

# 1000 kV 特高压电力变压器绝缘水平及试验研究

李光范, 王晓宁, 李 鹏, 孙 麟, 李 博, 李金忠

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Insulation Level and Test Technology of 1000 kV Power Transformers

LI Guang-fan, WANG Xiao-ning, LI Peng, SUN Lin, LI Bo, LI Jin-zhong

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** The insulation coordination for the first 1000 kV power transmission project in China is studied and decided under the optimization principle, it is not a simply extrapolation of that for 500 kV power transmission system and is nor completely in accordance with the standards of GB311.1-1997 and IEC60071-1-1993. The insulation level of 1000 kV power transformer adheres to following items: the lightning impulse withstand voltage is 2250kV; the switching impulse withstand voltage is 1800 kV; and the power frequency withstand voltage is 1100 kV/5min. Due to the differences among the insulation levels and insulation test voltages for different windings of UHV power transformer and the close electromagnetic coupling among the windings of UHV power transformer, the power frequency and impulse test voltages are transmitted among these windings by the transformer ratio, thus it is bound to bring about the condition that the insulation design for some conductor terminals can not be checked by the test voltage specified in the technical specification. Besides, due to the high voltage class, high capacity and super size of UHV power transformer, the size of its test circuit is correspondingly enlarged, the impacts of stray inductance and capacitance will be more intense consequentially, thus it makes the front time of voltage waveform in lightning impulse test elongated, however, the design and calculation are generally conducted according to standard waveform, thus in the isolation design of UHV power transformer the attention should be paid to the impact of long front time test voltage. In this paper, the structural features and insulation level of power transformer for 1000 kV power transmission project in China as well as special problems during the insulation test are presented in detail.

**KEY WORDS:** UHV ; power transformer ; insulation level ; test technology

**摘要:** 中国 1 000 kV 交流特高压系统绝缘配合不是对 500 kV 系统的简单放大, 也并未完全依照 GB311.1-1997 或 IEC60071-1-1993 标准, 是在优化原则下研究确定的。变压

器绝缘水平为: 雷电冲击耐压 2 250 kV、操作冲击耐压 1 800 kV、工频耐压 1 100 kV(5 min)。由于特高压变压器各绕组绝缘水平及绝缘试验电压要求不同, 而变压器各绕组是通过电磁耦合紧密联系的, 工频和操作冲击试验电压在各绕组间按变比传递, 因此势必造成有些线端绝缘设计不能按其技术规范所规定的试验电压来考核。此外, 特高压电力变压器电压高、容量大、尺寸超大, 试验回路尺寸也相应扩大, 杂散电感、电容影响也更加突出。这将造成雷电冲击试验电压波形的波头时间拉长, 而设计计算一般按照标准波头进行。因此, 在特高压变压器绝缘设计中, 应关注长波头试验电压的影响。文中详细介绍了中国 1 000 kV 交流特高压工程用电力变压器的结构特点、绝缘水平及绝缘试验中的特殊问题。

**关键词:** 特高压; 变压器; 绝缘水平; 试验技术

## 0 引言

中国正在建设首个 1000 kV 特高压交流试验示范工程, 包括 2 个变电站、1 个开关站和 650 多公里线路。特高压输电工程的成败在于设备, 其中变压器、电抗器和开关设备等尤为重要。特高压变压器电压高、容量大, 又受运输限值影响, 给设计和制造带来更高的技术难度。特高压变压器各绕组的绝缘配合原则不同, 同时因尺寸高大等原因有些绝缘试验不能按照技术规范要求进行, 这将影响设计及制造质量的考核和验证。

从前苏联和日本的特高压工程运行及试验经验来看, 特高压输电工程的建设不存在不可逾越的技术障碍。前苏联、日本和中国正在建设的特高压交流输电系统的额定电压及最高电压都相差无几, 但在系统构成、线路长度、主设备规范、绝缘技术等方面有较大差异。因此, 不可能将某一个国家的经验或技术照搬过来, 必须结合特定的工程条件进行原创性的研究、设计和制造。

