

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.10.023

乙丙橡胶表面电痕腐蚀对极化—去极化电流的影响

冯 晨, 雷志鹏, 任鸿秋, 宋建成, 田慕琴

(太原理工大学 电气与动力工程学院 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要: 电痕是引起绝缘表面劣化的主要原因之一。针对矿用乙丙橡胶电缆绝缘表面电痕腐蚀问题, 文中以不同电痕发展阶段的乙丙橡胶试样为研究对象, 试验测量并分析了乙丙橡胶表面电痕腐蚀程度与极化—去极化电流之间的关系, 提取了去极化初始电流值、电流衰减稳定值和凹点出现时间 3 个特征量。对比不同电痕腐蚀程度试样的极化—去极化电流曲线及其特征量发现: 在去极化初始阶段, 初始电流值、放电速率和去极化电流衰减稳定时刻的电流值与乙丙橡胶表面电痕损伤程度密切相关; 随着测量时间的延长, 去极化电流曲线上出现凹点, 该凹点出现时间与表面电痕腐蚀程度相关。研究结果证明, 使用极化去极化电流方法可以对乙丙橡胶的表面电痕腐蚀程度进行有效评估。

关键词: 乙丙橡胶; 电痕; 极化电流; 去极化电流; 特征参数

Effect of Surface Electrical Tracking of Ethylene Propylene Rubber on Polarization-depolarization Current

FENG Chen, LEI Zhipeng, REN Hongqiu, SONG Jiancheng, TIAN Muqin

(Shanxi Key Laboratory of Coal Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Electrical tracking is one of the main reasons for the deterioration of insulation surface. According to the problem of the surface electrical tracking erosion of insulation using in the high-voltage mining cables, the ethylene propylene rubber samples with different electrical tracking development stage are selected in the paper. The relationship between the surface electrical tracking erosion degree of ethylene propylene rubber and polarization-depolarization current is analyzed. Characteristic parameters, which include the initial value of depolarization current, the static value of current attenuation and the time of concave point, are extracted from the depolarization current curves. Comparing the depolarization curves of surface electrical tracking erosion degree of different samples and its characteristic parameters, it has been found that the initial value of depolarization current, the static value of current attenuation and the time of concave point are closely related to the electrical tracking development stage. The concave point can be observed with the increase of measuring time, which relates to the degree of surface electrical tracking erosion. Research results demonstrate that the severity degree of electrical tracking erosion can be discriminated with polarization-depolarization current.

Key words: EPR; electrical tracking; polarization current; depolarization current; characteristic parameter

0 引言

我国煤矿井下的最高电压等级为 10 kV, 其输电电缆以矿用移动金属屏蔽橡套软电缆为主。它的

主绝缘层材料为乙丙橡胶 (ethylene propylene rubber, EPR)。这是由于乙丙橡胶具有优异的耐候、阻水、耐热性和耐腐蚀性能, 抗拉伸强度较高, 在较宽的温度范围能具有良好的柔韧性及介电性能^[1-4], 特别适合用于可移动和环境温度较高的场合。然

收稿日期: 2017-05-18; 修回日期: 2017-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(51377113, 51577123); 山西省自然科学基金(2014011024-3)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51377113, 51577123), Natural Science Foundation of Shanxi Province(2014011024-3).

而,矿用 10 kV 乙丙橡胶电缆接头往往不做特殊处理,绝缘和导体均直接裸露在外,容易形成电晕和表面放电,腐蚀绝缘。同时,煤矿井下环境潮湿,粉尘大。绝缘表面在受潮后易吸附空气中漂浮的矿尘,从而形成绝缘表面脏污。已有研究表明与洁净的绝缘表面相比,脏污的绝缘表面更容易造成局部电场集中,引起放电现象,逐渐形成干燥带,导致乙丙橡胶表面电导率升高,使流过表面的泄漏电流增大,并释放大热量,最终形成电痕^[5]。

