

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.018

热机联合应力对油浸纸板绝缘及机械特性影响研究

刘志华, 崔彦捷, 汲胜昌, 祝令瑜

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049)

摘要:油纸绝缘系统在热、机械等应力共同作用下所发生的绝缘老化与破坏是电力变压器发生故障的主要原因之一,文中针对热机联合应力对油纸绝缘的影响开展了实验研究。对油浸纸板进行不同时间的热老化后施加不同形式的机械应力,测量纸板产生的应变,分析不同条件对油浸纸板的耐压时间、局部放电相位分布(PRPD)谱图、平均放电量等局放特征的影响。对未经老化的油浸纸板,机械应力加载时间越长、应力幅值越高或者应力频率越低,油浸纸板受到的破坏作用越严重,机械性能和绝缘性能越差。油浸纸板经过热老化处理后,机械应力对其绝缘性能和机械性能的影响趋势与未老化时类似,但热老化后PRPD谱图形态多呈现“兔耳状”。随着热老化时间的增加,纸板的绝缘寿命先有所上升,然后一直下降。文中研究结果可为热机联合应力下油浸纸板老化模型的建立提供试验依据。

关键词:油纸绝缘;热老化;热机联合应力;局部放电;局部放电相位分布(PRPD)谱图

中图分类号:TM855

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)05-0126-07

0 引言

电力变压器是电网中最关键、重要的电力设备,引发变压器故障的主要原因是运行年限增加导致内部绝缘系统在多应力作用下发生绝缘老化甚至绝缘破坏^[1-3]。油纸绝缘材料在电力变压器中应用广泛,在长期运行中,油纸绝缘材料会不断承受各种电、热及机械应力,并在应力的作用下逐渐发生老化,使油纸绝缘材料的绝缘及机械性能不断下降^[4-5]。因此,研究油纸绝缘材料的绝缘、机械特性在热机联合应力作用下的变化情况,对衡量变压器的绝缘状态、降低变压器的故障率有重要意义。

目前,国内外相关学者对油纸绝缘的热老化以及机械老化都有了一定的研究。从微观角度上看,油浸纸板的老龄化过程是纤维素等的链式结构发生断裂、产生缺陷的过程。在热的作用下,绝缘纸的聚合度会逐渐下降至极限阈值,并且有多种老化产物的生成^[6-9]。在机械力的作用下,绝缘材料受到的损伤不断累积,工作寿命会不断缩短^[10-11]。但目前有关热-机、机-电等复合老化作用对油纸绝缘、机械特性影响的研究相对来说还不够充分,有待进行更多的实验探究。在油纸绝缘系统状态检测方面,基于理化特征量检测^[12-15]、介电响应诊断技术^[16]与局部放电测量^[17-21]等方法的电力变压器油纸绝缘系统状态评估方法已较为成熟。

文中针对热机联合应力对油浸纸板的绝缘与

机械特性的影响开展研究。首先搭建机械应力加载平台、热老化平台及局部放电试验平台;然后对热机联合应力处理后的油浸纸板在板-板电极下进行局部放电试验;最后总结机械应力作用以及热机联合应力对油浸纸板机械与绝缘特性的影响规律,并对其影响机理进行分析。

1 热机老化及局部放电试验平台的搭建

1.1 热老化处理平台

试验中使用的变压器油为25号变压器油,绝缘纸板选用魏德曼公司生产的普通硫酸盐木浆纸板,厚度为1 mm。变压器油与绝缘纸板的热处理具体流程如下:

(1) 将绝缘纸板放入烘箱中,在110℃的真空环境下干燥48 h以去除水分。

(2) 向盛有绝缘纸板的烧杯中注入变压器油,放入烘箱中,在90℃的真空环境下干燥48 h,浸渍的同时除去变压器油中的水分和气体。

(3) 将盛有变压器油和纸板的烧杯置于烘箱中,先抽真空,再向烘箱中注入氮气,直至烘箱中压强升至 1.01×10^5 Pa。在130℃的温度下开始热老化。

(4) 分别取出达到相应老化时间的油浸纸板与变压器油(200 h, 400 h, 800 h),装入独立的烧杯中,在70℃的真空环境中静置。

1.2 机械应力加载平台

为了模拟电力变压器油纸绝缘系统所承受的短路力,文中采用的机械应力是以正弦为波形的循环应力,循环次数为3 000次。机械应力的频率设

收稿日期:2020-03-03;修回日期:2020-04-11

基金项目:国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U1866603)

