

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.08.032

基于局部放电能量的油纸绝缘典型缺陷放电严重程度评估方法

满玉岩¹, 董艳唯¹, 王伟¹, 肖伊², 刘涛², 李庆民²

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384; 2. 华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206)

摘要: 变压器内部缺陷引发的局部放电会导致油纸绝缘老化与损伤, 甚至造成威胁变压器安全运行的绝缘故障。为探究基于局部放电信号的变压器缺陷严重程度评估方法, 文中搭建了球—板、柱—板、针—板3种典型缺陷模型, 得到局部放电相位谱图、放电次数和放电量等特征参量随时间的变化规律, 发现球—板和柱—板模型下放电次数、针—板模型下平均放电量由上升到下降这一变化趋势的改变, 可作为放电后期的判断依据。在此基础上, 引入放电能量对放电强度进行量化表征, 分析了缺陷类型和放电发展阶段对放电能量的影响规律, 据此可将放电严重程度划分为起始、发展和危险3个等级。研究成果可为不同缺陷类型下的局部放电严重程度评估提供参考依据。

关键词: 油纸绝缘; 局部放电; 缺陷类型; 严重程度; 放电能量

Discharge Severity Evaluation Method for Typical Defects of Oil-paper Insulation Based on Partial Discharge Energy

MAN Yuyan¹, DONG Yanwei¹, WANG Wei¹, XIAO Yi², LIU Tao², LI Qingmin²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China; 2. Beijing Key Lab of High Voltage & EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Partial discharges caused by internal defects of transformer may lead to aging and damage of oil-paper insulation, or even threaten operation and security of the transformer. In order to explore a method for assessing the severity of transformer defects based on partial discharge signals, three typical defect models of sphere-plate, column-plate and needle-plate were set up in this study, and the characteristic parameters such as partial discharge phase spectrum, discharge number and discharge quantity were obtained. It turned out that the discharge number of the sphere-plate and column-plate models and the average discharge quantity of needle-plate model varied upward then downward, and these inflection points could be taken as the criterion at later stage of the discharge. Furthermore, discharge energy was used to quantify the discharge intensity, and the influences of defect type and discharge stage on the discharge energy were analyzed. On this basis, the discharge severity was divided into three levels- initiation, development and danger. The research results in this paper may be a reference for evaluating partial discharge severity for different defect types.

Key words: oil-paper insulation; partial discharge; defect type; severity; discharge energy

0 引言

电力变压器是电力系统中的枢纽设备, 变压器故障往往会导致大面积的停电^[1-2]。作为应用最广

泛的油浸式电力变压器, 在制造过程中其内部绝缘结构不可避免地会产生天然缺陷, 例如绝缘纸(板)内部含有气泡或者表面不平整, 这将导致变压器电场分布不均匀而产生局部放电现象^[3-5], 随着放电严

收稿日期: 2019-02-04; 修回日期: 2019-04-11

基金项目: 国网天津市电力公司科技项目(KJ17-1-26)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Tianjin Electric Power Company(KJ17-1-26).

重程度的加剧,往往会造成变压器绝缘的贯穿性击穿,因此局部放电一直是油纸绝缘领域的研究热点^[6]。

依据局部放电特性,可以获得变压器绝缘缺陷严重程度及内部故障信息。文[7]的研究结果表明,大多非破坏性试验下的测试参数都不能准确地反映变压器绝缘系统当前的状况,只有局部放电相关的参量才能合理地表征老化状态。文[8]建立了能量-相位分布图,并从分布图中提取特征量进行放电发展程度的判断。陈伟根^[9]认为单次放电能量可以通过视在放电量与相应瞬时电压乘积的一半来表示。局部放电对绝缘的损伤程度与其放电能量密切相关,基于局部放电的电信号特征,实现局部放电能量的量化分析,对变压器缺陷严重程度的准确评估具有重要的现实指导意义^[10-12]。

