

换流变压器局部放电检测与特性研究综述

高树国¹, 赵军¹, 乔辉², 田源¹, 王亚林³, 尹毅³

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050022; 3. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240)

摘要:随着我国特高压直流输电系统工程的发展,换流变压器的电压等级越来越高,绝缘问题也越来越突出。局部放电的研究对于换流变压器绝缘状况的判断以及设备寿命的评估具有重要的意义。本文介绍了换流变压器的绝缘特点、现场试验的过程、局部放电的检测方法及其注意事项,回顾了中外专家学者对换流变压器局部放电研究的成果,最后展望了换流变压器局部放电的研究方向,为换流变压器的运行维护和学术研究提供参考。

关键词:换流变压器;局部放电;交直流电压;油纸绝缘

中图分类号:TM835 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9239(2022)07-0001-09

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.07.001

Review of Partial Discharge Detection and Characteristics of Converter Transformer

GAO Shuguo¹, ZHAO Jun¹, QIAO Hui², TIAN Yuan¹, WANG Yalin³, YIN Yi³

(1. Hebei Electric Power Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Supply Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050022, China; 3. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the development of UHV DC transmission system engineering in China, the voltage level of converter transformers is getting higher and higher, and insulation problems are becoming more and more prominent. The study of partial discharge is of great significance to the insulation condition judgment and equipment life evaluation of converter transformer. In this paper, the insulation characteristics, the process of field tests, and the detection methods of partial discharges and their precautions of converter transformer were introduced, the research achievements of experts and scholars at home and abroad on the partial discharge of converter transformer were reviewed, and the research directions of partial discharge of converter transformer were prospected, which provided a reference for the operation, maintenance, and research of converter transformers.

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

0 引言

换流变压器是连接交流和直流系统的重要部件,换流变压器的一次侧(网侧)绕组与交流输电系统连接,二次侧(阀侧)绕组与直流换流阀连接。在运行过程中,换流变压器一方面要连接直流、交流输电系统,传输电能,另一方面要完成电压等级的

变换,使得两侧电压符合所需的额定电压并且能够处于可控的电压偏移范围内。

换流变压器的绝缘结构较为复杂,使用的绝缘材料包含变压器油、聚合物纸或纸板等,绝缘形式呈现复合绝缘的特点。在正常运行过程中,换流变压器绝缘需要耐受不同形式的电压,比如脉动直流电压、交直流叠加电压、操作和雷电冲击电压以及极性反转电压^[1-2]。对于油、纸和纸板复合绝缘,在交流和冲击电压作用下,各绝缘部分的电场分布取决于各绝缘材料介电常数的比例关系;而在直流高压作用下,各绝缘部分的电场分布主要取决于各

收稿日期:2021-09-02

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目(kjcb2020-013)

作者简介:高树国(1982-),男(汉族),河北张家口人,正高级工程师,主要从事电气设备状态监测的研究工作。

绝缘材料的电阻率。然而,各绝缘部分的电阻率容易受到各种因素的影响,比如温度、湿度、承受的电场强度、电场施加时间以及空间电荷积累等^[3]。此外,换流阀还可能会出现极性反转的情况,极性反转瞬间,反向电场和积累的空间电荷电场同向叠加,加剧了内部电场强度。因此,油纸复合绝缘在不同电压形式的作用下,内部各绝缘部分的电场分布不同,具有发生放电故障的风险。

据 CIGRE 调查和统计,58.8%的直流输电系统故障是由换流变压器故障引起的,而换流变压器的绝缘故障约占 50%^[4]。换流变压器的故障形式主要为线圈绝缘失效、油中放电和套管故障等,放电故障是换流变压器所有故障类型中较为主要的一部分。绝缘老化过程中,局部放电现象是伴随发生的重要现象,也是导致设备故障的重要因素。针对换流变压器运行状态进行局部放电在线监测,可以及时发现早期的故障隐患,对于换流变压器绝缘状态评估和维护以及电网的安全运行具有重要意义。换流变压器由于承受的电压形式多样,其局部放电特性与普通电力变压器不同,对换流变压器的局部放电特性与检测进行归纳和总结有助于了解换流变压器的失效原因,辅助换流变压器运维并保障其可靠性。

本文对换流变压器的局部放电研究进行综述,主要介绍换流变压器局部放电现场试验、局部放电的主要类型、局部放电的检测方法以及交直流混合情况下换流变压器绝缘局部放电特性等,旨在总结国内外学者的研究,为后续研究提供参考方向。

1 换流变压器局部放电现场试验

目前针对换流变压器的试验是基于 IEC 61378-2-2001 标准,标准中与局部放电相关的试验主要包括外施直流电压耐受试验、极性反转试验和外施交流电压耐受试验,试验加压程序如图 1 所示,其中 N 为六脉冲桥的串联数目, U_{dm} 为阀桥直流最大电压, U_{vm} 为阀侧绕组最大交流相电压。

(1)外施直流电压耐受试验:油温为 $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$,施加电压为正极性。非被试端子和套管在试验前都接地,保证电荷泄放。试验电压在 1 min 内升至规定水平并保持 120 min,之后电压应在 1 min 内完全降低到 0。此外,在直流耐压结束后应进行充分的放电,排除残余电荷的干扰。标准规定,在试验的最后 30 min 内大于 2000 pC 的放电不超过 30