置为 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz 这 4 个梯度, 应力幅值选取为 30 MPa, 50 MPa, 70 MPa, 以此来研究机械应力的频率与幅值等参数对油浸纸板绝缘与机械特性的影响。机械应力的加载在材料试验机 MTS-880/10T 上进行, 加载完成后对纸板的应变(纸板残留形变量与纸板厚度的比值)进行测量。

1.3 局部放电试验平台

局部放电试验在标准油杯中进行。电极结构为板-板电极, 板厚度均为 4 mm, 直径均为 25 mm, 材料为黄铜。以脉冲电流法为基础搭建如图 1 所示的试验平台。

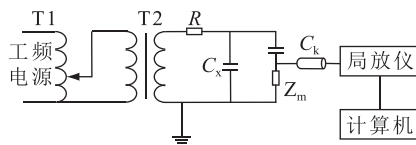


图 1 局部放电试验平台

Fig.1 Partial discharge test platform

试验中所采取的加压方法为逐步升压法。保持一定的速度与梯度逐步升压, 当电压达到预定值之后, 保持电压值恒定, 每隔固定时间(30 s 或者 1 min)采集一组局部放电数据, 采集时间为 10 s。最终试品击穿, 记录试品从电压达到预定值开始到最终击穿所经历的时间, 该时间即为试品在预定电压下的耐压时间。

试验击穿后试品形态如图 2 所示。图中圆形压痕即为机械应力处理后产生的形变, 2 个圆形板电极在压痕中央处夹紧, 在标准油杯中进行加压试验。击穿通道处于压痕范围中, 确保了试验结果的准确性。



图 2 击穿后试品形态

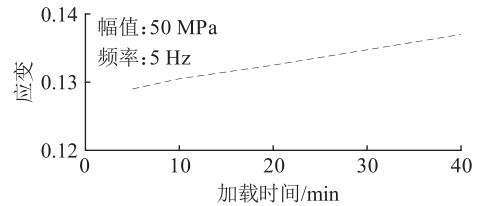
Fig.2 Specimen shape after breakdown

2 热机联合应力对纸板机械特性的影响

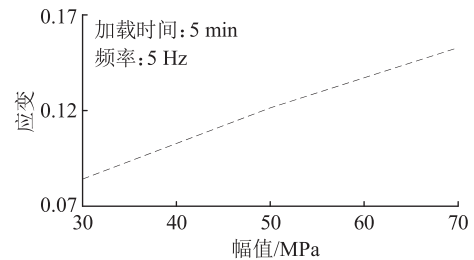
2.1 未老化纸板在机械应力作用后机械特性的演变规律

在机械应力的作用下, 油浸纸板的外观与形态均会有明显改变, 如印痕、凹陷甚至破裂等。对未老化纸板施加不同的机械应力, 改变应力的加载时间、幅值与频率, 得到 3 个因素对纸板应变的影响趋

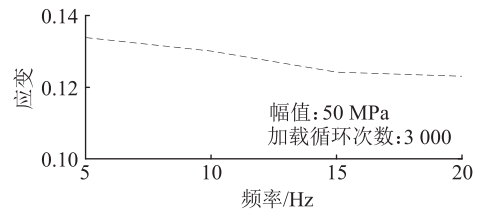
势, 如图 3 所示(改变频率时保持总加载循环次数不变)。



(a) 应力加载时间对应变的影响



(b) 应力幅值对应变的影响



(c) 应力频率对应变的影响

图 3 3 种因素对纸板应变的影响

Fig.3 The influence of three factors on the strain of paperboard

应力加载时间越长, 幅值越高, 频率越低, 纸板的应变越大, 纸板的机械特性受影响程度越高。

2.2 纸板在热机联合应力作用后机械特性的演变规律

在热老化作用下, 油浸纸板中的纤维素会逐渐发生热降解, 从而使得油浸纸板的结构变得疏松。施加与之前相同的机械应力后, 应变随 3 种因素变化的趋势类似, 但在长时间热老化以及高幅值应力作用下的应变出现了阈值, 如图 4 所示。