文中针对变压器油纸绝缘,首先搭建了局部放电测量系统,设计了球-板、柱-板、针-板3种典型缺陷,采用脉冲电流法对不同缺陷类型下的局部放电信号进行了测试。然后,分析并揭示了相位谱图、放电次数、放电幅值以及放电能量等特征参量随放电发展的变化规律,据此给出了绝缘材料临近击穿时刻的判断依据,以及局部放电3个发展阶段,即起始、发展和危险的划分准则,为油纸绝缘典型缺陷的严重程度评估提供了参考。

1 实验装置及测量系统

1.1 局部放电测试平台

为了研究油纸绝缘不同缺陷类型下的局部放电特性,搭建了图1所示包含缺陷模型的局部放电测试平台^[13]。

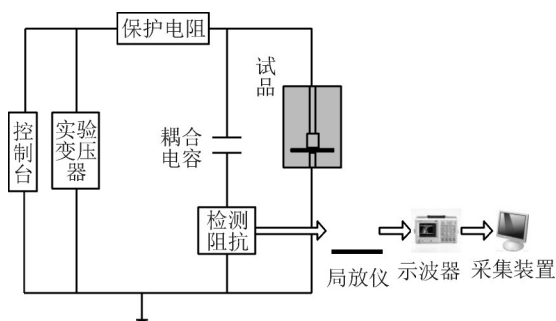


图1 局部放电测试平台

Fig. 1 Partial discharge measurement platform

测试平台主要由以下两部分组成:①加压系统:由实验变压器、阻值为10 kΩ的保护电阻、电容值为800 pF的耦合电容组成,变压器通过与电压控制台连接来实现电压控制;②局部放电检测与采集系统:主要包括检测阻抗、同轴传输电缆、局部放电检测仪 DST-4 和示波器 DPO403, DST-4 检测频带

(窄带)为40~80 kHz,检测灵敏度为5 pC。实验采用脉冲电流法进行局部放电信号的检测,通过局放仪进行放大和滤波,最后通过示波器将采集数据存储至计算机。为了尽量减少背景噪声以及环境的干扰,该实验在电磁屏蔽室进行,其背景噪声在5 pC以下,噪声对实验结果的影响可以忽略。

1.2 实验模型设计

依据变压器绝缘结构和故障种类,设计的3种典型缺陷模型为球-板、柱-板和针-板放电模型,分别代表切向与法向电场共同作用、强切向电场作用、强法向电场作用3种情况。高压电极和接地电极材料均为铜,电极之间隔有绝缘纸板,具体结构尺寸见图2,绝缘纸板厚度为2 mm,板电极直径为75 mm。

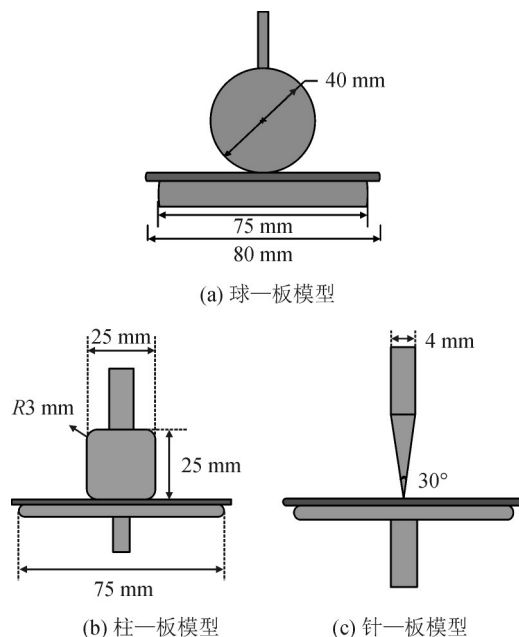


图2 3种典型缺陷模型

Fig. 2 Three typical defect models

1.3 实验材料预处理

实验采用2 mm厚的魏德曼绝缘纸板,其理想电气强度超过35 kV/mm。绝缘油采用25号变压器油,油中微水含量为6.4 μg/mL。实验前首先对纸板进行真空干燥,将纸板在105 ℃、50 Pa的条件下静置并真空干燥24 h;然后将绝缘纸板浸泡在绝缘性能良好的变压器油中,在80 ℃、50 Pa的条件下真空浸油48 h^[14]。

