

交直流电压下油纸绝缘典型缺陷的 局部放电特征

田天¹,周秀¹,丁培¹,李秀广¹,罗艳¹,
何宁辉¹,马飞越¹,杨鑫²

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院,宁夏 银川 750002;2. 长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:油纸绝缘局部放电问题受到业内普遍关注,为探究在交直流复合电压下的局部放电特征,该文搭建测量平台,并设计气隙、悬浮、柱板沿面和针板放电4种油纸绝缘典型缺陷的放电模型。结合这4种局部放电的实验结果,分析发现:在不同的复合电压比例下,4种典型缺陷局部放电会发生不同的变化,前3种缺陷平均放电电量在起始阶段与直流分量呈现负向变化的特征,与局放起始电压的关系呈正向变化特征。在交直流混合电压下,悬浮绝缘放电模型与其他3种典型缺陷的放电模型相比较,局部放电的起始电压明显增加,交流电压下的平均放电电量降低。所得结果为利用局部放电试验判别换流变压器缺陷类型和电压形式对局放的影响提供基础数据。

关键词:换流变压器;油纸绝缘;交直流复合电压;局部放电特征

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.005 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2021)06-0040-07

Partial discharge characteristics of typical defects in oil paper insulation under AC and DC voltage

TIAN Tian¹, ZHOU Xiu¹, DING Pei¹, LI Xiuguang¹, LUO Yan¹,
HE Ninghui¹, MA Feiyue¹, YANG Xin²

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750002, China;

2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The problem of oil-paper insulation partial discharge has attracted widespread attention in the industry. In order to explore the characteristics of partial discharge under AC-DC composite voltage, this paper builds a measurement platform and designs four typical types of discharge model for oil-paper insulation defects: air gap discharge, suspension discharge, and cylindrical surface discharge models. The experimental results of these four kinds of partial discharges indicate that, the partial discharges of the four typical defects will change differently under different composite voltage ratios. The variation characteristic of average discharge for the first three defect types are opposite to which of DC component and positive to which of initial voltage at the initial period. Compared with the other three

收稿日期:2020-11-11;修回日期:2020-12-07

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51407013)

通信作者:田天(1991-),男,硕士,工程师,主要从事线圈类设备的高压试验及设备诊断研究;E-mail:titan9012@163.com

typical defects, the initial voltage of partial discharge in the suspended insulation discharge model under AC and DC mixed voltage is obviously increased, and the average discharge under AC voltage is reduced. The results obtained provide basic data for the application of partial discharge tests to determine the effect of the type of commutation transformer defect and the voltage form on the partial discharge.

Key words: converter transformer; oil-paper insulation; AC and DC composite voltage; partial discharge characteristics

对于直流输电模式来说,换流变压器是其核心设备。换流变压器长期处于交直流复合电压的作用下,故障率较高。据统计,换流变所比交流变压器出现的绝缘故障率高出 2 倍^[1-2]。换流变压器长期承受着交、直流电压以及交直流混合电压,有时还承受潮流反转时的极性反转电压。在交、直流电压共同作用下,将导致换流变压器内部复杂的电场变化。局部放电参数是换流变场强设计的依据之一,能够有效地反映运行中设备的绝缘状态。因此,研究交直流复合电压作用下换流变油纸绝缘局部放电特征具有重要意义。

在油纸绝缘局部放电领域,越来越多的学者倾向于研究交直流电场的不同作用,而复合电压交直流比例问题,是该研究领域的重点研究对象。文献[3]对此进行了实验研究,并找到了它与起始放电电压之间的关联性,然而,对于实验过程中发生的放电缺陷以及解决方案,该学者并没有进行继续探索;文献[4-5]通过实验获得了复合电场下沿面放电发展特性,指出直流电压分量的增加能够加快放电的发展;文献[6]研究了气隙放电现象与交直流复合电压比例之间的关系,得到了从放电起始到绝缘失效各个阶段的优化模式识别方法。

