

DOI: 10.7667/PSPC201783

特高压用交流电容器局部放电抽检试验技术研究

马鑫晟, 龙凯华, 马继先, 郭绍伟, 蔡巍, 刘亮, 王建伟

(国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045)

摘要: 为了研究特高压用大容量电容器脉冲电流局部放电试验方法, 分析了电容器电气弱点局部放电等值模型, 并仿真分析了传统脉冲电流法检测特高压用大容量电容器局部放电困难的原因。针对性设计了特高压用电容器的宽频带高增益穿心电流互感器型检测阻抗。通过脉冲电流法与超声法的对比测试和脉冲电流法的背景噪声测试, 验证了脉冲电流法检测特高压用大容量电容器局部放电的可行性, 丰富了特高压用大容量电容器交接抽检试验手段, 确保投运电容器质量可靠。

关键词: 特高压电容器; 抽检试验; 局部放电; 脉冲电流法; 检测阻抗

Study on the random handover partial discharge test technology of UHV AC capacitor

MA Xinsheng, LONG Kaihua, MA Jixian, GUO Shaowei, CAI Wei, LIU Liang, WANG Jianwei

(State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: In order to study the partial discharge pulse current test method of large capacity capacitor for UHV, the equivalent model of partial discharge of capacitor electrical weakness is analyzed and the reasons for the difficulty of detecting partial discharge in high voltage large capacity capacitor are analyzed by the simulation. A broadband high gain through CT type detection impedance is designed for UHV capacitor pertinently. Through the contrast test of pulse current method and ultrasonic method and background noise test of pulse current method, the feasibility of pulse current method to detect partial discharge of capacitor used in UHV is verified, thus enriching the UHV capacitor random handover test methods and ensuring the reliability of operating capacitor quality.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Key Technology Research of the Optimization of UHVAC Main Equipment Test Methods”.

Key words: UHV capacitor; random handover test; partial discharge; pulse current method; detection impedance

0 引言

我国能源资源和地区经济发展呈逆向分布, 建设特高压电网实现电能的大规模和远距离输送成为我国解决能源分布不均格局的必然选择。特高压电网在实现我国电力资源更大范围配置的同时, 也增大了电力系统的规模, 使电力系统面临更多的风险。特高压设备可靠性是影响特高压电网安全运行的重要因素^[1-4]。电容器作为无功补偿的重要设备, 配置在特高压主变低压侧, 在运数量巨大。而全网各电压等级电容器每年都有因极间绝缘损坏导致的电容器烧毁退运故障发生。引起电容器极间绝缘故障最重要的原因就是长期运行过程中内部局部放电造成的绝缘损坏。对于电容器而言, 虽然元件属

于平行板电极电容器, 极间基本上是均匀电场, 但是在褶皱处、电极边缘、连接线、套管等处可能出现局部的电场集中, 特别是在运行中的过电压作用下, 局部放电都有可能发生, 甚至进一步发展^[5]。尤其是对于目前特高压用的大容量电容器, 元件数多, 薄膜用量大, 可能引起的局部放电因素进一步增加。据有关文章报道^[6], 2012年7月11日特高压长治站一台电容器单元电容量从额定值 37.1 μF 降到 34.1 μF 。经解体分析, 薄膜的偶然性缺陷是导致元件击穿的主要原因。这种薄膜缺陷在电容器长期运行, 由于局部放电作用才逐渐暴露出来。目前在厂家的出厂试验中, 电容器局部放电缺陷采用的是超声法, 但超声法的定量测量没有相关的国家或行业标准可以遵循^[7]。超声法检测手段的局限性造成出厂时对存在绝缘缺陷的电容器的检出率很低。而目前的国家或行业标准中, 电容器交接试验只进行电容量测量和极对壳的耐压试验, 这种薄膜缺陷或

基金项目: 国家电网公司科技项目“特高压交流主设备试验方法优化关键技术研究”

