

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.07.016

电网设备状态检测真型实验平台的设计与实现

段大鹏, 程 序, 任志刚, 陶诗洋, 谷 禹, 李 伟, 张学哲, 陈 平

(国网北京电力科学研究院, 北京 100075)

摘要: 针对电网设备状态检测技术推广应用过程中,面临的抗干扰技术研究、仪器性能检测与比对、技术培训、新技术研究等工作缺乏真型设备实验平台的问题,对状态检测特别是带电检测技术的研究应用现状及面临的问题进行了分析,提出了电网设备状态检测实验平台的设计方案。利用110 kV GIS、变压器、电缆及10 kV开关柜、箱变等真型设备,在机械结构、绝缘性能、内置传感器优化布局、典型缺陷设置等方面进行了改造,研制了变压器、GIS内置特高频局放传感器、高压电缆内置电容型高频局放传感器,并建立了基于真型电网设备状态检测的实验平台。在该平台上对变压器、GIS、高压电缆、配电设备的典型局部放缺陷进行了同步模拟与检测实验。结果表明:该平台能够完成电网设备状态检测技术的研究开发、技能培训、仪器校验与比对等工作,能够真实模拟变电站运行工况、复杂电磁环境下各种输变配设备典型缺陷,对推动状态检测技术的研究与应用具有重要的实际意义。

关键词: 电网设备; 状态检测; 真型模型; 局部放电; 缺陷模拟

Design and Implementation of Experiment Platform for Power Equipment State Detection

DUAN Dapeng, CHENG Xu, REN Zhigang, TAO Shiyang, GU Yu,
LI Wei, ZHANG Xuezhe, CHEN Ping

(State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: Focus on the problem of lacking of power equipment experiment system for researching of state detection technology, the present situation and problems of state detection, especially charged testing technology are summarized in this paper firstly. Based on the actual situation, the design scheme of simulation experiment platform for power equipment state detection is put forward. Then, design improvements of mechanical structure, insulating property, optimal inner sensor placement and typical defects are completed making use of GIS of 110 kV, transformer, HV cable, switchgear of 10 kV, prefabricated substation etc. Inner partial discharge sensors are designed and set in the transformer, GIS and HV cable. Experiment platform for power equipment condition monitoring is completed. Using this system, the partial discharge defects in the equipment are set and detected using the inner sensors and portable partial discharge detection instruments. R&D, application, skill training, instrument calibration and comparison of power equipment state detection technology can be completed using the system. The system can simulate the actual operating condition of substation and typical defects of various transmission and distribution equipment, and is of great significance to research and application of state detection technology.

Key words: power equipment; state detection; real model; partial discharge; defects simulation

0 引言

随着特高压坚强智能电网的建设与发展^[1-10],人们对供电可靠性要求不断提高,特别是以GIS、电缆

为代表的电力设备的大量应用及状态检修的深入推进,原有的设备试验及检修规程的局限性逐渐显现,迫切需要引进状态检测技术^[11-19]。状态检测技术可在设备运行状态下动态获取设备实际的状态量,它具有及时性和准确性的特点,有利于提高设备运

收稿日期:2017-02-21; 修回日期:2017-03-29

行的可靠性,降低设备检修成本,是实施电力设备状态检修的必要技术手段。

然而,在随着带电检测技术的深入推广,该领域的技术难题不断显现,亟待解决,主要表现在以下几个方面:①局部放电带电检测技术推广面临定性、定量和定位方面技术瓶颈;②状态检测仪器种类、品牌较多,标准不一,如何校验各种状态检测仪器的现场检测效果及应用条件,是状态检测技术推广过程中要面临的难题;③目前电力设备的状态检测技术手段单一,主要集中在局放和红外检测,不能全面掌握设备状态;④目前国内尚无电力设备状态检测的故障模拟及实操、培训、试验平台。

因此,为更好地规范和指引各类带电检测和诊断技术的现场应用,研究开发新的带电检测技术,国内外有的研究机构及电力企业建立了一些变压器、GIS、电缆等相关设备的状态检测实验研究平台或系统,如清华大学、华北电力大学、上海交通大学、江苏电力科学研究院等。然而,目前建立的电力设备状态检测实验研究平台多数为单台设备或者是按比例缩小的设备模型,如几个 GIS 气室等。因此,为了更深入的研究真实电力设备典型缺陷的发生、发展规律及适用的检测技术,掌握局部放电信号在真实设备内部的传播规律及不同设备间的相互影响,文中基于 110 kV 及 10 kV 真实设备设计建成了电力设备状态检测技术真型实验研究平台。并在该真型实验平台上对典型局部放缺陷进行了模拟与检测实验。结果表明,该平台能够完成电网设备状态检测技术的研究开发、技能培训、仪器校验与比对等工作,能够真实模拟变电站运行工况、复杂电磁环境下各种输变配设备典型缺陷,对推动状态检测技术的研究与应用具有重要的实际意义。