1 000 kV 交流特高压输电系统的绝缘配合原则不同于 750 kV 及以下电压等级。首先, 通过采用高性能避雷器、并联电抗器、先进的系统分析及过电压限制技术将特高压系统的雷电过电压、操作过电压及工频过电压水平进一步降低, 进而使得绝缘配合更为优化。

特高压电力变压器的绝缘设计不能由 500 kV 变压器简单地外推。特高电压、特大容量及超大尺寸对结构形式也带来特殊的要求。本文详细介绍了中国 1 000 kV 交流特高压工程用变压器的结构特点、绝缘水平及绝缘试验中的特殊问题。

## 1 1 000 kV 交流特高压变压器的结构特点

### 1.1 结构型式

特高压电力变压器电压高、容量大, 其结构型式、绝缘技术、冷却技术、漏磁/局部过热、调压方式、大件运输等方面都需要采用极限技术, 需要原始创新技术。其油箱结构可分为单体式和分体式。前苏联、意大利及中国都采用单体式结构<sup>[1-2]</sup>, 日本因公路交通所限采用了分体式<sup>[3]</sup>, 分别如图 1~3 所示。在铁心结构上, 一般采用三柱式结构, 如图 1 和图 2 所示<sup>[4]</sup>。中国特高压电力变压器采用单体、单相五柱式结构, 3 个主柱、2 个旁轭, 单柱容量 334 MVA, 图 3 和图 4 分别为结构示意图和效果图。单体容量 1 000 MVA, 是世界之最。特高压引出线为绕组中部引出, 绕组上下两端绝缘水平均为 500 kV 等级。

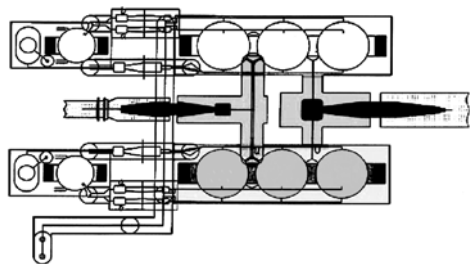
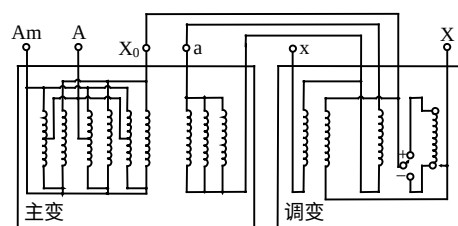


图 1 日本 1 000 MVA/1 050 kV 特高压变压器  
Fig. 1 1 000 MVA/1 050 kV UHV transformer of Japan



图 2 前苏联 667 MVA/1 150 kV 特高压变压器  
Fig. 2 667 MVA/1 150 kV UHV transformer of the Soviet Union



A—高压线圈首端; Am—中压线圈首端;  
X<sub>0</sub>—调压线圈; a, x—低压线圈; X—中性点  
图 3 中国单相五柱式特高压变压器结构示意图  
Fig. 3 Scheme of single pentastyle UHV transformer of China

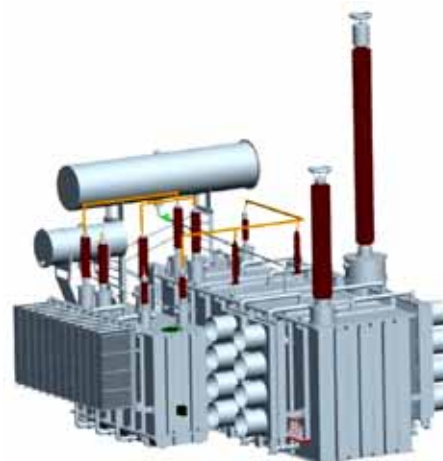


图 4 中国工程用特高压变压器效果图  
Fig. 4 Master drawing of UHV transformer of China

变压器冷却方式采用强油循环风冷, 即 OFAF 方式。

### 1.2 调压方式

500 kV 电力变压器中大多数采用中压绕组线端调压方式。特高压变压器的中压绕组电压即为 500 kV, 线端调压方式下绝缘技术难度非常高、调压开关研发难度大, 因而多采用中性点调压方式。中性点调压不同于线端调压, 是变磁通调压方式, 在调压过程中, 不仅中压端电压发生变化, 且低压绕组电压也将随磁通的变化而发生波动。由于低压端接有无功补偿装置, 电压的波动将使无功控制更为复杂。因此, 设置一补偿绕组, 以补偿调压过程中低压绕组的电压波动。