因为漏电起痕现象将破坏绝缘材料的电气性能,所以很多学者对绝缘材料的耐漏电起痕性能进行了研究,但是大部分都集中在材料的改性研究和复合绝缘子的耐漏电起痕性能研究上。如:文[6]通过在硅橡胶中填充不同质量分数的氧化铝对其耐漏电起痕性能进行改善,研究结果表明,填充质量分数为 4% 的氧化铝会提高硅橡胶的耐漏电起痕性能。文[7]以三元乙丙橡胶为研究对象,在进行 γ 射线照射后再利用“斜板法”进行耐漏电起痕试验,并利用分形技术对其表面电痕进行识别分类。研究结果表明,被 γ 射线辐射过的试样,分形维数范围在 1.142~1.333,未受到辐射的试样分形维数为 1.041,并且在相同的试验条件下,分形维数的变化在 0.001~0.004 之间,这说明三元乙丙橡胶的耐电痕性能可以用分形维数合理表示,且腐蚀深度随着辐射剂量的增大而增大。文[8-9]在实验室条件下建立了交联聚乙烯与硅橡胶的界面电痕击穿研究平台,通过放电电流电压、放电发光分布和放电起痕程度的测量,应用分形维数并结合图像处理技术,对交联电缆聚乙烯-硅橡胶界面的电痕击穿进行分析,得到电痕击穿的规律;并使用非线性处理方法对聚合物耐电痕实验的信号进行处理,对其耐电痕性能进行表征。

综上所述,国内外学者对改进绝缘材料的耐电痕性能进行了大量研究,取得了一些成果。但是针对乙丙橡胶表面电痕腐蚀的研究较少,且针对乙丙橡胶表面电痕腐蚀原因不明确,表征方法不完善,不利于评估或诊断乙丙橡胶表面电痕腐蚀程度,特别是无法诊断因表面电痕引起的乙丙橡胶电缆故障。因此,文中以矿用监视型移动橡胶软电缆的绝缘材料乙丙橡胶作为研究对象,试验测量并分析了不同表面电痕腐蚀程度乙丙橡胶的极化和去极化电流,为矿用 10 kV 乙丙橡胶绝缘电缆因表面漏电的在线监测提供了实验依据。

1 极化—去极化电流测量原理

极化—去极化电流方法(polarization-depolarization

current, PDC) 是以介质响应理论为基础进行的研究,属于无损检测的范畴。

当对充分放电的电介质两端施加阶跃电压 U_0 时,会有电流在介质内部流过,此电流称为极化电流。该极化电流会随着极化时间的增加而逐渐减小,并在一定的时间后趋于稳定值。这是因为在外电场的作用下,电介质内部将会感应出电偶极矩,并在电介质表面出现极化电荷^[10-13]。极化电流由电导电流、瞬时充电电流和吸收电流组成^[14],其中:电导电流可以反映电介质的直流电导率;吸收电流由介质的松弛极化过程所引起;瞬时充电电流会随着极化时间的增长逐渐衰减为零。极化电流可以表示为

$$i_0(t) = C_0 U_0 \left[\frac{\sigma}{\varepsilon_0} + f(t) \right] \quad (1)$$

式(1)中: C_0 为被测电介质的几何电容; σ 为被测电介质的直流电导率; ε_0 为真空介电常数; $f(t)$ 为被测电介质响应函数^[15]。

在极化过程结束后,将阶跃电压 U_0 撤去,并短接介质两端,此时会有电流在介质内部流过,此电流称为去极化电流。去极化电流的流动方向与极化电流的流动方向相反。去极化电流由瞬时极化电流和松弛极化电流组成^[16]。去极化电流可以表示为

$$i_{dp}(t) = C_0 U_0 [f(t) - f(t+t_p)] \quad (2)$$

根据实时记录的极化电流和去极化电流随时间的变化,即可得到极化—去极化电流的曲线,见图 1。极化—去极化电流可以直观地表示介质内的极化和去极化过程。极化电流与介质的直流电导率和极化过程相关。去极化电流与介质的去极化过程相关^[17]。