经过长时间热老化之后, 纸板中的纤维素结构经过热降解等作用已经遭到一定程度的破坏, 在此基础上给纸板施加机械应力(50 MPa), 纸板纤维素等结构就已经受到很大程度的破坏, 即使继续增加应力幅值, 或者延长热老化时间, 对纸板的破坏程度也不会有太大改变。

3 未老化纸板在机械应力作用后绝缘特性的演变规律

3.1 油浸纸板局部放电发展阶段

文中使用的是板-板电极进行局部放电试验, 典型的板-板电极局部放电发展过程如图 5 所示。可

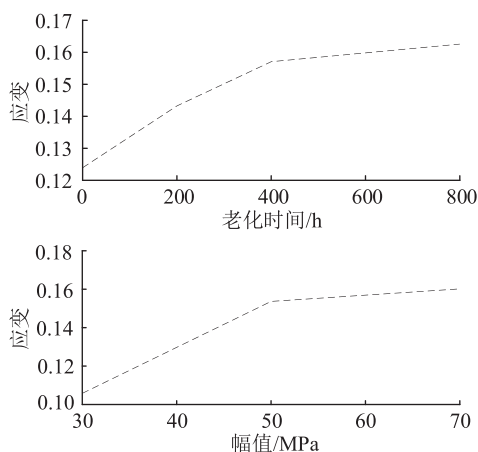


图4 应变在长时间热老化及高幅值应力作用下出现的阈值

Fig.4 The threshold value of strain under the action of long thermal aging time and high amplitude stress

以分为4个阶段:放电起始阶段、放电发展阶段、放电剧烈阶段以及击穿瞬间。每个阶段所对应的局部放电相位分布 (phase resolved partial discharge, PRPD) 谱图如图6所示。

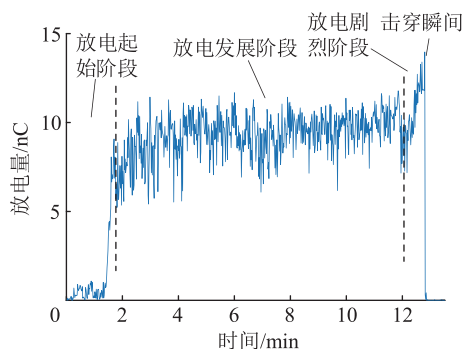


图5 局部放电发展过程

Fig.5 Development process of partial discharge

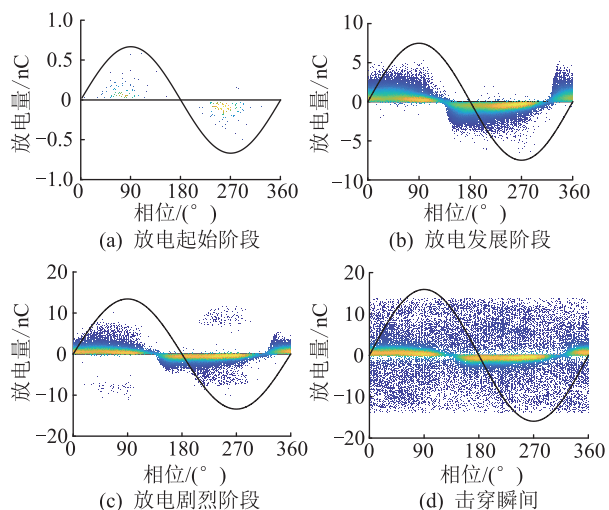


图6 各放电阶段的 PRPD 谱图

Fig.6 PRPD spectrum of each discharge stage

放电起始阶段持续时间较短,且只在部分相位存在局部放电。随着放电的持续进行,带电质点不断轰击绝缘材料,使得固有缺陷逐渐增大,放电逐渐从部分相位的局部放电发展为全相位的局部放电,同时放电量也明显增加,由放电起始阶段逐渐向放电发展阶段转变。此阶段放电量较高,主要集中在6~10 nC,局部放电由部分相位发展到全相位,且持续时间较长。放电剧烈阶段放电量持续增加,直至最后发生击穿。

选取持续时间最长、放电特征也较明显的放电发展阶段作为特征阶段。因为在某一放电阶段,最大视在放电量 and 放电重复率等局部放电特征量基本保持在一定的水平^[22],所以选取放电发展阶段作为特征阶段进行局部放电特征量的提取与分析具有一定的可靠性。