中国采用无载调压方式, 同时为使主变结构简单化, 将调压绕组安装在一个独立的箱体与主变箱体隔离, 通过套管与主变电气连接。

### 1.3 出线形式、套管

前苏联采用套管出线、日本采用全封闭式组合电器(gas insulated switchgear, GIS)出线、意大利采用充油电缆出线, 中国的特高压变压器采用套管出线形式。

在特高压变压器中,1 000 kV 等级电容式、短尾、油-空气套管是一顶尖技术产品。套管干弧距离 9 m 左右,安装后端部对地高度 17 m 左右,重量约 6 t。变压器抗震要求按照 8 级地震烈度设防,而套管是变压器中机械强度的最薄弱点。由于特高压套管尺寸高大,风压及导线舞动等外力对引出线结构的机械强度提出更高的要求。为安全起见,多采用在魏德曼结构与对地之间增加机械支撑点,如图 5 所示<sup>[5]</sup>。



图 5 特高压变压器外部机械支撑

Fig. 5 External mechanical sustainer for UHV transformer

套管应能承受工频耐受电压 1 200 kV(5 min)和  $1.5 U_m/\sqrt{3}$  ( $U_m$  为设备最高运行电压)工频电压下 1 h 的局部放电试验考核。值得注意的是,套管安装后,还要承受倍频下(不做频率/时间折算)的 1 100 kV (5min)和  $1.5 U_m/\sqrt{3}$  工频电压下 1h 的试验,制造厂应认真研究电压、频率和耐受时间对套管绝缘的影响。

1.4 运输

大件运输是建设特高压输电工程需要克服的

难题之一。

由于受运输条件的限制,中国特高压变压器装运件尺寸限制为:长 12 m×宽 4.15 m×高 4.9 m;运输重量 375 t。公路运输时,变压器应能在其底板与地平面的坡度不大于 15°的条件下运输。

日本的交通运输条件更差,为此采用分体式结构,每个单体运输重量控制在 200 t 左右,其公路运输照片如图 6 所示。为此,日本特高压变压器采用分体式、6 主柱结构,如图 1 所示<sup>[6]</sup>。



图 6 日本特高压变压器的运输

Fig. 6 UHV transformer transportation of Japan

2 特高压变压器的绝缘水平

1 000 kV 特高压交流输电系统的绝缘水平目前尚无国际标准可依。GB311.1-1997<sup>[7]</sup>适用于 500 kV 及以下系统,而 IEC60071-1-1993<sup>[8]</sup>的适用范围是 765 kV 及以下系统。表 1 为部分国家早期典型特高压变压器样机参数及其绝缘水平。中国、日本、前苏联、意大利的特高压变压器主要技术参数见表 2。

中国首个 1 000 kV 级特高压交流输电系统的绝缘配合根据优化原则确定。根据过电压及其限制措施的研究,过电压的限制水平为:操作过电压,变电站侧 1.6 pu(1 pu=1 100  $\sqrt{2}/\sqrt{3}$  kV(峰值)),线路侧最大 1.7 pu;工频暂时过电压,母线侧 1.3 pu,线路侧 1.4 pu<sup>[9-10]</sup>。