2 实验结果

2.1 局部放电相位谱图

3种模型均采用恒压法进行加压,球-板、柱-板和针-板模型所加交流电压幅值分别为28、24、24 kV。测试从开始加压至绝缘击穿整个统计时间

范围内的局部放电参数,绘制不同加压时间段的相位分布谱图^[15-16],见图3,从左至右分别代表加压前

期、中期和后期,相位谱图中数据点的密集程度表示放电密度的大小。

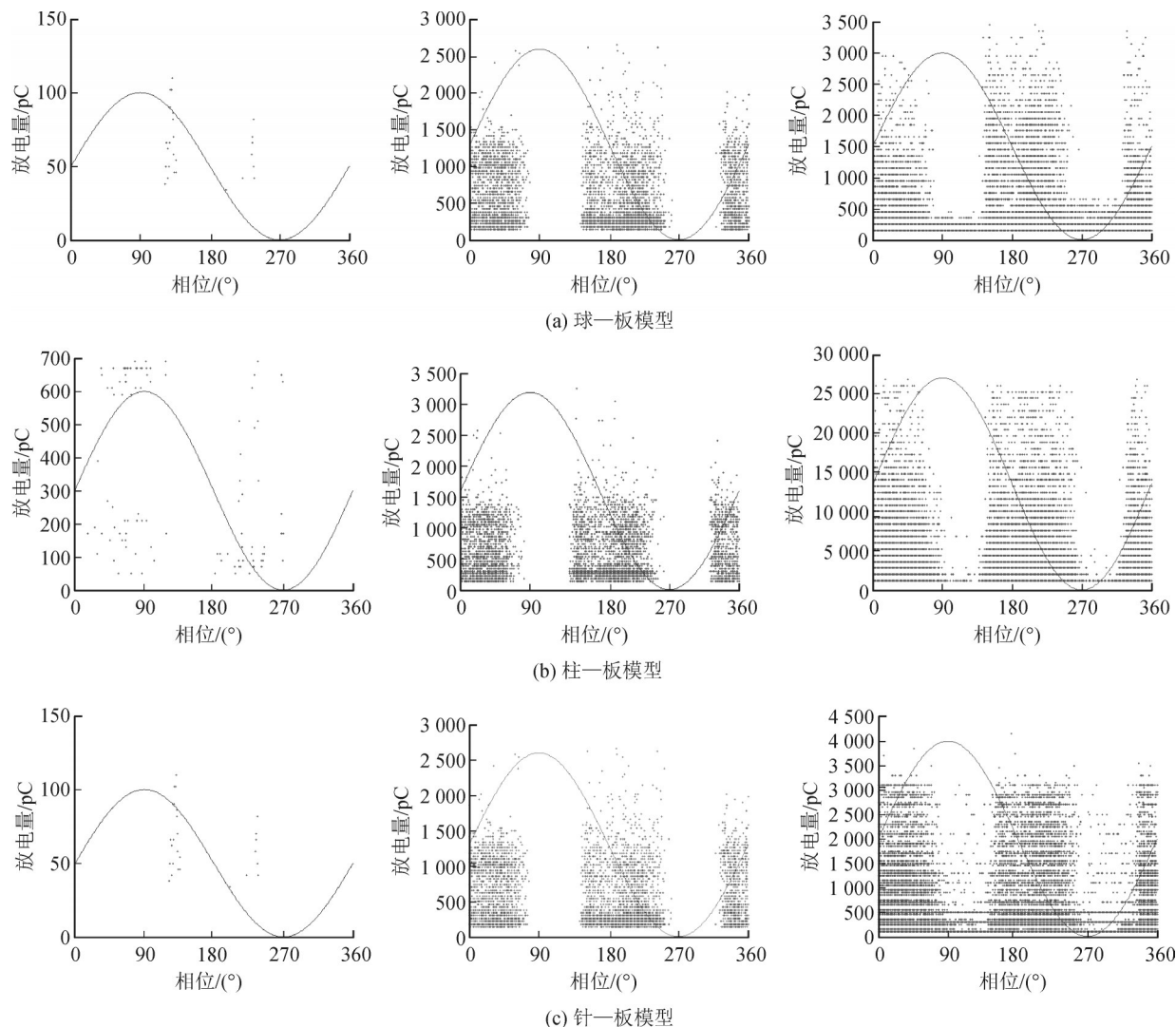


图3 3种缺陷模型下的局部放电相位谱图

Fig. 3 Phase resolved partial discharge under three defect types

从图3可以看出,3种模型下的相位谱图随加压时间具有相同的变化趋势。刚开始加压时局部放电几乎都在电压峰值附近产生,其他相位处没有或只有很少的放电;随着加压时间的增长,放电相位都呈现出逐渐向电压峰值两侧发展的趋势,放电相位宽度增加,放电密度也增大;在加压后期临近击穿时刻,放电几乎呈满相位分布,且放电幅值较加压前期和中期有明显增加。对比3种缺陷下的放电幅值可知,球一板与针一板电极下放电幅值比较接近,且明显小于柱一板电极下的放电幅值。

2.2 局部放电统计参量

为了定量地分析3种缺陷模型下局部放电的变化情况,得到了最大放电量与平均放电量、放电次数等统计参数随加压时间的发展趋势,见图4。

球一板模型下,最大放电量和平均放电量随加

压时间的延长均缓慢增长。放电次数在加压前期和中期一直处于上升阶段,在60 min达到峰值,随后急剧下降,并在最后10 min保持稳定。放电次数由上升到下降这一变化趋势的改变,可以作为球一板电极下放电发展至后期(60 min后),即绝缘材料临近击穿的判断依据。

柱一板模型下,最大放电量和平均放电量、放电次数呈现出与球一板模型下类似的变化趋势,即最大放电量与平均放电量在整个加压期间持续增大,而放电次数在临近击穿时刻(100 min)转为下降趋势,呈现出与加压前期和中期不同的变化规律。不同点在于,柱一板模型下最大放电量的增长主要体现在加压中期阶段(50~90 min),加压前期和后期增长幅度相对较小。