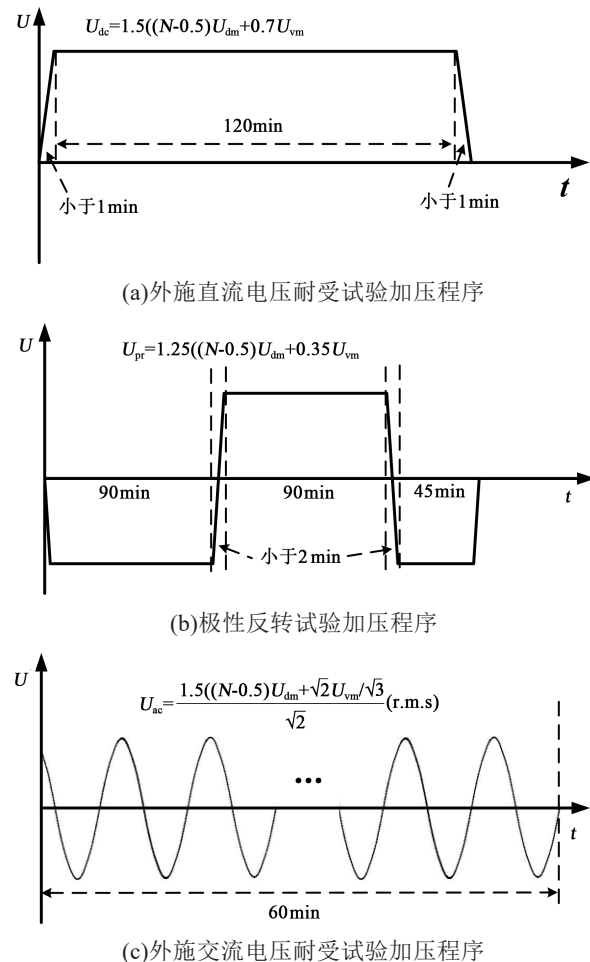


图 1 特高压换流变局部放电试验加压程序

Fig.1 Partial discharge test procedure for UHV converter transformer

个,且最后 10 min 内不超过 10 个可以认为试验通过。

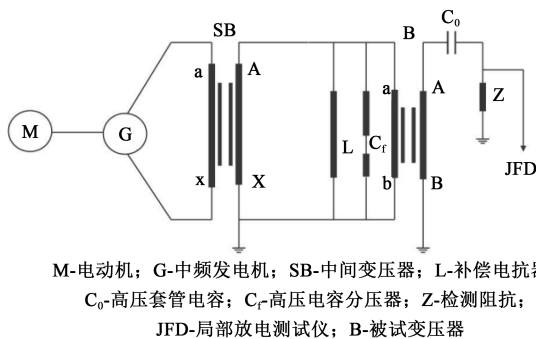
(2)极性反转试验:油温为 $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$,非被试端子固定接地,所有套管端子应在试验开始前至少接地 2 h,不允许对结构预先施加较低的电压。采用双极性反转试验,负极性电压-正极性电压-负极性电压交替,施加时间分别是 90、90、45 min,每次电压极性反转均应在 2 min 内完成。判断试验是否通过的放电次数和放电量与外施直流电压耐受试验相同。

(3)外施交流电压耐受试验:采用 50 Hz 或 60 Hz 的交流电压,电压应施加在与各相应端子连接在一起的每个绕组上,所有非被试端子都应接地。局部放电测量按 IEC 60076-3-2013 附录 A 的适用部分进行,测量仪器按 IEC 60270-2015 的标准要求,试验持续时间为 1 h。判断试验是否通过的局部

放电标准和上述两种试验略有不同,允许的局部放电电量最大值应不超过 500 pC。

可以看出,换流变压器的交流耐压性能要求高于直流耐压性能,这是由于直流电压下局部放电的重复特性并不显著,影响因素也更多,具有一定的偶然性,对直流下的局部放电测试要求更低。

目前报道的在现场对换流变压器进行的试验大多为交流电压下的局放试验。湖北省电力试验研究院的吴云飞等^[5]对向家坝-上海±800 kV 特高压直流输电示范工程的换流变压器进行了局部放电试验,提出了对称加压与单边加压两种试验接线方式并进行了试验效果比较,如图2和图3所示。针对试验电源方案,采用了中频电动机-发电机组结合与高压变频电源的不同形式并进行了比较。此外,分析了现场局放试验中的干扰来源,采用紫外成像技术、超声定位技术和宽频局部放电检测技术来抵抗干扰,现场局放试验表明,采用对称加压和单边加压相结合的接线方式以及中频电动机-发电机组的方式试验效果更好。青海电科院的岳海龙等^[6]研究了高海拔地区±800 kV 换流变现场局部放电试验技术,提出了基于变频并联谐振原理的试验装置,并对现场局部放电检测试验中防止电晕干扰提出了可行措施。国家电网公司的卢理成等^[7]首次对 ±1 100 kV 昌吉换流站的换流变在阀厅进行了阀侧外施交流耐压及局部放电测量,提出首端加装隔离变压器和尾端加装电感阻波器的双级滤波回路,采用“扇形布局、一点接地”的方法,降低了地线带来的试验干扰。



M-电动机; G-中频发电机; SB-中间变压器; L-补偿电抗器;
C₀-高压套管电容; C_r-高压电容分压器; Z-检测阻抗;
JFD-局部放电测试仪; B-被试变压器