油纸绝缘典型缺陷包括针板^[7-10]、球板^[10]、平行板^[11]、气隙^[12-14]、沿面^[15-17]以及悬浮金属颗粒缺陷^[7-8]等。从当前对交直流复合电压下部分典型缺陷的研究现状来看,虽然放电谱图特性与时频特性^[18-20]问题较为复杂,但学术界已对此进行了大量研究并取得了丰富的研究成果。在交直流复合电压下,放电模式识别^[21-23]问题和油纸界面电荷特性^[24-25]是重要研究课题。该研究领域还包括对其他方面的复杂现象进行研究,如放电阶段划分^[13]的问题等,这些学术问题都已取得明显的研究进展。

然而,已有针对交直流电压作用下油纸绝缘局

部放电的研究,大都针对一种特定的缺陷类型在不同放电阶段的放电谱图特性对比等方面^[9-10],缺少交直流电压作用下各种典型油纸绝缘缺陷类型的局放特征比对。因此,为了更好地分析不同缺陷类型的局部放电特征,该文设计 4 种典型的油纸绝缘缺陷,采用交直流混合加压的方式,测试典型缺陷类型在不同交直流电压形式下的局部放电特征,为进一步利用局部放电试验判别换流变缺陷类型及电压形式对局放的影响提供基础数据。

1 实验装置和实验方法

1.1 实验回路和局部放电测量系统

实验回路等效电路如图 1 所示,可以看出,交直流电源都为无晕设备,交流侧电源保护电阻 $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$,耦合电容 $C_1 = 300 \text{ pF}$,直流侧电源保护电阻 $R_2 = 200 \text{ k}\Omega$,耦合电容 $C_2 = 800 \text{ pF}$ 。此外,为将放电脉冲构成一个完整的耦合回路,把耦合电容与直流源侧并联,由此构成耦合回路。

为准确采取常规脉冲电流信号,该实验所需仪器不仅可以实现数据实时采集,而且还需备有软件实施存储功能。经过多方比较,该实验采用 Pd-check 局部放电检测仪,将检测仪与耦合电容 C_1 相联,不仅可以读取电压信号,而且也可以准确读取局

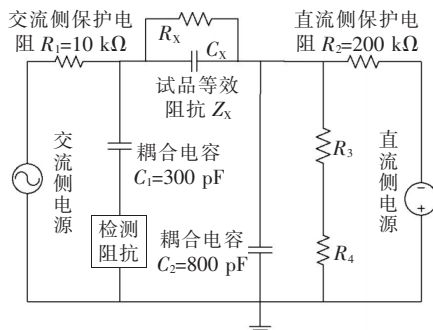


图 1 实验回路等效电路

Figure 1 Equivalent circuit of experimental circuit

放信号。Pdcheck局部检测仪的主要参数如表1所示。试验中环境噪声幅值为0.01 V, PDCheck量程选择5 V, 触发值为与量程对应的0.05 V, 每次采样5 000个局部放电脉冲。

表1 Pdcheck局部放电测试仪主要参数

Table 1 Main parameters of Pdcheck partial discharge test device

通道数	带宽	采样率/ (MS/s)	幅值范围/ V	位数/ bit
3	16 kHz~30 MHz	100	0~5	10

1.2 油纸绝缘典型缺陷模型

在交直流复合电压作用下, 该实验设计4种典型缺陷模型进行探究。

1) 油纸绝缘内部气隙放电模型。

气隙放电模型结构如图2所示, 模型由球板电极构成, 在球电极和板电极之间为3层0.5 mm厚绝缘纸板, 夹层纸板中间存在直径为40 mm的气隙, 球板电极材质选黄铜。球电极的直径为20 mm, 连接导杆直径为8 mm, 攻M4的螺纹; 板电极为直径为75 mm的圆盘, 边缘倒角3 mm, 厚度为10 mm, 连接导杆直径为10 mm, 螺纹孔为M4; 空气气隙的长度为40 mm, 纸板规格为80 mm×80 mm×0.5 mm。

