为基于 FT3 光纤传输的避雷器监测方案与传统监测方案的比较。

表 1 避雷器监测方案比较

Table 1 Solution comparison of lightning arrester monitoring

方案比较	传统方案	FT3 方案
传输协议	RS485/私有	FT3/开放
通信速率	低	高
传输距离	近	远
抗电磁骚扰	弱	强
经济成本	高	较低
智能化融合程度	低	高

基于光纤传输的避雷器在线监测方案如下:

(1) 由泄漏电流传感器和集成电压采集功能的避雷器监测 IED 配合完成上述功能。集成于避雷器本体的泄漏电流传感器实现避雷器本体的泄漏电流的采集, 并将采样数据发送给避雷器监测 IED; 安装于智能组件柜内的避雷器监测 IED 实现母线电压采集, 同时接受各泄漏电流传感器电流采集信息, 完成相量计算、数据分析、故障识别、预警功能。

(2) 泄漏电流传感器的泄漏电流采样点信息通过光纤上送给避雷器监测 IED, 信息格式采用 FT3。

(3) 避雷器监测 IED 具有定值设置和数据上送等对外交互功能, 通信基于 DL/T 860 格式, 通信方式为百兆或千兆光纤网。

(4) 避雷器监测 IED 的电压采集功能即可接受合并单元以 FT3 的格式送出的母线电压 SV 信号, 又具备常规 PT 的接入端口, 可兼容常规变电站和智能变电站的应用场合。

(5) 避雷器监测系统中不同 IED 采样同步可通

过软件差值算法实现,也可以由集成电压采集功能的避雷器监测IED输出光脉冲对各泄漏电流传感器同步。

以上方案通过光纤提升通信可靠性和同步采样可靠性,进而提升系统可靠性;采样点传送代替相量传送使交互信息更丰富,从而使智能IED可综合基波、三次谐波等多种故障识别方式,使得多种判据互相补充,解决单一判据不足,提升了系统的故障预警的正确判别率;该方案系统构架简单,维护方便,具有很高的实用性和经济性。

3 应用实施

下面就常规互感器(方案一)和电子互感器(方案二)两种应用场合介绍该方案的具体实施方法。两种方案的比较如表2所示。

表2 基于FT3避雷器监测方案比较

Table 2 Solution comparison of lightning arrester monitoring based on FT3

方案比较	方案一	方案二
互感器类型	常规PT	电子式PT
对时网络专线	需要	不需要
应用场合	常规变电站、智能变电站	智能变电站
数据传输介质	光缆	光缆
内部通信协议	FT3	FT3
与上层交互协议	DL/T 860	DL/T 860

适用于常规互感器的避雷监测方案(方案一)结构图如图3(a)所示,当采用常规PT时,在PT柜附近安装的避雷器监测IED利用自身的电压采集功能直接采集PT二次回路的模拟电压信号100V/57.7V,同时接受各泄漏电流传感器电流采集信息,可利用软件差值算法完成数据同步,进而实现相量计算、数据分析、故障识别、预警功能、数据存贮和信息交互等功能。

除可采用软件同步采样数据外,避雷器监测IED还可利用光脉冲对各泄漏电流传感器进行数据同步(如图中虚线所示)。

相对于传统的相量传送,本方案采用电流/电压采样点传送,可以使监测IED在更加丰富的信息基础上融合综合基波、三次谐波等多种故障识别方式,降低误报率。

在产品对外信息交互上,相对于现有产品RS485或CAN方式的私有通信规约通信方法,该方案中避雷器监测IED直接通过光纤网络基于DL/T 860标准对外进行信息交互,将避雷器阻性电流相量、雷击次数等监测参量和避雷器运行状态评

估结果上送到过程层/站控层,实现信息共享,支撑电力系统优化运行。

电子互感器^[11-12]应用场合的避雷器在线监测方案(方案二)实施如图3(b)所示,对采用电子式PT智能变电站而言,计量用PT/CVT端子箱将不复存在,无法取到电压量,该方案利用避雷器监测IED接收来自合并单元的FT3电压信号实现母线电压采集。集成于避雷器本体的泄漏电流传感器通过零磁通电流传感器实现避雷器本体的泄漏电流的采集,经滤波、放大、采样后将采样数据通过光纤网以FT3格式数据发送给避雷器监测IED;安装于智能组件柜内的避雷器监测IED接收来自合并单元的FT3格式电压信号实现母线电压采集,同时接受各泄漏电流传感器电流采集信息,利用软件差值算法完成数据同步,进而实现相量计算、数据分析、故障识别、预警功能、数据存贮和信息交互等功能。