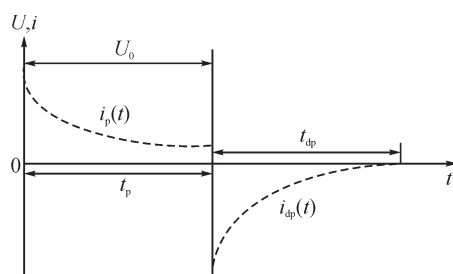


图 1 PDC 典型波形

Fig. 1 Typical waveform of PDC

2 试验设置

2.1 试样制备

试验使用 DCJ30M 型乙丙橡胶胶片制作试样,其标称电阻率为 $4.1 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$,介电强度为 25.7 kV/mm,相对介电常数为 3~4,介质损耗因数为 0.2~0.8,长期允许运行温度为 90 $^{\circ}\text{C}$,具有良好的耐腐蚀性和耐

水蒸气性。

制样时,先将未被硫化的胶片置于平板硫化机上预热 1 min; 然后根据乙丙橡胶推荐硫化温度和时间,将乙丙橡胶夹于模具中硫化 15 min,硫化温度约为 160 ℃,压力约为 14 MPa;硫化好后,将模具取出,并尽快从模具中取出试样,以防止被过硫化。将从模具中取出的试样置于洁净的桌面上自然冷却。制好的乙丙橡胶片状试样长度为 140 mm,宽度为 120 mm,厚度约为 2.3 mm。试验时将乙丙橡胶试样裁剪成长和宽分别为 120、60 mm 的样片。

2.2 电痕模拟方法

根据 IEC60587 规定,试验选择恒定电痕化电压法进行电痕模拟。改变试验时间,对试样进行了不同程度下的电痕化处理,并选取不同电痕腐蚀程度的试样进行后续的测量,见表 1。各试样的表面电痕腐蚀情况见图 2。由图 2 可知,其中试样 1 号为未老化的完好试样,试样 2~4 号的表面电痕腐蚀程度逐渐加深。

表1 所选试样的电痕参数

Table 1 Electrical tracking parameters of selected samples

试样	最大电痕长度/mm	最大电痕宽度/mm
1号	0	0
2号	32.4	3.9
3号	39.2	6.8
4号	46.2	7.3

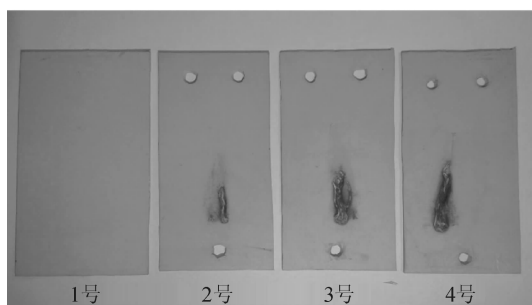


图2 各试样表面电痕腐蚀情况

Fig. 2 Corrosion of samples

2.3 极化—去极化电流的测量

极化去极化电流的测量电路图见图 3。由于在去极化过程中,流过乙丙橡胶绝缘的电流为容性,且此容性电流的数量级为 pA 级,所以想要准确测量去极化电流,对测量设备具有较高的要求。在文中测量系统中,选择 KEITHLEY-6517B 作为电流表,其直流电流的测量范围为 10 nA~21 mA,完全可以达到测量要求。测量过程中通过 RS-232 或 IEEE 488 通讯协议,将 6517B 与计算机连接,实现数据的实时采集。测量中选择 TREK-677B 为高压

直流电源。此直流源具有低噪声的优点,不会对测量数据产生较大的影响,保证了测量数据的可靠性。测量中选择的电极为三电极结构,其中高压端和测量端用于极化—去极化电流的测量,保护电极则是为了防止沿面泄漏电流的产生,以免对测量结果产生干扰。