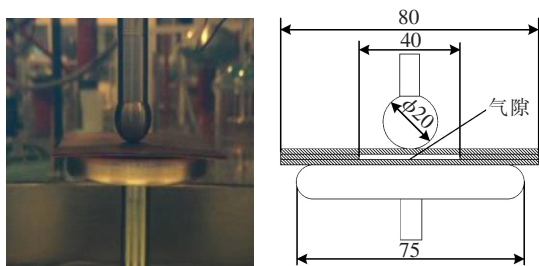


图2 油纸绝缘内部气隙缺陷模型

Figure 2 Internal air gap defect model

2) 悬浮放电模型。

悬浮放电模型如图3所示, 可以看出, 球电极正下方分别有金属圆环、纸板和板电极, 其中球板电极是模型的主体部分, 1 mm纸板置于板电极上。球电极、金属导杆和金属圆环的尺寸见图3; 板电极、连接导杆以及纸板的规格同气隙放电模型。

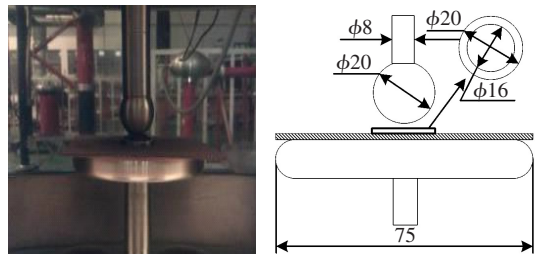


图3 悬浮放电模型

Figure 3 Suspended discharge model

3) 柱板沿面放电模型。

柱板沿面放电模型如图4所示, 可以看出, 实验将纸板置于板电极上, 并将柱电极压住绝缘纸板。柱板电极材质选黄铜, 柱电极以及连接柱电极导杆的尺寸见图4。板电极、连接导杆的规格同气隙放电模型, 纸板规格为65 mm×65 mm×0.5 mm。

4) 针板放电模型。

针板放电模型如图5所示, 可以看出, 针板电极(材质直径4 mm的黄铜)是实验模型的主体部分, 只需将其与绝缘纸板呈垂直状态放置即可构成完整的模型。材质规格: 纸板规格与其他模型的相同, 针电极的角度是30°。

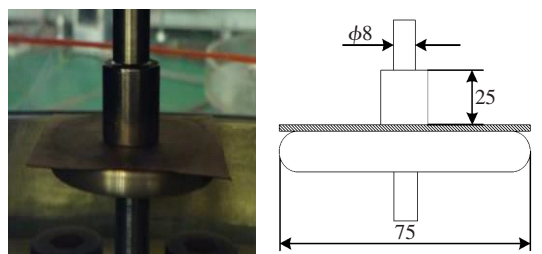


图4 柱板沿面放电模型

Figure 4 Surface discharge model of cylindrical plate

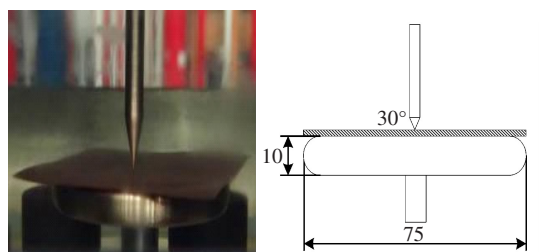


图5 针板放电模型

Figure 5 Pin-plate discharge model

1.3 实验方法

1) 交直流复合电压比例的选取。

分别施加直流、交流和不同比例的交直流电压,

进行局部放电特征的对比。选择的特征参数为局放起始电压、起始阶段平均放电量、起始阶段最大放电量以及失效电压;参照文献[6]建议的换流变压器实际运行的3种交、直流电压比例,即交流峰值与直流平均值之比分别为1:1,1:3,1:5。