电容器内部由于褶皱等原因导致的场强畸变缺陷在交接试验中无法暴露出来。造成电容器运行一段时间后绝缘失效，事故频发。因此需要研究有效的电容器交接试验手段。文献[8]提出了电力电容器的局部放电电测法，比较了不同测试回路对测量灵敏度的影响，采用电容量为 4~8 μF 的试品电容，灵敏度最高可达 22 pC。该方法虽然可以有效检测出电容器的局部放电缺陷，但试品电容量较小。目前的特高压用电容器配置在 110 kV 侧，串并联数量多，由于不平衡等因素，暂态过电压对单台电容器影响更大。且单台电容器容量已达到 600 kVar 以上，之前的局部放电检测手段已无法满足特高压用电容器的检测需求。因此，本文研究脉冲电流法检测特高压用大容量电容器局部放电的交接试验方法，提出特高压用电容器局部放电试验的具体实现方案。

1 特高压电容器局部放电检测困难的原因

1.1 特高压用电容器局部放电等值模型

本文将以某特高压工程用 6.63 kV，615 kVar 电容器为例，进行特高压用电容器脉冲电流法局部放电试验的研究。该电容器单元内部采用 15 并 3 串的结构，每个元件由 3 层 13 μm 聚丙烯薄膜构成，浸渍剂采用苜基甲苯浸渍剂^[9]。该电容器单元的总电容量及每个元件电容量分别为

$$C_{total} = 44.54 \mu\text{F}, C_{cell} = 8.91 \mu\text{F}$$

式中： C_{total} 为电容器单元总电容量； C_{cell} 为单个元件电容量。

假设在电容器单元内部某一个元件上存在局部放电缺陷，则在该元件内部可以用绝缘体气隙放电模型进行等值^[10-14]。在该元件外部先并联了 14 个无缺陷元件后同另外两个无缺陷串段串联，如图 1 所示。

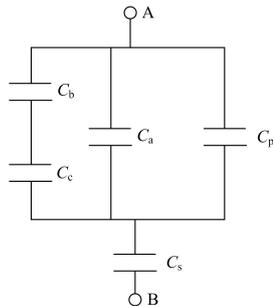


图 1 电容器局部放电等值回路

Fig. 1 Partial discharge equivalent circuit of capacitor

其中 C_c 代表元件中故障区域的电容量， C_b 代表跟元件故障区域串联部分的电容量， C_a 代表与元件中故障区域并联部分的电容量， C_p 为该放电元件串段上其他并联电容和， C_s 为其他两个串段电容

和。则对于上述电容器单元，有

$$\begin{cases} C_a \approx C_{cell} \\ C_p = (n-1)C_{cell} \\ C_s = nC_{cell} / (m-1) \end{cases} \quad (1)$$

式中： m 为电容器单元内部总串段； n 为电容器每个串段的并联元件数。将 C_{cell} 、 m 和 n 代入式(1)可得：

$$C_a = 8.91 \mu\text{F}, C_p = 124.74 \mu\text{F}, C_s = 66.83 \mu\text{F}$$

电容器元件内部复合介电系数即平均工作场强为

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_y \times \varepsilon_m}{\varepsilon_y \times K + \varepsilon_m \times (1-K)} \quad (2)$$

式中： ε_f 为复合介电系数； ε_m 为薄膜介电系数； ε_y 为浸渍剂介电系数； K 为压紧系数。

聚丙烯薄膜介电系数 $\varepsilon_m = 2.2$ ，浸渍剂介电系数 $\varepsilon_y = 2.6$ ，取压紧系数 K 取 0.85，代入式(2)可得 $\varepsilon_f = 2.261$ 。则当元件内部存在一个半径为 a ，高度为 h 的薄膜弱点时，可以得到：

$$\begin{cases} C_c = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_0 \pi a^2}{h} \\ C_b = \frac{\varepsilon_f \varepsilon_0 \pi a^2}{d_j - h} \end{cases} \quad (3)$$