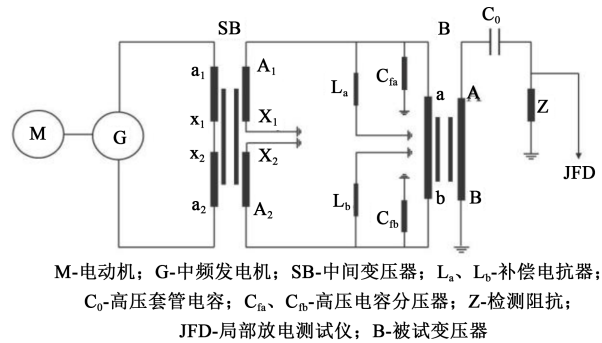
图2 局部放电试验单边加压方式

Fig.2 Unilateral partial discharge test method

2 换流变压器局部放电的起因及检测方法

2.1 局部放电的起因

换流变压器内部的绝缘系统主要是油纸复合绝缘,在设计和出厂之前已经通过了各类电性能和



M-电动机; G-中频发电机; SB-中间变压器; L_a、L_b-补偿电抗器;
C₀-高压套管电容; C_a、C_b-高压电容分压器; Z-检测阻抗;
JFD-局部放电测试仪; B-被试变压器

图3 局部放电试验对称加压方式

Fig.3 Symmetrical partial discharge test method

力学性能校核。然而目前换流变压器在运行与维护过程中时有放电等异常现象出现,其原因较多,主要包括绝缘材料本身缺陷、制造过程中引入外部杂质、运输贮存时引入缺陷和运行老化。

绝缘材料本身可能存在质量不合格的问题,比如纸板存在裂纹、绝缘纸存在金属和非金属颗粒,这些绝缘材料本身的缺陷使得换流变压器绝缘无法耐受或无法长期耐受额定应力,导致局部放电发生。为了避免绝缘材料本身的缺陷,重点部位绝缘件应在变压器厂内安装前进行X光检测。

此外,变压器在制造过程中容易引入外部杂质,这主要与制造工艺和厂内环境控制有关,比如二次拆除或返修产品容易出现脏污、引入杂质颗粒和人为损伤等缺陷情况。

除了在换流变制造环节引入缺陷外,运输和贮存过程中也容易出现受潮、现场组装失误等状况。目前要求换流变压器如果贮存时间超过3个月应充油保存,且除了在充气过程中记录过程气压外,运到现场安装之前还应测试换流变内部气体露点,评估整体绝缘状态。

换流变压器通过了一系列出厂和交接试验后,也有可能在正常运行过程中逐渐出现老化的情况,产生油中水分、金属毛刺、气泡、机械缺陷等。这些缺陷会使换流变压器油纸绝缘在长期运行过程中出现放电并最终导致故障,比如油中含有的水分或者固体绝缘在电场或其他因素作用下发生化学分解或放电产生二氧化碳、一氧化碳,进而形成气泡,由于气体的介电常数小于液体和固体绝缘,交流电场往往会在气体内部集中,容易发生局部放电,威胁绝缘可靠性^[8]。

2.2 局部放电的检测方法

经过几十年的发展,针对 50/60 Hz 交流电力设备的局部放电检测已经形成了相应的行业标准。然而,现场测试时往往伴随大量的干扰而影响局部

放电的检测。一般来说,局部放电检测方法可以分为非电学方法和电学方法两大类,这些方法的优缺点总结在表1中。

表1 不同局部放电检测方法的优缺点比较

Tab.1 Comparison of advantages and disadvantages of different partial discharge detection methods

局部放电检测方法	检测频带	优点	缺点	
声学方法	20 kHz~2 MHz	1.电磁干扰免疫性强 2.可用于局放定位	1.非定量方法 2.响应速度不快	
非电学法	光学方法	3×10 ¹⁴ ~2×10 ¹⁵ Hz	电磁干扰免疫性强	1.在黑暗环境中使用 2.测试不能有阻挡
	化学方法	—	电磁干扰免疫性强	1.响应速度很慢 2.需要积累足够的局放产物
电学法	脉冲电流法/高频电流互感器	3~30 MHz	1.定量方法 2.被大量标准收录	1.易受容性脉冲干扰 2.响应速度中等
	电磁感应法/UHF法	300 MHz~3 GHz	1.一定的抗电磁干扰性 2.无需接触	1.非定量方法 2.数据采集要求高

2.2.1 非电学检测法

非电学检测法的原理是将局部放电引起的非电学物理现象转化为电信号,大多具有抗干扰性强的优点。非电学方法主要包括声学方法、光学方法和化学方法^[9-11]。

(1)声学法是指在被测设备表面贴上压电传感器,检测局部放电引起的机械振动(声波)。有些研究者使用声学法来定位换流变压器中局部放电发生的位置^[12]。然而,声学法的输出信号频率通常是从几千赫兹到几兆赫兹,振荡信号持续几毫秒,无法捕捉到发生在冲击电压快速上升沿的多个局部放电信号。此外,声学法检测到的信号可能不是真实的局部放电信号,而是局部放电声波信号在被测设备内部的反射,需要谨慎处理避免误判。

