

基于同轴电容的谐波电压监测及影响因素分析

何文林, 詹江杨

(国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 300014)

摘要: 谐波含量是电能质量的关键指标, 高电压等级电网的谐波电压监测水平尚不能完全满足电力企业生产需求。通过建立基于同轴电容末屏接地电流的谐波电压测试系统, 分析了不同频率下电容量对谐波电压含有率测试结果的影响程度, 实测表明电容量变化对谐波电压含有率的影响不大于2%; 分析了绝缘性能与谐波电压含有率误差的关联关系, 当 $\tan\delta(f)$ 小于0.2时, 谐波电压含有率测试误差不超过2%; 实测了不同绝缘状态下 $\tan\delta(f)$ 的变化范围, 分析表明绝缘状态对谐波电压含有率影响不明显。

关键词: 同轴电容; 电流互感器; 谐波电压; 监测

DOI: 10.19585/j.zjdl.202303013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Harmonic voltage monitoring based on coaxial capacitor and the analysis of influencing factors

HE Wenlin, ZHAN Jiangyang

(State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Harmonic content is a key indicator of power quality, and the level of harmonic voltage monitoring in high-voltage power grids still cannot fully meet the production needs of electric power enterprises. By establishing a harmonic voltage testing system based on the end screen grounding current of coaxial capacitor, the influence of capacitance on the test results of harmonic voltage content at different frequencies is analyzed. The actual measurement shows that the influence of capacitance change on the harmonic voltage content is no more than 2%. The correlation between insulation performance and the error of harmonic voltage content is analyzed: when $\tan\delta$ is less than 0.2, the test error of harmonic voltage content is no more than 2%; the range of variation of $\tan\delta(f)$ under different insulation states is measured, and the analysis shows that the influence of insulation state on harmonic voltage content rate is not significant.

Keywords: coaxial capacitor; current transformer; harmonic voltage; monitor

0 引言

能源电力流经发电、输电、变电和用电的全过程, 该过程的任一节点皆可能产生谐波。谐波含量是电能质量的关键参数, 事关电能买卖双方的公平和设备的安全运行, 谐波含量包括谐波电流含量和谐波电压含量等参数。谐波监测是谐波治理的基础, 对使用CVT(电容式电压互感器)作为电压传感器的110 kV及以上电压等级电网而言, 谐波电压监测一直是谐波监测的难点。

常规火力发电、水力发电所产生的电能谐波较小, 随着分布式电源接入规模的扩大, 分布式电源出力的不确定性对配电网电压质量带来了严重影响。在谐波成因方面, 文献[1]建立了分布式电源接入电网的仿真模型, 从谐波电压含量、电

压波动两方面分析了不同接入情况下的配电网电压质量, 获得了分布式电源接入对电网电压质量的影响规律。在谐波传递方面, 文献[2]利用不同电压等级间谐波传递特性等效电路模型, 对不同电压等级间的谐波传递系数进行推导得出: 同次谐波从电网高电压等级传递到相邻低电压等级并无统一规律。在谐波危害方面, 文献[3-4]分析了谐波对电气设备安全运行的影响, 认为电气设备中的中性线会因为谐波引发过热现象, 影响电气设备的使用寿命; 变压器中性点零序谐波电流会引起500 kV变压器声音和振动异常。

在谐波检测方面, 研究方向主要聚焦在基于电磁式电压互感器、电容式电压互感器或光电式电压互感器的谐波电压检测。文献[5]提出一种基于有源电子分压器的电磁式电压互感器谐波计量

特性方法,完成了4台35 kV电磁式电压互感器谐波计量特性测量测试,测试结果表明:随着谐波次数升高,在互感器的自身电感与分布电容的谐振处,误差急剧变化,被试电压互感器在50~1 000 Hz范围内,可满足电能质量监测要求。虽然电网公司建设了电网谐波监测分析系统,但谐波电压监测数据并不完全准确。究其原因,有的谐波电压监测信号取自CVT二次侧电压,但CVT本身的设计原则是使其电容单元与电感单元仅在工频电压下谐振,导致CVT无法正确传递谐波电压^[6],误差甚至高达80%~1 200%^[7]。文献[8]明确规定:“电容式电压互感器不能用于谐波测量”。针对CVT谐波测量数据准确度无法满足电能质量监测系统要求的问题,文献[9]在常规标准型CVT的分压器低压端串入电容,利用电容分压原理获得电网谐波测量信号,110 kV样机谐波准确度试验结果表明:在2~50次谐波信号测量范围内能满足电能质量谐波监测要求。文献[10]对光学电压互感器传变特性进行了研究,分析了采样速率、量化误差、噪声以及频谱泄漏等要素对谐波测量准确性的影响,发现随着温度的升高,光学电压互感器的噪声会出现明显的畸变。