2) 加压方式。

国家局部放电标准对交流局部放电起始电压有明确规定:在实验过程中,若某一局部放电电压值重复出现,则将该数值作为交流局部放电起始电压^[26]。而对于直流局部放电起始电压,国际通用标准是放电量大于1 pC的电压^[27]。由于目前对交、直流复合电压下局部放电起始电压尚未有标准明确规定,故该文定义当电压升高到一定值后,在5 min内首次出现局部放电量超过5 pC情况的电压作为起始放电电压,这一阶段定义为起始放电阶段。

该实验过程中采用阶梯升压测量方法。首先,将试品的电压设置为0,每5 min做一次升压,每次升压步长设置为2 kV,连续多次重复后即可观察到局部放电放电量;然后,在此基础上,重复做升压实验,试品击穿后停止升压,此时观察到的电压即为失效电压。该文对总起始电压数值进行定义,该数值不仅包括起始交流电压有效值,而且还包括直流电压平均值,两者之和即构成总起始电压。总失效电压为击穿交直流电压幅值之和。

相同条件且每种直流分量比例下各进行5组实验,重复性良好。为使结论更具有说服力,对5组实验的局放起始电压和起始阶段平均放电量取平均值,研究起始电压和起始阶段平均放电量随交直流混合电压比例变化的总体趋势。

2 实验结果及分析

2.1 实验结果

在不同电压下,油纸绝缘内部气隙、悬浮、柱板沿面以及针板放电模型的起始电压 U_1 、起始阶段平均放电量 Q_{av} 、起始阶段最大放电量 Q_{max} 、失效电压 U_2 数据分别如表2~5所示,其中,交直流复合电压括号内依次为交流电压有效值、直流电压平均值以及交直流复合电压值。

表2 油纸绝缘内部气隙模型放电特性

Table 2 Discharge characteristics of air gap model under different voltages

电压类型	U_1 /kV	Q_{av} /pC	Q_{max} /pC	U_2 /kV
交流	4.8	70.3	172.1	26.9
交直流(1:1)	(6,6,12)	55.2	93.9	(17.85,17.85,35.7)
交直流(1:3)	(3.2,9.6,12.8)	33.7	65.7	(10.1,30.3,40.4)
交直流(1:5)	(4.3,22,26.3)	26.5	39.8	(9.5,47.7,57.2)
直流	30	12.6	36.2	60以上

表3 悬浮模型放电特性

Table 3 Discharge characteristics of suspension model

电压类型	U_1 /kV	Q_{av} /pC	Q_{max} /pC	U_2 /kV
交流	6.5	7.70	6.20	14.7
交直流(1:1)	(7.65,7.65,15.3)	12.65	36.86	(21.7,21.7,43.4)
交直流(1:3)	(10,29.9,39.9)	21.10	123.70	(18,54,72)
交直流(1:5)	(7.2,36,43.2)	5.30	15.50	(11,55,66)
直流	25	12.00	51.00	60以上

表4 柱板沿面模型放电特性

Table 4 Discharge characteristics of cylinder plate surface model

电压类型	U_1 /kV	Q_{av} /pC	Q_{max} /pC	U_2 /kV
交流	5.7	57.0	165.0	24.0
交直流(1:1)	(9,9,18)	25.8	27.0	(21,21,42)
交直流(1:3)	(5.3,15.9,21.2)	20.7	31.1	(14.6,43.8,58.4)
交直流(1:5)	(4.7,23.5,28.2)	16.4	46.4	(10,50,60)
直流	32	9.1	35.0	63

表5 针板模型放电特性

Table 5 Discharge characteristics of pin plate model

电压类型	U_1 /kV	Q_{av} /pC	Q_{max} /pC	U_2 /kV
交流	3.1	76.3	135.0	13.8
交直流(1:1)	(9.85,9.85,19.7)	29.7	93.7	(13.35,13.35,26.7)
交直流(1:3)	(6,18,24)	23.4	75.7	(8.3,24.9,33.2)
交直流(1:5)	(5,25,30)	20.1	68.4	(6.1,30.5,36.6)
直流	34.4	11.6	23.0	55.3