变压器类设备内绝缘的耐受电压以避雷器的操作冲击、雷电冲击保护水平为基础,同时乘一配合系数(安全裕度),通过惯用法加以确定。工频耐

| 表 1 部分国家早期典型特高压变压器样机参数及其绝缘水平                                                               |      |                                                            |        |         |       |                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------|--------|---------|-------|------------------------------|
| Tab. 1 Typical UHV transformer prototype parameters and insulation level of some countries |      |                                                            |        |         |       |                              |
| 国别                                                                                         | 年份   | 额定电压/kV                                                    | 容量/MVA | 绝缘水平/kV |       |                              |
|                                                                                            |      |                                                            |        | 雷电*     | 操作**  | 工频***                        |
| 瑞典                                                                                         | 1971 | (1 500/ $\sqrt{3}$ )/(765/ $\sqrt{3}$ )/(420/ $\sqrt{3}$ ) | 333    | 3 000   | 2 350 | 1 560(1 min), 1 300(30 min)  |
|                                                                                            | 1976 | (1 785/ $\sqrt{3}$ )/(835/ $\sqrt{3}$ )/(420/ $\sqrt{3}$ ) | 333    | 3 000   | 2 500 | 1 400(1 min), 1 300(30 min)  |
| 德国                                                                                         | 1972 | (1 200/ $\sqrt{3}$ )/(525/ $\sqrt{3}$ )/30                 | 400    | 2 400   | 1 950 | 1 200(1 min), 1 040(60 min)  |
| 前苏联                                                                                        | 1972 | (1 150/ $\sqrt{3}$ )/(500/ $\sqrt{3}$ )/18                 | 210    | 2 500   | —     | 1 100(60 min)                |
| 意大利                                                                                        | 1979 | (1 050/ $\sqrt{3}$ )/(400/ $\sqrt{3}$ )/24                 | 200    | 2 400   | 1 950 | 866(60 min)                  |
| 日本三菱                                                                                       | 1978 | (1 800/ $\sqrt{3}$ )/(825/ $\sqrt{3}$ )/66                 | 100    | 2 700   | 2 250 | 1 385(1 min), 1 040(长期)      |
| 日本东芝                                                                                       | 1979 | (1 200/ $\sqrt{3}$ )/(550/ $\sqrt{3}$ )/63                 | 500/3  | 2 400   | 1 950 | 1 385(1 min), 1 040(120 min) |

注: \*为雷电冲击电压水平; \*\*为操作冲击电压水平; \*\*\*为工频试验电压水平。

表 2 中国、日本、前苏联、意大利特高压变压器主要技术参数  
Tab. 2 UHV transformer qualification of China, Japan, the Soviet Union and Italy

| 主要技术指标               | 中国                                         | 日本                                           | 前苏联                                   | 意大利                                     |              |                             |
|----------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|--------------|-----------------------------|
| 最高电压 $U_m/\text{kV}$ | 1 100                                      | 1 100                                        | 1 200                                 | 1 050                                   |              |                             |
| 额定容量/MVA             | 1 000/1 000/334                            | 1 000/1 000/400                              | 667/667/180                           | 400/400/—                               |              |                             |
| 额定电压/kV              | $(1050/\sqrt{3})/(525/\sqrt{3}\pm5\%)/110$ | $(1\,050/\sqrt{3})/(525/\sqrt{3}\pm5\%)/147$ | $(1\,150/\sqrt{3})/(500/\sqrt{3})/20$ | $(1\,000/\sqrt{3})/(400/\sqrt{3})/12.2$ |              |                             |
| 冷却方式                 | OFAF                                       | ODAF                                         | —                                     | —                                       |              |                             |
| 引出线方式                | 套管                                         | GIS                                          | 套管                                    | 电缆                                      |              |                             |
| 调压方式                 | 中性点无励磁调压                                   | 中性点有载调压                                      | 单相自耦                                  | 升压变                                     | 单相自耦         |                             |
| 绝缘水平                 | (全波/截波)/kV                                 | 2 250/2 400                                  | 1 950                                 | 2 550/2 800                             | 2 250/2 550  | 2 250                       |
|                      | 高压 操作冲击/kV                                 | 1 800                                        | 1 425                                 | 2 100                                   | 1 800        | 1 800                       |
|                      | 工频(5min)/kV                                | 1 100                                        | 1 100                                 | 1 100(1 min)                            | 1 000(1 min) | 1.5×1 050/ $\sqrt{3}$ (1 h) |
|                      | (全波/截波)/kV                                 | 1 550/1 675                                  | 1 300                                 | 1 550/1 650                             |              | 1 300                       |
|                      | 中压 操作冲击/kV                                 | 1 175                                        | —                                     | 1 230                                   |              | —                           |
|                      | 工频(1min)/kV                                | 630                                          | 550(5 min)                            | 630                                     |              | —                           |
|                      | (全波/截波)/kV                                 | 550                                          | 750                                   | —                                       |              | 95                          |
|                      | 低压 工频(1min)/kV                             | 230                                          | 325                                   | —                                       |              | —                           |
|                      | (全波/截波)/kV                                 | 185                                          | —                                     | —                                       |              | —                           |
|                      | 中点 工频(1min)/kV                             | 85                                           | 185                                   | —                                       |              | —                           |
|                      | 空载损耗 $P_0/\text{kW}$                       | ≈200                                         | 350                                   | 310                                     |              | —                           |
|                      | 空载电流 $I_0/\%$                              | ≈0.05                                        | 0.35                                  | —                                       |              | —                           |
| 负载损耗 $P_k/\text{kW}$ | 1 420~1 450                                | 3 395                                        | 1 100                                 |                                         | —            |                             |
| 短路阻抗 $U_k/\%$        | ≈18                                        | 18                                           | 12.5                                  |                                         | 15           |                             |
| 噪声/dB(A)             | 78~80                                      | 65                                           | —                                     |                                         | —            |                             |
| 运输尺寸/m               | 12×4.15×4.9                                | 分体式 10.5×3.1×4.1                             | —                                     |                                         | 10×4.1×4.6   |                             |
| 运输重量/t               | 375                                        | 每箱体 200                                      | 带油 390                                |                                         | 不带油 275      |                             |

