

±800 kV 特高压换流变压器现场局放试验关键技术研究

蔚超¹, 陆云才¹, 高晓军², 姚廷利¹

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 国网江苏省送变电公司, 江苏 南京 210028)

摘要:局放试验作为变压器现场交接试验的一种,是考核变压器最严厉的方法之一,可以有效检测其内部是否存在缺陷故障。在±800 kV 锦苏特高压直流输电工程中进行 800 kV 特高压换流变压器的现场局放交接试验中,在计算分析被试变压器的容性无功及感性补偿的基础上,首次提出了可调电抗器技术应用于现场局放试验,可调电抗器可以平滑地调节电抗值从而实时地改变感性补偿,解决了固定电抗器欠补或过补的状态,使试验稳定在最佳水平,并在试验过程中予以了验证。

关键词:特高压变压器;局放试验;可调电抗器

中图分类号:TM72

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2016)04-0028-04

±800 kV 锦苏特高压是目前世界上输送容量最大、送电距离最远、电压等级最高的直流输电工程,代表了当今世界直流输电技术的最高水平。根据国家电网公司企业标准《±800 kV 直流系统电气设备交接验收试验》等技术规范的要求,换流变压器在现场安装完成后必须进行绕组连同套管的感应电压试验带局部放电试验。

1 换流变压器现场局放试验方法简述

目前,我国变压器现场局部放电试验装置主要有中频发电机组和变频谐振装置 2 种^[1,2]。

(1) 中频发电机组试验装置,即用大功率电动机拖动一台中频发电机来获得中频交流电源(频率为 125 Hz, 200 Hz 或 250 Hz 等)。采用中频电源对高压大容量变压器进行局放试验时,均需用电抗器来补偿被试变压器的容性无功功率,以避免发电机组出现自励磁。

而特高压、超大容量变压器局放试验需要的发电机组输出容量、电抗器补偿更大。中频发电机组的优点主要在可通过改变发电机组励磁回路励磁变阻器的阻值,使发电机输出平滑可调的电压,使用可靠性较高。同时存在的缺点是频率固定,需要依靠外配调节电抗器的方式进行补偿。

(2) 高压大功率变频谐振装置。用串联谐振变频装置进行局放试验时,在谐振条件下电源供给串联谐振回路有功损耗,故电源输入容量很小,只需被试品电容容量的 1/Q。与电动发电机组中频电源装置相比,变频感应试验成套设备具有容量大、干扰水平低、体积小、质量轻、没有旋转机组、运行维护简便等优点,目前在 500 kV 及以下交流变压器现场局放试验中应用较多。缺点是电子元器件较多,制造工艺等存在隐患,可靠性还有待提高。

2 参数及补充容量计算

2.1 ±800 kV 特高压换流变压器参数

±800 kV 苏州换流站换流变压器根据阀侧的联结方式不同,可分别为角型(Y-Δ型)和星型(Y-Y型)换流变压器,具体参数如表 1 所示。对于 2 种联结方式的换流变压器,虽然额定容量相同,但由于阀侧电压不同,造成内部绕组电容、电场分布均差异较大,因此现场局放的试验接线、补偿方式均有不同。

表 1 换流变压器基础参数

型式	额定电压 /kV	额定容量 /MV·A	接线组别	有载调压分接范围
Y-Y 型 换流变	$\frac{505}{\sqrt{3}} (+25, -3) \times$ $1.25\% / \frac{160.7}{\sqrt{3}}$	340.8	Y-Y	$(+25, -3) \times$ 1.25%
Y-Δ 型 换流变	$\frac{505}{\sqrt{3}} (+25, -3) \times$ 1.25%/160.7	340.8	Y-Δ	$(+25, -3) \times$ 1.25%

2.2 ±800 kV 特高压换流变压器补偿容量计算。

2.2.1 有功功率计算

有功损耗计算以被试变压器的空载损耗为依据,并按各铁心段分别计算,将空载损耗按铁心段数平均,三柱式铁心共分 7 段(3 柱和 4 段铁轭),每段损耗为总损耗的 1/7。试验时各段铁心损耗,取决于磁通密度和频率,即:

$$P_q = \left(\frac{f_n}{f_1}\right)^m \times \left(\frac{B_1}{B_n}\right)^n \times P_0 \quad (1)$$

