

极化去极化电流法极化参量 对电力电容器绝缘状态的影响

王鑫¹, 张晨萌², 刘渝根¹, 谭思文³, 孙鹏宇¹

(1. 输配电装备系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400044;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041;

3. 国网德阳供电公司 四川 德阳 618000)

摘要: 电力电容器用途广泛,是电力系统中重要的一次设备。针对目前电力电容器绝缘状态检测欠缺成熟高效的手段,提出一种基于极化去极化电流法来检测电力电容器的绝缘状态,并分析极化去极化电流法中极化电压和极化时间对绝缘状态判断的影响。首先阐述了极化去极化电流法的基本原理,其次利用测试的极化去极化电流推导出决定电容器绝缘状态的两个特征参量,即直流电导率和0.1 Hz介损;再基于该方法理论,研究出在不同极化电压和不同极化去极化时间下,电力电容器极化、去极化电流都有不同程度的差异,但其绝缘状态参量直流电导率和0.1 Hz介损却没有发生显著的变化。通过研究说明利用极化去极化电流法能够无损检测电力电容器的绝缘状态。

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

中图分类号: TM854 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)04-0038-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.04.009

Effect of Polarization Parameters of Polarization – Depolarization Current Method on Insulation State of Power Capacitors

Wang Xin¹, Zhang Chenmeng², Liu Yugen¹, Tan Siwen³, Sun Pengyu¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract: Power capacitors are widely used in power system and are the important primary equipment in power system. At present, there is a lack of mature and efficient means to detect the insulation state of power capacitors. So a method based on polarization – depolarization current is proposed to detect the insulation state of power capacitors. The influence of polarization voltage and polarization time in polarization – depolarization current method on the judgment of insulation state is analyzed. The basic principle of polarization – depolarization current method is described, and then two characteristic parameters are deduced, namely DC conductivity and dielectric loss at 0.1 Hz, which determine the insulation state of capacitors by using the measured polarization – depolarization current. Based on the theory of this method, the polarization and depolarization current curves of power capacitors under different polarization voltage and different depolarization time are studied. The test results show that the polarization and depolarization currents of power capacitors vary under different polarization voltage and time, but DC conductivity and dielectric loss at 0.1 Hz do not change significantly. It shows that the polarization – depolarization current method can detect the insulation state of power capacitors nondestructively.

Key words: power capacitor; polarization – depolarization current; DC conductivity; dielectric loss at 0.1 Hz

0 引言

电力电容器在电力系统中用途广泛等,扮演着滤波、载波和高压保护等多种角色^[1-4]。电力电容器长期

处于温度高、场强高的状态,受到谐波电流、过电压、过负载等因素影响,内部绝缘状态会出现一定程度的劣化,使电网正常运行受到威胁^[5-8]。所以,找到成熟高效的电力电容器绝缘检测手段显得十分必要。

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虚焊、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围要求不同)^[9]。如今,主要通过化学方法^[10]、电方法^[11]对其进行绝缘判断,其中包含电容器极间绝缘检测、油中气体组分分析、微水浓度分析、局部放电参量检测等一系列手段。就化学方法而言,油中溶解气体分析法已广泛使用,但由于实验材料取样困难,不易现场检测。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。

近些年来,基于时域介电响应的极化去极化电流法(polarization-depolarization current, PDC)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^[12-13]。该方法利用测试所得的极化去极化电流推导出决定电气设备绝缘状态的参量,可以有效对其老化程度进行判断。同时极化去极化电流法是一种快速、高效、不具有破坏性的电气测量方法。文献[14]利用PDC法对交联聚乙烯电缆进行了没有损耗的检测,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。文献[15]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情况,在不同温度下,其利用PDC法测试所得的极化去极化电流,推导出了油纸绝缘的极化电导率。文献[16]通过PDC法分析了油纸绝缘中水分含量与其PDC中的参数联系。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,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。

下面,首先分析了极化去极化电流法的测试原理,其次利用测试的极化去极化电流推导出决定电容器绝缘状态的两个特征参量,即直流电导率和0.1 Hz介损;再基于该方法理论,研究了在不同极化电压和不同极化去极化时间下,电力电容器的绝缘状态两个

