

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.06.043

基于极化去极化电流法的电力电容器绝缘状态检测方法研究

张晨萌¹, 谢施君¹, 谭思文², 张 榆¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司德阳供电公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 针对目前电力电容器缺乏有效绝缘状态检测方法的问题,文中提出基于极化去极化电流的电力电容器绝缘状态检测方法。首先论述了该方法的基本原理,并根据极化去极化电流推导出了两个电容器绝缘状态特征参量(直流电导率和0.1 Hz介损);基于该原理,研制了一台极化去极化测试装置,利用该装置对不同老化阶段的电力电容器进行了绝缘状态测试;测试结果表明,随着电容器老化程度的加深,电容器极化、去极化电流都有不同程度的增大,直流电导率和0.1 Hz介损同时也有不同程度增长。通过文中研究说明利用极化去极化电流法能够有效检测电容器绝缘状态。

关键词: 电力电容器;极化去极化电流;直流电导率;0.1 Hz介损

Research on Power Capacitor Insulation State Detection Based on Polarization Depolarization Current Method

ZHANG Chenmeng¹, XIE Shijun¹, TAN Siwen², ZHANG Yu¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Co. Deyang Power Supply Company, Sichuan Deyang 618000, China)

Abstract: Few effective insulation state detection methods for power capacitor can be used in field. In this paper, a power capacitor insulation state detection method based on polarization-depolarization current is proposed. Firstly, the basic principles of the method are discussed. Then, two characterized parameters are conducted based on polarization and depolarization currents, which are DC conductance and 0.1 Hz dielectric loss. A test device based on this method is developed to evaluate the insulation state of power capacitor with different aging conditions, using this device, the insulation state of power capacitors in different aging stages is tested. The test results showed that the polarization and depolarization currents increase in varying degrees with the deepening of aging. The DC conductance and 0.1Hz dielectric loss also increased in varying degrees. The study indicates that the polarization depolarization current method can effectively detect the insulation state of capacitor.

Key words: power capacitor; polarization depolarization current; DC conductance; 0.1 Hz dielectric loss

0 引言

电力电容器在电力系统中用途广泛,是电力系统中重要的一次设备,其作为电力系统中极为重要的无功功率提供者,对于改善系统结构,提高电能质量等方面起着重要作用^[1-3]。但是随着电力电容器运行年限的增加及施工、制造工艺和运行工况的不同,电力电容器内绝缘开始出现一定程度的绝缘性能退化,降低了电力电容器正常运行的可靠性^[4-8],因

此,有效的检测电力电容器绝缘状态对提高电力系统供电可靠性具有重要意义^[9]。

电容值作为电力电容器主要的电气参数,在一定程度上可以反映电力电容器的绝缘状态,电容值的减小,可判断是内部元件有断锡焊、松脱造成,电容值的增大,可判断是由于电力电容器内部某些串、并联单元被击穿所引起的。国家标准规定,电力电容器实测电容与其额定电容相差应保持在一定范围内(一般为-5%~+5%,不同类型电容器偏差范

收稿日期:2020-02-10; 修回日期:2020-04-12

基金项目:国网四川省电力公司科技项目资助项目(521997190010)。

Project Supported by State Grid Sichuan Electric Power Company Research Project(521997190010)。

围要求不同)^[10]。除此之外,目前评估电力设备内绝缘的方法主要分为化学方法^[11-12]和电方法^[13-14],主要有绝缘纸聚合度测试、拉伸强度测试、油中气体组分分析、微水浓度分析、局部放电参量检测等方法。化学检测法能够有效反映电容器绝缘状态,但实验材料取样困难,不适用于现场检测;局部放电检测法能够实现对电容器内部集中性缺陷的定量检测,但由于电容器电容值较大,限制了局部放电检测的灵敏度,且现场测试存在干扰,限制了电容器局部放电检测技术的广泛应用。