式(1)中: f_1, f_n 分别为基频和倍频电压频率; B_1, B_n 分别为与额定电压和倍频对应的磁通密度; P_q, P_0 分别为每段铁心的试验损耗和空载损耗。 m, n 分别为与硅钢片性能有关的系数,冷轧钢取 $m=1.6, n=1.9$,热轧钢取 $m=1.3, n=1.8$ 。

由于:

$$\frac{B_1}{B_n} = \frac{U_1}{U_n} \cdot \frac{f_1}{f_n} \quad (2)$$

得全磁通时各段铁心损耗为:

$$P_q = \left(\frac{f_n}{f_1}\right)^m \times \left(\frac{U_1}{U_n} \cdot \frac{f_1}{f_n}\right)^n \cdot P_0 \quad (3)$$

在电源频率 $f = 200 \text{ Hz}$, $K = 1.5 \times 1100/1050 = 1.57$ 情况下,有功损耗为:

$$P = (K \times f_n / f_s)^{1.9} \times (f_n / f_s)^{1.6} \times P_0 \quad (4)$$

由式(4)计算 $P = (1.57 \times 50/200)^{1.9} \times (200/50)^{1.6} \times 180 \approx 280 \text{ kW}$ 。

该变压器在电压时的有功损耗约为 280 kW,加上中间变和补偿电抗器的有功损耗(50 kW 左右),再考虑 10% 的裕度,则发电机组的有功输出不应小于 360 kW,本次试验使用 500 kW/1000 kV·A 的中频发电机组,能够满足试验要求。

2.2.2 容性无功计算

试验电压沿变压器绕组轴向高度成线性关系。假定高、低压绕组之间和绕组对地的电容沿绕组高度均匀分布,变压器绕组对地电容效应可由绕组两端的集中电容所等值,绕组容性功率为:

$$Q = \omega C_{\text{Line}_E} U_{\text{Line}_E}^2 / 2 + \omega C_{\text{valve}_E} U_{\text{Valvem}}^2 / 2 + \omega C_{\text{Line_valve}} (U_{\text{Line}} - U_{\text{Valvem}})^2 / 2 \quad (5)$$

式(5)中: ω 为试验电压角频率等于 $2\pi f$; C_{Line_E} 为网侧绕组对地电容, pF; $C_{\text{Line_valve}}$ 为网侧阀侧绕组间电容, pF; C_{valve_E} 为阀侧绕组对地电容, pF; U_{Line_E} 为绕组网侧电压, kV; U_{Valvem} 为绕组阀侧电压, kV。

对于 Y 型换流变非对称加压,由式(5)计算 $Q = 400 \times 3.14 \times 4100 \times 476^2 \times 10^{-9} / 2 + 400 \times 3.14 \times 3700 \times 151.5^2 \times 10^{-9} / 2 + 400 \times 3.14 \times 6700 \times (476 - 151.5)^2 \times 10^{-9} / 2 = 583.4 + 46.1 + 443 = 1072.5 \text{ kV} \cdot \text{A}$

对△型换流变采用对称加压,则:

$$Q = \omega C_{\text{Line}_E} U_{\text{Line}_E}^2 / 2 + \omega C_{\text{valve}_E} U_{\text{Valvem}}^2 / 8 + \omega C_{\text{Line_valve}} (U_{\text{Line}} - U_{\text{Valvem}})^2 / 2 \quad (6)$$

由式(6)计算 $Q = 400 \times 3.14 \times 4100 \times 476^2 \times 10^{-9} / 2 + 400 \times 3.14 \times 3700 \times 262.4^2 \times 10^{-9} / 8 + 400 \times 3.14 \times 6700 \times (476 - 262.4)^2 \times 10^{-9} / 2 = 583.4 + 36.8 + 953.4 = 1574 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 。

3 采用可调电抗器方式的感性补偿方法

3.1 可调电抗器的主要原理

当铁心电抗器的线圈中通过以交流电流时,它就产生两部分磁通,如图 1 所示。一部分是主磁通 Φ_m ,它沿铁心磁路(铁心饼、饼间气隙、铁轭)闭合,与全部线

匝相交链;另一部分是漏磁通 Φ_σ ,它主要沿空气(或油)闭合。这种电抗器的等效电路如图 2 所示。在等效电路中,主磁通所对应的电抗称为主电抗,而漏磁通所对应的电抗称为漏电抗,铁心电抗器的电抗为主电抗于漏电抗之和。