取 $a = 0.1 \text{ mm}$ ，高度为 $h = 13 \mu\text{m}$ 时：

$$C_c = 4.71 \times 10^{-14} \text{ F}, C_b = 1.91 \times 10^{-14} \text{ F}$$

以上即为电容器内部单个元件由于薄膜缺陷导致的局部放电的等值模型。

1.2 基于特高压用电容器参数的局部放电仿真分析

电容器局部放电仿真模型采用气隙放电电阻变化模型^[15-18]，如图 2 所示。其中 R 为限流电阻， R_c 为放电电阻， R_c 的值可根据放电时间估计。放电气隙或油隙等效电容 C_c 的输出电压取绝对值后进行滞环比较，当放电气隙或油隙电压达到放电电压时比较器输出“1”，开关闭合， C_c 经 R_c 放电；当放电电压降到放电熄灭电压时，比较器输出“0”， C_c 停止放电，并随电源电压变化。

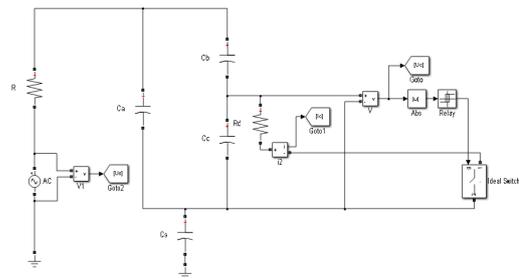


图 2 电容器局部放电仿真模型

Fig. 2 Partial discharge simulation model of capacitor

对于薄膜弱点的局部放电, 正常苝基甲苯浸渍剂一层膜的电气强度要大于 160 kV/mm, 取膜的弱点放电熄灭场强为 110 kV/mm, 起始局部放电场强取 1.3 倍^[19-21], 则一层膜的起始和熄灭放电电压为

$$U_i = 110 \times 1.3 = 1430 \text{ V}$$

$$U_e = 1.3 \times 1430 = 1859 \text{ V}$$

式中: U_e 为电容器元件一层薄膜缺陷的起始放电电压; U_i 为单个元件容量层薄膜缺陷的熄灭放电带电压。

对一层薄膜上的电气弱点产生的局部放电进行仿真。在仿真模型中加入 C_s 串段, 将放电串段内其他并联电容 C_p 与 C_a 并联, 更准确地模拟实际电容器放电情况, 电源起始放电电压取标准规定的 $2.15U_n = 14.25 \text{ kV}$, 仿真结果如图 3 所示。对缺陷元件上的放电电流积分可得真实放电电量为 86 pC。

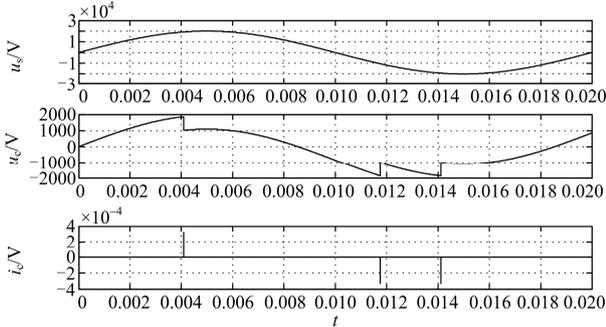


图 3 电场畸变在薄膜或油隙中局部放电仿真波形

Fig. 3 Partial discharge simulation waveforms of electric field distortion in film or oil gap

在缺陷元件上施加脉冲电压信号, 使真实放电电量等于 86 pC, 利用 RLC 型检测阻抗和经过校准的局放比例仿真分析视在放电电量与真实放电电量的关系, 如图 4 所示。计算得到视在放电电量为 23.45 pC。

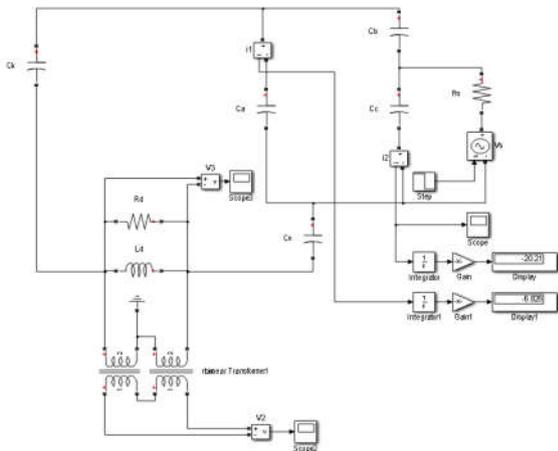


图 4 视在放电电量计算模型

Fig. 4 Apparent discharge calculation model

根据局部放电经典理论, 视在放电量和真实放电电量存在如下关系。

$$Q_x = \frac{C_b}{C_b + C_c} q = \frac{1.91}{1.91 + 4.71} q = 0.29q \approx 25 \text{ pC} \quad (7)$$