2.2 结果分析

在局放典型指标中,局放起始电压和起始阶段平均放电量最能反映局放特征,因此,对这2个指标

下不同缺陷类型的变化趋势进行进一步的分析。

2.2.1 不同缺陷类型的局放起始放电电压对比

不同缺陷类型其局放起始放电电压存在一定的差异。不同电压比例下局放起始放电电压的变化曲线如图6所示,可以看出:①4种缺陷模型均存在交流下的局部放电起始电压普遍小于直流下的情况;②气隙、柱板沿面以及针板放电模型随着直流电压比重的增加,局放起始电压逐渐增加;③在1:3和1:5交直流混合电压下,悬浮放电模型的局放起始电压明显增加。

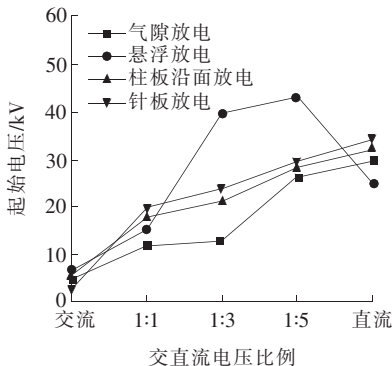


图6 不同缺陷模型与局放起始电压的关系

Figure 6 Relationship between different defect types and initial voltages

2.2.2 不同缺陷模型的局放平均放电电量对比

缺陷模型不同,局放平均放电电量会存在一定的差异,其变化规律如图7所示,可以看出:①气隙、柱板沿面以及针板放电模型随着交直流比例的下降、直流分量的增加,其起始阶段平均放电电量有逐渐下降的趋势;②悬浮放电模型起始阶段平均放电电量与交直流混合电压比例关系不大,总体呈现平均放电电量不变的趋势。

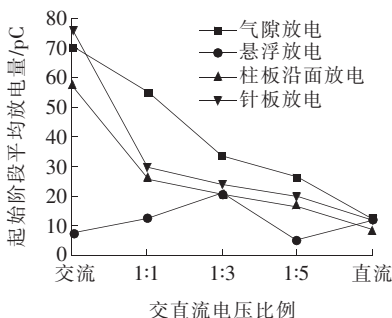


图7 不同缺陷类型与平均放电量的关系

Figure 7 Relationship between different defect types and average discharge

综上所述可知,悬浮放电模型在交直流电压下的局部放电特征与其他3种典型缺陷有较明显差异。具体表现:交直流混合电压下局部放电的起始电压明显增加,交流电压下的平均放电电量降低。之所以会出现这种现象,是因为金属环在交流电压环境下的影响所致,金属环改变了电场分布,从而在交流电压下的平均放电电量较低^[28]。对于交直流电压下悬浮放电模型局放特征的变化规律,仍有待进一步的实验研究。

3 结语

在不同的交直流电压形式下,该文对4种典型缺陷放电模型的局放特征进行了对比测试。结果发现:

1)气隙、柱板沿面以及针板放电模型的起始阶段平均放电电量与直流分量呈负向变化的特征,但与局放起始电压的关系呈正向变化特征;

2)在交直流比例为1:3和1:5的混合电压下,与其他3种典型缺陷相比较,悬浮绝缘放电模型局部放电的起始电压明显增加,交流电压下的平均放电电量降低;

3)通过对比分析4种典型缺陷的局放特征,有助于对缺陷类别的辨识,同时,应进一步深入悬浮放电模型下放电过程的理论和实验研究。

参考文献:

- [1] 袁佳波,徐鹏程,李磊,等.基于鸡群优化BP神经网络的变压器油纸绝缘老化预测方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(4):33-41.
YUAN Jiabo, XU Pengcheng, LI Lei, et al. Prediction of transformer oil-paper insulation aging based on BP neural networks with the chicken swarm optimization algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 33-41.
- [2] 朱航,高波,刘亚婕,等.硫腐蚀对变压器油纸绝缘局部放电过程影响研究[J].高压电器,2020,56(7):181-188.
ZHU Hang, GAO Bo, LIU Yajie, et al. Influence of sulfur corrosion on partial discharge process of transformer oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 181-188.