(2)光学法是另一种相对较新的局部放电检测方法^[13],它利用光电倍增管或其他光敏感器件收集绝缘中微弱的放电发光。虽然该方法具有相当好的抗电干扰能力,但检测必须在黑暗环境中进行,光探头必须指向可能发生局部放电的位置,这意味着检测人员需要提前估计可能发生局部放电的区域来布置相应检测点。

(3)与上述声学 and 光学方法相比,化学方法最不敏感。化学传感器用于检测局部放电产生的化学产物,例如臭氧等。与施加电压的周期相比,化学方法检测的时间要长很多。

2.2.2 电学检测法

电学检测方法是发展最完善的局部放电检测方法^[14-15]。电学局部放电检测方法主要包括脉冲电流法和电磁法。

(1)脉冲电流法使用耦合电路或高频电流互感器(HFCT)来检测局部放电产生的电脉冲,从而可以将检测到的信号直接映射为放电量。但是,如果换流变压器遭受快速变化的脉冲电压时,会产生不可忽略的位移电流来掩盖局放电流,影响局部放电的检测。

(2)局部放电感应电磁信号通常具有从几千赫兹到千兆赫兹的广泛分布的频谱^[16]。特高频(ultra-high frequency, UHF)方法是最常见的局放电磁检测方法。带宽为300 MHz~1.5 GHz的天线常用于接收局部放电在介质中产生的电磁波,广泛用于工业在线监测。这种方法具有较强的抗干扰特性和非接触特性的优点。然而,该类方法一般不具有定量检测的条件,检测信号的波形和幅值受到多种因素诸如天线的幅频响应、检测的位置、放电信号的频带等的影响。

2.3 局部放电检测的干扰来源及抑制手段

换流变压器的局部放电检测是在有各种干扰的环境中进行的,局部放电信号有时可能被干扰信号完全湮没。因此,如何最大限度地识别干扰和抑制干扰而获得可靠的局部放电信息成为变压器局部放电检测中的重要研究课题。

2.3.1 干扰来源

换流变压器局部放电检测干扰的主要来源包括以下几种:

(1)空间电磁干扰

电磁辐射在空间中广泛存在,其来源也非常多样,比如雷电、空气中的静电放电、无线电信号、50 Hz电磁辐射、电机运转的辐射、电子设备的高频辐

射等。除此之外,高压设备的裸露导体或者尖端产生的电晕也是干扰来源之一。

(2) 接地部分引入的干扰

接地是高压试验最为重要的试验准备工作之一,由于大量电器设备的使用,大地表层存在多种共模干扰电流,若接地不可靠,大地中具有悬浮电位的金属会引入静电耦合,产生的干扰杂波会对局部放电测试产生一定影响。因此,局部放电测试中为了保证具有低的接地电阻,一般采用单点接地,接地铜棒的入地深度也要得到保证。

(3) 换流阀动作干扰

对于换流变压器的现场局部放电检测,换流阀的脉动干扰也是不可忽视的重要来源之一。换流阀相当于电子开关,在开通和关断时,构成换流阀的晶闸管或IGBT两端的电压和电流突变,阻抗也会发生快速的变化,导致传导和辐射干扰,影响换流变现场局部放电的测量。

掌握局部放电的干扰来源后,需要进一步识别局部放电检测中的干扰信号,主要包括以下流程:

1) 在不通电不施加电压时进行检测,获得除测试系统之外引入的外部干扰信号。

2) 空载时检测的信号与测试试样无关,与未施加电压时的信号比较可以甄别测试系统的干扰信号。

3) 在通电但不施加电压时检测电源系统引入的干扰信号。

2.3.2 抑制手段

在识别出干扰的来源后,一般采用如下几种方法抑制局部放电的测量干扰^[7]:

(1) 根据波形的特征进行甄别并通过模拟或数字信号处理手段抑制干扰,比如局部放电波形大多呈现震荡的脉冲形式,频谱分布较为广泛,相比于白噪声等其他周期性出现的干扰,波形有一定差别。

(2) 通过滤波器等硬件手段屏蔽或滤除干扰,例如将测试系统和试样放置在法拉第笼里,使用金属屏蔽盒保护检测电路免受辐射干扰,选择滤波器滤除干扰。

(3) 由于局部放电信号具有很宽的频带,也可以通过检测固定频段的局部放电分量来避免其他频段的干扰,比如检测现场具有固定频段的无线电信号和网络信号,可以通过检测其他频段的局部放电信号来避免这些干扰。

干扰的抑制一般是从干扰源、干扰途径、信号后处理3个方面考虑。找出干扰源直接消除或切断相应的干扰路径,是解决干扰最有效、最根本的方法。以上抑制干扰的手段通常联合使用,一般抑制噪声干扰的思路为先硬件后软件。在局部放电检测前通常对环境噪声进行测定,排除通信信号的干扰。对于实验室中的研究可构造相应的微型屏蔽室。对于采集系统中放大器和电源等因素导致的不可避免的白噪声,可通过db2和db8小波变换等方案滤除。