综上所述,分布式电源产生的谐波电压在电力网的不同电压间无统一传递规律,对电网设备产生负面影响。本文建立了基于同轴电容接地电流的谐波电压检测系统,测试了电容型电流互感器主电容量的频率响应特性,分析了主电容绝缘性能对谐波电压测试结果的影响。

1 基于同轴电容接地电流的谐波电压监测

电力系统中拥有数量庞大、种类各异的容性设备,这些容性设备有外引的工作接地线,流经工作接地线的电流与容性设备的工作电压直接相关。以耦合电容器、无功补偿电容器为代表的容性设备,电容主屏为饼式电容结构。以电容型电流互感器、电容型套管为代表的容性设备,电容主屏为典型的同轴电容结构。与饼式电容结构相比,同轴电容结构具有较好的频率响应特性^[11]。电容型电流互感器工作接地具有结构简单、外引工作接地线较长、安装接地电流传感器安全性高的特点。基于电容型电流互感器的谐波电压监测

原理如图1所示。

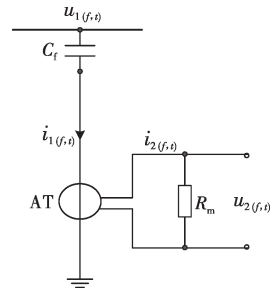


图1 谐波电压检测原理

Fig.1 Detection principle of harmonic voltage

理想状态下的电流互感器主屏可表示为无损耗的纯电容 C_f ,在电网一次电压 $u_{1(f,t)}$ 的作用下,互感器工作接地线上产生电流 $i_{1(f,t)}$,经接地电流传感器 AT 转换成电流 $i_{2(f,t)}$,通过电阻 R_m 采样形成可供后续处理的信号 $u_{2(f,t)}$ 。

在频率为 f 的电网电压 $u_{1(f,t)}$ (见式(1))作用下,输出的 $u_{2(f,t)}$ 及其有效值 $U_{2(f)}$ 如式(2)、式(3)所示:

$$u_{1(f,t)} = U_{mf} \sin(2\pi ft + \varphi_f) \quad (1)$$

$$u_{2(f,t)} = K \times f \times c_f \times U_{mf} \sin(2\pi ft + \varphi_f + 90) \quad (2)$$

$$U_{2(f)} = I_{1(f)} \times k \times R_m \quad (3)$$

式中: K 为常数, $K=2\pi k \times R_m$; k 为 AT 的变比; c_f 为频率 f 时的主屏电容量; U_{mf} 为频率 f 时的电压幅值; φ_f 为电压 $u_{1(f,t)}$ 的初始相位。

由式(1)~(3)可知,基于电容型电流互感器接地电流的谐波电压检测结果 $u_{2(f,t)}$,其幅值 U_2 与一次电压 $u_{1(f,t)}$ 的幅值 U_{mf} 成正比例关系,比例系数与 $u_{1(f,t)}$ 的频率 f 和该频率下的主屏电容量 C_f 成线性相关。同时, $u_{2(f,t)}$ 频率与 $u_{1(f,t)}$ 的频率保持不变。

谐波次数 h 是指对周期性交流量进行傅立叶级数分解,得到频率为基波频率大于1的整数倍分量。按 GB/T 14549 的规定^[8], HRU_h (谐波电压含有率)是指周期性交流量中含有的第 h 次谐波分量的均方根值与基波分量的均方根值之比,如式(4)所示:

$$H_{RUh} = \frac{U_{m50 \times h}}{U_{m50}} \quad (4)$$

式中: $U_{m50 \times h}$ 为 h 次谐波电压幅值; U_{m50} 为基波电压幅值。

联合式(2)~(4)得到 HRU_h 与 $U_{2(f,t)}$ 的关系式(5):

$$H_{RUh} = \frac{U_{2(50 \times h)}}{U_{2(50)}} \times \frac{50}{(50 \times h)} \times \frac{c_{50}}{c_{50 \times h}} \quad (5)$$