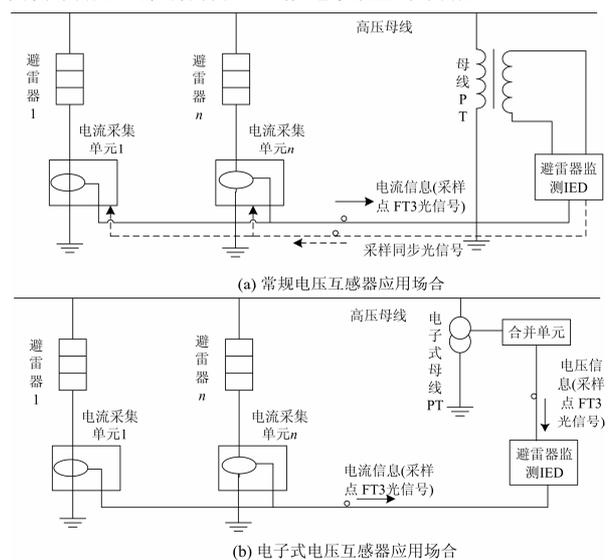


图3 基于FT3光纤通信的避雷器监测实现方法

Fig. 3 Implementation method of lightning arrester monitoring based on FT3 optical fiber communication

图3中示例采用基于FT3光纤数据传输的软件差值同步方式,因此没有给出光同步对时网络。

图4是根据本文提出的避雷器监测方案设计的避雷器监测装置设计框图。每相电流信号采集单元将零磁通互感器采集的避雷器漏电流和雷电流互感器采集的雷击次数经过模拟/数字处理以后以光信号FT3形式送给避雷器监测装置,同时避雷器监测装置接收采集器或者合并单元发出的光FT3或者光SV信号。避雷器监测装置内部经过重采样、数字滤波、分析诊断以及通信模块将数据以DL/T860规约送至在线监测后台。

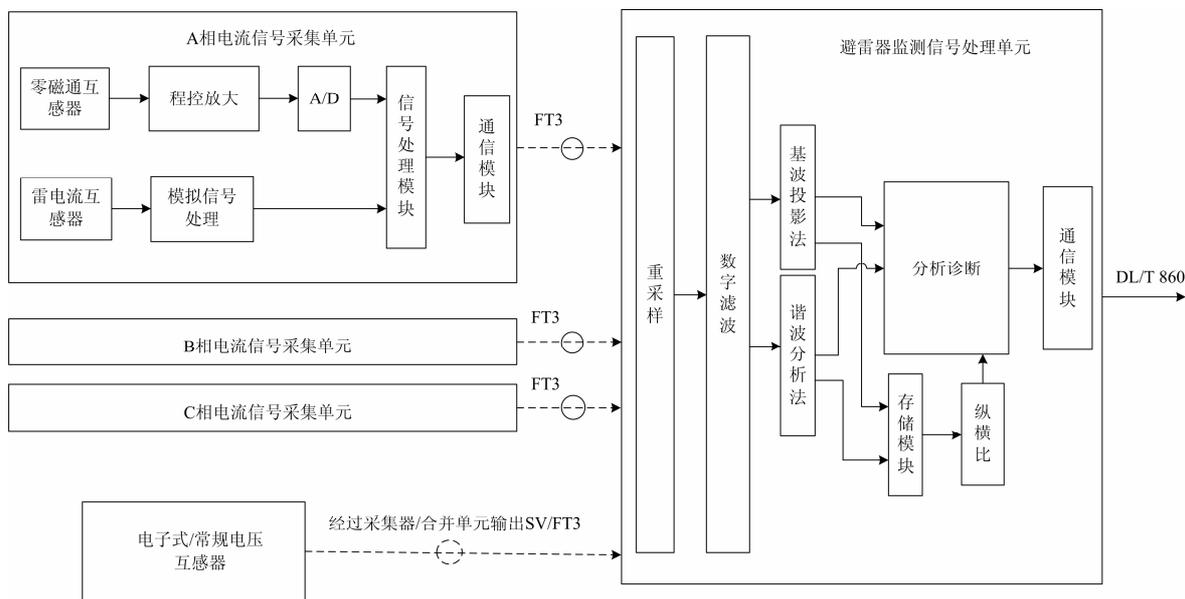


图 4 基于 FT3 方案的避雷器监测装置框图

Fig. 4 Diagram of lightning arrester monitoring device based on FT3

图 5、图 6 是基于本文方案研发的避雷器电流采集单元和监测装置。

误差不超过±5%或 0.05 mA，满足标准^[13]要求。

表 3 阻性电流测量准确度

Table 3 Impedance current measurement accuracy

施加值/mA	显示值/mA	误差/mA 或百分比
0.01	0.011	0.001 mA
1.00	1.039	3.90%
3.00	3.018	0.60%
5.00	5.035	0.70%
8.00	8.058	0.72%
10.00	10.068	0.68%



图 5 基于 FT3 方案的避雷器采集单元

Fig. 5 Lightning arrester data acquisition unit based on FT3

错误!