3.2 机械应力幅值对纸板绝缘特性的影响

对2.1节中不同应力幅值下的纸板进行局部放电试验,记录纸板在特定电压下(22 kV)的耐压时间、局部放电平均放电量、放电重复率等特征参量,并通过PRPD谱图对不同应力幅值下纸板的放电形态变化进行分析。

随着幅值的增大,纸板的内部结构收到的破坏越大,纸板的耐压时间逐渐减小。机械应力幅值对纸板局部放电PRPD谱图的影响如图7所示。

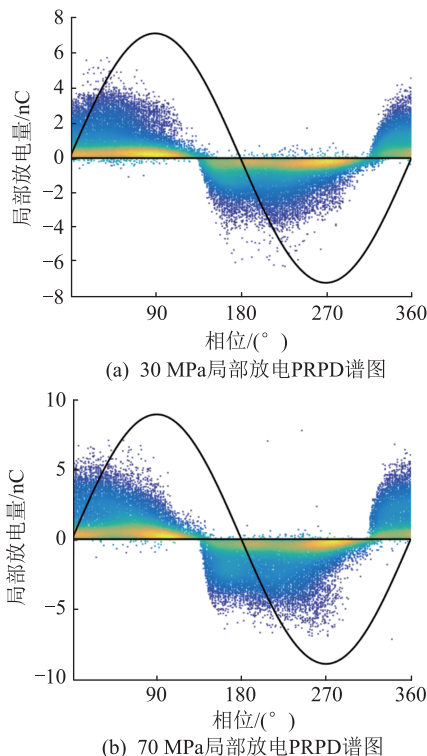


图7 不同幅值下纸板局部放电 PRPD 谱图

Fig.7 PRPD spectrum of partial discharge of paperboard under different amplitudes

30 MPa 时的放电形态为“龟背状”,在电压上升沿与下降沿处放电量相对较小,而 70 MPa 时放电形态更偏向于“方块状”,在全相位上的放电量都较高。

机械应力幅值对纸板局部放电特征量的影响如图 8 所示,平均放电量与放电重复率都随应力幅值的增大而增大。

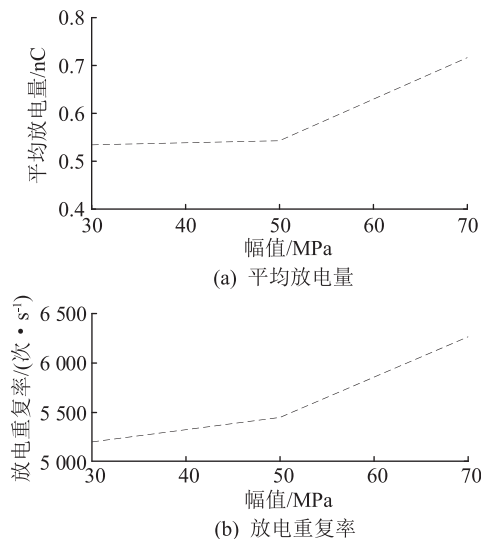


图 8 不同幅值下纸板局部放电特征量

Fig.8 Characteristics of partial discharge of paperboard under different amplitudes

3.3 机械应力频率对纸板绝缘特性的影响

试验中改变频率时保持总加载循环次数不变,所以频率越低,应力的等效加载时间就越长,纸板的耐压时间越短。不同频率下局部放电 PRPD 谱图并无明显的形态变化,都为“龟背状”。平均放电量与放电重复率则随着频率的降低而增大。

3.4 纸板在不同电压下绝缘寿命的演变

对经过相同应力处理后的纸板进行不同电压下的耐压试验,可以得知随着电压的升高,耐压时间呈现指数下降的趋势。

考虑到击穿时间长短与分散性的影响,试验电压取值为 21~24 kV。不同幅值应力下的纸板在不同电压下的耐压时间如图 9 所示,低幅值下的纸板耐压曲线整体高于高幅值下的耐压曲线。施加电压越高,应力幅值越高,纸板的绝缘寿命越短。