式中: Q_x 为视在放电电量; q 为真实放电电量。

仿真结果和理论计算结果相近, 可见虽然特高压用电容器容量较大, 但真实放电电量与视在放电电量的比在可接受的范围内, 其差距并不是大容量电容器局部放电检测灵敏度低的主要原因。特高压大容量电容器脉冲电流法局部放电检测灵敏度低主要是因为真实放电电量反映在大容量电容器上所得到的放电电压变化较小, 对于真实局部放电检测仪器, 电压采集装置无法达到相应的精度。实际电容器单元检测等效回路如图 5 所示。其中 C'_x 为与局部放电模型并联的同一串段的 15 个元件。而 C''_x 为其他两个串段的电容相串联。 C_d 为寄生电容, 可以忽略。当放电电压波形为理想直角波时, 简单绝缘体检测局部放电电压可以解得以下关系式:

$$\begin{cases} u_d(t) = \frac{q}{C_v} e^{-\alpha_d t} \cos \omega_d t \\ C_v = C_d + (1 + \frac{C_d}{C_k}) C'_x \\ C_t = C_d + \frac{C_k C'_x}{C_k + C'_x} \approx \frac{C_k C'_x}{C_k + C'_x} \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$\alpha_d = \frac{1}{2R_d C_t} \quad (5)$$

$$\omega_d = \sqrt{\frac{1}{L_d C_t}} \quad (6)$$

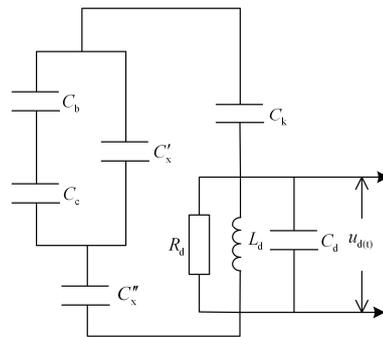


图 5 实际电容器单元局部放电检测等效回路

Fig. 5 Partial discharge detection circuit for capacitor

忽略 C_d 的影响可得:

$$C_v \approx 3C_{\text{total}} \quad (7)$$

因此, 从式(4)可以看出, 视在放电电量一定时, 电容量越大, 检测电压幅值越低, 检测回路的灵敏

度就越低。以该特高压用电容器为例，其电容量为 44.54 μF ，代入式(7)及式(4)可以得到：

$$C_v = 133.62 \mu\text{F}, u_{\text{dmax}} = \frac{q}{133.62} \mu\text{V}$$

一般局部放电检测仪最小可检测电压为 1 μV 。对于传统检测阻抗可检测最大 10 μF 电容量的局部放电，最小可检测放电量为 30 pC。而计算得到特高压用电容器的最小检测放电量为 133.62 pC。远无法达到对电容器局部放电检测的灵敏度要求。因此，需要提出针对特高压大容量电容器的局部放电检测方法。

2 宽频带高增益检测阻抗设计

基于以上分析，需设计出 20~500 kHz 增益达到 100 倍以上、通过电流超过 300 A 的检测阻抗，以满足特高压大容量电容器局部放电检测需要。本文设计出一种穿心 CT 型检测阻抗，其相当于初级线圈为一匝的 CT，通流容量很大，因此克服了传统 RLC 型检测阻抗通流容量不足的问题。RLC 型检测阻抗设计图和等效电路图分别如图 6 所示。