图 6 基于 FT3 方案的避雷器监测装置

Fig. 6 Lightning arrester monitoring device based on FT3

测试结果如表 3 所示，阻性电流量程 0.01~10 mA，

4 结论

本文提出一种基于光纤传输的避雷器在线监测方案。相对现有系统，该方案优势在于：① 基于 FT3 和 DL/T 860 等开放标准实现，便于不同厂商产品现场互换和方便后期运维。② 可同时适用于电子互感器和常规互感器的不同的应用场合。③ 就地化采集和光纤传输提高系统的精度和可靠性。④ 采样点传送取代相量传送，提升监测 IED 诊断评估的正确性。⑤ 通过差值软件同步算法或光秒脉冲同步算法取代电脉冲同步提升系统可靠性。

根据本文讨论的方案研制的 DAM-801 避雷器监测装置已经通过测试及成功现场运行，解决了传统避雷器监测难以适应电子互感器应用场合的难题，同时提高了系统的开放性、精度和可靠性，顺

应智能电网的发展趋势。

参考文献

[1] 林毅. 我国 110 kV 及以上电压等级 MOA 的发展、事故分析及其预防[J]. 电网技术, 1995, 19(3): 7-11.
LIN Yi. Analysis and prevention of fault of metal-oxide arrester (MOA) in power system of 110 kV and higher voltage class[J]. Power System Technology, 1995, 19(3): 7-11.

[2] 屠幼萍, 何金良, 廖冬梅. ZnO 避雷器运行状况的判断方法[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 22-23, 26.
TU Youping, HE Jinliang, LIAO Dongmei. Diagnosis methods of operation conditions of ZnO surge arresters[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 22-23, 26.

[3] 郑健, 张国庆, 田悦新, 等. 氧化锌避雷器泄漏电流在线监测技术综述[J]. 继电器, 2000, 28(9): 7-9.
ZHENG Jian, ZHANG Guoqing, TIAN Yuexin, et al. Description of on-line detection technique on MOA leakage current[J]. Relay, 2000, 28(9): 7-9.

[4] 邓旭, 王东举, 沈扬, 等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站内部暂态过电压[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 111-119.
DENG Xu, WANG Dongju, SHEN Yang, et al. Research on transient overvoltage for converter station of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 111-119.

[5] 胡文平, 尹项根, 张哲. 电气设备在线监测技术的研究与发展[J]. 华北电力技术, 2003(2): 23-26, 29.
HU Wenping, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. Research and development of on-line monitoring technique for electric equipments[J]. North China Electric Power, 2003(2): 23-26, 29.

[6] 钱家骊, 常越. 一种氧化锌阀片交流小电流等值电路及其应用[J]. 电瓷避雷器, 1994(3): 44-47.
QIAN Jiali, CHANG Yue. A valve small current equivalent circuit for zinc oxide and its application[J]. Insulators and Surge Arresters, 1994(3): 44-47.

[7] 周龙, 陈继东, 文远芳. 氧化锌避雷器阻性电流的谐波分析法[J]. 华东电力, 1997, 25(7): 46-47.
ZHOU Long, CHEN Jidong, WEN Yuanfang. Harmonic analysis method for zinc oxide lightning arrester impedance current[J]. East China Electric Power, 1997, 25(7): 46-47.

[8] 黄山. 信号的高精度采样中栅栏效应及克服方法[J]. 四川联合大学学报: 工程科学版, 1997, 1(6): 91-94.
HUANG Shan. The picket fence effect in precision sampling and its prevention[J]. Journal of Sichuan Union

University: Engineering Science Edition, 1997, 1(6): 91-94.

[9] 崔强, 朱洪, 相敬林. 谱分析中栅栏效应的影响及频率和幅度的精确估计方法[J]. 声学及电子工程, 1993(3): 10-13.
CUI Qiang, ZHU Hong, XIANG Jinglin. The fence effect and frequency in spectrum analysis[J]. Acoustics and Electrical Engineering, 1993(3): 10-13.

[10] 张达, 金立军. 基于频谱细化与插值法的特征谐波分析研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(4): 298-304.
ZHANG Da, JIN Lijun. Research of characteristic harmonics analysis based on spectral refinement and interpolation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(4): 298-304.

[11] 马超, 李立京, 李传生. Sagnac 型光纤电流互感器数据同步的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 38-43, 94.
MA Chao, LI Lijing, LI Chuansheng. Study of data synchronization of Sagnac fiber optic current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 38-43, 94.

[12] 李宝磊, 游大海, 李昊翔, 等. 基于 IEC61850-9-2LE 的电子式互感器校验与在线监测系统[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 136-140.
LI Baolei, YOU Dahai, LI Haoxiang, et al. Calibration and online monitoring system for electronic transformer based on IEC61850-9-2LE[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 136-140.

[13] Q/GDW 537-2010 电容型设备及金属氧化物避雷器绝缘在线监测装置技术规范[S].
Q/GDW 537-2010 technical specification for on-line insulation monitoring device of capacitive equipment and metal oxide arrester[S].

收稿日期: 2015-01-09; 修回日期: 2015-04-28

作者简介:

路光辉(1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化、高压设备状态监测及故障诊断。E-mail: luguanghui318@163.com

邓宇(1969-), 女, 本科, 工程师, 从事市场管理工作;

周钟(1983-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为高压设备智能化和局部放电状态监测。E-mail: zhouzhong.xj@foxmail.com

(编辑 张爱琴)