式中: $U_{2(50 \times h)}$ 为 U_2 中第 h 次谐波电压峰值; $U_{2(50)}$ 为 U_2 中基波电压峰值; c_{50} 为基波时主屏电容量; $c_{50 \times h}$ 第 h 次谐波时主屏电容量。

由式(5)可知, 基于接地电流检测的谐波电压含有率计算结果, 除与 $U_{2(f)}$ 幅值大小有关外, 还与电流互感器主屏电容量随频率的变化程度有关。

2 电流互感器主电容量的频率响应特性

电流互感器是一种实现电压隔离、电流转换的电网常用装备。为实现电压有效隔离, 110 kV 及以上电压等级电流互感器的一、二次绕组之间通常采用电容式结构, 按结构形式可分为正立式和倒置式 2 种, 2 种互感器的电容屏结构如图 2 所示。

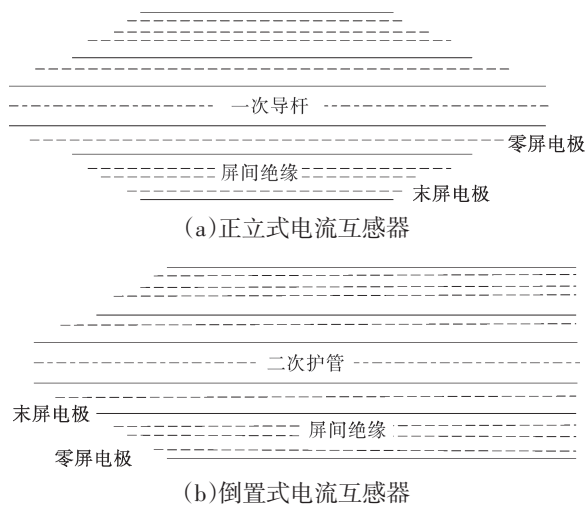


图2 电流互感器的电容屏结构

Fig.2 Capacitor screen structure of current transformer

由图2可知, 无论正立式还是倒置式电流互感器, 电容屏皆为同轴结构且都有末屏, 二者的差异在于: 正立式电流互感器的电容屏以高电压的一次导杆为圆心, 而倒置式电流互感器的电容屏以低电压的二次护管为圆心。

本文采用FDS(频域介电谱)测试仪开展电流互感器主电容量的频率响应特性测试, 测试原理如图3所示。

检测电流互感器主电容量频率响应特性的FDS测试仪由低压宽频信号源、高压宽频放大器

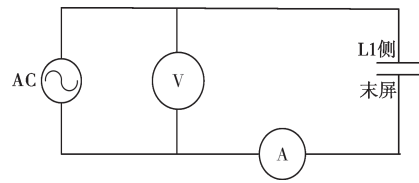


图3 FDS测试原理

Fig.3 Testing principle of FDS

和微电流检测模块等组成, 能实现电流互感器主屏电容量、介质损耗因素的宽频域检测。测试仪应满足以下技术要求: 频率范围不小于 5 kHz; 空载电压输出不小于 200 V; 电容量测试范围为 10~20 000 pF; 微电流测试范围不小于 20 mA。

电流互感器主电容量的频率响应特性测试接线与介质损耗因数测量的正接法试验接线相同。拆除电流互感器的所有外部引线后, FDS测试仪的电压输出端接电流互感器的高压 L1 端, FDS测试仪的信号线接电流互感器的末屏端子, 电流互感器的所有二次引线端子短路接地。为提高测试结果的可信度, 测试线应采用屏蔽导线, 屏蔽线就近接地, 电流互感器的外表面应保持清洁、干燥。现场干扰较严重时, 通过增加FDS测试仪的输出电压, 提高试验信噪比, 提升测试准确性。

