

# 串联变压器现场局部放电试验

孙雷,周健,张宇

(江苏省送变电公司,江苏南京 210028)

**摘要:**详细介绍了串联变压器的工作结构,分析了变压器局部放电试验的重要性,提出了串联变压器局部放电试验方法,并对局部放电试验未来发展趋势进行了展望。

**关键词:**串联变压器;局部放电;串联谐振

**中图分类号:**TM835

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2015)06-0065-05

电力变压器是电力系统中关键设备之一,因其本身结构特点以及运行环境等因素,致使电力变压器故障种类繁多,研究资料表明多数变压器故障引起电网事故的主要原因在于其绝缘系统的破坏。发生在电力变压器绝缘系统中的局部放电极易造成绝缘结构破坏致使变压器故障。当前,局部放电已经成为变压器在线监测项目的主要内容之一,其发展过程及相关机理的研究已经成为变压器状态监测研究领域的热点<sup>[1]</sup>。

## 1 统一潮流控制器

统一潮流控制器(UPFC)是一种先进的柔性交流输电装置,具备同时进行串联和并联动态补偿控制的能力,可以综合解决电网面临的线路潮流分布不均、电压动态支撑能力不足等问题,可破解高度城市化地区输电发展难题,挖掘现有网架潜力,提升电网安全稳定水平。UPFC的基本系统拓扑结构如图1所示。目前国内外大部分的研究均基于该拓扑结构,国外已投运的3个UPFC相关工程在此结构基础上做了优化。但无论UPFC的系统结构如何变化,其换流器均需通过串联变压器与交流系统连接,将由换流器控制的电压转换输出至输电线路,调节线路电压的幅值、相角,以实现各种调节功能。串联变压器作为换流器与交流系统交换功率的枢纽,一方面将交流系统电压转换为与换流器直流电压匹配的电压,另一方面将交流系统与换流器隔离,减小其相互影响。

## 2 串联变压器

### 2.1 串联变压器结构

(1) 国外已投运工程。美国CSC工程的换流器拓扑受当时技术条件的限制,结构较复杂,交流主体结构采用变压器多重化。CSC采用中间变压器,将直流侧并联的4个三电平电压源换流器的交流输出电压移相串联到输出变压器的二次侧绕组上,用以提高换流器交流侧的电压等级。CSC工程中的3台变压器容量利

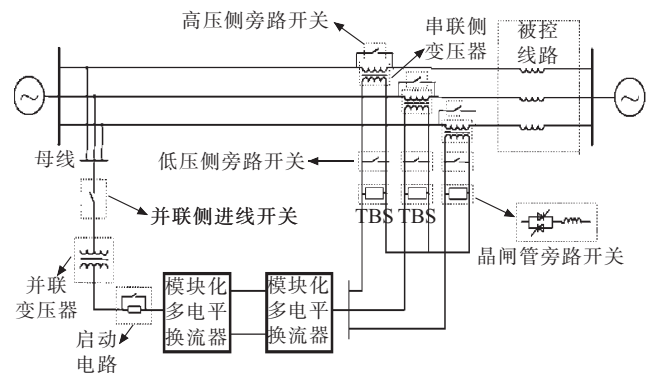


图1 UPFC基本系统结构

用率非常低,不同工作模式下,Marcy变电站内3台CSC变压器的总容量利用率通常在25%~50%,造成一次设备的极大浪费。而且CSC换流器由于当时技术条件限制,采用变压器多重化结构的换流器,构成复杂。从简单的功率半导体器件到成型的换流器需要经过串联、三电平、中间变压器等一系列变换,增加了换流器控制保护的复杂性。美国CSC工程基本系统结构如图2所示。