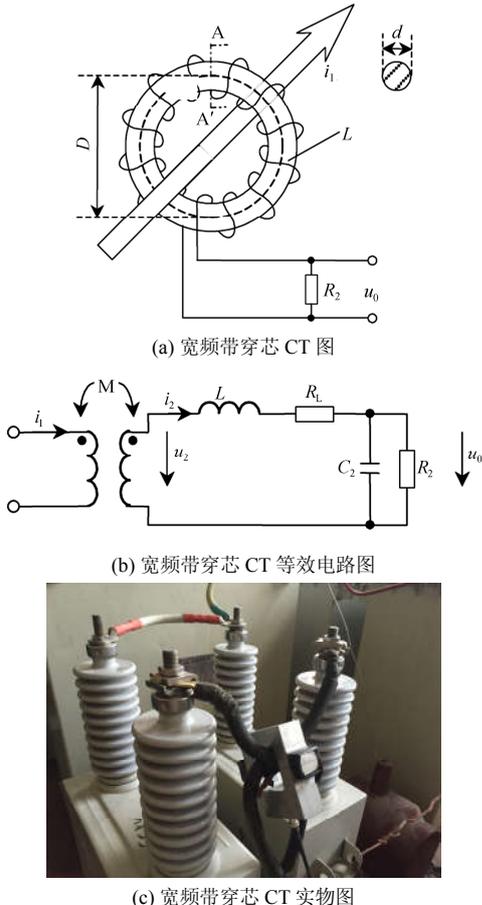


图 6 宽频带穿芯 CT 图

Fig. 6 Diagram of broadband through core CT

其中 M 为宽频带 CT 的等效互感， L 、 R_L 分别为其等效自感及等效电阻， C_2 为杂散电容， R_2 为负载电阻。

根据罗氏线圈原理可得

$$\begin{cases} M = \frac{NS\mu}{\pi D} \\ L = NM = \frac{N^2S\mu}{\pi D} \end{cases} \quad (8)$$

式中： N 为匝数； S 为磁芯横截面积； D 为环形材料直径。

根据等效回路求得的罗氏线圈频带范围为(C_2 足够小时，约为 760 pF)

$$\begin{cases} f_L = \frac{1}{2\pi} \frac{R_2 + R_L}{L + R_2 R_L C_2} \approx \frac{R_2 + R_L}{2\pi L} \\ f_H = \frac{1}{2\pi} \frac{L + R_2 R_L C_2}{LR_2 C_2} \approx \frac{1}{2\pi} \frac{1}{R_2 C_2} \\ |H(j\omega)| = \frac{R_2}{N} \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{R_2}{\omega L} - \omega R_2 C_2)^2}} \end{cases} \quad (9)$$

式中： f_L 为下限截止频率； f_H 为上限截止频率； H 为增益。

可见穿心 CT 的上限截止频率和负载电阻 R_2 及杂散电容 C_2 有关，而下限截止频率和自感 L 有关。当测试回路杂散电容和磁芯材料确定时，穿心 CT 的带宽和增益只与 R_2 和匝数 N 有关。 N 越大自感 L 越大，低频截止频率越低，而 N 增大会使增益减小。 R_2 增大会使增益增加，而 R_2 增大，下限截止频率增大，上限截止频率减小。基于以上矛盾，需确定一组最佳的 R_2 和 N ，使穿心 CT 达到较宽的工作频带，且保持一定的响应灵敏度。本设计选择磁导率高的铁淦氧磁芯，其磁导率 $\mu = 2000\mu_0$ ，根据两根电缆同时穿过 CT 的要求，选择环形材料的直径 $D = 80 \text{ mm}$ ，截面直径 $d = 15 \text{ mm}$ 。对几组数值进行扫描计算后最终得到理想的设计值，最终取 $R_2 = 300 \Omega$ ， $N = 35$ 。此时 20~500 kHz 的增益均大于 5 $\mu\text{V}/\mu\text{A}$ 。若放大器噪声为 3.5 μV ，则放大器最小输入电压为 7 μV ，此时的最小可检测电流为 1.4 μA 。根据脉冲电流计算公式，当放电时间取 8 μs (10%~90%时间)时，最小可检测视在放电量为

$$Q_x = \int_0^t i_a dt = I_a \int_0^t e^{-\frac{t}{\tau_f}} dt = \tau_f I_a (1 - e^{-\frac{t}{\tau_f}}) \quad (10)$$