使用FDS测试仪, 测得某 220 kV 电压等级线路三相倒置式电流互感器主屏电容量的频率响应特性如图4所示。

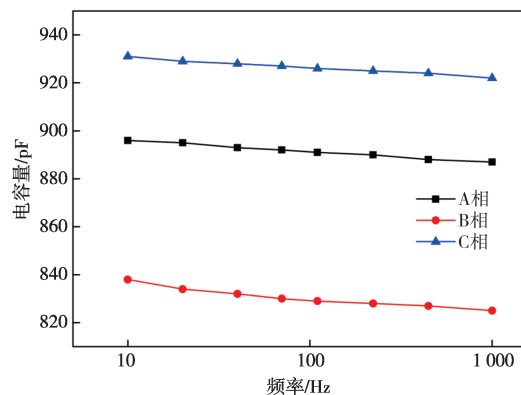


图4 电容量的频率响应特性测试结果

Fig.4 Test results of frequency response characteristics of capacitance

对LB-220(正立式)、LVB-220和CTH-550(倒置式)不同电压等级、不同结构形式的电流互感器开展了主屏电容量的频率响应特性测试, 得

到如下两条测试结论:

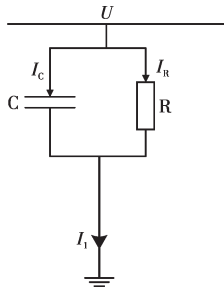
1) 主屏电容量与试验频率呈单调下降关系。

2) 在 10~1 000 Hz 的频率范围内, 任何频率下的电容量与 50 Hz 时的电容量相比, 变化率不超过 ±2%。

结合测试结论 2) 及式(5)得出: 不同频率下电容量的变化引起的谐波电压含有率 H_{RUh} 误差不大于 2%, 可满足 H_{RUh} 监测的工程需求。

3 绝缘性能对谐波电压测试结果的影响

真实的电流互感器主屏不是无损耗的纯电容, 无论数值大小, 皆存在一定的有功损耗, 有功损耗影响接地电流幅值的大小。电流互感器等效电路如图 5 所示。



注: C 为主屏等值电容量; R 为主屏等值电阻。

图 5 电流互感器等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of current transformer

电容量和介质损耗值 $\tan\delta$ 是表征电流互感器绝缘性能的主要参数。电流互感器投入系统运行后, 在电、热等因素的综合作用下, 绝缘性能可能发生劣化^[12], 测试结果表现在等值电容量 C 和等值电阻 R 的改变^[13]。在电流互感器一次不同频率电压 $U(f)$ 的作用下, 流过等值电容、等值电阻的电流有效值分别为 I_C 、 I_R , 则电流互感器工作接地电流的介质损耗因数为:

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} \quad (6)$$

则不同频率 f 下的 $I_{1(f)}$ 为:

$$I_{1(f)} = I_{C(f)} \times \sqrt{\tan^2\delta(f) + 1} \quad (7)$$

在不同频率 f 的电容量 C 基本不变的前提下, 由于电流互感器不同频率下介质损耗因数 $\tan\delta(f)$ 的存在, 引起互感器工作接地电流相对于纯电容电流 I_c 的变化率 $\Delta I_{1(f)}$ 为:

$$\begin{aligned} \Delta I_{1(f)} &= \frac{I_{1(f)} - I_{C(f)}}{I_{C(f)}} \\ &= \sqrt{\tan^2\delta(f) + 1} - 1 \end{aligned} \quad (8)$$

结合式(3)、式(4)、式(8)可知, $\Delta I_{1(f)}$ 值的大小表征了绝缘性能 $\tan\delta(f)$ 对 H_{RUh} 的影响程度。

H_{RUh} 测试误差与 $\tan\delta(f)$ 的关系如图 6 所示。由图 6 可知, H_{RUh} 误差随着 $\tan\delta(f)$ 的增加而变大, $\tan\delta(f)$ 小于 0.2 时, H_{RUh} 测试误差不超过 2%。