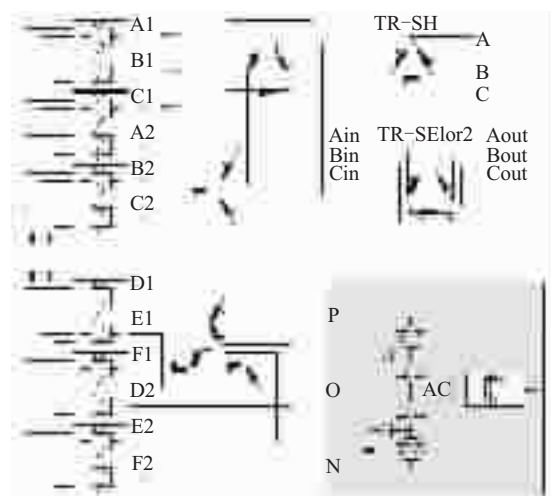


图2 美国CSC工程基本系统结构

(2) 南京UPFC工程串联变压器的结构如图3所示。串联变压器的结构比较特殊,其一次侧绕组(线路侧绕组)分相接入三相线路中,与线路连接需要6个端

口,需要三相变压器绕组分开;二次侧绕组(阀侧绕组)与换流器连接,需要3个端口,二次侧绕组可采用星型或者角型接法。

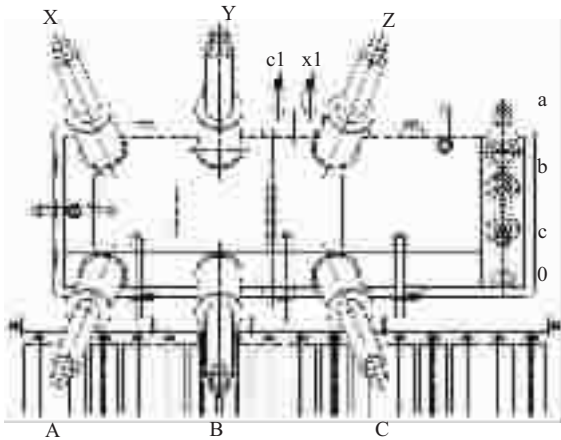


图3 串联变压器俯视图

由于磁路的非线性,当变压器励磁电流为正弦波时,主磁通为平顶波,其中除了基波还含有较强的3次谐波(忽略高次谐波)。对于两侧绕组均采用Y接法的变压器,由于三次谐波电流不能在三相绕组中流通,铁心中磁通的波形主要决定于磁路结构。三相组式变压器的磁路三相之间相互独立,三次谐波磁通与基波磁通有相同磁路,三次谐波磁通可以沿铁心闭合,其磁阻较小,三次谐波电势相当大,振幅可达基波振幅的45%~60%,导致电势波形严重畸变,所产生的过电压有可能危害线圈绝缘。三相心式变压器的磁路各相之间是相互关联的,对于三次谐波磁通,不能沿铁心闭合,只有从铁轭处散射出去,穿过一段间隙,借道油箱壁而闭合。这样三次谐波磁通就遇到很大的磁阻,使得它们大为削弱,主磁通接近正弦波。但因三次谐波磁通通过油箱壁或其他铁构件时,将在这些构件中产生涡流损耗,从而使变压器效率降低,对于YY结构的心式变压器只有容量较小时才采用(不大于1600 kV·A)。

考虑到控制系统可能会产生一个较小的直流偏置电压,如中性点直接接地,会产生较大的接地电流,因此串联变压器中性点应采用经高阻接地的方式。对于UPFC的串联变压器而言,其励磁绕组为阀侧绕组,采用如图4所示接地方式时,其接线组别与YNy类似,但不完全相同。阀侧绕组中性点有零序电流,线路侧绕组是否有零序电流与线路两侧变压器接法有关。

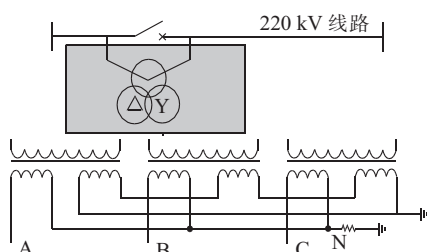


图4 阀侧星接中性点接地

若线路侧绕组不能流通零序电流,则零序电流不能安匝平衡,对铁心而言,有一个激磁零序电流,它受零序激磁阻抗控制,根据磁路的设计,这一零序激磁阻抗可能较大。相对地电压的对称会受到影响,中点会偏移,这种接法不能用于三相五柱铁心、单相组成的三相组。若线路侧绕组有零序电流流通,则零序电流会在绕组间转换,即阀侧、线路侧次绕组都有零序电流,且能安匝平衡以达到变压器有低的零序阻抗。串联变压器阀侧绕组采用星型连接、中性点接地后,可以为换流器控制提供接地平衡点,提高UPFC的工作性能。但另一方面,与采用YY结构类似,励磁电流中所必需的三次谐波电流分量不能流通。对于系统变压器,一般还设有D接平衡绕组。平衡绕组也叫补偿绕组,三角形连接、一点接地、不带负载,主要为三次谐波电流提供通路,消除三次谐波磁通,从而消除电压中的三次谐波分量。平衡绕组的作用即提供高次谐波通道,改善感应电动势波形;提高变压器带不平衡负载的能力,以稳定电压中性点;改善变压器的零序阻抗。