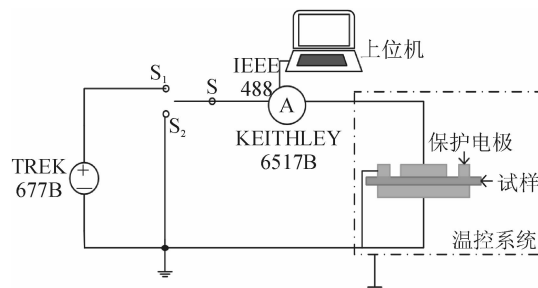


图3 极化去极化电流测量电路图

Fig. 3 Diagram of the PDC measurement

测量选用的直流电源极性为正极性,电压值为 400 V,试验环境温度选为 30 ℃,相对湿度为 15%。测量过程中,上位机通过串口将 6517B 实时采集到的数据传输到上位机中保存。在测量开始前,先将要进行测量的试样两端短接,将试样进行完全放电。初始测量时先对 6517B 进行零点校准,以保证测量数据的准确性。测量开始时,先将开关 S 闭合至 S₁,对试样进行 120 s 的充电;充电结束后的瞬间将开关 S 闭合至 S₂,对试样放电并进行去极化电流的测量,通过上位机对 6517B 实时测量的数据进行显示和保存。通常情况下,极化电流和去极化电流的测量时间是相同的。

因为测量的极化去极化电流数值很小,其测量结果很容易受到外部环境的干扰。因此在测量过程中,将试样和电极置于干燥箱中,以屏蔽外部干扰;同时将测量温度设置为固定值,保证湿度也在一定的范围内,减小外部环境条件的影响。

为了更直观地看到去极化电流的变化情况,文中选择去极化电流的测量时间为 350 s,并对测量所得的去极化电流 $i_{\text{dp}}(t)$ 的测量电流值进行了取反。

3 测量结果及分析

3.1 测量结果

不同电痕发展阶段的极化电流随时间的变化曲线见图 4。由图 4 可知,随着电痕腐蚀程度的加深,极化电流的初始电流值和电流衰减的稳定值依次增大。但是在极化过程中高压电源会引入较强的噪声信号,且极化电流对电痕腐蚀程度的判定区分度较弱。因此文中仅针对乙丙橡胶表面电痕腐蚀对去极化电流的影响进行详细的讨论和分析。

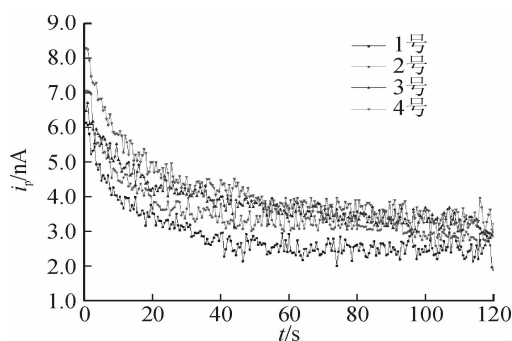


图4 不同电痕发展阶段的极化电流随时间的变化

Fig. 4 Polarization current of different electrical tracking stage

不同电痕发展阶段的去极化电流随时间的变化曲线见图5。由图5可知,在放电初始阶段,随着电痕腐蚀程度的加深,初始电流和去极化过程中的放电速度均逐渐增大,且电痕腐蚀程度越严重,去极化电流衰减稳定时刻的电流值就越大。由试验结果可知,各个试样的去极化电流曲线存在明显的差异。由图5还可知,去极化电流的衰减在整个去极化过程中存在一个凹点。

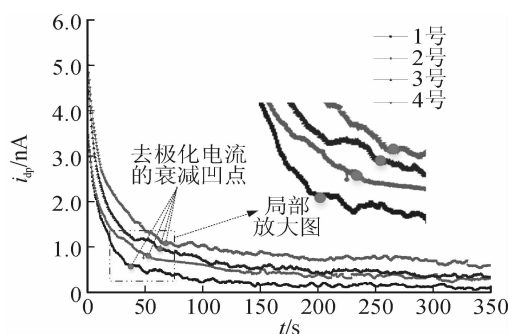


图5 不同电痕发展阶段的去极化电流

Fig. 5 Depolarization current of different electrical tracking stage

虽然不同电痕发展阶段的去极化电流曲线存在明显的差异,但是为了反映去极化电流在随去极化时间变化过程中的微小差别,文中对去极化电流 $i_{dp}(t)$ 和去极化时间 t_{dp} 分别进行了取对数处理,见图6。