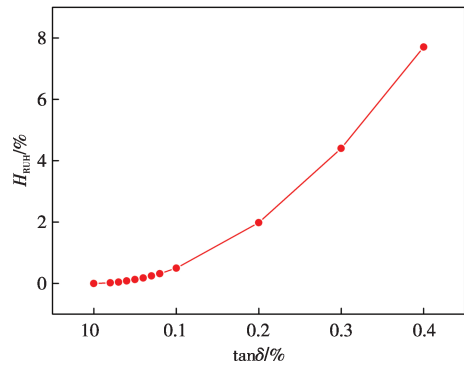


图 6 H_{RUh} 误差与 $\tan\delta(f)$ 的关系

Fig.6 Relationship between H_{RUh} errors and $\tan\delta(f)$

某 220 kV 电压等级 LB-220 型电流互感器, A 相正常运行时发生金属膨胀器冲顶。事后对该线路三相电流互感器进行了绝缘油色谱分析、高电压介质损耗因数试验和局部放电量测试, 测试结果表明: A 相互感器的 3 项试验结果皆异常, 存在绝缘缺陷; B、C 相互感器测试结果合格, 绝缘无异常。3 台电流互感器在不同试验频率下的介质损耗因数 $\tan\delta(f)$ 测试结果^[14] 如图 7 所示。

由图 7 可知, 绝缘状态正常的 B、C 相相电流

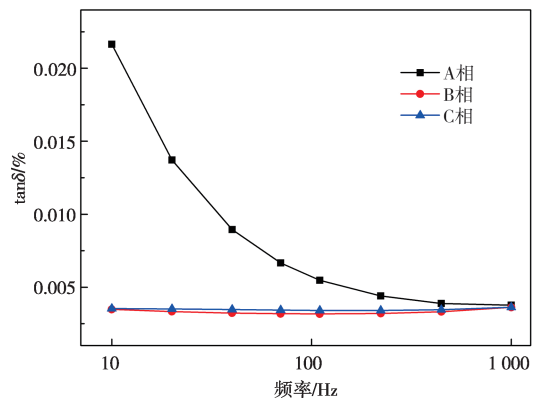


图 7 不同频率下的介质损耗因数

Fig.7 Dielectric loss factors at different frequencies

互感器不同频率 f 下的 $\tan\delta(f)$ 几乎不变;而存在绝缘缺陷的A相电流互感器的 $\tan\delta(f)$ 随频率 f 的增大而减小,但变化范围非常有限,在10~1 000 Hz,频率内的变化范围为0.02~0.004。结合图6、图7可知,电流互感器绝缘状态对 H_{RUh} 有一定影响,但影响程度非常小。

4 结论

随着太阳能、风能等新型发电接入规模的增加和电力电子器件的普遍应用,能源电网中的谐波含量存在增大的趋势^[15-19],影响电能买卖的公平性和电气设备的运行安全性。谐波测试是实现电能质量评估、谐波治理的基础,常规基于CVT的检测方法无法满足谐波电压含量准确检测的要求。本文以同轴电容末屏接地电流为传感载体,建立了谐波电压监测系统,给出了谐波电压测试方法和影响因素。研究结论如下:

1)分析了不同频率下电容量对 H_{RUh} 测试结果的影响程度,实测结果表明电容量对 H_{RUh} 的影响不大于2%。

2)给出了绝缘性能与 H_{RUh} 误差的关联关系,分析表明 $\tan\delta(f)$ 小于0.2时, H_{RUh} 测试误差不超过2%。

3)实测了不同绝缘状态下 $\tan\delta(f)$ 的变化范围,分析表明绝缘状态对 H_{RUh} 影响不大。

参考文献

- [1] 徐钦,袁奔.分布式电源接入对配电网电压质量的影响研究[J].电工技术,2020(3):15-17.
XU Qin, YUAN Ben. Research on influence of distributed power supply access on voltage quality of distribution network[J]. Electric Engineering, 2020(3):15-17.
- [2] 薛俊茹,赵世昌,李晓伟,等.谐波在不同电压等级下传播机理的研究[J].青海电力,2016,35(3):38-41.
XUE Junru, ZHAO Shichang, LI Xiaowei, et al. Research on the propagation mechanism of harmonic wave under different level voltages[J]. Qinghai Electric Power, 2016, 35(3):38-41.
- [3] 孔小丽.谐波对电器设备的影响分析[J].黑龙江科学,2020,11(24):110-111.
KONG Xiaoli. Analysis of influence of harmonic wave on electrical equipment[J]. Heilongjiang Science, 2020, 11(24):110-111.
- [4] 张建平,潘星.500 kV变压器异常噪声与振动的原因分析[J].浙江电力,2006,25(3):6-10.
ZHANG Jianping, PAN Xing. Analysis for abnormal noise and mechanical vibration of 500 kV transformer[J]. Zhejiang Electric Power, 2006, 25(3):6-10.
- [5] 姜春阳,刘俭,王雪,等.电磁式电压互感器谐波误差测量方法研究[J].中国测试,2021,47(3):163-168.
JIANG Chunyang, LIU Jian, WANG Xue, et al. Research on test method of harmonic measurement error of inductive voltage transformer[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(3):163-168.
- [6] 谢伟伦,黄志威,刘小沛.杂散电容对CVT谐波测量影响的处理方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(2):59-63.
XIE Weilun, HUANG Zhiwei, LIU Xiaopei. Study on the processing method of influence of stray capacitance on CVT harmonic measurement[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2):59-63.
- [7] 陈一惊,刘坤雄,张小庆,等.基于电容电流的谐波电压在线监测系统研制[J].智慧电力,2021,49(6):67-74.
CHEN Yicong, LIU Kunxiong, ZHANG Xiaoqing, et al. Development of voltage harmonics online measurement system based on capacitor current[J]. Smart Power, 2021, 49(6):67-74.
- [8] 国家技术监督局.电能质量 公用电网谐波:GB/T 14549—1993[S].北京:中国标准出版社,1994.
- [9] 王玲,冯宇,杨柳,等.电容式电压互感器谐波测量方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(1):95-100.
WANG Ling, FENG Yu, YANG Liu, et al. Study on harmonic measurement method of capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1):95-100.
- [10] 王宇航,刘有为.光学电压互感器谐波测量影响因素及分析[J].自动化仪表,2021,42(6):14-18.
WANG Yuhang, LIU Youwei. Influencing factors and analysis of harmonic measurement of optical voltage transformer[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(6):14-18.
- [11] 肖耀荣,高祖绵.互感器原理与设计基础[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,2003.
- [12] 王世阁,张军阳.互感器故障及典型案例分析[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [13] 何文林.电容型电流互感器主屏局部绝缘缺陷检测[J].华东电力,1994,22(7):10-12.
HE Wenlin. Detection of local insulation defects in the main screen of capacitive current transformer[J]. East China Electric Power, 1994, 22(7):10-12.

- [14] 詹江杨,何文林,杨智,等.油浸正立式电流互感器绝缘受潮缺陷的诊断分析[J].浙江电力,2018,37(3):17-21.
ZHAN Jiangyang, HE Wenlin, YANG Zhi, et al. Diagnosis on insulation damp defects of oil-immersed vertical current transformer [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(3):17-21.
- [15] 陈砚圃,杨蕾,张介秋.基于组合余弦窗加权的高精度电力谐波分析[J].高压电器,2021,57(8):127-135.
CHEN Yanpu, YANG Lei, ZHANG Jieqiu. Analysis on high precision power harmonic based on combinatorial cosine window weighting method [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(8):127-135.
- [16] 王鹤蓉,关焕新,郭伟坤,等.基于混合卷积窗三谱线插值的谐波分析方法[J].山东电力技术,2021,48(2):30-34.
WANG Herong, GUAN Huanxin, GUO Yishen, et al. A triple-spectrum-line interpolation harmonic analysis method based on hybrid convolution window [J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(2):30-34.
- [17] 冷全超,张展,王维,等.改进的变步长自适应谐波检测算法[J].电测与仪表,2022,59(11):133-138.
LENG Quanchao, ZHANG Zhan, WANG Wei, et al. Improved adaptive harmonic detection algorithm with variable step size [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11):133-138.
- [18] 马明,杜婉琳,白雪儿,等.配电网中串联补偿电容方案的谐波谐振分析[J].电测与仪表,2022,59(4):159-163.
MA Ming, DU Wanlin, BAI Xueer, et al. Harmonic resonance analysis of series compensation capacitor scheme in distribution system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4):159-163.
- [19] 罗海荣,徐丽娟,张逸,等.基于监测数据相关性分析的谐波趋势预警方法[J].电测与仪表,2022,59(5):123-128.
LUO Hairong, XU Lijuan, ZHANG Yi, et al. Harmonic trend warning method based on correlation analysis of monitoring data [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5):123-128.

收稿日期:2022-06-06;修回日期:2022-07-13

作者简介:

何文林(1963),男,教授级高级工程师,从事电气一次设备绝缘试验、故障诊断、处理及科学研究。

(本文编辑:童凯)