超高压/大容量电力变压器,通常增加一个三角形的第三绕组提供3次谐波励磁电流的通路,以改善电势波形。目前,结合平衡绕组在变压器运行中的多年经验、运行方式及平衡绕组的结构形式,在确保变压器能够满足使用要求的情况下,当其仅充当平衡绕组时,一般设计成10 kV,容量大约为变压器额定容量的1/3或者30%。

## 2.2 额定参数

串联变压器一次侧额定电压取决于系统需求,以南京UPFC工程为例,经仿真计算,串联变压器注入线路最大线电压达到26.5 kV,即可满足该区域电网近、远期潮流控制的需求,二次侧的电压需要与直流电压相匹配,设计值为20.8 kV,UPFC所安装线路的额定电流为1525 A。串联变压器的额定参数如表1所示。

表1 串联变压器额定参数

主要技术参数	一次绕组	二次绕组	平衡绕组
额定容量/MV·A	70	70	25
额定电压/kV	26.5	20.8	10
变压器漏抗/%		20(高压—低压)	
		30(高压—平衡)	
		7.5(低压—平衡)	
绕组联结组标号	III(开口Y)	Yn0	d11
变压器一次侧额定电流/A	1525	1943	1443

## 2.3 关键技术

串联变压器与常规变压器相比,其用途、要求比较特殊,其额定容量和额定电压等级取决于系统的需求,但均比常规变压器小很多。由于串联变压器一次(线路)侧绕组串联在线路中,因此当系统发生故障时,串

联变压器会有较严重的过压、过流问题,在设计制造时需要考虑技术难点。

(1) 端对地绝缘水平。串联变一次侧绕组分相串入线路,没有接地点,虽然其注入电压较小(即绕组两端电压不高),但其一次侧绕组端对地绝缘水平需要按线路电压等级来设计。

(2) 端间绝缘水平。正常运行时,串联变压器绕组的端间电压较小,但当串联变压器出口发生接地短路故障时,串联变压器绕组端间电压会发生很大的突变,电压跨度大,串联变压器绕组的端间绝缘水平需满足故障时的绝缘要求。

(3) 抗短路电流能力。正常运行过程中,串联变压器一次侧流过系统电流。但当系统发生故障时,由于变压器绕组串联在线路中,绕组中会流过较大的短路电流,对变压器抗短路能力要求较高。

(4) 过励磁耐受能力。系统故障时,串联变二次侧开路或短路运行状态,一次侧绕组端间电压均有很大的突变,导致变压器铁心处于较严重的过励磁状态,需提高变压器的过励磁耐受能力。

### 3 串联变压器局放试验

#### 3.1 局放试验的意义

电力变压器是电力系统电气设备组成之一,它的可靠运行对电力系统的安全稳定有着重大的意义。变压器能否可靠运行主要取决于其绝缘状况,实践证明,通过局放试验技术是诊断变压器绝缘状况的手段。局放试验的目的是发现变压器结构和制造工艺、安装工艺的缺陷。例如:绝缘内部局部电场强度高、金属部件有尖角毛刺、绝缘混入杂质或局部带有缺陷、产品内部金属接地部件之间、导体之间电气连接不良、真空注油工艺控制不严格等。通过试验结果指导缺陷的消除,防止变压器运行中由于局放对绝缘造成破坏,确保电网运行的安全。

#### 3.2 现场局放试验的基本要求

根据 Q/GDW-10-J206—2010 输变电设备交接和状态检修试验规程要求,110 kV 及以上电压等级变压器,交接时必须进行现场局放试验。对于新投运油浸式变压器,要求  $1.5 U_m/\sqrt{3}$  电压下,局放量不大于 100 pC(绕组额定电压 110 kV 及以上);对于有运行史的 220 kV 及以上油浸式变压器,要求  $1.3 U_m/\sqrt{3}$  电压下,局放量一般不大于 300 pC<sup>[2]</sup>。

#### 3.3 局放试验原理接线图

现场采用脉冲电流法对串联变压器进行局部放电测试,它是通过检测阻抗接入到测量回路中来检测。检测变压器套管末屏接地线、外壳接地线、中性点接地线、铁心接地线以及绕组中由于局放引起的脉冲电流,