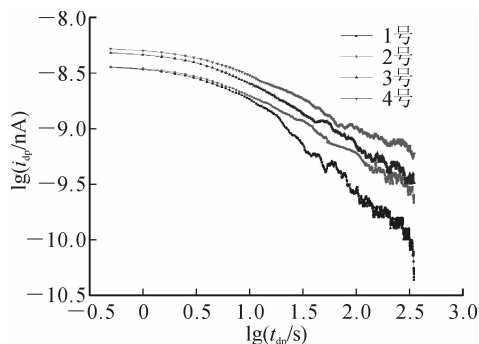


图6 对数坐标系下不同电痕发展阶段的去极化电流

Fig. 6 Depolarization current of different electrical tracking stage in the logarithmic axis

由图6可知,在去极化初期,各试样的去极化电流衰减速度比较慢,但是随着去极化时间的增大,各试样的去极化电流衰减速度均增大,这对未老化试样来说更为明显。同时,随着电痕腐蚀严重程度的加深,去极化电流的衰减速度逐渐变慢,而且电痕腐蚀越严重,其去极化电流越大。

对测量结果进行整理,见表2。选取去极化电流的初始电流值、电流衰减稳定值、电流曲线的变化趋势和凹点出现的时刻等特征量,对乙丙橡胶电缆绝缘老化程度进行评估^[13]。

表2 各试样的去极化电流特征参数

Table 2 Characteristic parameters of depolarization current of samples

试样	初始电流值 / 10^{-9} A	电流衰减稳定值 / 10^{-11} A	凹点出现时刻 /s	$\lg(i_{dp}/A)$
1号	3.558 13	8.206 96	37	-10.303 11
2号	3.594 03	29.866 50	54	-9.600 11
3号	4.785 03	32.627 70	69	-9.486 41
4号	5.187 24	58.997 70	78	-9.229 16

各试样的去极化电流特征参数如表2所示。由表2可知,随电痕腐蚀程度的加深,去极化电流的初始电流值和电流衰减稳定值都逐渐增大,且凹点出现的时刻延后。

3.2 结果分析

在极化过程中,2-4号试样由于存在电痕,其表面存在或大或小的凹陷,在较强外电场的作用下,表面电荷会依附在电痕的凹陷处,并沿电场方向整齐排列,形成附加电流。由于1号试样表面平整光滑,2-4号试样的表面电痕损伤腐蚀程度依次加深,所以1号试样的去极化电流初始值最小,4号试样的去极化电流初始值最大。

去极化电流的衰减过程可以看作是电容放电的过程,去极化电流的稳定值通常可以反映出绝缘材料的介电能力。电痕腐蚀老化后,其老化产物的主要成分一般为碳,附着于试样表面的碳会提高试样表面的直流电导率,这无疑会导致极化电流中直流电导分量的增加,使得所测得的极化电流随电痕腐蚀老化程度的加深而逐渐升高,这个现象在图4中可以清楚地看到。老化部位电导率的升高会引入表面浅陷阱,有利于去极化过程中表面电荷的消散,然而,由于电痕腐蚀中的热老化作用,绝缘材料的电痕腐蚀表面出现了多层结构。相比于老化前的光滑表面结构,电痕腐蚀老化后的材料表面又有新的表面层出现,此时的电痕腐蚀表面去极化过程类似于多层复合绝缘的去极化过程。有研究表明,双层复合绝缘在极化过程中的电荷积累比单层绝缘的

要多很多^[18]。随着电痕腐蚀程度的加重,表面电痕腐蚀处的分层数量增多,积累的电荷数量也逐渐增多。因此随着电痕腐蚀程度的增加,在相同的去极化时间内,去极化电流衰减的稳定值越大,凹点出现的时刻延后。