近年来,基于时域介电谱法的极化去极化电流的测试方法作为一种新型的电力设备绝缘状态评估方法开始受到各国学者的重视^[15-18]。该方法利用测试得到的极化去极化电流提取相应的指标,可以有效对电力设备的老化程度进行判断,同时,该方法具有测试速度快,灵敏度高,对电力设备无损伤的优点。四川大学周凯研究团队研究了极化去极化电流法对交联聚乙烯电缆的无损检测,研究结果证实了极化去极化电流检测方法能够有效反映XLPE电缆的绝缘特性^[19]。西南交通大学的周利军利用极化去极化电流法提出了用极化电导率来衡量油纸绝缘的老化状态,并测试了不同温度下油纸绝缘的极化电导率^[20]。Leibfried等人利用极化去极化电流法研究了油纸绝缘的时域响应法参数和水分含量的关系^[21]。Saha等人通过试验室加速热老化试验研究了油纸绝缘老化对时域响应特性的影响规律^[22]。上述研究表明,利用极化去极化电流法可以有效反映试品的绝缘状态。但目前极化去极化电流测试法多在实验室针对绝缘介质进行测试^[23],利用该方法对现场电气设备的测试,特别是对电力电容器的测试尚缺乏研究。文中首先分析了极化去极化电流的测试原理,然后介绍了所研制的极化去极化测试装置,最后利用该装置对不同老化程度的电容器进行绝缘状态测试,测试结果表明,利用极化去极化电流测试法可以有效反映电容器绝缘状态。

1 极化去极化电流理论分析

理想的电容模型对限流电阻充放电测得的电流符合指数规律,极化电流与去极化电流为:

$$i_p = U_0 e^{-t/RC} / R = i_0 e^{-t/RC} \quad (1)$$

$$i_d = -U_0 e^{-t/RC} / R = i_0 e^{-t/RC} \quad (2)$$

对式(1)、(2)等式两边做对数变换,所得结果为

$$\ln(i) = -t/RC + \ln(U_0/R) \quad (3)$$

从式(3)中可以看出,理想电容的极化去极化电流的自然对数是关于时间 t 的一次函数,其中一次函数的斜率为 $-1/RC$, R 为限流电阻值, C 为理想电容的电容值。可以看出 $-1/RC$ 决定了极化去极化过程电流变化的速率, RC 的值越大,电流的衰减过程就越缓慢。

实际的电力电容器的极化去极化过程与理想电容并不完全一样,其基本形状见图1。

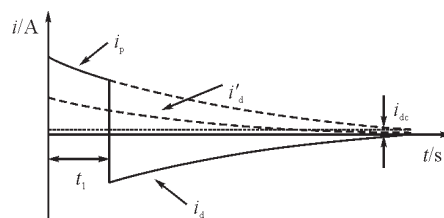


图1 极化—去极化电流图

Fig. 1 Polarization depolarizing current diagram

图1中 i_p 为极化电流; i_d 为去极化电流; i_d' 为去极化电流关于时间轴的翻转; i_{dc} 为直流漏电流,从图1可以看出即使经过足够长时间的极化,极化电流 i_p 也不会为0,其存在一个直流分量,即直流泄漏电流 i_{dc} 。

根据电介质响应理论,当极化电压为 $U(t)$ 时,产生的静电场 $E(t)$ 使电介质中的电荷、偶极子等产生电位移。电介质中流过的电流为

$$i(t) = C_0 \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} u(t) + \varepsilon_r \frac{du(t)}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) u(\tau) d\tau \right] \quad (4)$$

式(4)中: C_0 为电介质材料的几何电容; $U(t)$ 为极化电压; σ_0 为电介质材料的直流电导率; ε_0 为真空介电常数; ε_r 为电介质材料的相对介电常数; $f(t)$ 为介质响应函数。