获得视在放电量,是研究最早、应用最广泛的一种检测方法。

(1) 传统变压器局部放电试验通过对变压器低压侧施加励磁电压,高压侧感应出相应的试验电压,测量信号从高压套管的末屏接入,如图 5 所示。图 5 中, $C_1$  为无局放电容分压器高压臂; $C_2$  为无局放电容分压器低压臂; $Z_m$  为测量阻抗。

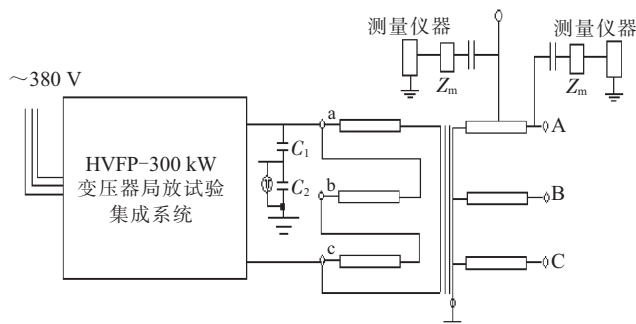


图 5 传统变压器局部放电试验接线示意图 (以 A 相为例)

(2) 不同于传统变压器,串联变压器高、低压变比极小,仅为 26.5/20.8(见表 1),难以进行励磁调压,因此试验通过串联谐振方式直接对被试串联变压器高压套管及高压中性点套管加压,测量信号从套管的末屏接入,通过局放测试仪进行试验结论的判定。试验分 A 相、B 相、C 相三相依次进行,低压绕组、平衡绕组及非被试相可靠接地。原理图如图 6 所示。

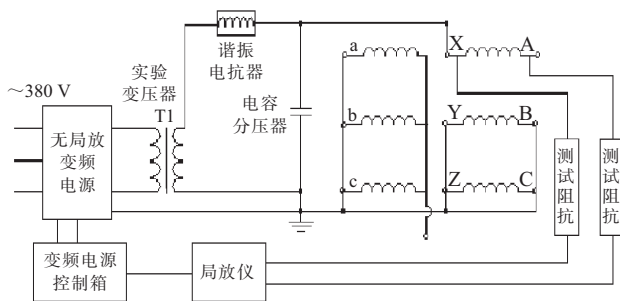


图 6 串联变压器局部放电试验接线示意图 (以 A 相为例)

#### 3.4 试验电源的选择

试验采用推挽式的大功率无局放变频调谐电源。无局放调谐电源主要用于现场各种电压等级电力设备的交流耐压试验及电力变压器、电压互感器的局部放电和感应耐压试验。同时也可作为高压电气设备绝缘介质损耗、大型接地网接地电阻的测量电源。特别是近年来开发的推挽式的大功率无局放变频调谐电源装置,作为电力变压器现场局部放电测量用电源的技术已经成熟,而且在全国电力系统范围内,该技术已经得到很大的推广。

##### 3.4.1 无局放变频调谐电源装置工作原理

无局放变频调谐电源装置的逆变电路中,不采用一般常用的工作于开关状态的场效应可控三极管

(IGBT),避免其迅速导通和截止时产生的强烈干扰脉冲,使局部放电测量工作难于进行。改用工作于功率放大原理的大功率三极晶体管,用可调频率的低频正弦信号电压,控制大功率功放管,用串并联方式达到能输出0~360 V大电流正弦电压,达到无局放的要求,即局部放电量 $\leq 10$  pC。而其他它高压谐振电抗器、励磁变和中间变压器、补偿电抗器及有关辅助设备等都按照无局放的要求进行设计和生产后,即可作为局部放电试验的电源。

### 3.4.2 无局放变频调谐电源装置的优点

(1) 试验设备体积小,重量轻,较中频发电机、三倍频发生器相比轻便得多;

(2) 利用变频调谐电源装置完成大型变压器的局部放电现场试验,可以降低试验设备和试验电源的输入容量;

(3) 试验接线更加简单,现场便于操作,可以大大降低现场的劳动强度,提高工作效率;

(4) 当试品出现绝缘缺陷时,由于失谐,变频调谐电源装置会自动跳闸,不会加剧试品的绝缘缺陷;

(5) 有一定的经济价值,可以节约大量的人工成本和车辆使用成本。

### 3.5 局放试验加压设备选择

根据输变电设备交接试验规程及合同要求,需在 $U=1.5 U_m/\sqrt{3}$ (即218 kV)试验电压下测量设备局放。考虑到设备耐压试验需升至316 kV(高压套管对地绝缘水平为395 kV,试验耐受电压标准为出厂试验电压值的80%),现场局放系统应具备升至316 kV的能力,且试验频率应满足45~65 Hz<sup>[3]</sup>。变压器局放试验等效图如图7所示。