注：OFAF—强油循环风冷；ODAF—强油导向油循环风冷。

受试验电压的确定较为复杂。

220 kV 及以下电压等级变压器的工频耐压值是由操作过电压水平折算得来，即

$$U_{AC,1min}=1.1KU_{\Phi m}/1.35 \tag{1}$$

式中： $U_{AC,1min}$  为工频 1 min 试验电压有效值，kV； $U_{\Phi m}$  为最大工作相电压； $K$  为系统操作过电压计算倍数，通常取 3；1.1 为累积系数；1.35 为操作冲击系数(代表变压器的内绝缘耐受操作过电压的强度与耐受 1 min 工频电压强度之比)或由雷电冲击过电压水平折算得来，即

$$U_{AC,1min}=U_{BIL}/\sqrt{2} \beta \tag{2}$$

式中： $U_{BIL}$  为雷电冲击试验电压，kV； $\beta$  为全波冲击系数(代表变压器的内绝缘耐受冲击过电压的强度与耐受 1 min 工频电压的强度之比，通常取 1.7)<sup>[11]</sup>。

在 220 kV 以上电压等级系统中，随着保护水平的提高，绝缘水平得以优化，工频耐受试验电压值也随之降低。

工频耐受试验的目的是确认有无局部放电并验证绝缘强度。变压器的短时间和长时间局部放电概率可由韦伯尔(Welbull)分布方程得到： $P_1(U_b,t_b)=1-\exp(-kU_b^m t_b^m)$ ，约为 1%~2%，根据经验，试验期间局部放电概率远低于 2%。对于重要设备，局部

放电的概率应控制在 0.1%~0.2%的水平，并由此确定试验电压  $U_t$  和试验时间  $t_t$ 。一般认为，变压器交流耐压试验时，在  $U_m$  电压下的持续时间，根据变压器绝缘模型的局部放电伏秒特性试验，5 min 更能反映其特点。运行经验表明，超高压变压器的损坏大多数是在工频电压下发生，因此适当加长工频耐压时间是合理的<sup>[12-13]</sup>。

由表 2 可见，各国的特高压变压器绝缘水平都是优化设计的，不是简单的放大。中国、日本、前苏联、意大利 4 个国家特高压变压器的结构、容量、调压方式、绝缘水平等都有一定差异。日本特高压变压器的容量与我国相同，但采用分体式结构，技术难度较大。日本东京电力公司新榛名特高压试验场的 3 台特高压变压器分别由东芝、三菱、日立公司研制。据了解，在研制过程和现场试验中 3 台变压器分别都出现过一些问题。我国采用单体式结构，技术难度非常大，且与日本的难点不同，从容量、电压方面来说无世界先例<sup>[14]</sup>。