1 检测实验平台整体架构

该平台的功能定位为:①电网设备带电检测技术研究;②输变电设备故障、缺陷复现及现场抗干扰技术研究;③各种带电检测仪器、仪表的功能及有效性检验;④技能培训。

电网设备状态检测实验平台功能架构图见图 1,是由变压器、GIS、高压电缆及配网 4 个子平台组成。

检测实验平台的整体设计思路如下:

1)电网设备状态检测实验平台是一套完整的变电站运行工况模拟系统。

2)检测实验平台能够模拟变电站运行工况下电磁环境,能够研究各种干扰环境条件下状态检测的测试与诊断方法。

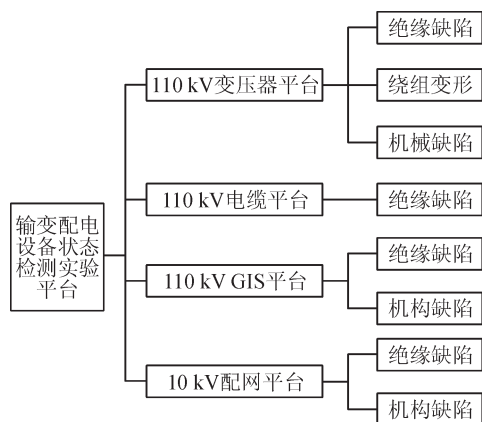


图 1 电网设备状态检测实验平台功能架构

Fig. 1 Function structure of simulation experiment system for power equipments condition monitoring

3)检测实验平台能够模拟一次设备典型缺陷,能够满足带电检测技术研究和相关培训的要求。

4)检测实验平台具有检测功能,内置安装各种传感单元,满足开展带电检测技术研究和培训等工作。

电网设备状态检测实验平台主接线图见图 2。平台有 2 路试验电源,均来自 10 kV 侧。1 路是 1 500 kW/10 kV 调压电源,可进行短时间内的试验;1 路是从配电室 10 kV 开关柜直接引出的电源可满足平台较长时间运行的要求。10 kV 系统采用单母线分段接线方式,2 路电源分别接到 10 kV 201 和 202 进线开关,由 1 路变压器出线柜输出到主变压器的低压端,再由主变压器升压至 110 kV 后与电缆一端相连,电缆的另一端与 GIS 相连。

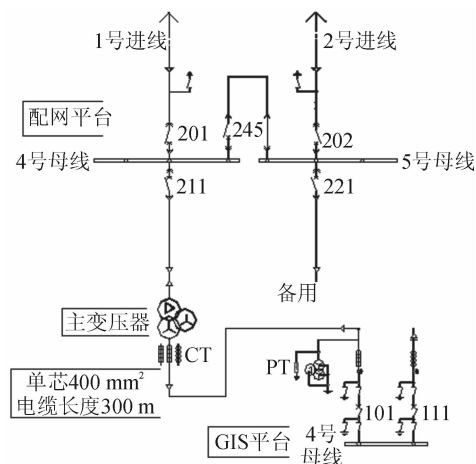


图 2 电网设备状态检测实验平台主接线图

Fig. 2 Main connection of simulation experiment system for power equipments condition monitoring

该平台包括以下主要设备:110 kV 电力变压器 1 台 (50 MVA)、110 kV XLPE 电缆 3 组 (300 m×3); 110 kV GIS 2 个间隔;110 kV CT 3 只;110 kV CVT