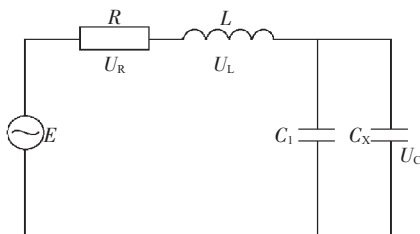


图7 变压器局放试验等效图

已知被试变压器单相套管电容量 $C_x=10\ 000$  pF,现有试验电容分压器 $C_1=20\ 000$  pF,则总电容 $C=12\ 000$  pF。此时应选用合适的试验电抗器。设 $e=\sqrt{2} E \cos \omega t$ ,则:

$$\dot{Z} = \dot{Z}_R + \dot{Z}_L + \dot{Z}_C = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + (\omega L - \frac{1}{\omega C}) = Z e^{j\varphi} \quad (1)$$

由 $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ 知,当 $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ 时, $Z =$

$Z_{\min} = R; \varphi = 0; I = \frac{E}{R} = I_{\max}; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。此时电路中电流

达到最大值且电流与电压同位相,电路处于谐振状态。

已知 $\omega_0 = 2\pi f$ ,要求 $45 \leq f_0 \leq 65$ ,则:

$$45 \leq \frac{\omega_0}{\pi} \leq 65$$

$$45 \leq \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \leq 65$$

$$500 \leq L \leq 1042$$

选用电抗器 $L=850$  H,经计算得 $f=49.9$  Hz, $\omega_0 = 2\pi f = 313$  rad/s。当谐振电路到达谐振状态时:

$$U_L = I_{\max} X_L = I_{\max} L \omega_0 = \frac{E}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = U_C \quad (2)$$

已知系统等值电阻约5 k $\Omega$ ,试验放大倍数(即品质因数) $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = 53.2$ ,则当试验电压 $U_C = 316$  kV

时,励磁变输出电压 $E = \frac{U_C}{Q} = 5.9$  kV,电抗器通过电流

$I_{\max} = \frac{E}{R} = 1.2$  A。试验设备完全满足要求。故最终选择

650 H电抗器及2000 pF电容分压器用于试验,该方案可行。

### 3.6 局放试验具体步骤

自预加激磁电压 $U_1 = 1.7 U_m / \sqrt{3} = 252$  kV,试验电压 $U_2 = 1.5 U_m / \sqrt{3} = 218$  kV, $U_3 = 1.1 U_m / \sqrt{3} = 160$  kV,匀速升至 $U_3$ 并维持5 min,匀速升至 $U_2$ ,在试验电压 $U_2$ 下维持5 min。若无异常,升至 $U_1$ ,维持15 s迅速降至 $U_2$ ,并在测试电压 $U_2$ 下维持30 min,降至 $U_3$ 并维持5 min后,降压结束<sup>[4]</sup>。根据输变电设备交接试验规程及合同要求,在 $U_2 = 1.5 U_m / \sqrt{3}$ 试验电压下被试变压器局部放电量高压侧及高压中性点侧不大于100 pC为合格,试验加压程序如图8所示。

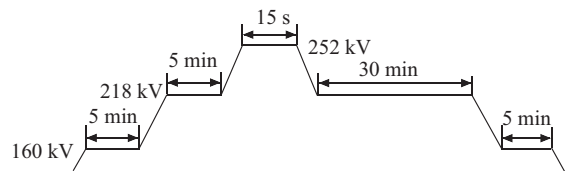


图8 串联变压器局部放电试验加压程序图

注意试验前必须在高压套管侧末屏接入分压器,进行高压侧电压为50 kV,100 kV,200 kV电压下的校核,确认无误后开始加压,加压过程中注意监视分压器及试验变压器测量绕组电压,严防高压过压。在试验升压过程中监视局部放电起始电压,降压过程中监视局部放电熄灭电压。

## 4 现场抗干扰措施

局部放电量的测量灵敏度极高,在进行现场试验时,现场干扰情况也是比较复杂的,但都有一定规律可

循。通过采取有针对性的抗干扰措施,可获得良好的现场试验效果<sup>[5]</sup>。

(1) 接地的影响。被试品的地电位应是整个测量系统的地电位,试验电源测试仪器都要用接地线直接连接并可靠接地,不允许有接地环路。现场试验过程中不允许有电焊机、电锯等大电流设备作业,以防止外界干扰信号通过地电位进入测量回路。