4 结论

文中以矿用10 kV电缆用乙丙橡胶绝缘为研究对象,根据IEC 60587标准对试样进行了电痕试验,选取不同电痕腐蚀程度的试样,研究了其极化和去极化电流特性,得到如下结论:

1)在相同的极化条件下,表面电痕腐蚀越严重,去极化电流的初始电流值越大,电流衰减的稳定值也越大。

2)在去极化电流曲线中,电流衰减的初始阶段,衰减速率较慢,但是随着去极化时间的增大,各试样的去极化电流衰减速率均增大。

3)去极化电流衰减的凹点会随着电痕腐蚀程度有所延后,这主要是由表面电荷的积聚量和释放量来决定的。

参考文献:

- [1] ZUIDEMA C, KEGERISE W, FLEMING R, et al. A short history of rubber cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(4):45-50.
- [2] ORTON H. History of underground power cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(4):52-57.
- [3] PIAH M A M, DARUS A, HASSAN A. Electrical tracking performance of LLDPE-natural rubber blends by employing combination of leakage current level and rate of carbon track propagation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(6):1259-1265.
- [4] 李文文. 船用乙丙橡胶电缆在线监测及热寿命评估研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
LI Wenwen. The research of on-line monitoring and thermal life assessing of ethylene propylene rubber insulated marine cable[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [5] VENKATESULU B, THOMAS M J. Erosion resistance of alumina-filled silicone rubber nano-composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(2):615-624.
- [6] RAJINI V, KUMAR K U. Surface tracking in polymers: A pattern discrimination technique using fractals[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(16):3695-3701.
- [7] PIAH M A M, DARUS A, HASSAN A. Electrical tracking performance of LLDPE-natural rubber blends by employing combination of leakage current level and rate of carbon track propagation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(6):1259-1265.
- [8] 古亮. 交联聚乙烯-硅橡胶界面电痕破坏现象研究[D]. 天津:天津大学, 2010.
GU Liang. Tracking failure at interface between XLPE and silicon-rubber[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [9] 董典帅. 聚合物绝缘材料耐电痕性研究及其非线性分析[D]. 天津:天津大学, 2008.
DONG Dianshuai. Resistance to tracking of polymer materials and nonlinear analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [10] 李陈, 雷勇, 周凯, 等. 极化去极化电流技术用于诊断XLPE电缆绝缘老化状态[J]. 电工电能新技术, 2014(4):32-35.
LI Chen, LEI Yong, ZHOU Kai, et al. Diagnosis of XLPE cable insulation using polarization and depolarization current measurement[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014(4):32-35.
- [11] 王世强, 张冠军, 魏建林, 等. 纸板的老龄化状态对其PDC特性影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34):177-183.
WANG Shijiang, ZHANG GuanJun, WEI JianLin, et al. Experimental study of the aged states effects on pressboard PDC characteristics[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(34):177-183.
- [12] 曾静岚, 蔡金锭, 李安娜. 基于去极化电流特征参数分析法的油纸绝缘老化评估[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(2):48-54.
ZENG Jinglan, CAI Jinding, LI Anna. Oil-paper insulation aging assessment based on characteristic parameters analysis method with depolarization current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(2):48-54.
- [13] 雷勇, 蒋世超, 周凯, 等. 基于极化-去极化电流方法的交联聚乙烯电缆绝缘无损检测[J]. 高电压技术, 2015, 41(8):2643-2649.
LEI Yong, JIANG Shichao, ZHOU Kai, et al. Non-destructive detection of XLPE cable insulation based on the method of polarization-depolarization current[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8):2643-2649.
- [14] 杨雁, 杨丽君, 徐积全, 等. 用于评估油纸绝缘热老化状态的极化/去极化电流特征参量[J]. 高电压技术, 2013, 39(2):336-341.
YANG Yan, YANG Lijun, XU Jiquan, et al. Characteristic parameters for assessing aging condition by polarization/depolarization current[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):336-341.
- [15] 马志钦, 廖瑞金, 郝建, 等. 温度对油纸绝缘极化去极化电流的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4):290-297.
MA Zhiqin, LIAO Ruijin, HAO Jian, et al. Influence of temperature on polarization and depolarization current of oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electro Technical

Society, 2014, 29(4):290-297.