3只;110 kV MOA 3只;10 kV 开关柜 9面;10 kV XLPE 电缆 4条(60 m×4);占地约 500 m²。

2 真型实验平台的设计与实现

文中利用真实的电网设备进行改造,建设电网设备状态真型设备检测实验平台。

2.1 变压器状态检测实验子平台

变压器试品模型为沈阳某变压器公司生产的 SFSZ9 型三相三绕组 110 kV 电力变压器。其主要额定参数为:额定容量 50 MVA;电压组合 (110±8×1.25%)/(36.6±2×2.5%)/10.5 kV;冷却方式 ONAN/ONAF 70%/100%;额定频率 50 Hz;联结组标号 YN yn0 d11;空载损耗 42 kW;空载电流 0.35%;短路阻抗分别为高压—中压 9.91%,高压—低压 18.09%和中压—低压 67%。该台变压器长 5.59 m,宽 2 m,高 2.64 m。

文中研制了内置特高频局放检测与定位传感器,传感器采用平面等角螺旋传感器,按照使用条件,检测传感器须安装在变压器油箱外壁上的指定位置处。封装后的检测传感器主要有传感器、密封结构、固定结构 3 部分组成。见图 3。传感器安装孔直径 100 mm。

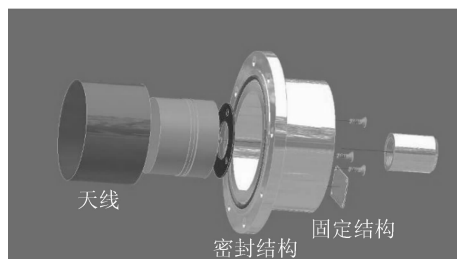


图 3 变压器内置 UHF 局放检测传感器封装示意图

Fig. 3 Sketch figure of UHF antenna for partial discharge monitoring

在该变压器上两侧共安装了 8 个内置 UHF 局放检测传感器。通过仿真优化,传感器采取大 Y 型阵列布置,具体安装位置见图 4。图 4 中的 4 个圆圈标注,在变压器的前后两侧分别进行了这样的布置。



图 4 变压器 UHF 检测传感器安装位置

Fig. 4 Real object of UHF antenna for partial discharge monitoring

2.2 GIS 状态检测实验子平台

GIS 试品模型为上海某电气有限公司生产,型号为 ZF3-110D,一个进线间隔和一个出线间隔,该 GIS 平台主要包括断路器、电压互感器、隔离开关、接地开关、母线等;结构为母线三相共仓,断路器、电压互感器等其他设备分仓。该平台实物图见图 5。



图 5 GIS 平台实物图

Fig. 5 Real object of GIS

文中研制的特高频内置局放传感器,采用了金属圆柱形电极,还包含支撑、紧固、密封、工频保护电阻等,结构示意图见图 6。传感器位置与气隔分布见图 7,图 7 中 S₁—S₄ 为传感器。

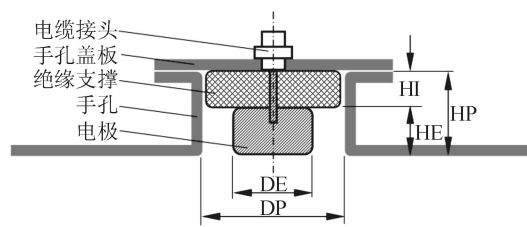


图 6 GIS 内置 UHF 传感器结构示意图

Fig. 6 Structure sketch figure of coupling

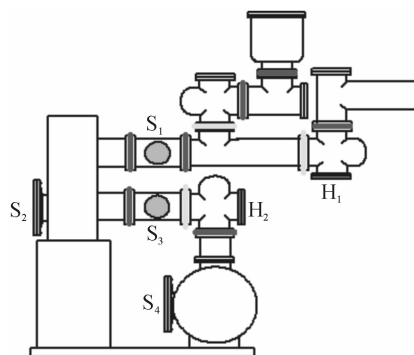


图 7 GIS 平台传感器安装位置示意图

Fig. 7 Positon of the UHF sensors on GIS

2.3 高压电缆状态检测实验子平台

高压电缆平台为一个包含 A、B、C 三相的 110 kV 实体电缆系统,平台完全按照实际电缆线路运行

模式进行建设。每相电缆长约 300 m, 电缆中间安装 2 组接头, 将电缆均匀分成 3 段, 并做交叉互联接地。电缆模拟平台结构见图 8。接头 1 和接头 2 为设置缺陷接头; 电缆本体、其他接头与电缆终端均不含缺陷; 其中接头 2 采用的是插入式装配型绝缘接头, 其具有金具免模压结构, 可方便调整缺陷类型、缺陷大小。

