

电抗器潜伏性故障特征及其耦合量分析综述

林瑞聪¹, 缪希仁¹, 郭谋发¹, 陈丹¹, 林峰²

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108; 2. 福建省电力有限公司检修分公司, 福州 350013)

摘要: 针对电抗器容量及电压等级提高所带来的潜伏性故障发生趋势增加, 笔者分析了绝缘水平、温升、振动特征参量的检测技术特点及其局限性, 阐述了振动信号可作为电抗器各类故障的体现方式及其与电抗器的绝缘、温升之间的耦合关系, 提出基于振动法的电抗器潜伏性故障检测应解决的关键技术问题, 尤其是大型电抗器阵列式振动传感器的应用及其振动传播特性对故障诊断与定位的作用。以潜伏性故障特征及其耦合关系的角度诊断故障类型与故障定位, 对电抗器状态检修具有实际的工程应用价值。

关键词: 并联电抗器; 潜伏性故障; 振动信号; 阵列式传感器; 故障定位; 参量耦合

Analysis and Review on Reactor Latent Fault Characteristics and Its Coupling Parameter

LIN Ruicong¹, MIAO Xiren¹, GUO Moufa¹, CHEN Dan¹, LIN Feng²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Power Maintenance Branch of Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350013, China)

Abstract: With elevation in shunt reactor's capacity and voltage level, its latent faults tend to increase. In this paper, the characteristics and limitations of the existing measurement techniques for insulation level, temperature rise, and vibration signal are analyzed. And the coupling relationship of the vibration signal to the shunt reactor's insulation level and temperature rise is expounded to draw a conclusion that the vibration signal can reflect various faults of a shunt reactor. Moreover, key technological issue for latent faults detection of shunt reactor based on vibration method is put forward to be solved. Based on the application of vibration sensor array to detecting the vibration signal of a large-scale shunt reactor, the effect of vibration propagation characteristics on fault diagnosis and location is discussed. It is concluded that the fault diagnosis and location with the latent fault features and its coupling parameters are applicable to practical engineering for condition-based maintenance of shunt reactors.

Key words: shunt reactor; latent fault; vibration signal; vibration sensor array; fault location; coupling parameters

0 引言

随着中国经济的发展, 电力需求容量不断的提升, 电能质量问题备受关注。为增强电力系统中的无功补偿与无功平衡, 抑制系统过电压, 提高电能质量和供电可靠性, 并联电抗器的使用越来越广泛^[1-3]。因此, 并联电抗器能否安全可靠运行是保持电力系统稳定性的关键。

大量实践表明, 电抗器的主要故障是由于内部局部放电、局部过热及设备绝缘的老化等潜伏性故障随时间积累引起的。目前, 电抗器保护方法主要

通过故障时的电压、电流等电气参量进行继电保护^[4-10], 然而, 电抗器潜伏性故障迄今缺乏有效的检测方法、技术与装置。

随着容量的增大造成电抗器绕组匝数的增多, 在制造和安装工艺上出现的问题也呈现逐步增加的趋势, 电抗器运行时机箱或壳体的振动呈上升趋势, 有可能导致设备无法长期稳定运行。由于大型电抗器振动与制造、安装、地基结构等均可能存在一定的关系。因此, 振动已经成为衡量大型电抗器设备能否安全和长期运行的一个重要指标。但是, 长期以来除了常规的电流、电压、绝缘水平、温升等参数外, 振动的测试与分析并没有受到足够重视, 如何通过监测大型电抗器的振动信号, 解决稳定运

行时的潜伏性故障问题已成为实际工程中有待解决的问题。

因此,在综述电抗器潜伏性故障及其检测参量的基础上,提出振动可作为电抗器各类故障的特征体现,分析了电抗器振动故障与绝缘水平、温升之间的耦合关系,且提出基于振动法的电抗器故障检测及应解决的关键技术问题,对电抗器的状态检修具有一定的工程价值。

1 潜伏性故障的检测参量

电抗器的故障可分为两大类,突发性故障和潜伏性故障^[11]。突发性故障发展过程很快,瞬间后果严重,如雷击等,一般可通过继电保护装置进行保护。潜伏性故障一般分为3种,即电抗器内部局部放电、局部过热和电抗器的绝缘受潮与老化等。潜伏性故障的检测与诊断,可以有效避免电抗器的严重故障发生。目前对于电抗器检测参量主要有:

1)绝缘水平相关检测参量。电抗器的故障也可分为电气与非电气两类,电气类故障往往都是由于绝缘水平的劣化引起的,如电抗器的绕组匝间短路等^[5-10]。为避免电抗器发生严重电气故障,它的绝缘水平的检测参量将是电抗器潜伏性故障检测参量的一部分,如对电抗器的绝缘电阻、吸收比、极化指数、介质损耗因数 $\tan\delta$ 、泄露电流等的检测^[12-13]。

2)温度检测。电抗器属于变压器类电力设备,同样存在漏磁通问题。漏磁通与绕组线圈交链,在绕组中形成环流,加剧了绕组的发热,因此漏磁通将引起电抗器的局部过热。电抗器的温升将加速电抗器绝缘损坏、绝缘油分解与器件的结构变形等^[14]。温度作为一种故障发生的集中输出变量,它是大部分故障的结果反应,可以较好地反映电抗器的大部分故障,因此,温度是电抗器状态检测重

要参量之一。

3)振动检测。近年来,变电站电压等级的提高及其可靠运行要求不断加强,非接触式的振动检测逐步成为当前电抗器研究的热点问题之一,电抗器振动与其结构有关^[15-16],见图1,其在运行中产生振动主要有两个原因:一是铁心磁致伸缩导致铁心振动;另一是在铁心饼之间产生的麦克斯韦力作用下,气隙垫块发生伸缩引起铁心饼振动。然而,当电抗器发生故障时,将对电抗器的电磁场分布及结构产生影响,从而振动信号也相应地产生变化,如电抗器的异常振动将可能导致油浸式电抗器波纹管金属疲劳破裂引起漏油的故障出现^[15]。此外,随着变电站电压等级的提高,大型电抗器应运而生,由于基础结构不稳固或电抗器基座支撑不当引起的电抗器振动故障增加。由此可见,对电抗器尤其是大型电抗器振动检测及其机理研究有待于加强。

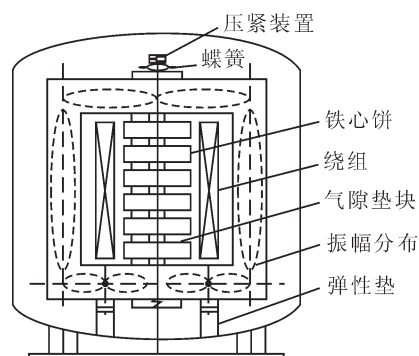


图1 并联电抗器结构图

Fig. 1 The structure diagram of shunt reactor

表1针对电抗器潜伏性故障及采取绝缘水平检测、温度检测、振动检测的3种方法,各自所具备的技术优势与存在的不足加以分析总结,可有效指导上述检测方法在电抗器状态检修的综合应用。

表1 电抗器潜伏性故障检测各参量对比

Table 1 The comparison on the detection parameters of latent fault about shunt reactor

序号	参量	优势	缺点
1	绝缘水平相关检测参量	可以反映大部分电气故障,适用于电气预防性试验	只能进行离线检测,目前未能有很好的在线检测装置
2	温度的测量(温度传感器或者红外成像仪)	可以较好地反映电抗器的大部分故障,红外设备对于温度场的测量可以实现离线检测	基于传感器的温度测量难以实现对故障类型进行辨识,红外设备价格昂贵
3	振动信号的检测	采用适当算法加以分析,可以得出故障类型辨识的理论依据	电抗器本身存在振动问题,且未能引起相应振动变化的一些故障,将被固有振动噪声所淹没

2 现有电抗器故障分析法

电抗器一般由铁轭、绕组、铁心柱等组成,其运行故障主要为线圈受潮、局部放电电弧、局部过热

绝缘烧损等引起线圈匝间绝缘击穿,以及漏磁造成周围金属构架、接地网、高压柜内接线端子损耗和发热等^[17]。面对如此复杂的电抗器故障,现有电抗器故障的检测分析方法主要有电气预防性试验^[11-13]、

色谱分析法^[18]、比值法^[19]、振动信号法^[15]等。

在预防性试验方面,文[13]介绍了500 kV油浸式电抗器预防性试验的操作指导书,其中有绕组直流电阻测量、绝缘电阻测试、介质损耗角正切即 $\tan\delta$ 的测量等。其中,绝缘电阻的测试包括测量电抗器绕组连同套管的绝缘电阻、吸收比或极化指数等^[13],见图2。预防性试验十分必要,但是它只能进行离线检测,且测试过程复杂繁琐,对电抗器状态检修应用具有一定的局限性。