4 纸板在热机联合应力作用后绝缘特性的演变规律

4.1 热老化时间对纸板绝缘特性的影响

以热老化时间为变量,对不同时间(0, 200 h, 400 h, 800 h)热老化后的纸板施加相同的机械应力,以此来研究在不同热老化时间下纸板绝缘特性

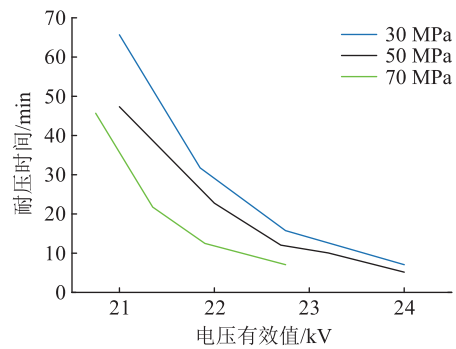


图 9 纸板的绝缘寿命曲线

Fig.9 Insulation life curve of paperboard

的变化规律。不同热老化时间下纸板的耐压时间如图 10 所示。

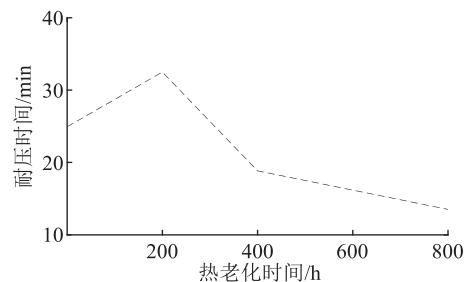


图 10 不同热老化时间下纸板耐压时间

Fig.10 Withstand time of paperboard under different thermal aging time

随热老化时间的增加,纸板耐压时间先有所上升,然后一直下降,800 h 处的耐压时间最低。200 h 热老化纸板的耐压时间明显高于未老化纸板,是因为老化时间不太长时,热老化会先把纸板中的水分蒸干,起到了彻底干燥的作用。而水分含量对纸板纤维素的老化作用十分明显,水分含量每升高 1%,纤维素水解老化速率就会倍增^[23]。200 h 处的干燥作用降低了纸板水分含量,使得耐压时间有一定的上升,提高了纸板的绝缘性能。

在长时间热老化后,纸板的 PRPD 谱图会出现“兔耳状”放电特征,在电压上升沿处放电量较突出,如图 11 所示。出现“兔耳状”放电是固体绝缘内部存在气隙缺陷的结果^[24],经过长时间的热老化处理之后,纸板中原本平滑、排列紧密的纤维变得粗糙,纤维之间的排列也逐渐松散,结合力也不断下降^[25],在机械应力的作用下,纸板内部更容易产生气隙缺陷,所以热老化后纸板的局部放电 PRPD 谱图存在“兔耳状”放电特征。

4.2 热老化后机械应力幅值对纸板绝缘特性的影响

热老化后,纸板的耐压时间、平均放电量与放电重复率与未老化时的趋势类似,而在 PRPD 谱图

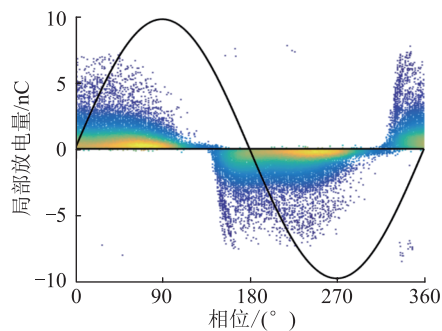
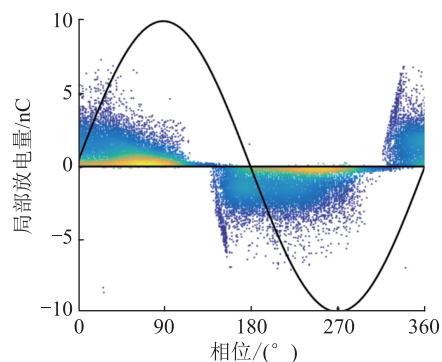


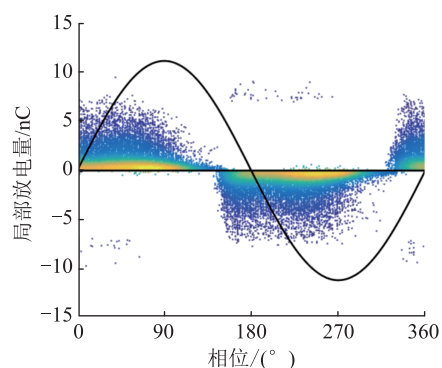
图 11 800 h 热老化后纸板局部放电 PRPD 谱图

Fig.11 PRPD spectrum of partial discharge of paperboard after 800 hours thermal aging