3 绝缘试验

3.1 概述

特高压变压器内有不同电压等级的 3 个绕组。这些绕组之间通过磁链紧密耦合，使电能得以在不同的电回路中传递，以实现传输和分配电能的目的。

的。由于这 3 个电压等级的绝缘配合原则不同,由此确定的试验电压与额定电压或最高运行电压之间的倍率不同,这将影响各绕组试验电压的确定。

此外,特高压变压器由于电压高、容量大、尺寸超大,试验回路的杂散参数将对雷电冲击的波头时间产生较大影响。

试验研究表明,在操作冲击试验电压、工频试验电压及雷电冲击试验电压作用下,变压器绝缘的放电特性和放电路径不同<sup>[15]</sup>。因此,特高压变压器的绝缘试验方法需要认真研究。

### 3.2 雷电冲击试验

雷电冲击试验电压的标准波形是 $(1.2 \pm 30\%) / (50 \pm 20\%) \mu\text{s}$ 。研究发现,某些国家特高压变压器的实际试验波头时间约为  $5 \mu\text{s}$ ,超出标准规定。主要原因是特高压变压器尺寸大,试验回路非常大,杂散电感、入口电容也大,造成波头时间拉长。我国几个大型变压器厂的冲击电压发生器基本都是近几年购置的,在  $500 \text{ kV}$  变压器上试验波头时间非常标准;但在  $750 \text{ kV}$  变压器上应用时发现,变压器的雷电冲击电压波头上升时间远超过 $(1.2 \pm 30\%) \mu\text{s}$ ,有的甚至达  $4 \mu\text{s}$  左右。这意味着在特高压变压器上波头时间将会更长。

$5 \mu\text{s}$  的波头对变压器主纵绝缘的影响不同,而设计计算一般都是按照标准波形进行。因此,较长波头时间的试验电压在变压器内复合绝缘结构中的电场分布将有别于设计计算值。一般来说,波头越陡对变压器纵绝缘冲击梯度分布的要求越严格<sup>[16]</sup>。根据计算程序分析,在较长波头冲击试验电压下的油中场强值会有所降低。这一方面说明较长波头不能完全考核验证短波头的设计,即“严设计、松考核”,另一方面说明油中场强值的降低会加重纸/固体绝缘上的压力。设计时必须引起注意。

### 3.3 操作冲击试验

在  $220 \text{ kV}$  及以下电压等级变压器试验中,通常采用  $1 \text{ min}$  工频耐受试验(或感应试验)来替代操作冲击试验。随着  $500 \text{ kV}$  及以上电压等级的出现,为保证系统更加安全经济的运行,高性能避雷器等保护设备的普遍使用使得电力系统的绝缘水平得以降低。系统绝缘水平的降低使得变压器耐受操作冲击的能力更加突出,此时已不能用工频耐受试验来保证操作冲击试验水平,而必须对变压器进行操作冲击耐受试验<sup>[11]</sup>。

一般来说,操作波试验电压在 3 个绕组中按变

比传递。由于特高压变压器 3 个绕组的绝缘配合原则不同,如果满足特高压端的操作冲击试验电压,则  $500 \text{ kV}$  侧试验电压偏低;而如果满足  $500 \text{ kV}$  侧,则特高压端超出规定试验电压。这是无法解决的,这就意味着不能用试验来验证  $500 \text{ kV}$  侧的操作冲击绝缘设计。为此,一般采用  $1 \text{ min}$  短时工频耐受试验( $630 \text{ kV}$ )来替代操作冲击耐受试验。此外,据特高压试验示范工程的系统研究,操作过电压的波头可能达到  $3000 \mu\text{s}$ ,而标准试验波形是  $250/2500 \mu\text{s}$ 。这一点在设计时也应予以考虑<sup>[10]</sup>。