将 $\tau_f = 8 \times 10^{-6} \div 2.2$ ， $t = 15 \mu\text{s}$ 代入式(10)可得

$Q_x = 5 \text{ pC}$ ，该设计可满足电容器局部放电测量要求。由于需在现场检测电容器局部放电，干扰较大，穿心 CT 需采取抗干扰措施。本设计采用电磁屏蔽

的方法抑制空间电磁干扰。设计采用钢作为屏蔽材料, 其对于 1 kHz 以下的屏蔽吸收效果明显。经检测, 测试回路最小可检测放电量可达 10 pC。

3 实验室及现场测试结果

测试回路采用串并联谐振的加压方式, 如图 7 所示。图中 C_f 为滤波电容, L 为补偿电抗。两台电容器的低压端引线分别从穿心 CT 的正反面穿过, 再连接到一起后接地。

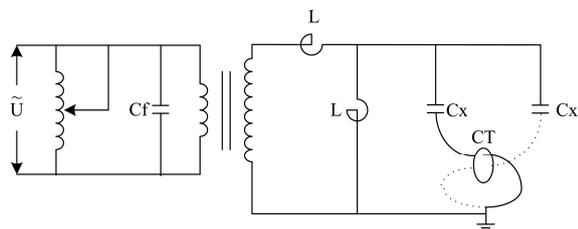


图 7 平衡法试验回路

Fig. 7 Balance method test circuit

对于干扰问题, 由电源侧侵入的共模干扰可采用平衡回路的方法消除, 其衰减倍数可达 1:20; 来自电源或测试回路的干扰还可以在电源中用滤波器加以限制, 本文采用在励磁变压器高低压侧分别并接 10 μ f 的电容来滤波, 充分利用变压器漏抗与滤波电容所形成的 Π 形回路进行滤波。若回路中同时串联 2.5 mH 的电感 L (电感量需与电容量配合计算), 则电路的截止频率为 1 kHz, 该滤波器在局部放电测试频段对来自电源的干扰信号有很强的抑制作用; 当电容量或测试回路尺寸较大时, 回路本身成为天线, 感应到空间无线电干扰信号电压, 因此需要在屏蔽实验室或特制的现场屏蔽车中进行试验; 测试回路中设备选用油浸式励磁变压器, 自身局部放电为 2 pC; 电动接触调压器自身局部放电为 3 pC; 补偿电抗器的自身局部放电为 7 pC, 通过平衡回路可将背景噪声控制到 10 pC 以下, 完全满足测试需要。

对 615 kvar 试品电容器进行脉冲电流法及超声法局部放电对比试验, 加压到 1.6 倍额定电压 (出厂值的 75%, 约 10.6 kV), 再逐步降压。试验结果如表 1 所示。加压到 10.6 kV 时脉冲电流法、超声法局放波形对比如图 8 所示, 其中左侧为脉冲电流法局放波形, 右侧为超声法局放波形。对该电容器进行解体, 发现明显的褶皱缺陷, 如图 9 所示。超声法测量内部局部放电产生的超声信号在电容器介质及外壳上传导后的信号大小, 跟电容器外壳、主绝缘厚度、测量位置等参数密切相关, 因此无法定量测量, 只能进行横向对比定性分析。从本文试验中

可以看出, 无特殊处理时, 超声法的定量值不准确, 但可以在测量同一型号电容器时, 在同一测量位置跟脉冲电流法测试结果进行对比校正。如表 1, 若将超声法测试结果放大 10 倍, 测试结果也是可信的。

表 1 局部放电实验室测试结果

试验电压/kV	脉冲电流法/pC	超声法/pC	备注
8	110	12	测试背景噪声为 10 pC
8.5	380	15	
9	600	50	
10.6	1300	80	