(2) 试验电源的影响。试验中如果试验电源和其他大型设备共用一个电源而又不能采取有效的隔离措施,将会干扰测量设备的使用。如在使用变频电源试验时,电源回路中的其他大电流设备的运行将会严重干扰测量设备的使用。所以,应保证试验电源的独立性,以避免电源回路干扰信号的影响。

(3) 悬浮电位影响。在试验过程中,由于对被试品施加了较高电压,不可避免地在其端部形成极大的场强。若此时在其附近有不接地的或接地不可靠的金属物,即可产生悬浮电位放电。如遮阳伞未接地或通过油漆接地、试验设备的接地线通过油漆接地等均可产生悬浮电位而干扰测试结果。

(4) 高压套管的电晕放电影响。在试验过程中高压套管端部将有很高的电压,为防止电晕放电影响测试结果,必须对其进行有效地屏蔽,且架空线应采取必要的措施来保证其端部的距离大于套管端部到升高座的距离,并可靠接地。

## 5 结束语

(1) 变压器局部放电测量根本目的是通过检测到的局部放电来判断变压器绝缘状况,但目前还没有很好地将局部放电测量结果跟变压器绝缘状况联系起来。因此,需要更深入地研究局部放电检测结果与变压器绝缘发展程度的关系,以实现对其整体绝缘寿命的评估和预测。

(2) 目前变压器的局部放电试验通常在外施电压下进行,这种情况代替不了变压器在电力系统中的实际运行情况,也不可能准确反映变压器的绝缘状况及其发展趋势。而变压器局部放电在线监测却与电网紧密相联,它通过监测变压器的电信号及时获取反映运行状态的各种物理量,并对其进行分析处理,预测运

行状况,所以在线监测是变压器局部放电测量技术的发展方向。

(3) 由于变压器油中局放信号的频率分布可达 1 GHz,空气中局放约为 200 MHz,而目前窄频带局部放电测量系统的工作带宽约为 10 kHz,宽频带系统的工作频带也就仅为几十到几百千赫,在这种工作带宽下,提取到的局部放电信息量是非常少的,不足以反映设备的局部放电水平,且在这个工作频带下,去除干扰也是难题,所以更宽的工作频带局部放电测量系统或高频测量技术是发展趋势。

(4) 变压器运行现场存在各种各样的干扰信号,按其波形特征主要分为两大类:连续周期性干扰和随机脉冲型干扰。由于周期性干扰在频域上表现为频带很窄的一类信号或者在固定的相位窗口出现,所以目前一般采用数字滤波器设定合适的阻带频段以及相域开窗技术,便可以比较容易地滤出。至于脉冲型干扰,它是一种更严重、更难抑制的干扰,这是由于它和局部放电信号具有相似的特性,例如频率分量、交流相位、重复率等。剔除脉冲型干扰,目前常用的方法有逐个脉冲识别法、差动平衡法和脉冲极性鉴别法等,但这几种方法的实际效果不好,有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 张涛,张超峰,周倪.脉冲电流法检测变压器局部放电的研究[J].大科技,2013(3):61-63.
- [2] Q/GDW-10-J206—2010,输变电设备交接和状态检修试验规程[S].
- [3] GB 50150—2006,电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S].
- [4] GB/T 1094.3—2003,电力变压器 第3部分 绝缘水平和绝缘试验和外绝缘空气间隙[S].
- [5] 张苏.有关电力变压器局部放电试验相关问题的探讨[J].电力科技,2012(9):161-163.

### 作者简介:

- 孙雷(1969),男,江苏邳州人,高级工程师,从事变电生产管理的工作;
- 周健(1976),男,江苏南通人,高级工程师,从事调试技术管理的工作;
- 张宇(1990),男,山东枣庄人,助理工程师,从事高电压试验的工作。

## Discussion on Site Partial Discharge Test of Series Transformers

SUN Lei, ZHOU Jian, ZHANG Yu

(Jiangsu Power Transmission and Transformation Corporation, Nanjing 210028, China)

**Abstract:** This paper introduces the working structure of the series transformer in detail, analyses the importance of the partial discharge test of transformer, proposes a partial discharge test method for the series transformer, and finally the article gives an outlook for future development trend of partial discharge test.

**Key words:** series transformer; partial discharge; series resonance