在极化时间足够长的条件下,由介电响应时域关系可获得被试品的直流电导率和频域介电谱^[13],见式(5)、(6):

$$\sigma_0 \approx \frac{\varepsilon_0}{U_0 C_0} [i_p(t_c) - i_d(t_c)] \quad (5)$$

$$\tan \delta(\omega) \approx \frac{\varepsilon_r''(\omega)}{\varepsilon_r'(\omega)} = \frac{\sigma_0 / \varepsilon_0 \omega + \chi''(\omega)}{1 + \chi'(\omega)} \quad (6)$$

式(5)、(6)中: t_c 为极化时间; ε_r'' 为相对介电常数虚部; $\varepsilon_r'(\omega)$ 为相对介电常数实部; $\chi''(\omega)$ 为去极化电流傅里叶变换的虚部,表示极化过程中的损耗; $\chi'(\omega)$ 为去极化电流傅里叶变换的实部,表示极化强度。因此,如果能够测得电力电容器的极化去极化电流,即可根据式(5)、(6)计算出直流电导率和介损频谱。

2 极化去极化测试装置研制

根据极化去极化电流测量法的工作原理,研制

了一台实际装置,该装置的原理见图2。

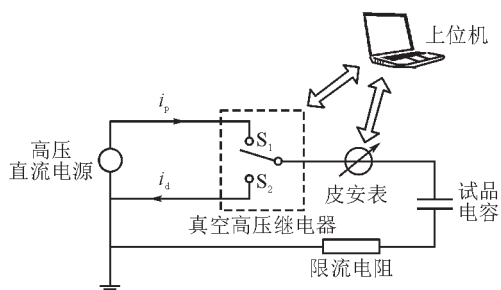


图2 极化—去极化测试装置工作原理

Fig. 2 Polarization depolarization current testing platform working principle

图2中,直流高压电源为0~1 000 V高精度直流电压,试验电压根据测试对象确定,额定电容1 000 pF以下的电容器,测试电压为500 V;额定电容1 000 pF以上的电容器,测试电压为1 000 V。真空高压继电器选用高压双掷开关,其动作时间不大于15 ms。皮安表(Keithley6485)为高精度电流表,测量范围通常为5~20 000 pA。限流电阻限制设备极化瞬间回路中的暂态大电流,应采用无感电阻。

测试过程如下:当测试开始时,将高压灭弧开关拨至 S_1 时为极化回路,进入极化阶段,通过直流极化电源给试品电容加压,使其极化。经过一定的极化时间之后,将开关拨至 S_2 ,试品两端短接,充电时积累的电荷就会释放,通过限流电阻放电,进入去极化阶段。该装置采用皮安表对极化去极化电流进行准确测量,并将数据存储在皮安表的缓冲区内。最后,通过串口将记录数据传送给上位机,以用于后续的数据分析工作。高压灭弧开关的切换,可以通过上位机加继电器进行控制。因此,只要在试验开始前通过上位机设置好相应的试验参数,即可进行自动化的试验测量,整个过程无需任何其他人为操作。

由于极化—去极化试验中,电流幅值非常小,通常是纳安乃至皮安的级别。所以需要通过种种方式尽量抑制噪声对测量结果的干扰。在硬件方面,抑制噪声的主要措施有:走线尽量简单,不要出现交叉和冗余接线;高压回路和低压回路接线不要相互靠近或者出现交叉;接地时尽量选择单点接地。用多点+接地时可能在电路中形成电流环流,干扰测量精度,应予以避免。在软件方面设计中加入了噪声抑制算法,对噪声进行了抑制。当采用了上述措施之后,可以有效降低噪声干扰、减小零点漂移,尽可能的保障了测量的准确性。

3 基于极化去极化电流的电容器绝缘状态检测试验

3.1 试验试品及老化试验

3.1.1 试验试品

文中选用的电容器为全膜型电力电容器,由绵竹西南电工有限公司生产,其薄膜为厚度12 μm 的双面粗化聚丙烯薄膜,绝缘油为苜基甲苯。试品电容量为0.6 μF ,内部采用3个芯子并联后两组串联形式,额定电压12 kV。试验电容器外形及内部结构见图3。