3 不同电压形式下的油纸绝缘局部放电特性研究

由于针对换流变压器本体进行局部放电特性研究不是很现实,并且换流变压器内部绝缘的主要形式是油纸绝缘,因此大部分研究者主要针对油纸绝缘进行局部放电特性研究。

3.1 交流电压

交流电压下油纸绝缘局部放电的研究主要包括:局放模式识别、局放发展过程与老化程度评估。

(1) 局放模式识别

局放模式识别的目标是希望通过统计分析方法或其他手段分析局部放电信号的波形特征和统计特征,识别可能发生的放电故障类型,进而判断可能的局部放电位置。传统的局放模式识别方法是通过分析多次放电叠加后的放电频次-放电幅值-放电相位统计谱图,计算形状分布参数如偏斜度、陡峭度等,进而根据形状分布参数的不同判断放电类型。另外的方法是通过分析单次波形的时频域特征,判断放电类型。

目前随着人工智能技术的发展,人工智能方法也逐渐被应用在局放模式识别中。使用人工智能进行模式识别的步骤大致分为两步:第一步为有效特征的提取。由于局部放电波形包含的频谱广泛,可以通过多种方法检测,并且获得的数据信息量大,存在冗余的情况,有效特征往往隐藏在大量的数据中,一般不会直接将原始局放信号输入模式识别模型中。特征提取手段主要包括对局部放电信号的时域和频域谱进行分析,或者使用人工智能方法进行数据降维。第二步为故障类型判断。使用人工智能算法对不同缺陷类型的局部放电信号特征量进行训练,学习局部放电类型与特征的关联性,进而对未知局部放电信号采用同样的模型处理

来识别局部放电类型。

局放模式识别的算法多种多样,部分算法之间存在交叉和融合的特性,下面根据模式识别算法的主要类型进行分类阐述。

1) 模糊识别法

模糊识别法并不直接确定局部放电信号属于哪种放电类型,而是通过隶属度函数,计算出不同放电类型的识别概率,然后选择概率高的类型作为最有可能的放电类型。模糊概率的使用提高了识别结果的泛化性能,有助于人工判断,也可以结合专家的先验知识进行更为准确的判断,使用方式灵活。全玉生等^[18]通过对不同局放类型下采集的单个局部放电特高频脉冲信号进行小波包分解,提取熵值和能量等6个特征量,使用模糊理论计算了不同放电模式的参考量,识别结果较好。

2) 聚类算法

聚类算法的核心是通过将不同类型的局部放电信号特征映射到特征空间,进而通过特征空间上不同放电类型之间的距离来判断放电类型。常见的聚类方法包括K-means法等。ZHU M X等^[19]对局部放电信号在时域和频域的累积能量函数进行特征提取,并采用K-means聚类算法将多种放电类型分离,如图4所示。但是聚类算法容易受噪声信号的干扰,并且对于放电特征相似的放电类型难以识别^[20]。

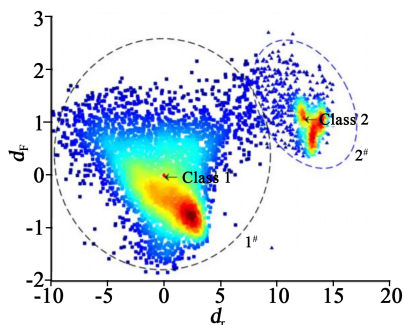


图4 聚类分析法局部放电模式识别实例

Fig.4 Clustering method for partial discharge pattern recognition

3) 支持向量机法

支持向量机将局部放电信号提取的低维特征向量映射到高维空间进行区分,因而具有较好的抗干扰性。支持向量机的参数选取对局放模式识别效果具有较大影响,比如核函数的选取和局放提取特征的不同往往会影响到识别准确率。

4) 神经网络以及深度学习法

神经网络作为应用最广的人工智能算法,得到了非常广泛的应用。在此基础上,为了学习更深层的隐藏规律,深度神经网络被提出。深度神经网络由于具有大量的神经元和学习参数,可以直接将特征提取与故障识别两部分整合并同时实现。何金等^[21]采用稀疏自编码器实现基于相位分辨脉冲序列图谱的特征提取,提取后使用神经网络对局放类型获得超过80%的识别准确率。除此之外,卷积神经网络和循环神经网络也被用于处理局部放电图像特征和时序特征。

(2) 局放发展过程与老化程度评估

华北电力大学王辉^[22]对油纸绝缘局部放电进行长期监测,并将放电过程划分为放电起始阶段、发展阶段和严重阶段;放电起始阶段具有多种特征,放电频次较低,放电幅值和产生的能量较小,放电相位集中在较窄的范围;随后在发展阶段放电次数开始增多,能量和幅值也越来越大,放电造成的烧蚀痕迹逐渐明显。英国南安普敦大学的H ZAINUDDIN等^[23]对油纸绝缘的沿面放电进行了研究,结果表明随着外加电压的升高,沿面放电的发展过程呈现4个阶段,沿面闪络发展严重程度受施加电压以及施加时间的影响。局部放电是油纸绝缘老化的一种表现形式和先兆,不同老化程度的油纸绝缘中局部放电存在较大差异,因此可以利用局部放电的特征来诊断绝缘老化状态。基于局部放电来评估油纸绝缘的老化状态需要选择出能够表征局部放电信息、反映老化状态的特征量。选择特征量可以PRPD谱图为基础,也可以从脉冲信号的时域波形入手。重庆大学的杨眉等^[24]在油纸绝缘多因子老化诊断方面进行了大量研究,根据局部放电特征量和聚类分析参数,得出谱图偏斜度可以用于评估油纸绝缘针板模型下的老化状态,并提出油纸绝缘状态诊断方法。