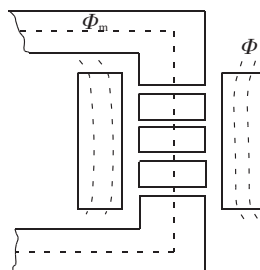


图 1 铁心电抗器的磁通及磁势

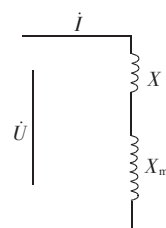


图 2 铁心电抗器的等效回路

铁心电抗器的主电抗:

$$X_m = \omega L_m \quad (7)$$

式(7)中: L_m 为主磁路对应的电感,即主电感, H。

$$L_m = W^2 A_m \quad (8)$$

式(8)中: W 为电抗器的总匝数; A_m 为主磁路的磁导。

为了较准确地计算主磁导 A_m ,首先研究一下主磁道磁力线的分布。如图 3 所示。

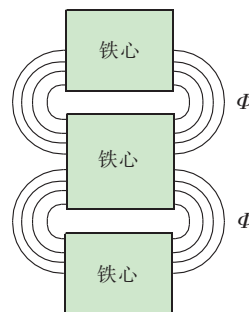


图 3 气隙处磁力线分布图

主磁通的磁力线可分为 2 个部分,第一部分是穿过铁心饼下气隙面积的磁力线,假定它们都是垂直射入(或射出)铁心饼截面,分布是均匀的,这一部分磁路对应的磁导记为 A_{m1} ;第二部分是除了第一部分之外的主磁通的磁力线,它们是由边缘效应所产生的,其路径近似为半圆,这一部分磁路对应的磁导为 A_{m2} ,则:

$$A_m = A_{m1} + A_{m2} \quad (9)$$

铁心饼下空气气隙对应的磁导:

$$A_{m1} = \mu_r \mu_0 \frac{A_\delta}{\delta} \quad (10)$$

式(10)中: δ 为铁心饼间气隙长度,m; μ_r 为相对磁导率; μ_0 为磁常数; A_δ 为铁心饼截面的截面积,m²。

$$A_\delta = \frac{A_i}{K_{dp}} \quad (11)$$

式(11)中: A_i 为铁心柱的净截面积,m²; K_{dp} 为铁心碟片系数。

假定对应边缘效应的那一部分磁通从一个铁心饼沿半圆路径到达另一个铁心饼,那么该路径长度为 πx 。对于铁心横截面圆周上单位长度,边缘效应磁通所穿过的面积可表示为 $l \cdot dx$,则该磁路的磁导可表示为:

$$A'_{m2} = \mu_r \mu_0 \int_{\frac{\sigma}{2}}^{\frac{4+\sigma}{2}} \frac{l \cdot dx}{\pi x} = \frac{\mu_r \mu_0}{\pi} \ln \frac{h+\sigma}{\sigma} \quad (12)$$

设由于边缘效应,铁心柱向外扩大的等效宽度为 ε ,则 A'_{m2} 还可以表示为:

$$A'_{m2} = \mu_r \mu_0 \frac{l \cdot \varepsilon}{\delta} \quad (13)$$

式(12)与(13)相等,于是得到:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\pi} \ln \left(\frac{h+\delta}{\sigma} \right) \quad (14)$$

在式(14)中, ε 的单位为m。如图3所示,对于平行叠片铁心,边缘效应产生的气隙向外扩大的等效面积为:

$$A_{\sigma2} = 2\varepsilon(b_m + \Delta_m + 2e) \quad (15)$$

式(15)中: b_m 为铁心柱最大片宽,m; Δ_m 为铁心柱最大厚度,m。

$$A_{m2} = \mu_r \mu_0 \frac{A_{\sigma2}}{\delta} \quad (16)$$

由式(10)、式(11)、式(16)得到:

$$A_m = A_{m1} + A_{m2} = \mu_r \mu_0 (A_{\sigma1} + A_{\sigma2}) = \mu_r \mu_0 A_\delta \quad (17)$$