- [16] 李洁,侯英酒,赵建利. 变压器油纸绝缘的极化去极化电流法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2015(4):9-11.
LI Jie, HOU Yingsa, ZHAO Jianli. The polarization of transformer oil-paper insulation to study the polarization current method[J]. Automation & Instrumentation, 2015(4):9-11.
- [17] 李军浩,司文荣,姚秀,等. 油纸绝缘变压器老化状态评估的极化/去极化电流技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(12):2605-2611.
LI Junhao, SI Wenrong, YAO Xiu, et al. Study of polarization and depolarization current measurements for assessment of aging state of oil-paper insulated transformers[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(12):2605-2611.
- [18] 陆小虹. EP/ZnO 双层复合绝缘界面极化特性实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2014.

LU Xiaohong. A study on interface polarization properties of EP/ZnO double layer composite insulation[D]. Haerbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.

冯晨(1990—),女,硕士研究生,主要从事矿用高压电缆的电老化分析及其故障诊断预警方面的研究。

雷志鹏(1983—),男,博士,讲师,主要从事高压电缆故障的状态评估及其局部放电特性分析的研究。

任鸿秋(1965—),女,副教授,硕士生导师,长期致力于智能测试仪器、电工理论与新技术应用等领域的科学研究。

宋建成(1957—),男,教授,博士生导师,长期致力于电气工程学科矿用智能电器、电力设备寿命评估、电力系统继电保护、煤矿安全监测监控等领域的科学研究。

田慕琴(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事智能电器、煤矿安全监测监控技术与设备绝缘技术方面的研究。

(上接第 135 页)

电网多目标优化自愈[J]. 电网技术, 2012, 36(10):23-29.

WANG Zhaoyu, AI Qian. Multi-objective optimal self-healing of dynamic microgrid based on quantum-based PSO and binary PSO[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 23-29.

- [14] 方健,彭辉,李自品,等. 改进小波网络在油浸式变压器故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(11):115-120.
FANG Jian, PENG Hui, LI Zipin, et al. An improved wavelet network with application to the fault diagnosis of oil-immersed transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11):115-120.
- [15] 廖瑞金,廖玉祥,杨丽君,等. 多神经网络与证据理论融合的变压器故障综合诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3):119-124.
LIAO Ruijin, LIAO Yuxiang, YANG Lijun, et al. Study on synthetic diagnosis method of transformer fault using multi-neural network and evidence theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3):119-124.
- [16] GHOLAMIL B, HADDAD W M, TANNENBAUM A R. Relevance vector machine learning for neonate pain intensity assessment using digital imaging[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010, 57(6):1457-1466.

[17] PSORAKIS I, DAMOULAS T, GIROLAMI M A. Multiclass relevance vector machines: an evaluation of sparsity and accuracy[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2010, 21(10):1588-1598.

[18] 袁蕾,杜林,吴俊美,等. 基于模糊隶属函数的变压器多参量故障综合诊断方法[J]. 高压电器, 2011, 47(5):35-42.

YUAN Lei, DU Lin, WU Junmei, et al. Transformer multi-parameter integrated fault diagnosis method based on fuzzy membership function[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5):35-42.

[19] 程加堂,熊伟. 灰色神经网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2010, 46(8):56-58.

CHENG Jiatang, XIONG Wei. Application of gray neural network in the fault diagnosis of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8):56-58.

付华(1962—),女,博士(后),教授,博士生导师,主要从事智能检测和电力系统故障诊断等方面的研究。

任仁(1992—),女,硕士研究生,主要从事电力设备状态监测与故障诊断和高压电网运行等方面的研究。