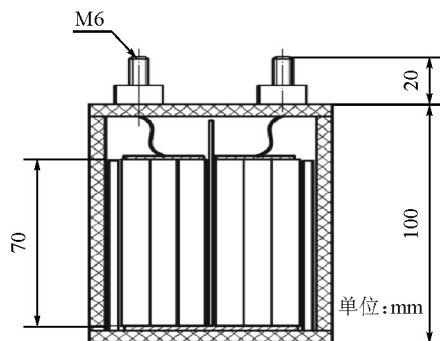


图3 试验电容器

Fig. 3 Test capacitor

3.1.2 老化试验

选取60、90 $^{\circ}\text{C}$ 两个温度对电容器进行热老化,一个老化周期为12 h,将烘箱设定为试验要求温度,保证电容器在恒温的环境中进行老化。老化时间结束后将电容器取出,冷却至室温(25 $^{\circ}\text{C}$)进行测试。各试品的老化参数见表1。

表1 试品预处理参数

Table 1 Preconditioning parameters

试品编号	老化项目	老化条件/ $^{\circ}\text{C}$	老化周期/h
C01	热老化	60	12
C02	热老化	90	12

3.2 测试结果

本次试验测试环境温度在25 $^{\circ}\text{C}$,能够保证较为准确的测试结果,测试试品极化去极化电流所设定的极化电压为1 kV。

3.2.1 极化电流变化规律

分别测试 60 ℃ 和 90 ℃ 下极化电流, 测试结果见图 4。从图 4 中可以看出, 极化初期, 电荷的注入速率很快, 极化电流值大, 该部分为吸收电流, 随后极化电流迅速降低, 波形逐渐趋于平稳, 这是介质极化弛豫的一种表现。随着老化时间的不断增加, 极化电流波形平稳部分呈现出逐渐上移的趋势, 这一现象说明随着油膜老化程度的加深, 油中杂质离子数增加, 薄膜表面粗糙增加使得油膜绝缘的等效电容增加, 对电荷的持续吸收能力加强。对比图 4 可以发现, 60 ℃ 热老化条件下老化末期极化电流的稳定值为 23.4 nA, 而 90 ℃ 热老化条件下老化末期极化电流的稳定值为 34.7 nA, 增加了 48.3%, 这也说明更高的温度能加速油膜绝缘的老化。

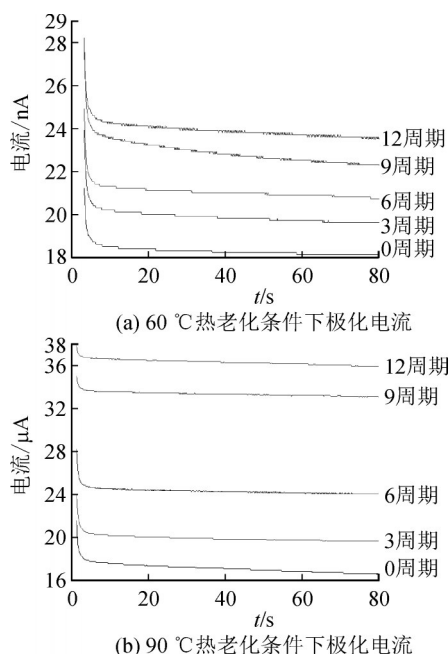


图 4 极化电流变化趋势

Fig. 4 Variation trend of polarization currents

3.2.2 去极化电流变化规律

一旦油中出现更多的杂质离子或者薄膜表面出现一些变化, 会直接影响极化产生的极化电荷的多少, 导致去极化电流波形出现改变。60、90 ℃ 热老化条件下, 处于不同老化程度的去极化电流波形分别见图 5。由于各个阶段去极化电流之间在线性坐标下的区别并不明显, 为了能够将这种变化更清晰的展示出来, 利用对数坐标系显示去极化电流。