特征参量的差异;提出了利用极化去极化电流来检测电力电容器绝缘状态,并分析极化参量对检测结果的影响。

1 极化去极化电流法原理和测试方法

1.1 极化去极化电流法原理

外加电场 $E(t)$ 作用在电力电容器上,则此时电力电容器介质材料内部的全电流为

$$i(t) = C_0 \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} U(t) + \epsilon_\infty \frac{dU(t)}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) U(\tau) d\tau \right] \quad (1)$$

式中: $i(t)$ 为极化全电流; C_0 为电介质试验样品的几何电容; σ_0 为电介质的直流电导率; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_∞ 为光频介电常数; $f(t)$ 为电介质极化响应函数,其随着时间连续衰减,衰减的速度和电介质的组成、构成以及外界因素有关。

通过式(1)可知,当电力电容器两端通电,其电介质进入极化过程,此时极化电流为

$$i_p(t) = C_0 U(t) \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + f(t) \right] \quad (2)$$

当进入去极化过程,即电力电容器两端短接,此时回路电流是去极化电流。

$$i_d(t) = -C_0 U[f(t+t_d) - f(t)] \quad (3)$$

式中 t_d 表示极化时间。

利用设备测试所得PDC电流推导出表征电力电容器绝缘参量之一的直流电导率。

$$\sigma_0 = \frac{\epsilon_0}{C_0 U(t)} (i_p(t) - i_d(t)) \quad (4)$$

式中 σ_0 即为电力电容器绝缘状态评估的其中一个特征参量。

其次,通过傅立叶变换得到频域中的全电流表达式为

$$I(\omega) = C_0 \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} U(\omega) + j\omega\epsilon_\infty U(\omega) + j\omega F(\omega) U(\omega) \right] \quad (5)$$

式中 $F(\omega)$ 是将电力电容器内部电介质响应函数 $f(t)$ 利用傅立叶变换表示的复数形式。

$$F(\omega) = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),全电流的频域表达式可改写为

$$I(\omega) = j\omega C_0 \left[\epsilon_\infty + \chi'(\omega) - j \left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0 \omega} + \chi''(\omega) \right) \right] U(\omega) \quad (7)$$

则可以得到介质损耗角正切值为

$$\tan\delta(\omega) = \frac{\varepsilon''_r(\omega)}{\varepsilon'_r(\omega)} = \frac{\sigma_0/\varepsilon_0\omega + \chi''(\omega)}{1 + \chi'(\omega)} \quad (8)$$

式中: t 为极化时间; ε''_r 相对介电常数虚部; ε'_r 为相对介电常数实部; $\chi''(\omega)$ 为去极化电流傅立叶变换的虚部, 表示极化过程中的损耗; $\chi'(\omega)$ 为去极化电流傅立叶变换的实部, 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(4)、式(8)计算出电力电容器直流电导率和 0.1 Hz 低频介损。

1.2 极化去极化电流测试方法

图1为电力电容器极化去极化电流波形。

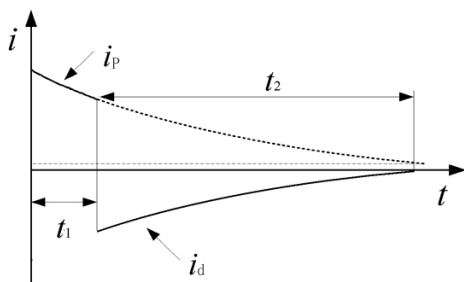


图1 极化去极化电流曲线

实验基于极化去极化电流法测试平台, 该测试平台的原理如图2所示。

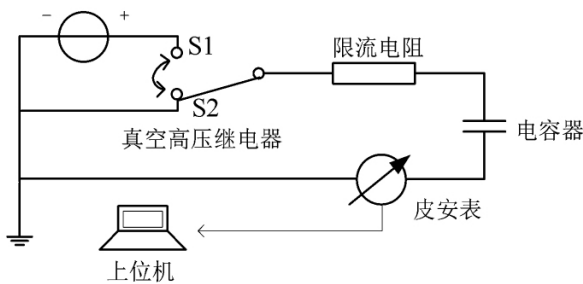


图2 测试平台

试验中将开关打向 S1, 此时整个回路进入极化阶段, 利用直流电源为电力电容器提供极化电压, 其内部电介质开始极化, 并通过回路中的皮安表记录极化电流值。极化时间人为设定, 极化阶段结束后, 开关自动从 S1 打向 S2, 此时回路中无直流电源, 充电完成的电力电容器会对回路进行放电, 进入去极化阶段, 同样采用皮安表记录此时的去极化电流。