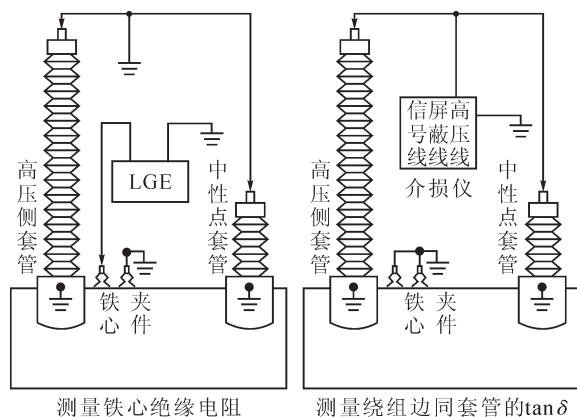


图2 部分预防性试验测量原理图

Fig. 2 The schematic diagram of some preventive testing

文[18]介绍了并联电抗器的绝缘油的色谱分析。由于电抗器有漏磁现象且常处于较高温度工作状态,电抗器的潜伏性故障将改变电抗器的电磁场分布,从而使得漏磁更加严重,导致不同程度的发热且加速绝缘油的分解,因此,通过对电抗器绝缘油的成分分析可用来初步分析电抗器的故障。然而色谱分析法只能进行初步的故障诊断,无法确定并联电抗器潜伏性故障的故障类型。

文[18-19]介绍了通过“三比值”法分析电抗器的潜伏性故障。该法根据充油电气设备内绝缘油在故障状态下裂解产生气体组分含量的相对浓度与温度的相互依赖关系,从以下5种特征气体中选取两种溶解度和扩散系数相近的气体组成三对比值(CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$, $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$),且以不同的编码表示,从而用来辨识各种潜伏性故障。文[19]以表2数据加以分析、判定设备存在的故障类型,一般为典型的低能量放电,即火花放电、闪络等。“三比值”法消除了油的体积效应的影响,是判断充油电气设备故障类型的主要方法,可得出故障状态较为可靠的诊断;但其测试分析过程较复杂,准确度只能达到80%左右^[20-21]。

文[15]通过分析电抗器异常的振动信号得到

表2 油中比值与编码

Table 2 The ratio on oil and code

气体比值	气体比值范围	比值范围编码
$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4=0.39$	$\geq 0.1 \sim < 1.0$	1
$\text{CH}_4/\text{H}_2=0.88$	$\geq 0.1 \sim < 1.0$	0
$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6=4.60$	≥ 3.0	2

500 kV油浸式电抗器的波纹管损坏故障,其振动传感器测点分布见图3,测点设置一般根据常见故障发生位置加以布点。

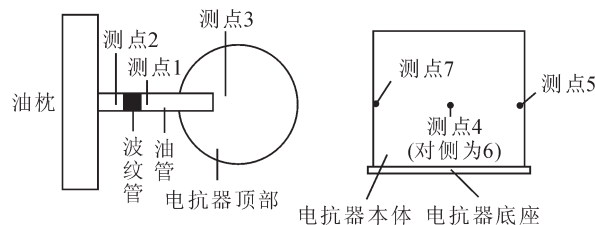


图3 振动测点分布图

Fig. 3 The distribution of mensuration dots about vibration

由图3可见,大型电抗器实时运行状况的振动具有其结构分布特点,电抗器内部发生典型缺陷时,其振动信号具备相应的时频域分布特征,采用阵列式振动传感器不仅可检测故障信号特点而且可反映出不同故障在各测点的传播特性,在解决故障类型诊断的同时还有利于电抗器故障定位,可为潜伏性故障预测及控制电抗器振动提供技术依据。

由此可见,振动信号包含了设备工作状态的丰富的信息,如果通过正确的布置振动测量点,提取振动信号的时域和频域特征参数及其传播特性,借助于信号处理和数学方法来对电抗器的潜伏性故障进行诊断,就能实现对电抗器的工作状态的准确分析,确保电抗器的健康稳定工作。