其中,等效导磁面积:

$$A_\delta = A_{\delta1} + A_{\delta2} \quad (18)$$

当铁心电抗器有 N 个气隙时,其主电感:

$$L_m = W^2 \mu_r \mu_0 \frac{A_\delta}{N\delta} \quad (19)$$

其主电抗:

$$X_m = 2xfW^2 \mu_r \mu_0 \frac{A_\delta}{N\delta} \quad (20)$$

考虑到 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m,则:

$$X_m = 8x^2 fW^2 \mu_r \frac{A_\delta}{N\delta} \times 10^{-7} \quad (21)$$

由此可见,通过改变铁心饼间气隙长度可以有效地改变电抗器的电抗值 X_m ,从而改变感性补偿容量。

3.2 可调电抗器参数选择

根据容性无功计算结果,单台容量需大于1200 kV·A,同时考虑过补偿度在10%至30%,容量范围应

在1300~2000 kV·A。在局放试验时,1.5倍预加电压时,阀侧电压为151.5 kV,同时为兼顾±500 kV换流变及特高压现场应用,选择额定电压为200 kV。具体参数如表2所示。

表2 可调电抗器参数设置

项目	参数
额定电压/kV	200
额定容量/kV·A	2000
额定电流调节范围/A	1.5~10
额定电感调节范围/H	10~100
冷却方式	ONAN
波形畸变率/%	≤1
电抗值调节范围/kΩ	13.33~133.3

4 现场局放试验验证

4.1 被试变压器参数(Y型为例)

被试变压器参数(Y型为例)如表3所示。

表3 变压器参数

项目	参数
额定电压/kV	$\frac{505}{\sqrt{3}} (+25, -3) \times 1.25\% / \frac{160.7}{\sqrt{3}}$
额定容量/MV·A	340.8
接线组别	Y-Y
有载调压分接范围	(+25, -3) × 1.25%

4.2 试验接线

试验采用200 Hz倍频电源加压,阀侧绕组单端加压励磁,网侧绕组中性点接地的标准接线方式,分相进行。试验接线如图4所示。

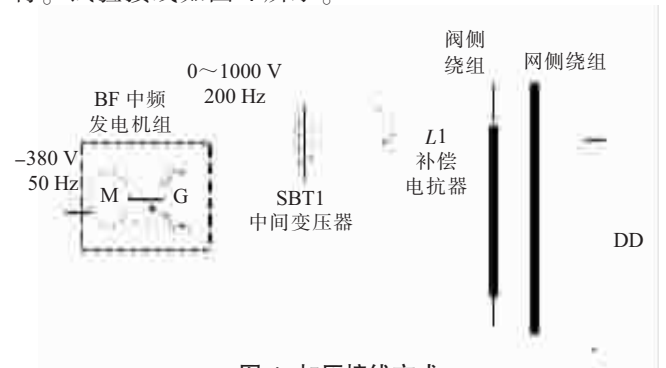


图4 加压接线方式

在不大于 $U_2/3$ 的电压下接通电源;上升到 $1.1U_m/\sqrt{3}$,保持5 min;上升到 $1.3U_m/\sqrt{3}$,保持5 min;上升到 $1.5U_m/\sqrt{3}$,保持30 s;降低到 $1.3U_m/\sqrt{3}$,保持60 min测量局部放电;降低到 $1.1U_m/\sqrt{3}$,保持5 min;在施加试验电压的整个期间,应监测局部的放电量。加压方式如图5所示。

图5中: $U_1 = 1.5U_m/\sqrt{3}$; $U_2 = 1.3U_m/\sqrt{3}$; $A = 5$ min; $B = 5$ min; $C = 30$ s; $D = 60$ min; $E = 5$ min;系统最高运