2 基于极化去极化电流法的电容器绝缘状态测试

2.1 试验试品

测试电容器为全膜型电力电容器, 内部采用 3 个芯子并联后两组串联形式。双面粗化聚丙烯薄膜厚度为 12 μm , 绝缘油为苜基甲苯油。样品额定电压为 12 kV, 电容量为 0.6 μF 。图3为测试电容器的外形及内部结构。

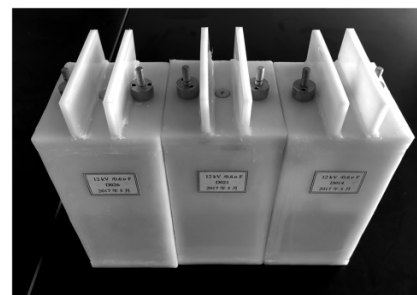
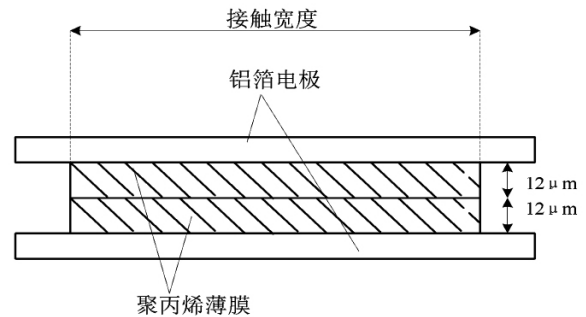
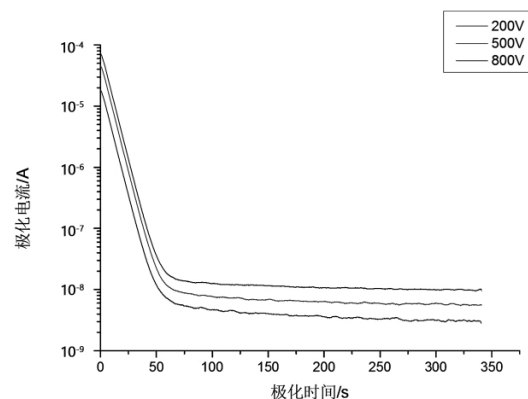


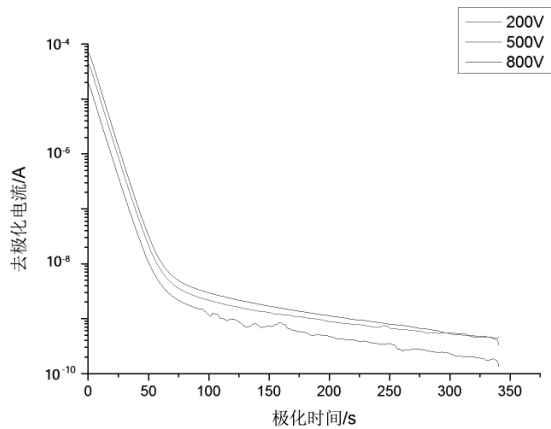
图3 试验电容器

2.2 不同极化电压下 PDC 曲线

为了对电力电容器绝缘状态参量进行计算, 需要把时域 PDC 数据利用傅立叶变换到频率, 故利用不同极化电压来检测其油膜绝缘结构的线性特性。试验分别选取 200 V、500 V、800 V 三种极化电压值, 进行电力电容器极化去极化电流曲线测试, 极化去极化时间均选为 360 s。每一种电压等级下, 重复测量 PDC 电流曲线 10 次并取其平均值。每两次试验间隔时间为 5 min, 每次试验结束后对样品进行放电。各个电压等级下的测试结果如图4所示。



(a) 不同电压下的极化电流曲线



(b) 不同电压下去极化电流曲线

图4 不同电压下极化去极化电流曲线

从图4所示的测试结果分析,在不同极化电压等级下,极化和去极化电流曲线都受到了一定的影响。从PDC电流幅值角度出发,可以看出随着极化电压的不断攀升,PDC电流幅值也不断越大,而对极化去极化电流衰减趋势没有影响,体现了电力电容器油膜绝缘结构具有良好的线性特性。