3 电抗器的振动信号及其耦合参量的分析

并联电抗器在电网中起着确保无功平衡、抑制系统过电压等重要作用,因此其安全运行关系着电能质量好坏和供电可靠性,然而,电抗器的故障类型多样且原因复杂,其中主要有绝缘击穿、漏磁造成的温升、漏磁及系统结构所造成的振动等潜伏性故障。振动信号包含着丰富的电力设备工作状态信息,作为一种结果型参量,振动信号可直接或者间接地反映绝缘击穿与温升等的变化,因此电抗器的振动信号及其耦合量的分析,将对电抗器潜伏性故障的辨识及其在线监测有着重要意义。

实验表明^[22],随着电抗器温升的增加,电抗器的整体振动增强,刚开始铁心振动谱以磁致伸缩(100 Hz,

即电抗器由于结构导致的自身振动问题的振动频谱)为主,实验后期(温升后期)高频成分明显增多。电抗器内部温升发热产生高温引起材料特性变化,导致电抗器在不同温度下结构发生明显变形,也因此加剧了振动及出现振动的高频分量。(增加电抗器型号规格)各测点的电抗器振动强度—温度特性曲线见图4^[17],其中,测点1至测点5分别为电抗器铁心由上至下每间隔1/4所布置振动信号的检测点。

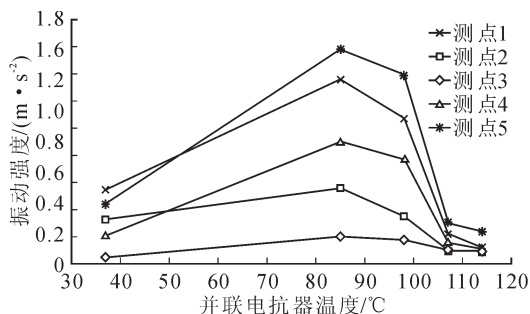


图4 不同测点的电抗器振动强度—温度特性曲线

Fig. 4 The characteristic curve about vibration strength-temperature at different measuring points of shunt reactor

据文[16]并联电抗器的事故分析,当电抗器的紧固件出现松动等机械故障将导致其接触不良,接触电阻增大且发热严重,最后导致弧光相间短路及对地短路,电抗器过流保护动作。事故表明,电抗器的机械故障,可能造成接触电阻增大,而后引起严重温升。然而紧固件的松动往往都是振动引起的,因此,对于电抗器的潜伏性机械故障造成的温升,可通过振动信号的异常加以体现。

电抗器的潜伏性故障还包括由于绝缘水平导致的局部放电、绝缘击穿等^[23],这都将产生瞬变的电磁场,由此改变原先电磁场的分布,造成漏磁更严重,从而使电抗器振动加剧;而且局部放电和绝缘击穿等故障的发生也将释放出短时能量,随着时间的积累将引起温升^[24]。据文[22]分析,局部放电、绝缘击穿、温升等故障还将加剧电抗器的振动故障程度。由此可见,电抗器的各类潜伏性故障问题,可通过电抗器的振动故障异常加以体现。

综上所述,对于电抗器的潜伏性故障的振动及其耦合参量之间的关系可归纳为图5所示,表示振动异常可作为电抗器各类潜伏性故障的集中体现,振动信号具备的非接触式及方便多点分布检测特点,利用阵列式传感器传播特性机理研究且结合电抗器故障耦合参量检测分析,将可有效实现电抗器尤其是大型电抗器的在线检测及状态检修故障诊断。

因此,电抗器尤其是大型电抗器器身振动信号

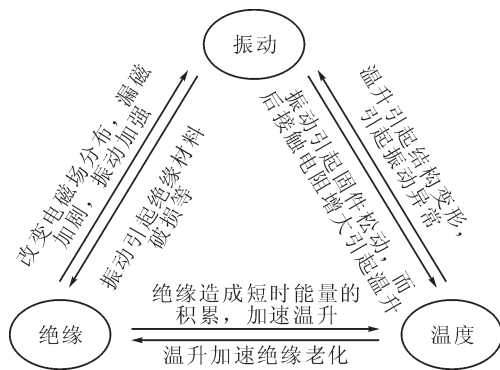


图5 振动及其耦合参量分析结构图

Fig. 5 The structure about parametric analysis of vibration and its coupling

与内部绕组及铁心状况等密切相关,包含着丰富的信息,开展大型电抗器振动的在线监测工作具有良好的应用前景,但振动法用于电抗器在线监测的研究目前还没有达到完善、可靠的程度,需解决以下几个方面问题:

1)由于高压与大电流的存在,如何对电抗器的振动进行实时监测;

2)除了常规的电流、电压、温升等参数监测外,如果电抗器出现了故障,振动变化是否能先于常规参数表现出来;

3)振动变化与电抗器的故障之间是否存在一一对应的关系;

4)对电抗器的振动故障进行系统和长期监测分析的可能性及其方法;

5)大型电抗器实时运行状况的振动具有其结构分布特点,如何采用阵列式振动传感器检测故障信号特点及其传播特性,以解决故障类型诊断与故障定位问题,为故障预测及控制电抗器振动提出可行的技术分析。

4 结论

1)电抗器潜伏性故障可通过绝缘水平、温升、振动等参量加以检测与辨识。

2)分析对比了绝缘水平、温升、振动参量,指出电抗器潜伏性故障检测的各自特点优势及存在的不足。

3)振动故障具有非接触及测点分布的特点,可作为各类潜伏性故障的体现方式,研究振动变化与电抗器各类故障特征对应关系,对大型电抗器状态检修具有实际工程价值。

4)对大型电抗器采用阵列式振动传感器,不仅有利于故障类型诊断,且有利于故障定位,因此,

有待开展电抗器阵列式传感器传播特性与机理的研究。

参考文献:

- [1] 岳昊,徐永海,刘颖英,等. 高压并联电抗器非线性模型的分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 39-45.
YUE Hao, XU Yonghai, LIU Yinying, et al. Analysis of nonlinear model of HV shunt reactor[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities, 2011, 23(1): 39-45.
- [2] 邓占锋,王轩,周飞,等. 超高压磁控式并联电抗器仿真建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36): 108-113.
DENG Zhanfeng, WANG Xuan, ZHOU Fei, et al. Modeling of extra-high voltage magnetically controlled shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(36): 108-113.
- [3] HYOGO A. A new algorithm of digital protection for shunt reactors[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS-103(10): 2935-2942.
- [4] 邹卫华,苏毅,邹东霞,等. 末端制动的新型数字式高压并联电抗器纵差保护[J]. 继电器, 2007, 35(15): 1-3.
ZOU Weihua, SU Yi, ZOU Dongxia, et al. Numerical differential protection restrained by end terminal current for HV shunt reactor[J]. Relay, 2007, 35(15): 1-3.
- [5] 张春合,高旭,沈全荣. 特高压站用电并联电抗器匝间保护分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 53-56.
ZHANG Chunhe, GAO Xu, SHEN Quanrong. Analysis of inter-turn protection in shunt reactor in ultra-high-voltage substation-used power system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 53-56.
- [6] 杨铨,索南加乐. 并联电抗器对模型识别纵联保护的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 23-28.
YANG Cheng, SUONAN Jiale. Influence of shunt reactors on model recognition pilot protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 23-28.
- [7] 郭宝甫,张建国,赵应兵,等. 750 kV 并联电抗器新原理的匝间短路及单相接地保护研制[J]. 继电器, 2005, 33(19): 10-13.
GUO Baofu, ZHANG Jianguo, ZHAO Yingbing, et al. Distance protection based on bergeron model for UHV transmission lines[J]. Relay, 2005, 33(19): 10-13.
- [8] 田应富. 变电站干式电抗器故障监测方法研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(Z1): 60-63.
TIAN Yingfu. Research of fault detection method of dry type power reactor at substations[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(Z1): 60-63.
- [9] 杨建立,常会军,武成章. 干式空心电抗器的安全运行及检修[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(1): 70-73.
YANG Jianli, CHANG Huijun, WU Chengzhang. Safe operation and maintenance of dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(1): 70-73.
- [10] 张科,原会静,郭磊,等. 换流站交流滤波电抗器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(1): 74-79.
ZHANG Ke, YUAN Huijing, GUO Lei, et al. Fault analysis of ac filtering reactor at power converting station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(1): 74-79.
- [11] 冯永新,邓小文,范立莉,等. 大型电力变压器振动法故障诊断与发展趋势[J]. 变压器, 2009, 46(10): 69-73.
FENG Yongxin, DENG Xiaowen, FAN Lili, et al. Vibration method for large power transformer fault diagnosis and its trend[J]. Transformer, 2009, 46(10): 69-73.
- [12] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 596—1996 电力设备预防性试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [13] 广东电网公司. Q/GD1 1151.43—2009 500 kV 油浸式电抗器预防性试验(电气部分)作业指导书[S]. 广东: 广东电网公司, 2009.
- [14] 王巍,谭小俊,朱培刚,等. 750 kV 并联电抗器油色谱异常原因分析及处理[J]. 变压器, 2012, 49(1): 65-67.
WANG Wei, TAN Xiaojun, ZHU Peigang, et al. Analysis and treatment of abnormal oil chromatographic data of 750 kV parallel reactor[J]. Transformer, 2012, 49(1): 65-67.
- [15] 逯怀东,陈玉峰,朱文兵,等. 一起 500 kV 并联电抗器振动异常的分析处理[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 153-155.
LU Huaidong, CHEN Yufeng, ZHU Wenbing, et al. Analysis and treatment of a 500 kV shunt reactor abnormal vibration[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 153-155.
- [16] 刘石,徐林峰,冯永新,等. 10 kV 干式铁心并联电抗器振动问题研究[J]. 变压器, 2009, 46(9): 31-34.
LIU Shi, XU Linfeng, FENG Yongxin, et al. Research on vibration of 10 kV dry-type shunt reactor with core[J]. Transformer, 2009, 46(9): 31-34.
- [17] 刘海莹,魏宾. 干式空心电抗器的运行分析及故障处理[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 239-240.
LIU Haiying, WEI Bin. Operation and maintenance of dry air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(3): 239-240.
- [18] 赵京武,李红林. 500 kV 并联电抗器色谱监测与故障诊断[J]. 变压器, 2002, 39(1): 39-41.
ZHAO Jingwu, LI Honglin. Fault diagnosis and monitoring with chromatography in 500 kV shunt reactor[J]. Transformer, 2002, 39(1): 39-41.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 7252—2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [20] 彭宁云,文习山,王一,等. 基于线性分类器的充油变压器潜伏性故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 147-151.
PENG Ningyun, WEN Xishan, WANG Yi, et al. A potential fault diagnosis method based on linear classifier for oil-