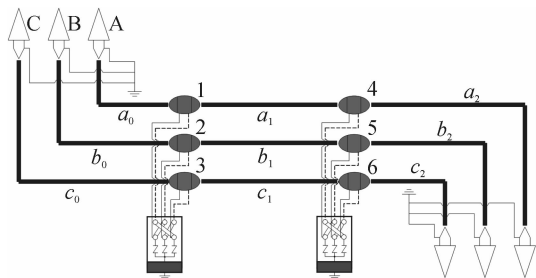


图 8 高压电缆平台接线示意图

Fig. 8 Structure figure of HV cable

电缆缺陷仿真平台主要模拟局部放电缺陷和电缆老化缺陷。对局部放电缺陷共设计与构造了 4 种典型缺陷, 分别为半导体层尖端缺陷、应力锥错位缺陷、电缆主绝缘划痕和气隙缺陷。缺陷部位选取在真实的 110 kV 交联电缆接头内部, 制作过程中要求能够真实的反应电缆接头在生产环节与安装环节产生的典型缺陷模式。

文中研制了电容式内置高频局放传感器, 传感器的结构示意图见图 9。一组内置式传感器分为 2 只, 分别安装在中间接头两侧, 用于识别局部放电信号是产生于接头两侧还是中间接头内部。具体安装位置为电缆中间接头两端的外半导体屏蔽层外, 使图 9 中的铜箔电极与半导体屏蔽层接触, 使铝外壳与电缆的铝护套可靠等电位连接。

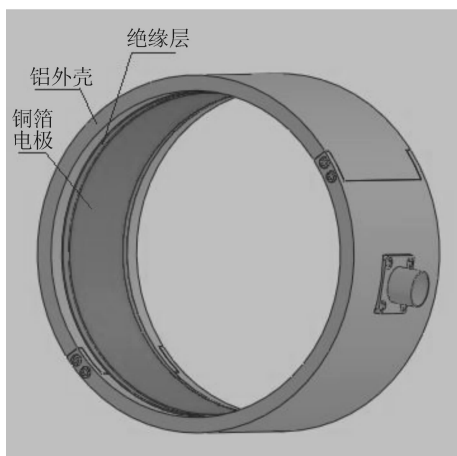


图 9 内置式传感器结构示意图

Fig. 9 Structure sketch figure of inner sensor

2.4 配网设备状态检测实验子平台

配网设备子平台包括 10 kV 中置式开关柜、10 kV

交联聚乙烯电缆、交直流屏、箱式变电站。配网设备平台实物见图 10。该平台共包括由 9 面开关柜, 接线方式为单母线分段接线。并且设计有电缆夹层, 10 kV 电缆线路全部通过电缆夹层进出。



图 10 配网设备平台实物图

Fig. 10 Real object of distribution network equipments

该平台可以复现实际配网设备中经常出现的母线、支撑绝缘子、电缆终端、开关柜等各种设备的局部放电典型缺陷, 研究局部放电故障的地电波、超声波、高频以及 UHF 电磁波等信号的特征和传播特性。

配网设备平台的局部放电缺陷设计有母线放电模型设计、支撑绝缘子放电模型设计、电缆终端缺陷模型设计和主绝缘内部放电模型设计。在配网设备平台还进行了断路器载流过热缺陷的设计。

2.5 真型实验平台的整体联调

包含变压器、GIS、高压电缆、配网设备组成的电网设备状态检测实验真型平台建设完成以后, 并按照图 2 完成系统接线, 然后进行系统加压联调。目的是通过加压试验检验 4 个平台设备的绝缘性能、控制性能、设计缺陷的放电情况以及安装的内置局部放电传感器的检测性能。

按照原设计, 可以从 10 kV 侧采取 2 种方式为整个实验平台提供电源, 分别为 10 kV 直供方式与 0~10 kV 三相可调升压方式。联调工作采取 0~10 kV 可调升压方式加压, 在升压过程中观测电源电流、平台设备绝缘情况、内置局部放电传感器检测信号情况。变压器平台内置特高频传感器、GIS 内置特高频传感器以及高压电缆内置电容传感器均能够检测到明显的局部放电信号, 且起始电压基本处于 40~45 kV 范围内。电源侧电压一直升至 10 kV, 110 kV 侧电压达到额定电压 110 kV, 然后整个实验平台在该电压下持续运行 30 min, 所有设备绝缘性能良好, 无击穿, 然后降压, 系统联调完成。