3.2 直流电压

直流电压下的局部放电由于施加电压的极性不发生变化,和交流电压下的局部放电相比呈现不同的特性。以油中气隙放电为例,若直流电压下气隙内发生放电,由于空间电荷的积累,在气隙内会产生与外施电压相反的电场,进而导致气隙内实际电场小于起始放电电场,放电不能自持,之后若空间电荷通过气隙壁或体泄放中和,内部电场逐渐增加,可能引发再次放电。因此直流电压下放电重复

周期不规律,放电频次也比交流情况下小很多^[25-27]。换流变压器阀侧绕组长期承受直流高压作用,因此很多研究人员对直流情况下油纸绝缘的局部放电进行了深入研究。

(1)局放模式识别

荷兰 Delft 科技大学的 H F PETER 等^[28]对直流电压下局部放电测试及其模式识别进行了大量研究,类交流电压下局部放电的相位信息,引入直流下放电时间间隔概念,从而提出直流下的图谱识别概念。意大利 Bologna 大学的 A CAVALLINI 等^[29]根据威布尔分布的形状参数,放电幅值和间隔时间曲线的偏斜度、陡峭度等提取的形状参数,分析了局部放电波形的时域和频域谱特征,并基于这些特征分辨了内部放电、沿面放电和电晕放电。中国电科院的徐征宇等^[30]总结了直流电压下局部放电模式识别方法,指出直流局部放电的特征提取和模式识别与交流类似,主要包含统计特征量以及人工智能算法等,但在交流中采用的分形特征提取法和图像矩特征法却未得到应用。

(2)局放特征及影响因素

国外还有文献研究了直流情况下试验电压幅值、加压时间等电压波形参量对局部放电发生频次和放电信号时间序列的影响规律。西安交通大学的于钦学等^[31]对直流下油纸绝缘的局部放电进行研究,发现油纸绝缘的局部放电重复频率与施加电压和温度呈现正相关性。常温下,放电随时间的延长逐渐减弱,重复频率也逐渐减小。高温下,局部放电重复频率没有衰减情况出现。西安交通大学的司文荣等^[32]研究了直流电压下油纸绝缘中局部放电的超高频特性,指出不同放电类型的放电能量集中在不同的频带,此外,放电信号的波形也呈现与交流不同的特性,局部放电信号的宽度和上升下降沿参数均有所不同,为直流电压下根据波形参数判断局放类型提供了参考。

(3)局放演变与绝缘状态评估

上海交通大学的白建社等^[33]提出基于时间窗处理方式的直流局放特征参数提取方法,通过移动固定宽度的时间窗,将时间窗内的放电次数和放电量作为局部放电特征参量,反映油纸绝缘的状态。华北电力大学的杨波^[34]搭建了直流下的局放模拟系统,实验研究了在恒定温度下不同缺陷模型中的放电发展过程。研究表明直流局部放电发生的重复频率低,局部放电在外施电压改变时会出现增强现

象,待电压稳定一段时间后强度逐渐减弱。在放电全周期直到击穿过程中,局部放电的各特征参量如放电次数、放电量等均没有大的变化。

3.3 交直流复合电压

如前所述,换流变压器中的油纸绝缘承受的电压形式复杂,阀侧绕组的绝缘也承受交直流电压混合的情况,需要进行复合电压下的试验来研究换流变压器绝缘的局部放电特性^[35-39]。

(1)局放特征以及与其他电压形式比较

西安交通大学的孙振权等^[40-41]搭建了工频交流、直流叠加工频交流、直流叠加不同频率交流、直流叠加谐波等复合电压源以及模拟直流输电系统的电源,研究了不同放电模型在不同复合电压下的局部放电特性。研究表明对于内部缺陷放电,交直流叠加情况下的局部放电起始电压低于纯交流情况,随着复合电压中交流电压频率的升高,放电平均幅值下降,放电重复率提高,放电相位后移。西安交通大学的麦洪等^[42]研究了交流及直流复合电压下油纸绝缘气隙缺陷的局部放电特性,试验表明当直流电压分量较低时,放电特性由交流分量决定,随着直流电压比例的增加,同极性放电逐渐增强,而相反极性的放电得到了抑制。祝令瑜等^[43]研究了油纸绝缘针板缺陷在交直流复合电压作用下预击穿阶段的局部放电特性,实验表明针板缺陷油纸绝缘在直流复合电压下,局部放电的规律不明显,在时域范围具有一定的随机波动性,平均放电幅值和周期放电数总体上随加压时间增加而减小。

(2)不同缺陷下的局放模式

文献[44-45]设计了悬浮、沿面、针板、气隙等不同放电模型,以平均放电量和放电重复率为特征区分了局部放电发展的不同阶段,得出交直流电压中的直流分量可有效抑制放电量和放电重复率。不同放电模式的识别可通过起始放电量、放电重复率以及气体成分来进行区分,悬浮放电具有较高的放电重复率,而针板模型的起始放电量最高,针板模型容易产生更多的甲烷^[45]。清华大学的周远翔等^[46-47]研究了交直流复合电压下不同缺陷模型局部放电的起始过程,结果表明,不同的放电缺陷模型对复合电压的波形参数和幅值呈现不同的敏感度。针板电极的局部放电起始电压只与施加电压的幅值有关,而板板电极的局部放电起始电压与直流分量的关系不大。此外,交直流叠加电压下油纸绝缘沿面闪络的试验结果表明,在复合电压下,沿面闪