图 8 脉冲电流法、超声法局放波形对比图

Fig. 8 Comparison of pulse current method and ultrasonic wave method



图 9 被试电容器元件褶皱缺陷

Fig. 9 Fold defect of under-test capacitor element

为验证该方法在现场试验时的干扰情况, 项目组在某在运特高压变电站进行了现场测试, 测试地点选在距离主变压器较近的场地, 该站为典型设计的特高压变电站, 对其他典型设计特高压站具备参考价值。测试结果如表 2 所示。试验结果表明通过抗干扰手段, 现场背景噪声可控制到 23 pC, 因此根据国网十八项反事故措施要求, 可以检测 50 pC 以上的缺陷电容器局部放电情况。但对于交接抽检试验, 应在屏蔽实验室中进行。

表 2 局部放电现场测试结果

型号	试验电压	现场背景噪声	实验室背景噪声
BAW12/2-615-1W	9.6 kV	23 pC	10 pC

4 结论

本文分析了脉冲电流法检测特高压大容量电容器局部放电困难的原因,提出了传统阻抗难以满足检测仪器分辨率要求且通流容量不足等问题,基于以上结论,设计了基于宽频带高增益穿心 CT 的电容器局部放电检测方法。

通过仿真分析及实验验证证明了基于穿心 CT 的大容量电容器脉冲电流法局部放电检测的有效性。该方法已应用于运行中的某在运特高压变电站的现场电容器检测及基建期的某特高压变电站电容器交接抽检试验。

然而穿心 CT 型检测阻抗抗干扰性能不如传统 RLC 型检测阻抗,更适用于屏蔽实验室内的检测。因此,建议将该试验作为抽检试验,可以按一定比例进行实验室脉冲电流法局部放电试验,试验预加电压宜加到出厂值的 75%(约 1.6 倍),试验标准可采用国家电网公司十八项反事故措施中规定的 50 pC。在进行局部放电试验时,可同时进行电容器极间耐压和损耗测量两项试验,确保投运电容器质量可靠。对于现场试验,可进一步进行整个检测回路的抗干扰性能措施研究,提高现场试验检测灵敏度。

参考文献

- [1] 张宁,刘静琨.影响特高压电网运行的因素及应对策略[J].电力系统保护与控制,2013,41(1):109-114.
ZHANG Ning, LIU Jingkun. The ultra high voltage grid risk analysis and its assessment framework[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 109-114.
- [2] 高凡,吴军,刘涤尘,等.特高压电网社会效益评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(22):12-17.
GAO Fan, WU Jun, LIU Dichen, et al. Research on the social benefit evaluation method of UHV power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 12-17.
- [3] 董飞飞.特高压输变电技术的现状分析和发展趋势研究[J].陕西电力,2016,44(11):1-3.
DONG Feifei. Research on situation and development trend of UHV power transmission and transformation technology[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(11): 1-3.
- [4] 王紫琪,和敬涵,汪小君,等.考虑温度因素的特高压并联电容器双桥不平衡电流保护整定方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(22):77-83.
WANG Ziqi, HE Jinghan, WANG Xiaojun, et al. Double-bridge unbalance current protection setting method for EHV shunt capacitor banks considering temperature influence[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 77-83.
- [5] 李舟,程璐,李原,等.电力电容器主绝缘局部放电特性的研究[J].陕西电力,2016,44(10):77-81.
LI Zhou, CHENG Lu, LI Yuan, et al. Study on major insulation partial discharge performance of power capacitor[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(10): 77-81.
- [6] 李晓杰,马士莲.特高压变电站 110 kV 并联电容器组电容器故障分析[J].电力电容器与无功补偿,2013,34(3):43-46.
LI Xiaojie, MA Shilian. Fault analysis of 110 kV shunt capacitor in UHV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(3): 43-46.
- [7] 林福昌,徐智安,叶启弘,等.全膜脉冲电容器局部放电试验研究[J].电力电容器,2001(4):42-46.
LIN Fuchang, XU Zhian, YE Qihong, et al. Experimental investigation on partial discharge of all-film impulse capacitor[J]. Power Capacitor, 2001(4): 42-46.
- [8] 王安明.电力电容器局部放电测量[J].电力电容器技术,1990(2):27-29.
WANG Anming. Partial discharge measurement of power capacitor[J]. Power Capacitor Technology, 1990(2): 27-29.
- [9] 王子建,严飞,侯智剑,等.高压全膜电容器热稳定性试验条件下的温度场特性[J].电工技术学报,2016,31(17):207-215.
WANG Zijian, YAN Fei, HOU Zhijian, et al. Thermal field characteristics of high voltage film capacitors in thermal stability test[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 207-215.
- [10] 曲岩.高压电器局部放电测试方法[M].沈阳:沈阳变压器研究所,1983:3-9.
- [11] 刘耀楠,邱昌容.电气绝缘测试技术[M].北京:机械工业出版社,1981:176-183.
- [12] 夏建中,李洪臣.对电力电容器局部放电的理解与对策[J].电力电容器与无功补偿,2009,30(2):7-13.
XIA Jianzhong, LI Hongchen. Research and countermeasure on partial discharge of power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(2): 7-13.
- [13] 陈伟根,龙震泽,谢波,等.不同气隙尺寸的油纸绝缘气隙放电特征及发展阶段识别[J].电工技术学报,2016,31(10):49-58.
CHEN Weigen, LONG Zhenze, XIE Bo, et al.