根据测试所得的极化去极化电流曲线,推导出了被测电力电容器直流电导率和0.1 Hz介损损耗,并取其平均值,如表1所示。

表1 不同极化电压下电力电容器
直流电导率和0.1 Hz介损损耗

极化电压/V	0.1 Hz 介质损耗	直流电导率 $\sigma / (S \cdot m^{-1})$
200	0.002 122 69	1.88×10^{-16}
500	0.002 068 12	1.69×10^{-16}
800	0.001 998 28	1.70×10^{-16}

图5、图6可以更加直观地表现不同电压等级下,电力电容器直流电导率的变化。

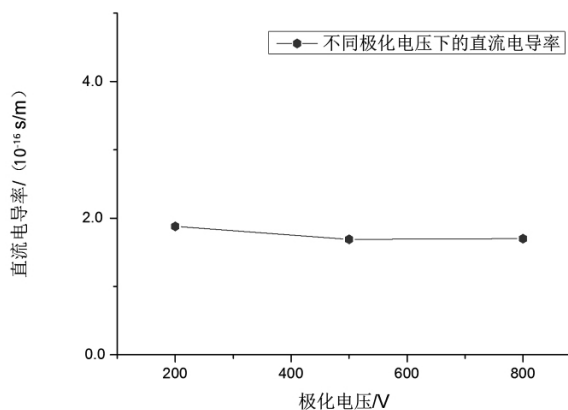


图5 不同极化电压下的电力电容器直流电导率

从图5、图6中可知,在不同极化电压等级下,被测电力电容器直流电导率和0.1 Hz介损损耗没有明显变化,相邻电压等级下变化不超过5%,趋近

于一条直线。表明了极化电压的变化对于极化去极化电流法检测电力电容器绝缘状态没有显著影响。

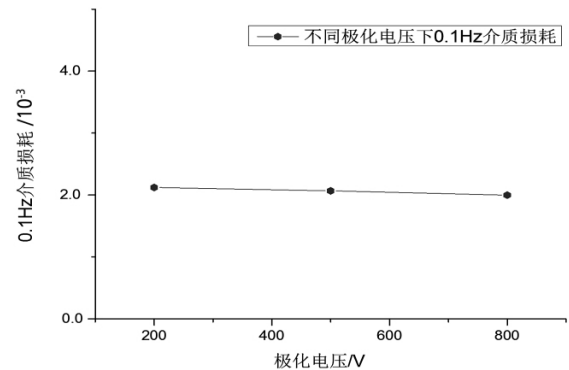
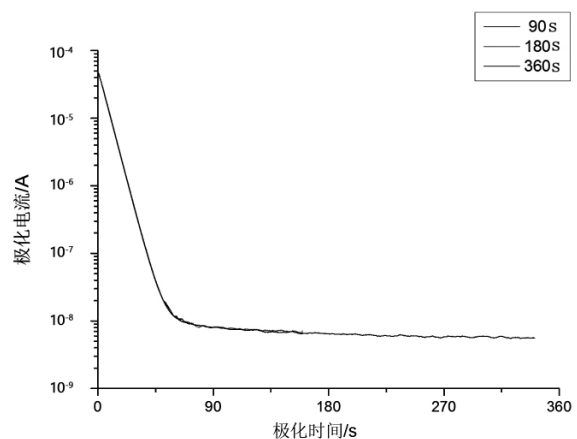


图6 不同极化电压下电力电容器0.1 Hz 介质损耗

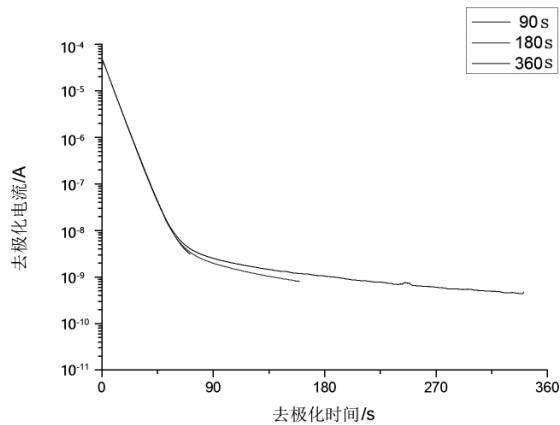
2.3 不同极化去极化时间下 PDC 曲线

由介电响应理论可知,电介质绝缘材料极化过程充分与否取决于极化时间,极化过程越充分,对于极化过程中的信息记忆更为清楚,此现象为“记忆效应”,其有利于基于PDC对电力电容器绝缘状态进行准确检测。分别设置90 s、180 s、360 s不同极化去极化时间,进行电力电容器极化去极化电流曲线测试,极化电压均选为500 V。在任一极化去极化时间下,重复进行极化去极化电流曲线测试10次,并取极化去极化电流平均值作为测试结果,如图7所示。同样,每两次试验间隔时间为5 min,每次试验结束后对样品进行放电。