- [3] Takahashi E, Tsutsumi Y, Okuyama K, et al. Partial discharge characteristics of oil-immersed insulation systems under DC, combined AC-DC and DC reversed polarity voltage[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(1): 411-420.
- [4] Jamali-Abnavi Ahmadreza, Hashemi-Dezaki Hamed. Evaluating the electromagnetic forces on the electric arc furnaces' powercables under various operation conditions[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 201: 107553.
- [5] 金福宝,周远翔,黄建文,等. 电场分量对交直流复合电场下油纸绝缘沿面放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2516-2524.
JIN Fubao, ZHOU Yuanxiang, HUANG Jianwen, et al. Effects of electrical field component on characteristics of creepage discharge in oil-impregnated pressboard under combined AC/DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2516-2524.
- [6] Qi B, Wei Z, Li C R, et al. Influences of different ratios of AC-DC combined voltage on internal gas cavity discharge in oil-pressboard insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1026-1033.
- [7] Sha Y C, Zhou Y X, Zhang L, et al. Measurement and simulation of partial discharge in oil-paper insulation under the combined AC-DC voltage[J]. Journal of Electrostatics, 2013, 71(3): 540-546.
- [8] Sha Y C, Zhou Y X, Li J Z, et al. Partial discharge characteristics in oil-paper insulation under combined AC-DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1529-1539.
- [9] 孔晓晓,杜伯学,姜金鹏,等. 纳米纤维素掺杂改善油浸纸介电性能的研究[J/OL]. 高电压技术: 1-8 [2021-10-27]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210413>.
KON Xiaoxiao, DU Boxue, JIANG Jingpeng, et al. Study on improving the dielectric properties of oil-immersed paper by doping nano-cellulose [J/OL]. High Voltage Engineering, 1-8 [2021-10-27]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210413>.
- [10] 齐波,魏振,李成榕,等. 交直流复合电压作用下油纸绝缘典型缺陷放电现象及特征[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 639-646.
QI Bo, WEI Zhen, LI Chengrong, et al. Discharge characteristics of the typical defects in oil-paper insulation under AC-DC compound voltage[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 639-646.
- [11] Wang Y H, Wei X L, Chen Q G, et al. Breakdown characteristics of converter transformer insulation under composite AC and DC voltage[C]//IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, ICPADM, Harbin, China, 2009.
- [12] Chen W, Long Z Z. Experimental research on air-gap partial discharge properties in transformer oil-paper insulation[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, Shenzhen, China, 2013.
- [13] 齐波,魏振,李成榕,等. 交直流叠加电压作用下油纸绝缘内部气隙放电发展过程[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6554-6561.
QI Bo, WEI Zhen, LI Chengrong, et al. Development of discharge of internal gas-gap defect in oil-paper insulation under AC and DC combined voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6554-6561.
- [14] Li J H, Han X T, Liu Z H, et al. PD characteristics of oil-pressboard insulation under AC and DC mixed voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 444-450.
- [15] Qi B, Wei Z, Li C R. Creepage discharge of oil-pressboard insulation in AC-DC composite field: Phenomenon and characteristics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics Electrical Insulation, 2016, 23(1): 237-245.
- [16] Zhou Y X, Jin F B, Huang M, et al. Effects of thermal aging on creepage discharge in oil-impregnated pressboard under combined AC-DC voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2737-2746.
- [17] Chen Y L, Li C R, Du Y F, et al. Influence of nanoparticles on the surface discharge marks in oil-pressboard insulation[C]//IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, Montreal, QC, Canada, 2012.
- [18] 林智勇,张达敏,郑运鸿,等. 混联等效电路 p 参数诊断变压器油纸绝缘老化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 164-169.
LIN Zhiyong, ZHANG Damin, ZHENG Yunhong, et al. Investigation on the p parameter of hybrid equivalent circuit to diagnose transformer oil-paper insulation aging[J]. Power System Protection and Control, 2020,