络电压比只施加交流电压时低,沿面闪络电压随着直流电压分量的增加而增加。

(3)局放发展与特征演变

齐波等^[48]研究了交直流叠加电压下油纸绝缘内部气隙放电的发展过程,结果表明交直流叠加电压下,油纸绝缘气隙起始放电发生在复合电压的交流负半周期,随后放电的相位分布逐渐扩散,并且正半周期开始出现放电,放电次数也逐渐提高。

刁常晋等^[49]搭建了交直流复合电场下局部放电试验检测平台,用恒定电压和阶梯升压两种方法研究了多种电压形式下油纸绝缘的局部放电特性。结果表明,恒定电压下油纸绝缘的放电呈现间歇性,虽然放电重复频率不高,但单次放电的幅值较大。阶梯升压情况下,局部放电起始电压与复合电压中的交流电压分量更相关。在长时间的加压过程中,复合电压下快击穿时局部放电强度增加,重复频率较高,随着老化程度的加深,放电特性均呈现上升的趋势。

4 结束语

换流变压器局部放电的研究具有很强的工程实际意义,随着特高压直流输电系统输电电压等级的提高,换流变压器的局部放电测量与特性研究将会越来越重要。由于直流、工频交流以及高次谐波叠加起来的复合电压形式是换流变压器实际使用过程中承受的电压形式,复合电压下换流变压器油纸绝缘的局部放电特性是研究的重点,然而国内外学者对此还没有形成统一的结论。根据换流变压器局部放电的研究成果总结和梳理,给出了未来的研究方向:

(1)当前换流变压器试验标准仅包含单一直流或单一交流下的试验,对于交直流叠加下的试验标准仍未给出。应根据换流变压器电压波形中交直流电压的比例来制定相应试验标准,进而全面评估换流变压器局部放电的风险。

(2)有关换流变压器局部放电的研究多针对于模式识别领域,对于故障定位方面研究较少,后续研究可通过设计天线阵列组合等方式实现局部放电电源的定位。

(3)多传感器数据融合有助于全面表征局部放电的强度以及放电规律,通过电学测量法和非电学测量法的结合能够提供局部放电综合信息,有望为能源互联网的构建和电力设备状态智能评估提供

数据支撑。

(4)换流变压器油纸绝缘在 50 Hz 交流电压下的局部放电研究已经趋于完善,但有关交直流混合以及 3 次、5 次等高频分量下的局部放电机理和特性仍未形成统一的理论。

参考文献:

- [1] 杜伯学,朱闻博,李进,等.换流变压器阀侧套管油纸绝缘研究现状[J].电工技术学报,2019,34(6):1300-1309.
- [2] 梁晨,邓军,周海滨,等.换流变压器典型绝缘缺陷案例[J].变压器,2019,56(10):80-84.
- [3] 刘青松,邓军,池明赫,等.水分对复合电场下油纸绝缘局部放电特性的影响[J].哈尔滨理工大学学报,2018,23(6):82-87.
- [4] LIU Y, ZHANG D, LI Z, et al. Evaluation of the calculation method for stray losses in structural parts of HVDC converter transformers[C]//2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Changsha, China: IEEE,2015:1780-1785.
- [5] 吴云飞,汪涛,沈煜,等.特高压换流变压器现场局部放电试验技术[J].高电压技术,2011,37(9):2140-2143.
- [6] 岳海龙,王生杰,包正红,等.高海拔地区±800kV换流变现场局部放电试验技术研究及应用[J].青海电力,2020,39(4):42-45.
- [7] 卢理成,文卫兵,王庆,等.±1100kV换流变压器阀侧外施交流耐压及局部放电测量[J].高压电器,2019,55(12):106-111.
- [8] 魏振,孙昭昌,史蕾琦,等.复合电压比例对油纸绝缘沿面放电的影响[J].绝缘材料,2017,50(12):43-47.
- [9] GAO C, XU Y, WANG J, et al. Partial discharge online monitoring and localization for critical air gaps among SiC-based medium-voltage converter prototype[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2019,34(12):11725-11735.
- [10] ZHANG C, XU Y, DONG M, et al. Design and assessment of external insulation for critical components in a medium voltage SiC-based converter via optical method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(12):12887-12897.
- [11] YOU H, WEI Z, ALDAWSARI M, et al. Partial discharge behaviors in power module under very high dv/dt repetitive square voltages[C]//2019 IEEE Electrical Insulation Conferenc. Calgary, Canada:IEEE,2019:489-492.
- [12] 曹成,张剑峰,程涣超,等.变压器局部放电超声定位技术改进研究[J].变压器,2021,58(3):76-79.
- [13] 孙廷玺,陈浩,钱森,等.光纤传感技术在局部放电检测的研究进展[J].高压电器,2018,54(11):1-8.
- [14] International Electrotechnical Commission. High-voltage test techniques - Partial discharge measurements: IEC 60270-2015 [S]. Geneva, Switzerland:IEC,2015.
- [15] International Electrotechnical Commission. Railway applications - Power converters installed on board rolling stock - Part 1: Characteristics and test methods: IEC 61287-1-2014[S]. Geneva, Switzerland:IEC,2014.
- [16] 刘顺成,向加佳,陈剑,等.局部放电特高频检测校准影响因素