图 5 中可以看出, 在对数坐标系下, 两种热老化条件下去极化电流曲线都有明显的上升, 这样的变化主要表现在两个方面: 一是去极化电流的起始部分, 随着老化程度的增加, 起始部分的去极化电流值逐渐增加, 曲线与纵轴相交的点逐渐上移, 不过在 60 ℃ 热老化条件下, 存在去极化电流起始部分相

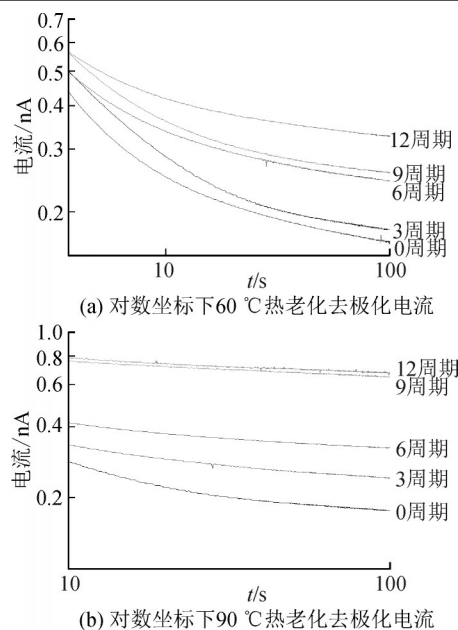


图 5 去极化电流变化趋势

Fig. 5 Variation trend of depolarization currents

重合的地方; 二是去极化电流的末尾阶段, 末尾阶段的去极化电流逐渐趋于稳定, 随着老化程度的增加, 曲线上移的趋势明显。

由图 5 可知, 相较于 60 ℃ 热老化条件下, 90 ℃ 热老化条件下去极化电流的起始值和末尾稳定值在各个老化阶段都要更高一些, 老化末期 60 ℃ 热老化下去极化电流起始值为 578 pA, 同一时期 90 ℃ 热老化下为 882 pA, 上升了 52.6%; 老化末期 60 ℃ 热老化下去极化电流末尾稳定值为 356 pA, 同一时期 90 ℃ 热老化下为 792 pA, 上升了 122.5%。实验结果表明, 更高的温度对油膜绝缘的老化程度更为显著, 体现在去极化电流起始值与稳定值大幅度增加上。

3.2.3 绝缘特征参数测试

试品一共经历了 12 个老化周期, 共 13 个状态, 利用得到的极化去极化电流计算得到试品的低频介损 (0.1 Hz) 以及直流电导率。老化温度为 60 ℃ 时试品 C01 在不同老化时间下各参数的变化趋势见图 6, 老化温度为 90 ℃ 时试品 C02 在不同老化时间下各参数的变化趋势见图 7。

由图 6、7 可以看出, 随着老化程度的加深, 电容器的 0.1 Hz 介损和直流电导率都有一定增长。对比 60 ℃ 和 90 ℃ 下 0.1 Hz 介损和直流电导率曲线, 在相同老化周期下 90 ℃ 老化下的 0.1 Hz 介损和直流电导率均高于 60 ℃ 老化下的值, 说明温度越高, 对电容器绝缘的老化作用就越明显。

3.2.4 试验结果分析讨论

试验中采用的电容器为全膜型结构, 其内部绝缘介质为聚丙烯薄膜和苜基甲苯油, 电容器内部单

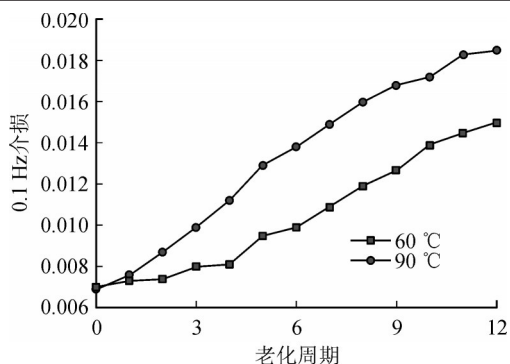


图6 低频介损(0.1 Hz)随老化时间的变化

Fig. 6 The change of low frequency (0.1 Hz) dielectric loss and DC conductivity with aging time at 60 °C