上有一定的改变。不同应力幅值下纸板的局部放电 PRPD 谱图如图 12 所示。



(a) 30 MPa 时局部放电 PRPD 谱图



(b) 70 MPa 时局部放电 PRPD 谱图

图 12 热老化后不同幅值下纸板局部放电 PRPD 谱图

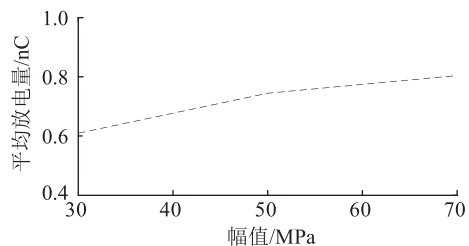
Fig.12 PRPD spectrum of partial discharge of paperboard under different amplitudes after thermal aging

在低幅值应力下,放电谱图呈现“兔耳状”,在高幅值下呈现“方块状”,与未老化时的“龟背状”向“方块状”转变有一定不同。

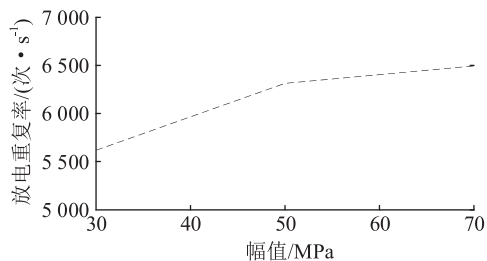
在 30 MPa 下,热老化后纸板由于热机应力联合作用,产生的内部气隙缺陷更多,所以呈现“兔耳状”而不是未老化时的“龟背状”;在 70 MPa 高幅值应力作用下,纸板内部的缺陷已经很多,所以老化与未老化时均为“方块状”。

图 13 为热老化后不同应力幅值下纸板局部放

电特征量变化情况,随着应力幅值的增高,纸板在热老化与机械应力的联合作用下的放电程度愈发剧烈,对应的 PRPD 谱图出现放电量在全相位都较高的“方块状”。



(a) 平均放电电量



(b) 放电重复率

图 13 热老化后不同幅值下纸板局部放电特征量

Fig.13 Characteristics of partial discharge of paperboard under different amplitudes after thermal aging

4.3 热老化后机械应力频率对纸板绝缘特性的影响

热老化后,纸板的耐压时间、平均放电量与放电重复率与未老化时的趋势类似,同样是在 PRPD 谱图上有一定的改变。热老化后的纸板在不同频率应力下的 PRPD 谱图都呈现不同程度的“兔耳状”,且频率越低,“兔耳状”特征越明显。

5 结论

文中通过对油浸纸板施加不同的机械应力以及不同的热老化处理,研究了热机联合应力对油浸纸板机械与绝缘特性的影响规律。得到结论如下:

(1) 随着热老化时间和应力幅值的增大,纸板应变增大,但增大速率逐渐下降。

(2) 机械应力加载时间越长、幅值越高或者频率越低,纸板的耐压时间越短,平均放电量与放电重复率越大。纸板的耐压时间与所加电压幅值近似呈指数关系。

(3) 在热老化时间不超过 200 h 时,随着热老化时间的增加,纸板的耐压时间也有所增加。但超过 200 h 后,老化时间越长,纸板的耐压时间越短。热老化不影响机械应力幅值与频率对纸板的绝缘寿命与局部放电特征量的影响趋势,但会影响 PRPD 谱图形态。

参考文献:

- [1] 康兵,杨勇,李振兴,等. 基于实际运行数据的配电变压器故障原因多维度分析[J]. 智慧电力,2019,47(3):66-70,116.
KANG Bing, YANG Yong, LI Zhenxing, et al. Multidimensional analysis of causes of distribution transformer fault based on actual operation data [J]. Smart Power, 2019, 47(3): 66-70, 116.
- [2] 翟章良,周力行. 基于状态量权重的变压器状态评价系统研制[J]. 智慧电力,2018,46(9):88-94.
ZHAI Zhangliang, ZHOU Lixing. Development of transformer state evaluation system based on state quantity weight [J]. Smart Power, 2018, 46(9): 88-94.
- [3] 中国南方电网. 南方电网 2008—2013 年变压器故障分析报告[R]. 广州,2013.
China Southern Power Grid. Transformer fault analysis report of China Southern Power Grid in 2008—2013 [R]. Guangzhou, 2013.
- [4] 林晓宁,蔡金錠. 基于粗糙集理论的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(7):22-29.
LIN Xiaoning, CAI Jinding. Evaluation of transformer oil-paper insulation based on rough set theory [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 22-29.
- [5] 刘庆珍,张晓燕,蔡金錠. 基于降维技术与 K-means 聚类的油纸绝缘状态综合灰评估[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(8):62-70.
LIU Qingzhen, ZHANG Xiaoyan, CAI Jinding. Comprehensive grey evaluation for oil-paper insulation based on dimension reduction techniques and K-means cluster [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 62-70.
- [6] 廖瑞金,杨丽君,郑含博,等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报,2012,27(5):1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.
- [7] PAOLO Calvini. The Influence of levelling-off degree of polymerisation on the kinetics of cellulose degradation [J]. Cellulose, 2005, 12(4): 445-447.
- [8] EMSLEY A M, STEVENS G C. Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers [J]. IEEE Proceedings of Science, Measurement and Technology, 1994, 141(5): 324-334.
- [9] 穆龙,兰生,黄明亮. 不同类型电热应力下变压器油纸绝缘老化特性实验研究[J]. 电气技术,2018,19(12):29-34.
MU Long, LAN Sheng, HUANG Mingliang. Study on aging characteristics of transformer oil-paper insulation under different types of electro-thermal stress [J]. Electrical Engineering, 2018, 19(12): 29-34.
- [10] MCNUTT W J, PATEL M R. The combined effects of thermal aging and short-circuit stresses on transformer life [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(4): 1275-1286.
- [11] 杨丽君. 变压器油纸绝缘老化特征量与寿命评估方法研究 [D]. 重庆:重庆大学,2009.
YANG Lijun. Study on aging characteristics and life evaluation method of transformer insulation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [12] LUNDGAARD L E, HANSEN W, LINHJELL D, et al. Aging of oil-impregnated paper in power transformers [J]. IEEE Transactions on power delivery, 2004, 19(1): 230-239.
- [13] 连鸿松,郑东升,王兆东,等. 基于多特征指标综合评价的油纸绝缘热老化程度研究 [J]. 绝缘材料, 2018, 51(3): 64-69.
LIAN Hongsong, ZHENG Dongsheng, WANG Zhaodong, et al. Study on thermal ageing level of oil-paper insulation based on comprehensive evaluation with multi-characteristic parameters [J]. Insulating Materials, 2018, 51(3): 64-69.
- [14] 董明,张瑞刚,张冠军,等. 回复电压法在变压器故障诊断中的应用 [J]. 电网与水力发电进展, 2007, 23(4): 21-25.
DONG Ming, ZHANG Ruigang, ZHANG Guanjun, et al. Application of recovery voltage measurement in fault diagnosis of oil-immersed transformer [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2007, 23(4): 21-25.
- [15] 孙长海,杨子江,葛维春,等. 双变量因素影响下的绝缘纸板去极化电流研究 [J]. 变压器, 2019, 56(4): 41-45.
SUN Changhai, YANG Zijiang, GE Weichun, et al. Study on the depolarization current of insulation paper affected by bivariate factors [J]. Transformer, 2019, 56(4): 41-45.
- [16] 廖瑞金,郝建,杨丽君,等. 变压器油纸绝缘频域介电特征量与绝缘老化状态的关系 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 43-49, 76.
LIAO Ruijin, HAO Jian, YANG Lijun, et al. Relationship between frequency domain dielectric characteristic quantity and aging status of transformer oil-paper insulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 43-49, 76.
- [17] 司文荣,李军浩,袁鹏,等. 直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析 [J]. 西安交通大学学报, 2008(4): 481-486.
SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, et al. Measurement and analysis for pulse current shapes of partial discharge in oil under DC voltage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008(4): 481-486.
- [18] 廖瑞金,杨丽君,孙才新,等. 基于局部放电主成分因子向量的油纸绝缘老化状态统计分析 [J]. 中国电机工程学报, 2006(14): 114-119.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, SUN Caixin, et al. Aging condition assessment of oil-paper based on principal component and factor analysis of partial discharge [J]. Proceedings of the CSEE, 2006(14): 114-119.
- [19] 金朝向,王俊丰,刘根才,等. 不同老化程度的油纸绝缘中气隙缺陷局部放电特性研究 [J]. 绝缘材料, 2013, 46(6): 53-56.
JIN Xiangchao, WANG Junfeng, LIU Gencai, et al. Partial dis-