系统联调试验表明, 实验平台达到了原设计要

求,设计、安装的局部放电内置传感器性能优良,能够真实模拟变电站运行工况、复杂电磁环境下各种输变配设备典型缺陷。

3 典型局放缺陷模拟与检测

3.1 平台缺陷模拟与局放检测案例

应用该平台完成了十余起电网设备的典型缺陷模拟与局部放电检测研究工作,文中给出2个案例,分别为GIS高压导体上的金属尖端缺陷与GIS内部脱落漆皮缺陷。

3.1.1 GIS高压导体上的金属尖端缺陷

在高压导体上固定直径为 $\Phi 0.35$ mm,长度为9 mm的尖端,方向为垂直向下,见图11。局部放电起始电压为43 kV,分别用外置式与内置式特高频局部放电传感器进行检测,得到的PRPS图谱见图12。从图12可知,局放信号强度中等,相位分布特征明显。两者比较可见,内置传感器的灵敏度与抗干扰能力明显优于外置传感器。

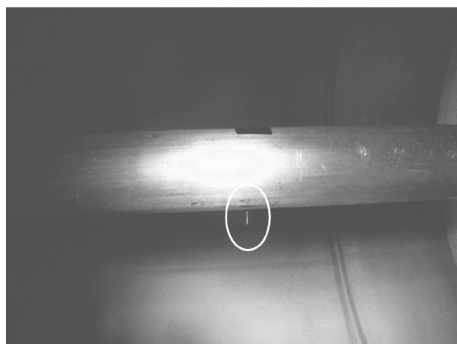
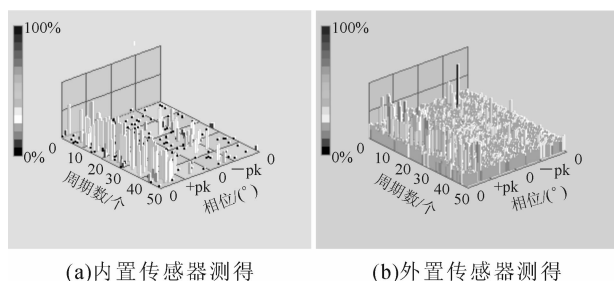


图11 金属尖端缺陷照片

Fig. 11 Photo of metal point in GIS



(a)内置传感器测得

(b)外置传感器测得

图12 内置与外置传感器测得的PRPS图谱

Fig. 12 PRPS maps of inner and external sensor

3.1.2 GIS内部脱落漆皮缺陷

在实际GIS运维检修过程中,发现某厂家GIS设备存在内壁漆皮大面积脱落现象,故在该实验平台进行缺陷模拟,以深入研究通过状态检测发现该缺陷的检测与诊断方法。将现场检修清理出来的漆皮取回实验室,将面积小于 2 cm^2 的碎漆皮4块、面积不小于 10 cm^2 的较大漆皮2块自由放置于GIS

筒底,见图13。局部放电起始电压为60 kV,局部检测PRPS图谱见图14。从图14可知,信号较弱,相位分布特征不明显。

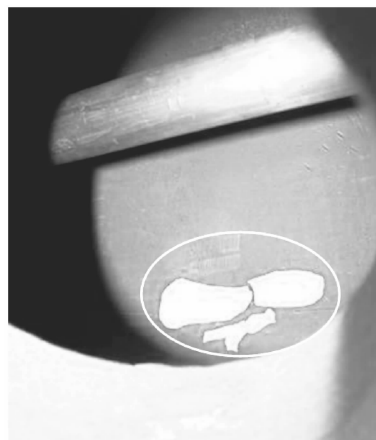
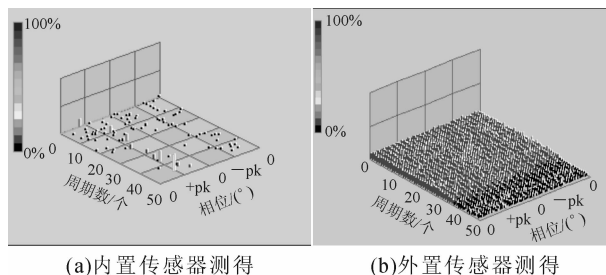