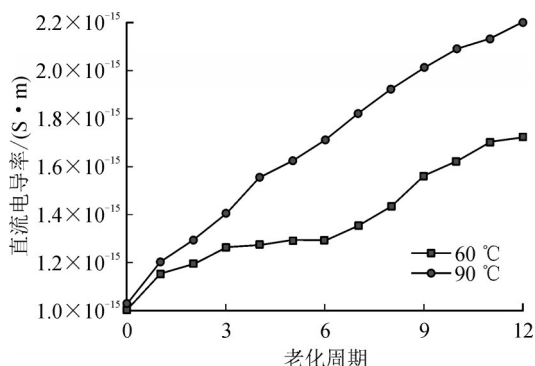


图7 直流电导率随老化周期的变化

Fig. 7 The variation trend of DC conductivity

元为铝箔电极加聚丙烯膜卷绕结构,见图8。在电力电容器高温老化后,由于聚丙烯薄膜本身特性,其会发生一定热缩现象,从而导致原本光滑平整的介质发生褶皱,从而导致绝缘介质界面面积增大。当发生界面极化时,更大的界面面积极化需要的电荷量也越大,从而导致极化、去极化电流增加,见图4、5。同时,随着电介质在高温下的老化,其绝缘性能不断下降,在图4中体现在稳态电流的增大,根据式(5)绝缘介质直流电导率增大,见图7。绝缘介质的介损为绝缘介质有功损耗与无功容量之比(即复电容虚部与实部之比,如式(6)),当介质老化后电导率上升,其有功损耗增大,因此导致介质介损随之增大,见图6。

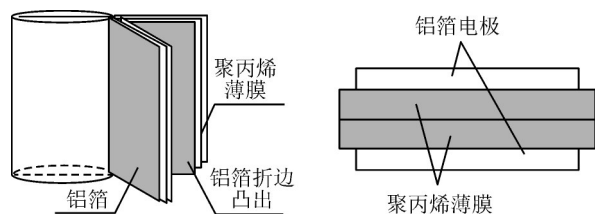


图8 电容器芯子卷绕示意图

Fig. 8 Sketch map of capacitor packet

4 结论

1)电力电容器的绝缘状态会在其时域介电响应

上有所反映,具体表现为:随着电容器老化程度的加深,电容器的极化、去极化电流的初始值和稳定值都有一定程度增长。

2)通过测试电介质的极化、去极化电流能够计算包括低频介损和直流电导率在内的电气参量,通过对不同老化程度的电容器进行测试表明:随着老化程度的加深,电容器的直流电导率和低频介损都随之增大。

3)电容器绝缘介质的老化程度与老化温度密切相关,随着老化温度的增高,在相同老化时间下电容器的低频介损和直流电导率随老化温度的升高而增大。

参考文献:

- [1] 房金兰. 我国电力电容器技术的发展[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(1):1-4.
FANG Jinlan. Development of power capacitor technology in China[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(1):1-4.
- [2] 容亮, 陈作兵. 电力电容器在电力系统中的应用综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2006, 26(5):49-5
RONG Liang, CHEN Zuobing. Survey on the application of power capacitors in power system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2006, 26(5):49-5
- [3] 谢建容. 无功补偿电容器故障机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
XIE Jianrong. The research of reactive power compensation capacitor's fault mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [4] WU G, ZHOU L, ZHANG X, et al. Study on the failure factors of composite insulation in high-voltage storage capacitors[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(2):186-193.
- [5] REED C W, CICHANOWSKIL S W. The fundamentals of aging in HV polymer-film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 904-922.
- [6] 沈文琪. 电力电容器的实际使用寿命与使用条件的关系[J]. 电力电容器与无功补偿, 2004, 24(1):27-28.
SHEN Wenqi. Relationship with service life in practice and location condition in close of power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2004, 24(1): 27-28.
- [7] 陈松, 李兆林, 卢有盟. 影响金属化膜脉冲电容器寿命试验的因素研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(2):64-67.
CHEN Song, LI Zhaolin, LU Youmeng. Study on the factor affecting the endurance test of metallized film pulse capaci-