针一板模型下,局部放电统计参量的变化规律

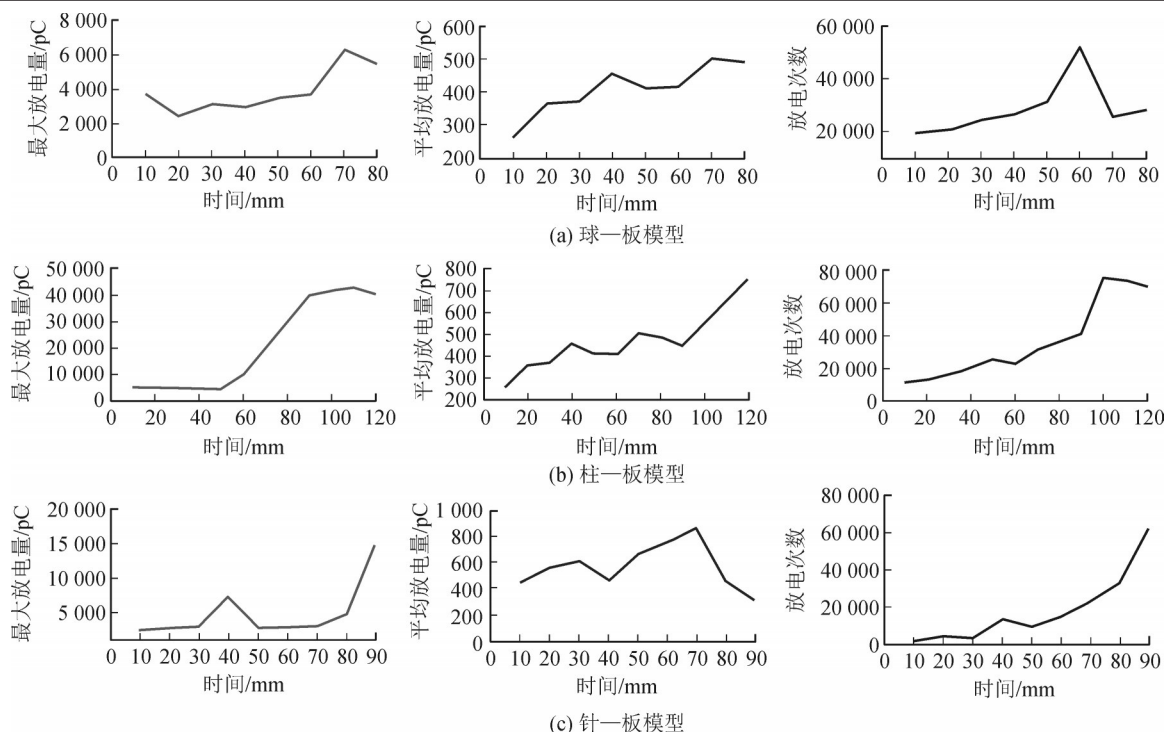


图4 3种放电模型局部放电特征参量图

Fig. 4 Partial discharge characteristics of three models

与前两种模型有明显的不同。针—板模型下最大放电量和平均放电量在加压前期和中期变化幅度均较小,而在加压后期(70 min后)前者急剧上升,后者快速下降,这与前两种模型下单调的变化趋势不同;放电次数在加压期间持续增长,不存在临近击穿时刻放电次数的骤降现象。

对比3种模型可知,3种情况下平均放电量和放电次数在量级上无明显差异,只是随加压时间的变化规律有所不同;而球—板、柱—板和针—板模型下的最大放电量分别约为5 000、45 000、15 000 pC,柱—板模型下的放电能量最大,是球—板的近10倍。

理想球形气隙下的局部放电量可表示为^[17-19]

$$\pm q = \varepsilon_0 \pi^2 \left\{ 1 + \varepsilon_r \left[K \left(\frac{a}{b} \right) - 1 \right] \right\} \Delta U \quad (1)$$

式(1)中: $K(a/b)$ 是气隙的形状参数; K 为比例常数; a 为气隙平行于电场方向的纵向半径; b 为气隙垂直于电场方向的横向半径; ε_0 和 ε_r 分别为真空中绝对介电常数和气隙中气体的相对介电常数; ΔU 为放电瞬间的气隙压降。

由此可以看出,局部放电量与放电瞬间的气隙压降成正比。需要说明的是,虽然文中实验模型下的放电气隙并非理想球形气隙,但不会改变放电量与放电气隙瞬时压降成正比这一关系,仅会影响与气隙形状相关的参数取值,如 $K(a/b)$ 这一形状参数。与球—板和针—板模型相比,柱—板模型下在

绝缘纸板表面存在强切向电场分量,因此在电极与纸板接触的表面,容易产生沿面爬电现象,放电电弧沿绝缘纸板表面的发展路径较长,即放电瞬间的电压降落加大,易导致大幅值放电的发生。

3 基于放电能量的缺陷严重程度评估

考虑到缺陷严重程度与局部放电强度直接相关,为对局部放电强度进行准确表征,引入放电能量的概念,其计算式为^[20]

$$W = U \sum_{i=1}^n q_i \sin \varphi_i \quad (2)$$

式(2)中: U 、 q_i 、 φ_i 分别代表外施电压峰值、局部放电量以及放电对应的相位; n 表示统计时间段内局放仪记录的总放电次数。

以10 min作为一个统计时间段,参照式(2)可得3种模型下每一时间段内的局部放电能量,其随加压时间的变化见图5。从图5可知,3种模型下放电能量随加压时间的变化趋势与图4中放电次数的整体变化规律类似,但同时又受到放电量大小的影响;放电能量按从大到小的顺序分别为柱—板模型>球—板模型>针—板模型,最大放电能量值分别为10、4、0.25 J。球—板模型下,放电能量随加压时间的延长先增加后减小,加压后期呈现出与前期、中期不同的变化规律;而柱—板和针—板模型下,放电能量整体表现为增长趋势。