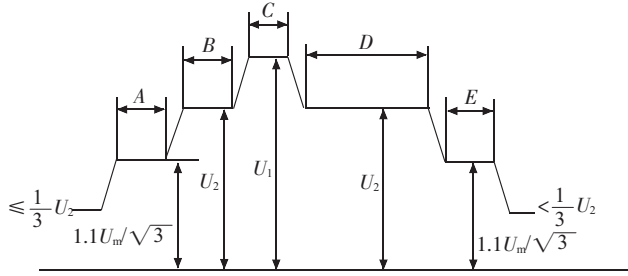


图5 加压方式示意图

行电压 $U_m=550$ kV; 激发电压 $U_1=1.5U_m/\sqrt{3}=476$ kV; 试验电压 $U_2=1.3U_m/\sqrt{3}=413$ kV。

4.3 试验过程

调整可调电抗器,使气隙到最大,从而感性补偿容量最大,保证感性电流要大于容性电流。为使得倍频电源发电机的电流最小化,不断的调整气隙,调节感性补偿容量,使感性容量过补偿 10%左右,因为可调电抗器在励磁变出口电压与被试变压器的电压相同,因此仅需监测电流,即可计算出补偿情况。电抗器调节过程中电压电流如表 4 所示。

表 4 电抗器调电流值

试验电压(折算到高压侧)/kV	感性电流/A	容性电流/A	补偿度/%
50	1.2	0.82	146
100	1.87	1.42	131
150	2.73	2.20	124
200	3.61	3.04	119
300	5.38	4.89	110

从表 4 可以看出,不断地调整气隙可以平滑地改变电抗器的电抗值,从而改变感性补偿容量,调整感性过补偿的程度,从而使发电机工作在最佳状态。最终调整到电抗值为 13.6 H。施加电压及局放量如表 5 所示。

表 5 试验过程中各侧电压电流值

电压倍数	阀侧电压/kV	网侧电压/kV	发电机电压/V	发电机电流/A
1.3	131.4	413	600	295
1.5	151.5	476	750	328

5 结束语

对于大容量、高电压可调电抗器在特高压换流变局放试验中的首次应用,现场接线简单、无需串并联组装、试验准备工作量小、节省人力物力、背景局放量小、试验安全、方便快捷等特点,高效优质地完成换流变特殊性试验,既验证了特高压换流变的优良性能,又验证了新试验方法的可行性。同时缩短了换流变安装试验周期,加快了特高压直流输电技术推广应用的步伐,也为特高压直流电网的安全运行提供了安全保障。

参考文献:

- [1] 董宝华,何平.油浸式电力变压器的局部放电测量试验[J].变压器,2008,45(8):33-37.
- [2] 吴鹏,田猛,陆云才,等.锦—苏特高压直流对江苏电网变压器直流偏磁的影响[J].江苏电机工程,2014,33(1):5-8.
- [3] 谢毓城.电力变压器手册[M].北京:机械工业出版社,2003:892-904.
- [4] 陈乔夫,李湘生.互感器电抗器的理论与计算[M].武汉:华中理工大学出版社,1992:195-224.

作者简介:

- 蔚超(1984),男,山东莱芜人,工程师,从事变压器状态评价及诊断技术研究工作;
- 陆云才(1982),男,南通如皋人,工程师,从事变压器故障诊断技术研究工作;
- 高晓军(1979),男,江苏如东人,工程师,从事电力系统工程试验技术研究工作;
- 姚廷利(1965),男,江苏南京人,工程师,从事电力一次设备特殊性试验研究工作。

Research on Key Technology of Partial Discharge Testing for ±800 kV UHVDC Converter Transformer

WEI Chao¹, LU Yuncai¹, GAO Xiaojun², YAO Tingli¹

(1.State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Transmission and Transformation Corporation, Nanjing 210028, China)

Abstract: As the most severe assessment method in transformer commissioning testing, partial discharge testing can effectively detect insulation faults inside transformer. In this paper, the adjustable reactor has been firstly proposed and used in the partial discharge commissioning testing of the converter transformers in Jinping-Sunan ±800 kV DC transmission project. The capacitive reactive power of the converter transformer under testing has been analyzed and the inductive compensation has been calculated. The reluctance of the adjustable reactor can be adjusted smoothly, therefore the inductive compensation can be changed continuously in real time and the under-compensation or over-compensation problems of fixed reactor can be avoided. The testing method is validated in the field commissioning testing in Jin-Su UHVDC project and the filed partial discharge testing is completely successful.

Key words: converter transformer; partial discharge testing; adjustable reactor