- charge characteristic study of gap defect in oil-paper insulation under different aging degree[J]. *Insulating Materials*, 2013, 46(6):53-56.
- [20] RAMYA M, UDAYAKUMAR K. Characterization of partial discharge phenomenon on paper insulation under aggravated aging conditions[C]//Proceedings of IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids. 2002:433-436.
- [21] 潘志新, 刘利国, 钱程, 等. 基于融合极限学习机的局部放电模式识别[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(5):42-48.
PAN Zhixin, LIU Ligu, QIAN Cheng, et al. Pattern recognition of partial discharge based on fusion extreme learning machine [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(5):42-48.
- [22] 谢波. 油纸绝缘气隙放电产气和能量变化特性及信号能量熵特征研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
XIE Bo. Study on the characteristics of gas generation, energy change and signal energy entropy in air gap discharge of oil paper insulation[D]. Chongqing:Chongqing University, 2016.
- [23] 朱孟兆, 廖瑞金, 杜修明, 等. 绝缘纸中水分扩散及其对绝缘纸机械性能影响的仿真研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(10):338-345.
ZHU Mengzhao, LIAO Ruijin, DU Xiuming, et al. Simulation of diffusion of moisture in insulation paper and the affect on mechanical properties of the paper[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(10):338-345.
- [24] 张芊, 韩旭涛, 张哲铭, 等. 固体绝缘内部气隙缺陷尺寸和位置对其局部放电特性的影响[J]. *高电压技术*, 2019, 45(4):1313-1322.
ZHANG Qian, HAN Xutao, ZHANG Zheming, et al. Influences of internal void defect dimension and position on partial discharge characteristics in the solid insulation[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(4):1313-1322.
- [25] CAO Pei, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. The effect of thermal aging on surface structure and mechanical strength of oil-impregnated pressboard[C]//Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2016 International Conference on. IEEE, 2016:1000-1003.

作者简介:



刘志华

刘志华(1997),男,硕士在读,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail:lzh2536@stu.xjtu.edu.cn);

崔彦捷(1991),男,博士在读,研究方向为高电压与绝缘技术;

汲胜昌(1976),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力设备在线监测及故障诊断技术等。

Influence of thermo-mechanical combined stress on insulation and mechanical characteristics of oil-impregnated paperboard

LIU Zhihua, CUI Yanjie, JI Shengchang, ZHU Lingyu

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: The main cause of transformer fault is insulation aging and damage caused by internal oil-paper insulation system under thermal and mechanical stress. The effect of thermo-mechanical combined stress on oil paper insulation is studied. Oil-impregnated paperboard is subjected to thermal aging at different times and different forms of mechanical stress are applied, and the strain generated by the paperboard under stress is measured. The effects of different loading conditions on the characteristics of withstand time, phase resolved partial discharge (PRPD) spectrum, average discharge capacity and other partial discharge characteristics were analyzed. The longer the stress loading time, the higher the stress amplitude or the lower the stress frequency, the more severe the damage of the oil-impregnated paperboard under the same mechanical stress, and the worse the mechanical insulation and mechanical properties of the paperboard. Under the action of thermo-mechanical accumulation, the effect of different mechanical stress is similar to that of unaged, but the morphology of PRPD spectra after thermal aging is mostly "rabbit-like". With the increase of thermal aging time, the insulation life of paperboard first increased, then decreased. The results of this study will provide a reference for establishing an aging model of oil-impregnated paperboard under thermo-mechanical combined stress.

Keywords: oil-paper insulation; thermal aging; thermo-mechanical combined stress; partial discharge; phase resolved partial discharge (PRPD) spectrum

(编辑 方晶)