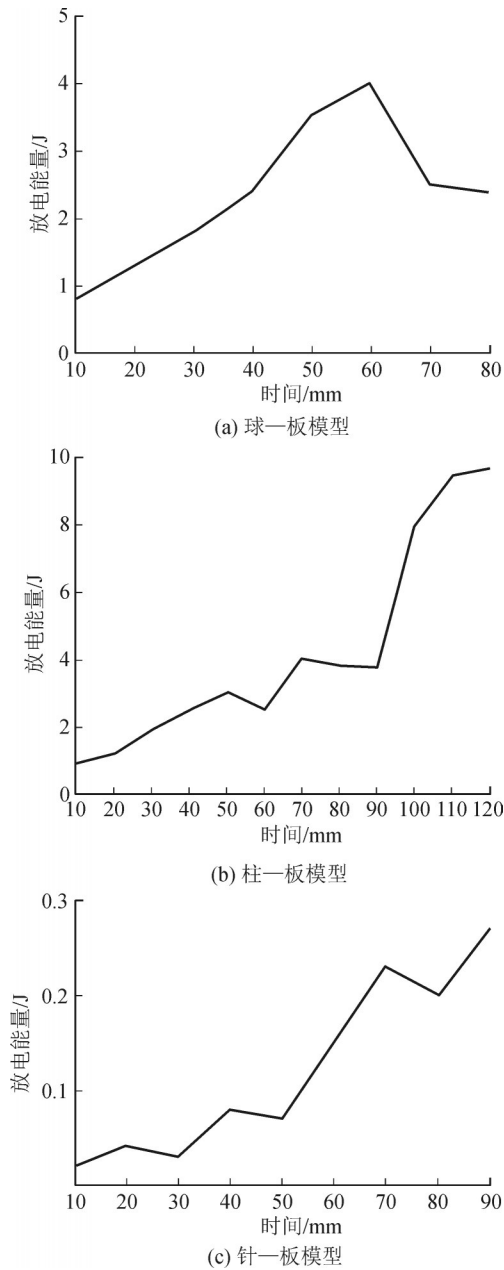


图5 3种缺陷模型下的放电能量变化

Fig. 5 Variation of discharge energy under three models

上述为各时间段放电能量的变化趋势,将各个时间段的放电能量相加,可以得到累积放电能量随加压时间的变化情况,见图6。累积能量反映了3个缺陷模型下各放电阶段累积总能量的变化趋势,以累积能量增长速率变化为依据,可将放电严重程度划分为起始、发展和危险3个等级,表征局部放电发展的3个不同阶段。不同阶段下的累积能量增长速率见表1。

分析累积能量变化趋势以及不同阶段的能量增长速率可知,不同缺陷模型下的累积能量幅值及其变化规律不同。对于球—板模型,发展阶段的增长速率最大,临近击穿时的增长速率介于起始和发展阶段之间;而柱—板和针—板模型下,累积能量