- 48(15):164-169.
- [19] 孔灿,张大宁,田杰,等. 110 kV 变压器油纸绝缘套管不均匀绝缘受潮劣化分析[J]. 智慧电力,2020,48(4):119-124.
- KONG Can, ZHANG Daning, TIAN Jie, et al. Non-uniform moisture degradation analysis of 110 kV transformer oil-paper insulation bushing[J]. Smart Power, 2020,48(4):119-124.
- [20] 沙彦超,周远翔,王明渊,等. 不同发展阶段油纸绝缘直流局部放电信号的时频特性[J]. 高电压技术,2014,40(5):1481-1490.
- SHA Yanchao, ZHOU Yuanxiang, WANG Mingyuan, et al. Time-frequency characteristics of DC partial discharge signals of oil-paper insulation in different development stages[J]. High Voltage Engineering, 2014,40(5):1481-1490.
- [21] 季盛强,纪海英,胡泉伟,等. 基于层次分析法的油纸绝缘局部放电模式识别[J]. 高压电器,2012,48(1):70-75.
- JI Shengqiang, JI Haiying, HU Quanwei, et al. Pattern recognition of partial discharge in oil-paper insulation based on analytic hierarchy process[J]. High Voltage Apparatus, 2012,48(1):70-75.
- [22] 季盛强,纪海英,曹蕤,等. 基于时间序列对油纸绝缘局部放电模式识别的研究[J]. 高压电器,2012,48(2):46-49.
- JI Shengqiang, JI Haiying, CAO Rui, et al. Pattern recognition of partial discharge in oil-paper insulation based on time series[J]. High Voltage Apparatus, 2012,48(2):46-49.
- [23] 段炼,黄锦增,唐娴,等. 基于 Attention-RBF 神经网络的配电变压器电流骤降点辨识方法[J]. 供用电,2020,37(12):31-39.
- DUAN Lian, HUANG Jinzeng, TANG Xian, et al. Identification model of distribution transformer current sag point based on Attention-RBF neural network[J]. Distribution & Utilization, 2020,37(12):31-39.
- [24] 陈义龙,齐波,李成榕,等. 交直流复合电场下油纸绝缘界面电荷对沿面闪络电压的影响[J]. 电网技术,2014,38(4):1070-1075.
- CHEN Yilong, QI Bo, LI Chengrong, et al. Impact of interfacial charge of oil-pressboard insulation on surface flashover voltage under compound AC-DC electric field[J]. Power System Technology, 2014,38(4):1070-1075.
- [25] 刘东超,林语,原辉,等. 灰度纹理与油气特征融合的油纸绝缘老化状态评估[J]. 中国电力,2020,53(12):159-166+197.
- LIU Dongchao, LIN Yu, YUAN Hui, et al. Aging state evaluation of oil-paper insulation based on fusion of gray texture and oil gas features[J]. Electric Power, 2020,53(12):159-166+197.
- [26] GB/T 7354—2018. 高电压试验技术局部放电测量[S].
- [27] IEC 60270—2000. High-voltage test techniques-Partial discharge measurements[S].
- [28] 孔庆奕,邓树端,容焯,等. 复杂激励条件下变压器结构件杂散损耗的测量方法[J]. 电测与仪表,2020,57(7):106-112.
- KONG Qingyi, DENG Shuduan, RONG Ye, et al. The method of the stray-field loss of components measurement under complex excitation conditions[J]. Measurement & Instrumentation, 2020,57(7):106-112.