### 3.4 感应耐压试验

与操作波试验相同, $500 \text{ kV}$  侧也达不到规定试验电压。可通过辅助变压器支撑中性点电位以提高  $500 \text{ kV}$  侧的端电位。为此,有必要将中性点绝缘水平设计为  $66 \text{ kV}$  或以上电压等级,其  $1 \text{ min}$  工频耐受试验电压为  $140 \text{ kV}$ 。这样,可以在  $500 \text{ kV}$  侧的短时工频耐受试验(short-duration AC withstand voltage test, ACSD)时,通过抬高中性点电位来满足  $500 \text{ kV}$  侧端部试验电压达到  $630 \text{ kV}$ 。即便是这样,不能提高  $500 \text{ kV}$  侧纵绝缘(匝间绝缘)试验电压<sup>[17]</sup>。 $500 \text{ kV}$  侧 ACSD 试验接线如图 7 所示。图中:G 为中频发电机;T1 为中间变压器;T2 为辅助变压器。

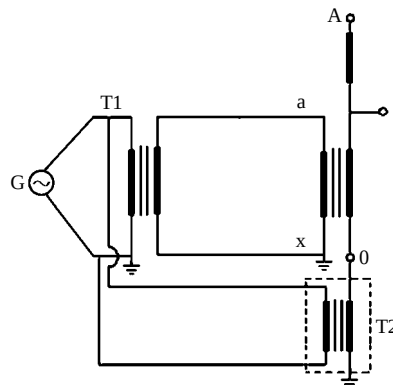


图 7  $500 \text{ kV}$  侧 ACSD 试验接线

Fig. 7 The connection diagram of  $500 \text{ kV}$  ACSD test

$500 \text{ kV}$  绕组中性点支撑下的 ACSD 试验可按如下方式进行。试验时,调压变压器置于极限正分接;感应倍数  $1.633$ ;中性点支撑电压  $U_0 = 110.2 \text{ kV}$ ;  $U_A = 1\,050 / \sqrt{3} \times 1.633 + 110.2 = 1\,100 \text{ kV}$ ;  $U_{Am} = 525 / \sqrt{3} \times 1.05 \times 1.633 + 110.2 = 630 \text{ kV}$ 。如果进一步提高中性点支撑电压即降低感应倍数,可适当降低特高压绕组的试验电压。

$110 \text{ kV}$  绕组的工频绝缘水平为  $230 \text{ kV}$ ,其端绝缘可通过外施工频试验考核,但绕组纵绝缘可能的最高工频试验电压为  $1\,100 / 1\,050 \times \sqrt{3} \times 110 =$



199.6 kV, 无法做到规定试验电压。

### 3.5 快速暂态过电压问题

快速暂态过电压 (very-fast-front transient overvoltage, VFTO) 是 GIS 中隔离开关投切过程中因多次重燃产生的特快速暂态过电压。过电压振荡频率很高、波前很陡, 也称为陡波前过电压。一般其初始前沿为  $3\sim 200\text{ ns}^{[18]}$ 。

VFTO 一般不超过 2.0 pu, 有的可达 2.5 pu, 极少达到 3.0 pu。VFTO 的平均值一般低于雷电冲击耐受水平, VFTO 直接冲击变压器的内绝缘。在变压器与 GIS 直接连接回路或非直接连接回路中, 国内外都曾发生过多起变压器遭受 VFTO 而导致绝缘破坏的事故。VFTO 对变压器绕组的前几匝影响较大。

高性能避雷器、高压并联电抗器及中性点小电抗等过电压限制措施对 VFTO 起不到限制作用。据国外经验, 在 GIS 的隔离开关中设置合分闸电阻是最为有效的限制措施。

我国首个 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程中, 晋东南与荆门站为变电站, 南阳为开关站。三站开关将采用 GIS 或复合组合电器 (hybrid gas insulated switchgear, HGIS) 设备。因此, 需要重点研究 VFTO 对特高压变压器绝缘的影响。