从如图7所示测试结果分析可得,在不同极化去极化时间下,极化电流曲线随着时间的增长趋近于一个稳定的值,不同极化时间下极化电流曲线在同一时间段内几乎重合;而去极化电流曲线在前60 s内几乎重合,随着去极化时间的增加,去极化电流时间长的曲线有上移趋势,说明去极化过程更为充分时,可以使得电介质产生更多的束缚电荷来降低去极化电流的衰减程度。



(a) 不同极化时间下极化电流曲线



(b) 不同去极化时间下去极化电流曲线

图7 不同极化去极化时间下 PDC 电流曲线

同理由测试所得的极化去极化电流曲线,可推导出此时被测电力电容器直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗,其平均值如表 2 所示。

表 2 不同极化去极化时间下电力电容器直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗

极化去极化时间 /s	0.1 Hz 介质损耗	直流电导率 $\sigma/(S \cdot m^{-1})$
90	0.002 122 84	1.72×10^{-16}
180	0.002 087 82	1.75×10^{-16}
360	0.002 068 12	1.69×10^{-16}

更加直观体现不同极化去极化时间下电力电容器直流电导率的变化,如图 8、图 9 所示。

同样,从图 8、图 9 可得:在不同极化去极化时间下,被测电力电容器直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗并未发生明显变化,相邻不同极化去极化时间下,其两个绝缘参量变化不超过 5%,趋近于一条直线。这表明了 PDC 法中极化去极化时间不同(极化时间大于等于 90 s)对于其检测电力电容器绝缘状态没有显著影响。

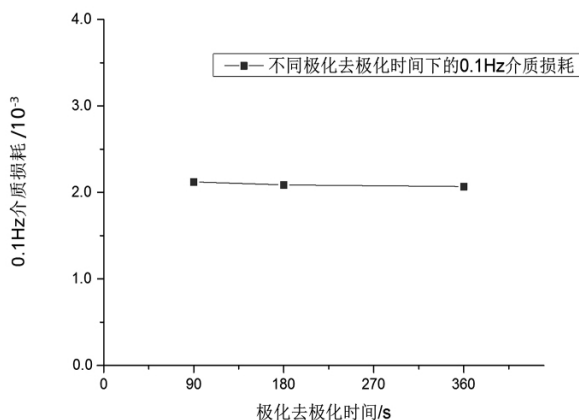


图 8 不同极化去极化时间下的电力电容器直流电导率

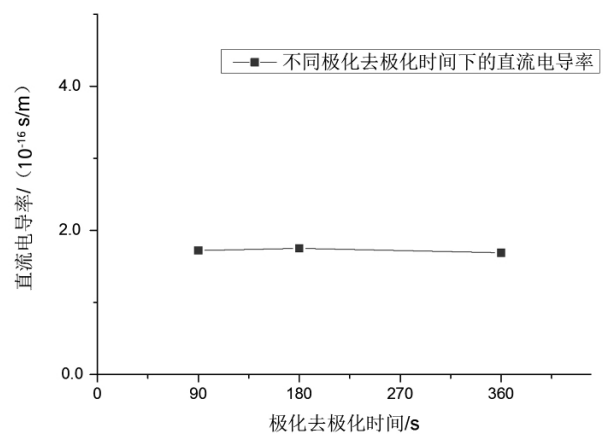


图 9 不同极化去极化时间下电力电容器 0.1 Hz 介质损耗

3 结 论

通过理论分析及试验验证,得出以下结论:

1) 利用极化去极化电流法来检测电力电容器的绝缘状态,其决定性的两个特征参量为直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗。

2) 测试表明在不同极化电压下,随着极化电压的提升,极化去极化电流幅值越大,但对极化去极化电流衰减趋势没有影响,直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗没有发生显著的变化。