图13 GIS内部脱落漆皮缺陷照片

Fig. 13 Photo of metal point in GIS



(a)内置传感器测得

(b)外置传感器测得

图14 内置与外置传感器测得的PRPS图谱

Fig. 14 PRPS maps of inner and external sensor

通过以上2个案例可见,该实验平台能够模拟设备的典型缺陷,研制的内置局放传感器灵敏度与抗干扰性能优良,达到了设计要求与功能。

3.2 平台应用情况小结

依托该平台完成了或正在进行20余项科技项目的研究工作;完成了GIS内部脱落漆皮、内部粉末、电缆终端气隙缺陷等40余次典型缺陷的复现与检测试验工作;完成了约600人次的输变电设备带电检测技能培训班的技能培训与比武;完成了开关柜暂态地电压局放检测仪、GIS局放声电联合检测仪、变压器超声波局放定位仪、电力电缆振荡波局放测试装置、GIS超声波局放检测仪等100多款状态检测仪器或检测系统的性能校验工作。

4 结论

1)设计并建立了电网状态检测技术真型实验平台并得到成功应用,能够复现典型缺陷,模拟电网设备实际运行工况与电磁环境,能够在此基础上研究各类状态检测技术,可真实模拟变电站运行工况、电磁环境以及各类设备典型缺陷,平台各项指

标达到设计要求。

2)研制了变压器、GIS 内置特高频局放传感器、高压电缆内置电容型高频局放传感器, 实际缺陷模拟及检测结果验证了其良好的检测灵敏度与可靠性。

3)下一步可以应用该硬件平台进一步研究其他绝缘、化学、物理及机械方面的缺陷模拟与状态检测技术、智能一次设备及智能电网建设, 重点可在传感器技术研发及抗干扰方面开展研究工作。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010. LIU Zhenya. Technology of smart grid[M]. Beijing:China Electric Power Press,2010.
- [2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005. LIU Zhenya. Extra high voltage power grid[M]. Beijing: China Economic Press,2005.
- [3] 律方成,金虎,王子建,等. 252 kV GIS 局部放电实验仿真平台的设计[J]. 高压电器,2014,50(7):21-23. LYU Fangcheng, JIN Hu, WANG Zijian, et al. Design of the 252 kV GIS partial discharge experimental simulation platform[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(7):21-23.
- [4] 徐春社,孙振权,赵学风,等. 油纸绝缘气隙模型局部放电特性试验研究[J]. 高压电器,2012,48(2):34-41. XU Chunshe, SUN Zhenquan, ZHAO Xuefeng, et al. Experimental investigation of the partial discharge feature with the air gap model in oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(2):34-41.
- [5] 李兴旺,卢启付,李端姣,等. GIS 局部放电特高频在线监测系统传感器配置方案研究[J]. 高压电器,2012,48(11):70-74. LI Xingwang, LU Qifu, LI Duanjiao, et al. Transducers arrangement of the UHF-PF online monitoring system for GIS[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(11):70-74.
- [6] 刘君华,姚明,黄成军,等. 采用声电联合法的 GIS 局部放电定位试验研究[J]. 高电压技术,2009,35(10):2458-2463. LIU Junhua, YAO Ming, HUANG Chengjun, et al. Experimental research on discharge localization in GIS using ultrasonic associated with electromagnetic wave method[J]. High Voltage Engineering,2009,35(10):2458-2463.
- [7] 王国利,郝艳捧,李彦明. 电力变压器局部放电技术的现状和发展[J]. 电工电能新技术,2001,2(2):52-57. WANG Guoli, HAO Yanpeng, LI Yanming. Present and future development of partial discharge detection in power transformers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2001,2(2):52-57.
- [8] 郭俊,吴广宁,张血琴,等. 局部放电监测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报,2005,20(2):29-35. GUO Jun, WU Guangning, ZHANG Xueqin, et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(2):29-35.
- [9] 朱景军. 金属成套开关设备局部放电带电检测技术的研究[D]. 天津:天津大学,2011. ZHU Jingjun. On-line detection of partial discharge in switchgear assembly[D]. Tianjin: Taijin Univisity,2011.
- [10] 许坤,周建华,茹秋实,等. 变压器油中溶解气体在线监测技术与展望[J]. 高电压技术,2005,31(8):30-33. XU Kun, ZHOU Jianhua, RU Qiushi, et al. Development and prospect of transformer oil dissolved gas on-line monitoring technology[J]. High Voltage Engineering,2005,31(8):30-33.
- [11] 周力行,何蕾,李卫国. 变压器局部放电超声信号特性及放电源定位[J]. 高电压技术,2003,29(5):11-14. ZHOU Lixing, HE Lei, LI Weiguo. Research on characteristics of ultrasonic signal of partial discharge and partial discharge sources location in transformer[J]. High Voltage Engineering,2003,29(5):11-14.
- [12] 李燕青,陈志业,律方成,等. 超声波法进行变压器局部放电模式识别的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(2):108-111. LI Yanqing, CHEN Zhiye, LYU Fangcheng, et al. Pattern recognition of transformer partial discharge based on acoustic method[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(2):108-111.
- [13] OKABE S, YAMAGIWA T, OKUBO H. Detection of harmful metallic particles inside gas insulated switchgear using UHF sensor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(3):701-709.
- [14] CHANG C, CHANG C S, JIN J, et al. Source classification of partial discharge for gas insulated substation using waveshape pattern recognition[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2005,12(2):374-386.
- [15] 曾剑锋. 智能电网电力设备状态检测技术研究[J]. 中国电业(技术版),2013(10):45-47. ZENG Jianfeng. Research on the condition monitoring technology for power equipments in smart power grid[J]. China Electric Power Technology Edition,2013(10):45-47.
- [16] KABE S, YAMAGIWA T, OKUBO H. Detection of harmful metallic particles inside gas insulated switchgear using UHF sensor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(3):701-709.
- [17] METVALLY I A. Status review on partial discharge measurement techniques in gas-insulated switchgear/lines[J]. Electric Power System Research,2004,69(1):25-36.
- [18] KANEKO S, OKABE S, YOSHIMURA M, et al. Partial discharge diagnosis method using electromagnetic wave mode transformation in actual GIS structure[J]. IEEE Trans-