- 研究[J]. 电力工程技术,2021,40(3):128-134.
- [17] 张广宏,魏本刚,任晓明. 电力变压器局部放电干扰信号抑制的研究[J]. 变压器,2018,55(12):53-57.
- [18] 全玉生,何秋宇,卢天盛,等. 电力变压器局放信号抗干扰与模式识别[J]. 电力自动化设备,2008,28(1):57-60.
- [19] ZHU M X, ZHANG J N, LI Y, et al. Partial discharge signals separation using cumulative energy function and mathematical morphology gradient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(1):482-493.
- [20] 靖小平,彭小圣,姜伟,等. 基于K-Means聚类算法的自动图谱识别在电缆局部放电在线监测系统中的应用[J]. 高电压技术,2012,38(9):2437-2446.
- [21] 何金,曹梦,王伟,等. 基于稀疏自编码和极限学习机的局部放电模式识别[J]. 高压电器,2018,54(11):295-300.
- [22] 王辉. 变压器油纸绝缘典型局部放电发展过程的研究[D]. 保定:华北电力大学,2010:1-8.
- [23] ZAINUDDIN H, MITCHINSON P M, LEWIN P L. A method for the measurement of leakage current due to surface discharge at the oil-pressboard interface[C]//2011 Electrical Insulation Conference. Annapolis, USA: IEEE,2011:41-44.
- [24] 杨眉,李剑,杨丽君,等. 变压器典型油纸绝缘局部放电特性[J]. 重庆大学学报,2007,30(2):46-49.
- [25] FROMM U. Interpretation of partial discharge at DC voltages [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 761- 770.
- [26] RENATE S. Ramp technique for DC partial discharge testing[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1985,20(1):38-46.
- [27] RENATE S, JOHN L. Partial discharge testing under direct voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System,1982,18(1):82- 93.
- [28] PETER H F, JOHAN J. Partial discharges at DC voltage: Their mechanism, detection and analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2005,12(2):328- 340.
- [29] CAVALLINI A, MONTANARI G C, CIANI F. Analysis of partial discharge phenomena in paper-oil insulation systems as a basis for risk assessment evaluation[C]//IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Coimbra, Portugal: IEEE, 2005: 241-244.
- [30] 徐征宇,李光范,赵志刚. 直流电压下局部放电研究进展[J]. 智能电网,2014,2(10):19-25.
- [31] 于钦学,印昌容,谢恒. 油纸绝缘直流局部放电的研究[J]. 变压器,1998,35(5):17-20.
- [32] 司文荣,李军浩,袁鹏. 直流下局部放电试验与测试系统设计[J]. 高压电器,2008,44(4):326-328.
- [33] 白建社,盛戈峰,江秀臣等. 基于移动时间窗的直流局部放电特征提取方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(14):55-58.
- [34] 杨波. 直流电压下油纸绝缘模型放电发展过程的研究[D]. 保定:华北电力大学,2010:1-8,11-20.
- [35] 李斯盟. 换流变直流电场分量对油纸绝缘针板局放特性影响及其放电机理研究[D]. 济南:山东大学,2019.
- [36] 邓颖. 换流变压器绝缘结构分析[J]. 高压电器,2011,47(10):53-55.
- [37] 孙优良. 特高压换流变压器绝缘特性的研究[D]. 保定:华北电力大学,2012:1-8,42-47.
- [38] 王琼. 不同电压形式下油纸绝缘柱板模型局部放电的特征[D]. 保定:华北电力大学,2012:1-3.
- [39] 张血琴,吴广宁,李晓华,等. 典型绝缘缺陷的直流局部放电信号波形分析[J]. 绝缘材料,2007,40(3):58-59.
- [40] 孙振权,赵学风,李继胜,等. 雷电冲击电压下油纸绝缘气隙模型的局部放电测量与分析[J]. 西安交通大学学报,2009,43(12):75-80.
- [41] 顾朝敏,孙振权,郭治锋,等. 交直流复合电压下油纸绝缘内部气隙缺陷局部放电特性[J]. 高压电器,2010,46(12):9-13.
- [42] 麦洪,金向朝,李军浩,等. 交流及直流复合电压下油纸绝缘气隙缺陷局部放电特性研究[J]. 变压器,2014,51(12):54-59.
- [43] 祝令瑜,崔彦捷,李斯盟,等. 交直流复合电压下油纸绝缘针板缺陷的预击穿阶段局部放电特性[J]. 高压电器,2018,54(11):176-183.
- [44] 张鹏. 交流、直流、复合电压下油纸绝缘缺陷局部放电起始和发展特性[D]. 北京:华北电力大学,2013.
- [45] 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.
- [46] 周远翔,沙彦超,聂德鑫,等. 交直流复合电压下油中局部放电的起始过程[J]. 高电压技术,2012,38(5):1163-1170.
- [47] 沙彦超,周远翔,孙清华,等. 局直流电压分量对交直流叠加电压下油纸绝缘沿面闪络的影响[J]. 高电压技术,2013,39(6):1340-1342.
- [48] 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.
- [49] 刁常晋,程养春,邓春,等. 阶梯升压试验和恒定电压试验中油纸绝缘局部放电发展规律的对比[J]. 高电压技术,2013,39(2):365-373.