- immersed transformer[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2004, 24(6): 147-151.
- [21] 兰 华, 郑广瑞, 孙学林, 等. 基于 Vague 集的模糊聚类在变压器故障诊断中的研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(1): 46-49.
- LAN Hua, ZHENG Guangrui, SUN Xuelin, et al. Research of power transformer fault diagnosis based on vague clustering analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(1): 46-49.
- [22] 钟星鸣. 干式变压器的振动和噪声研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- ZHONG Xingming. Research on vibration and noise of dry-type transformer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [23] 唐 炬. 防御变电设备内绝缘故障引发电网停电事故的基础研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1281-1291.
- TANG Ju. Basic research on preventing power supply blackout caused by the inner insulation fault of transformation equipments[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1281-1291.
- [24] SCATIGGIO F, TUMIATTI V, MAINA R, et al. Corrosive sulfur induced failures in oil-filled electrical power transformers and shunt reactors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1240-1248.
- 林瑞聪(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。
- 缪希仁(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为在线监测与故障诊断、电器及其系统智能化、新型电器技术。
- 郭谋发(1973—), 男, 副教授, 研究方向为电力系统自动化。
- 陈 丹(1977—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为预测控制、网络控制、机器人学等。
- 林 峰(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统超高压电网运行检修生产管理等。

《高压电器》2015 年 1 期广告单位

彩色广告

封一: 江苏常新密封材料有限公司

封二: 攀时(上海)高性能材料有限公司

封三: 扬州万能科技发展有限公司

封四: 常熟市通润开关厂有限公司

前插 1: 北京京东方真空电器有限责任公司

前插 2: 成都凯赛尔电子有限公司

前插 3: 珠海思创电气有限公司

前插 4: 中山市泰峰电气有限公司

前插 5: 上海乐研电气科技有限公司

前插 6: 常州帕斯菲克自动化技术股份有限公司

前插 7: 陕西斯瑞工业有限责任公司

前插 8: 湖北武高电力新技术有限公司

前插 9: 山东泰开互感器有限公司

前插 10: 厦门凯鼎机电有限公司

前插 11: 陕西卓越电力设备有限公司

前插 12: 上海利驰软件有限公司