(下转第 112 页)

- pact in microgrid networks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 702-716.
- [11] HE J W, LI Y W. An enhanced microgrid load demand sharing strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3984-3995.
- [12] HE J, LI Y W, BLAABJERG F. An enhanced islanding microgrid reactive power, imbalance power, and harmonic power sharing scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3389-3401.
- [13] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [14] SHAFIEE Q, GUERRERO J M, VASQUEZ J C. Distributed secondary control for islanded microgrids—A novel approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 1018-1031.
- [15] ZHONG Q C. Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 60(4): 1.
- [16] 王瑞琪, 程 艳, 孙树敏, 等. 基于坐标旋转变阻虚拟阻抗的微电网控制与性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014(12): 78-86.
- WANG Ruiqi, CHENG Yan, SUN Shumin, et al. Control and performance analysis of microgrid based on coordinate rotational virtual impedance[J]. Power System Protection and Control, 2014(12): 78-86.
- [17] 耿志清, 卓 放, 宁改娣, 等. 孤岛微电网中逆变器并联功率与电压均衡控制技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(12): 41-48.
- GENG Zhiqing, ZHUO Fang, NING Gaidi, et al. Balanced control strategy for paralleled inverter power and voltage in islanded microgrid[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(12): 41-48.
- [18] 吕志鹏, 罗 安. 不同容量微源逆变器并联功率鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 35-42.
- LYU Zhipeng, LUO An. Robust power control of paralleled micro-source inverters with different power ratings[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(12): 35-42.
- [19] 黎 颖, 卢继平, 李 健. 基于在线计算线路分布参数的故障定位方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 185-189.
- LI Ying, LU Jiping, LI Jian. Fault location based on on-line computation of the transmission line distributed parameters[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 185-189.
- [20] 刘金琨. 系统辨识理论及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- LIU Jinkun. The theory of system identification and simulation MATLAB[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [21] 张 虎, 李正熙, 童朝南. 基于递推最小二乘算法的感应电动机参数离线辨识[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 79-86.
- ZHANG Hu, LI Zhengxi, DONG Chaonan. Off-line parameter identification of induction motor based on recursive least-squares algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 79-86.
- 许 钊(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高压交直流、电力电子设备、无功补偿等设备的试验技术开发和研究。
- 胡长斌(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为分布式发电、微电网技术、配电网能量管理。
- 王斐然(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网运行与控制。
- 王弋飞(1981—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事智能配电网电能质量治理装置、交直流混合微电网系统及关键设备的研究。

(上接第 105 页)

- actions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5): 1329-1339.
- [19] CAVALLINI A, MONTANARI G C, PULETTI F. A novel method to locate PD in polymeric cable systems based on amplitude-frequency (AF) map[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(3): 726-734.
- 段大鹏(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力设备绝缘检测及故障诊断技术, 电网谐波抑制与无功功率补偿。