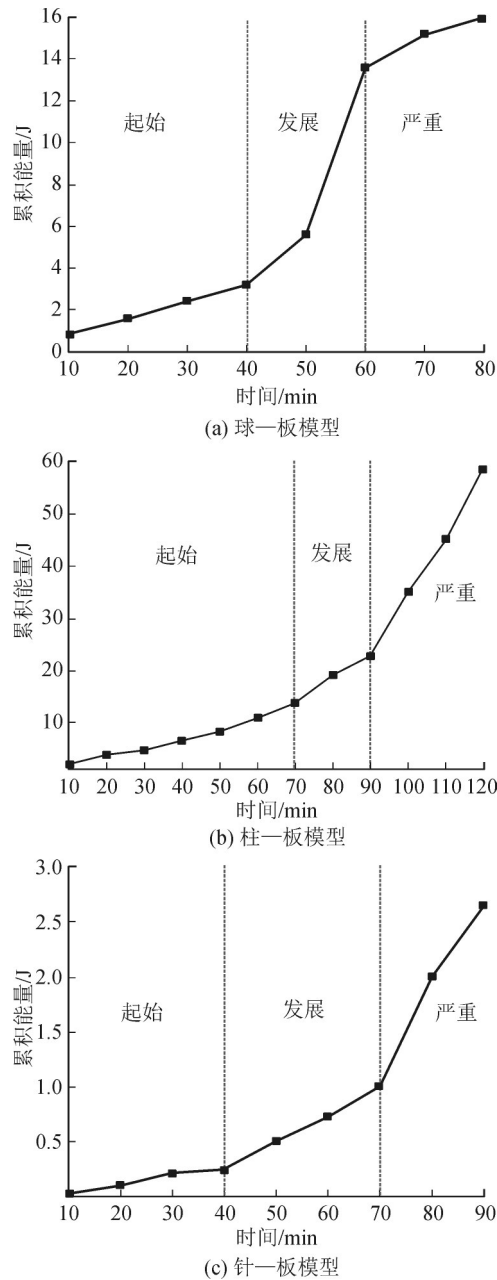


图6 累积放电能量随加压时间的变化

Fig. 6 Variation of cumulative energy with time

表1 不同阶段累积能量增长速率

Table 1 Growth rate of the cumulative energy J/min

模型	起始	发展	危险
球—板	0.080	0.520	0.120
柱—板	0.195	0.450	1.800
针—板	0.007	0.025	0.082

增长速率逐渐变大,后期危险阶段的增长速率是起始阶段的10倍以上,该数值可作为放电发展至危险阶段的量化指标。

4 结论

文中基于球—板、柱—板、针—板3种典型缺陷

模型,研究了油纸绝缘局部放电的发展过程,得到了放电特征参量及随时间的变化规律。主要结论如下:

1)在局部放电相位谱图中,初期放电主要集中在电压峰值附近,随后放电相位逐渐向峰值两侧发展,最终在放电后期呈满相位分布。球一板和柱一板模型下放电次数由上升至下降的趋势转变、针一板模型下平均放电量急剧下降、以及相位谱图的变化可作为放电发展至后期的诊断指标。

2)综合考虑放电幅值和放电次数的影响,引入放电能量的概念实现了放电强度的量化表征,相同电压幅值下放电能量由大到小的顺序为柱一板模型>球一板模型>针一板模型

3)与柱一板和针一板模型下各阶段放电能量的增长趋势不同,球一板模型下放电能量在临近击穿时刻会有所降低。

4)根据累积放电能量增长率的变化,可将局部放电划分为起始、发展和危险3个等级,柱一板和针一板模型下累积放电能量在放电后期的增长率是起始阶段的10倍以上,可将此作为危险放电的评估依据。

参考文献:

- [1] 梁方建,刘 勋,杨艳齐. 变压器安装事故的问题分析[J]. 高压电器,2012,48(6):119-122.
LIANG Fangjian, LIU Xun, YANG Yanqi. Accident analysis of transformer installation[J]. High Voltage Apparatus, 2012,48(6):119-122.
- [2] 李宏斌. 广东电网220 kV、110 kV电力变压器质量抽检结果分析[J]. 高压电器,2010,46(12):100-103.
LI Hongbin. Analysis on 220 kV and 110 kV power transformer quality spot check of Guangdong power grid corporation[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12):100-103.
- [3] 武中利. 电力变压器故障诊断方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.
WU Zhongli. Research on fault diagnosing methods for power transformers[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [4] 郭 俊,吴广宁,张血琴,等. 局部放电检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.
- [5] 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.
- [6] 俞 华,齐 琛,王天正,等. 大型变压器放电发展机理及原因分析[J]. 变压器,2014,51(3):60-63.
YU Hua, QI Chen, WANG Tianzheng, et al. Discharge development mechanism and causes analysis of large transformer[J]. Transformer, 2014,51(3):60-63.
- [7] KIM Y J, NELSON J K. Assessment of deterioration in epoxy - mica machine insulation[J]. IEEE Transaction on Electrical Insulation, 1992,27(5):1026-1039.
- [8] 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.
- [9] 陈 曦,陈伟根,王有元,等. 油纸绝缘局部放电与油中产气规律的典型相关分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):92-99.
CHEN Xi, CHEN Weigen, WANG Youyuan, et al. Canonical correlation analysis of dissolved gas production with partial discharges in oil paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(31):92-99.
- [10] 王 琼,付文光,杨 波. 不同电压形式下油纸绝缘柱板模型局部放电的特征[J]. 高压电器,2015,51(6):183-190.
WANG Qiong, FU Wenguang, YANG Bo. Features of partial discharge of plane-plate model in oil-paper insulation under different types of applied voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(6):183-190.
- [11] MALEWSKI R. Insulation diagnostic system for HV power transformer in service[J]. CIGRE 1986 Session, 1986(12):1.
- [12] 葛为民. 变压器局部放电综合判断分析[J]. 高压电器,2006,42(2):144-145.
GE Weimin. Comprehensive judgement analysis about partial discharge in transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2006,42(2):144-145.
- [13] 伍志荣,裴德鑫,陈江波. 特高压变压器局部放电试验分析[J]. 高电压技术,2010,36(1):54-61.
WU Zhirong, NIE Dexin, CHEN Jiangbo. Analysis of partial discharge test of UHV transformer[J]. High Voltage Engineering, 2010,36(1):54-61.
- [14] 廖瑞金,刘捷丰,杨丽君,等. 电力变压器油纸绝缘状态评估的频域介电特征参量研究[J]. 电工技术学报,2015,30(6):247-254.
LIAO Ruijin, LIU Jiefeng, YANG Lijun, et al. Investigation on frequency domain dielectric characteristics for condition assessment of transformer oil - paper insulation[J]. Transactions

- of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6):247-254.
- [15] 吴旭涛, 李秀广, 李军浩, 等. 交直流复合电压下油纸绝缘沿面局部放电特性研究[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 128-131.
- WU Xutao, LI Xiuguang, LI Junhao, et al. PD characteristics over oil/paper interface stressed by AC and DC composite voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4):128-131.
- [16] 陈伟根, 蔚超, 凌云, 等. 油纸绝缘气隙放电特征信息提取及其过程划分[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 7-12.
- CHEN Weigen, YU Chao, LING Yun, et al. Feature information extraction of air-gap discharge in oil-paper insulation and its process partition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4):7-12.
- [17] NIEMEYER L. A generalized approach to partial discharge modelling[J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4):510-528.
- [18] 谢波, 陈伟根, 崔鲁, 等. 油纸绝缘气隙放电发展能量熵特征研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12):58-64.
- XIE Bo, CHEN Weigen, CUI Lu, et al. Energy entropy feature research in air-gap discharge development process of oil-immersed paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12):58-64.
- [19] GUTFLEISCH F, NIEMEYER L. Measurement and simulation of PD in epoxy voids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5):729-743.
- [20] WANG Zhongdong, WANG Xin, YI Xiao, et al. Gas generation in natural ester and mineral oil under partial discharge and sparking faults[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(5):62-70.

满玉岩(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事高压设备绝缘老化与故障诊断研究。

(上接第222页)

- capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1):458-465.
- [20] 郑翔, 徐政, 屠卿瑞, 等. 静止同步串联补偿器次同步谐振多模式阻尼控制器设计[J]. 高电压技术, 2011, 37(9):2321-2327.
- ZHENG Xiang, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Static synchronous series compensator multimode damping controller design for subsynchronous resonance suppression[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9):2321-2327.
- [21] BONGIORNO M, SVENSSON J, ANGQUIST L. On control of static synchronous series compensator for SSR mitigation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 735-743.
- [22] THIRUMALAIVASAN R, JANAKI M R, XU Y J. Kalman filter based detection and mitigation of subsynchronous resonance with SSSC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2):1400-1409.

朱鑫要(1987—), 男, 博士, 工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制、电力系统次同步振荡、新能源并网, HVDC & FACTS等研究。

周前(1978—), 男, 研究员级高级工程师, 主要从事电力系统分析、电力系统仿真等研究。

刘建坤(1980—), 男, 研究员级高级工程师, 主要从事电力系统分析、电力系统规划、FACTS等研究。