3) 测试表明在不同极化去极化时间下:极化电流曲线趋近于一个稳定的值,不同极化时间下极化电流曲线在同一时间段内几乎重合;而去极化电流曲线在前 60 s 内几乎重合,随着去极化时间的增加,去极化电流时间长的曲线有上移趋势。由此可得在不同极化去极化时间下,直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗也没有发生显著变化。

综上所述,在不同极化电压和不同极化去极化时间下,电力电容器的极化、去极化电流都有不同程度的差异,绝缘状态参量直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗却没有发生显著的变化。所以利用极化去极化电流法能够无损检测电力电容器的绝缘状态。

参考文献

- [1] 彭倩,吴广宁,周力任,等. 电容器绝缘检测技术的现状与发展[J]. 绝缘材料,2008,41(1):67-70.
- [2] 王鹏,吴广宁,罗杨,等. 脉冲电容器绝缘老化和直流局部放电测试系统[J]. 仪器仪表学报,2012,33(6):1268-1274.
- [3] 党晓强,刘念. 电力电容器在线监测技术研究[J]. 四川电力技术,2003,26(6):6-7.

(下转第 79 页)

tion and analysis of incipient faults leading to a catastrophic failure in an underground distribution feeder [C] //IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. Seattle, WA, USA, 2009: 1-6.

[5] 戴铭. 10 kV 地下电缆早期故障检测与识别方法探讨[D]. 成都: 西南交通大学.

[6] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.

[7] Kasztenny B., Voloh I., Jones C. G., et al. Detection of Incipient Faults in Underground Medium Voltage Cables [C]. Protective Relay Engineers 61st Annual Conference for 2008.

[8] Kulkarni S., Santoso S., Shortta. Incipient Fault Location Algorithm for Underground Cables [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1165-1174.

[9] Herrera-Orozco AR, Bretas AS, Orozco-Henao C, et al. Incipient Fault Location Formulation: A Time-domain System Model and Parameter Estimation Approach [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 90: 112-123.

[10] Kim C, Bialek T, Awiylika J. An Initial Investigation for Locating Self-clearing Faults in Distribution Systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2):

1105-1112.

[11] Zhang Wenhai, Xiao Xianrong, Zhou Kai, et al. Multi-cycle Incipient Fault Detection and Location for Medium Voltage Underground Cable [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1450-1459.

[12] Livie J, Gale P, Anding Wang. The Application of On-line Travelling Wave Techniques in the Location of Intermittent Faults on Low Voltage Underground Cables [P]. Developments in Power System Protection (DPSP), IET 9th International Conference on 2008.

[13] 严凤, 杨奇逊, 齐郑, 等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 9(8): 41-47.

[14] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the Complex Spectrum: the S Transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.

[15] Yann LeCun, Yo shua Bengio, Geoffrey Hinton. Deep Learning [J]. Nature, 2015, 521: 436-444.

作者简介:

李成升(1988), 工程师, 主要从事电能质量管理、谐波测量及电力系统滤波方面工作;

于洋(1983), 工程师, 从事电能质量、无功电压方面技术工作。

(收稿日期: 2019-07-11)



(上接第42页)

[4] 曲衍宁, 吴广宁, 张血琴, 等. 储能电容器直流局部放电检测装置[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 131-134.

[5] 宁武, 孟丽囡, 王宇, 等. 电解电容器的应用条件与寿命的关系[J]. 电源世界, 2004(3): 17-18.

[6] 王振河, 咸日常, 李其伟, 等. 基于模糊理论算法的电力电容器绝缘故障诊断技术研究[J]. 电器与能效管理技术, 2018(23): 31-36.

[7] 刘念. 电气设备状态监测与故障诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

[8] 朱德恒, 严璋, 谈克雄, 等. 电气设备状态监测与故障诊断技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[9] 标称电压 1000 V 以上交流电力系统用并联电容器第 1 部分: 总则: GB/T 11024.1-2010 [S] 2010.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 雷勇, 蒋世超, 周凯, 等. 基于极化-去极化电流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.

[15] 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.

[16] 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.

作者简介:

王鑫(1993) 硕士研究生, 研究方向为电力电容器绝缘状态检测技术研究。

(收稿日期: 2019-05-08)