- tor[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(2):64-67.
- [8] 秦楠. 交互式电力电容器绝缘电阻的远程测试和监控系统研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(1):57-61.
- QIN Nan. Study on remote test of insulation resistance and monitoring system of interactive power capacitor[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 57-61.
- [9] VODRAZKA J, HORAK M, DUSEK K. Aging analysis of metalized film capacitors[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika. [S.l.]: IEEE, 2014: 648 - 651.
- [10] 标称电压1 000 V以上交流电力系统用并联电容器:GB/T 11024.1—2010[S]. 2010.
- Shunt capacitors for AC power systems having a rated voltage above 1 000 V:GB/T 11024.1—2010[S]. 2010.
- [11] 谢超, 叶建铸, 石延辉, 等. 直流滤波电容器剩余预期寿命的试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(2):87-93.
- XIE Chao, YE Jianzhu, SHI Yanhui, et al. Experimental investigation of predict remainder lifetime for DC filter capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(2):87-93.
- [12] HUANG P H, DU B X, LI A, et al. Effects of fluorination on surface charge behavior of polypropylene films under pulse voltage[C]//IEEE International Conference on Dielectrics (ICD). Montpellier, France: IEEE, 2016: 10.
- [13] 王鹏, 吴广宁, 张血琴, 等. 高压储能电容器直流局部放电测试分析系统[J]. 高电压技术, 2007, 33(4):38-42.
- WANG Peng, WU Guangning, ZHANG Xueqin, et al. Study of partial discharge detection and analysis system of high voltage storage capacitor based on client/server mode[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(4):38-42.
- [14] HAMMAL R, RAIN P, GOSSE J P, et al. Study and characterization of PD in impregnated polypropylene capacitors [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2002, 7(3):446-457.
- [15] 唐盼. 基于极化去极化电流法的变压器油纸绝缘状态研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- TANG Pan. Study of oil - paper insulated transformers' aging state based on PDC method[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012
- [16] 杨帆, 沈煜, 王彦博, 等. 基于极化/去极化电流法的交联聚乙烯电缆热老化程度判定[J]. 高电压技术, 2016, 42(2):496-503.
- YANG Fan, SHEN Yu, WANG Yanbo, et al. Thermal aging status diagnosis of XLPE cable using polarization/depolarization current method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2):496-503.
- [17] HAO J, LIAO R, CHEN G, et al. Quantitative analysis ageing status of natural ester-paper insulation and mineral oil-paper insulation by polarization/depolarization current[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2012, 19(1):188-199.
- [18] VERMA H C, BARAL A, PRADHAN A K, et al. A method to estimate activation energy of power transformer insulation using time domain spectroscopy data[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 3245-3253.
- [19] 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.
- [20] 周利军, 王林, 李先浪, 等. 基于极化/去极化电流法的油纸绝缘时域电导模型[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1433-1438.
- ZHOU Lijun, WANG Lin, LI Xianlang, et al. Time domain conductivity model of oil - paper insulation using polarization and depolarization current method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5):1433-1438.
- [21] LEIBFRIED T, KACHLER A J. Insulation diagnostics on power transformers using the polarization and depolarization current (PDC) analysis[C]// Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston, USA: IEEE, 2002: 170-173.
- [20] SAHA T K, PURKAIT P. Understanding the impacts of moisture and thermal ageing on transformer's insulation by dielectric response and molecular weight measurements [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 568-582.
- [22] MUHAMAD N A, SULEIMAN A A, PHUNG B T, et al. Faults identification of biodegradable oil-filled transformers based on polarization and depolarization current measurement (PDC) method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6):2299-2306.

张晨萌(1988—), 男, 博士, 博士后, 主要研究方向为电力系统过电压及其对电力设备绝缘影响机理(通信作者)。