- Characteristics and development stage recognition of air-gap discharge within oil-paper insulation considering effect of cavity size[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(10): 49-58.
- [14] 周凯, 吴科, 万利, 等. 无机纳米颗粒抑制中压电缆终端气隙缺陷局部放电的有效性[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(22): 230-238.
- ZHOU Kai, WU Ke, WAN Li, et al. Validity of inorganic nano-particles on the suppression of partial discharge in air gap defects for medium voltage cable terminations[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(22): 230-238.
- [15] 陈小林, 成永红, 任成燕, 等. 单气隙局部放电仿真模型的修正与关键参数的确定[J]. *西安交通大学学报*, 2004, 38(8): 815-819.
- CHEN Xiaolin, CHENG Yonghong, REN Chengyan, et al. Study on modifying the simulation model and computing the key parameters of partial discharge in single void[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, 38(8): 815-819.
- [16] 李猛, 张盈利, 陈蕾, 等. 固体绝缘气隙局部放电模型构建与仿真研究[J]. *电瓷避雷器*, 2013(2): 31-39.
- LI Meng, ZHANG Yingli, CHEN Lei, et al. Model and simulation of partial discharge in void of solid insulation[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2013(2): 31-39.
- [17] 任成燕, 成永红, 陈小林, 等. 基于 SIMULINK 的气隙局部放电仿真技术研究[J]. *西安交通大学学报*, 2004, 38(8): 824-827.
- REN Chengyan, CHENG Yonghong, CHEN Xiaolin, et al. Study on simulation technology of partial discharge in single void based on SIMULINK[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, 38(8): 824-827.
- [18] 任成燕, 成永红, 陈小林, 等. 基于气隙电阻变化模型的单气隙局部放电仿真计算[J]. *西安交通大学学报*, 2004, 38(10): 1018-1021.
- REN Chengyan, CHENG Yonghong, CHEN Xiaolin, et al. Simulation calculation of partial discharge in single void using variable void resistance model[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, 38(10): 1018-1021.
- [19] 刘文珍. 全膜电容器液体电介质性能研究[J]. *电力电容器*, 1995(4): 14-20.
- LIU Wenzhen. Study on liquid dielectric properties of the full film capacitor[J]. *Power Capacitor*, 1995(4): 14-20.
- [20] 李兆林. 全膜电容器用聚丙烯薄膜主要性能研究[J]. *绝缘材料通讯*, 1997(2): 20-26.
- LI Zhaolin. Study on the main properties of polypropylene film for the full film capacitor[J]. *Insulating materials Communication*, 1997(2): 20-26.
- [21] 李兆林, 罗锐, 陈松, 等. 特高压串联电容器用国内外 PP 膜性能对比试验研究[J]. *高压电器*, 2015, 51(3): 65-69.
- LI Zhaolin, LUO Rui, CHEN Song, et al. Contrastive test on domestic and foreign polypropylene films used in UHV series capacitors[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(3): 65-59.

收稿日期: 2017-07-20

作者简介:

马鑫晟(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为无功及过电压。E-mail: t_mxs@163.com

(编辑 周金梅)