## 4 现场带有局部放电测量的长时感应耐压试验

现场常规性能试验不存在特殊难度。

建议特高压变压器在现场安装后进行带有局部放电测量的长时感应耐压试验 (long-duration induced AC voltage test, ACLD), 以检验长途运输及现场安装后的绝缘状态。试验电压与时间可适当降低, 如将  $1.5 U_m/\sqrt{3}$  降为  $1.3 U_m/\sqrt{3}$ , 5 min 缩短为 1 min 等。

现场局部放电试验难度很大: ①特高压变压器额定条件下的空载损耗预计约 200 kW, 加上试验回路其他部分的有功损耗, 要求有大容量站用变, 一是满足大功率电动机的启动电流, 二是提供足够的试验所需的有功功率; ②低压绕组电压为 110 kV, 要求采用高电压、低局放中间变压器及补偿电抗器, 同时需采用大管径引线以避免发生电晕; ③高、中压端部均压处理难度大, 在现场解决大直径均压罩有一定困难。

因此, 建议组织专题研究特高压变压器的现场局放试验方法及试验电源的研制。

## 5 结论

(1) 特高压变压器的绝缘水平是绝缘配合优化原则下确定的。由于特高压变压器 3 个绕组的绝缘配合原则不同, 影响各绕组试验电压的确定, 因此造成其中、低压绕组的部分绝缘试验项目不能按照规定的方式进行。此外, 特高压变压器的高大尺寸也将影响雷电全波的波形因素。这些因素有可能在特高压变压器的绝缘试验中造成“严设计、松考核”现象, 应通过加强半成品试验来弥补。综上所述, 在特高压电力变压器中, 500 kV 绕组不能做标准规定电压下的操作波冲击试验, 建议用中性点支撑的 ACSD 试验替代。

(2) 感应耐压试验中, 500 kV 绕组侧的试验电压不能达到标准规定的试验电压。建议同样用中性点支撑的 ACSD 试验考核 500 kV 侧的主绝缘, 但纵绝缘无法通过规定的工频耐受电压考核。

(3) 特高压输电系统操作过电压的波头时间远超过标准规定的  $250\mu\text{s}$ , 建议开展  $3000\mu\text{s}$  长波头下的油纸绝缘特性研究。

(4) 特高压绕组的雷电冲击试验电压波头上升时间可能远大于  $(1.2\pm 30\%)\mu\text{s}$ , 设计时要认真研究不同的波头时间对绝缘的影响。

(5) 建议研究特高压变压器的现场局部放电试验设备和试验方法。

## 参考文献

- [1] Kovalev V, Panibratets A, Volkova O, et al. The equipment for the AC 1 150 kV transmission line[C]. International Workshop on UHVAC Transmission Technology, Beijing, China, 2005.
- [2] Ardito A, de Nigris M, Giorgi A, et al. The Italian 1 000 kV project [C]. International Workshop on UHVAC Transmission Technology, Beijing, China, 2005.
- [3] Yamagata Y, Tamaki E, Ikeda M, et al. Development and field test of 1 000 kV 3 000 MVA transformer[C]. CIGRE Paris session 1998.
- [4] 国家电网公司. 特高压输电建设、运行和维护赴俄罗斯培训报告[R]. 北京: 国家电网公司, 2005.
- [5] Toshiba. 1 000 kV transformer[C]. International Workshop on UHVAC Transmission Technology, Beijing, China, 2005.
- [6] Kawamura T, Kobayashi T, Ebisawa Y, et al. Development and long term field tests for UHV 3 000 MVA transformer in Japan [C]. IEC/CIGRE UHV Symposium, Beijing, 2007.
- [7] GB311.1-1997, 高压输变电设备的绝缘配合[S].
- [8] IEC60071-1-1993, Insulation for co-ordination high voltage transmission and distribution equipment[S].
- [9] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [10] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

(下转第 40 页 continued on page 40)

- Jiang Xingliang, Sun Caixin, Sima Wenxia, et al. Study on AC flashover performance and process of iced 10 kV composite insulator [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 58-61(in Chinese).
- [21] Liang Xidong, Wang Shaowu, Huang Lenceng, et al. Artificial pollution tests and pollution performance of composite insulators [C]. High Voltage Engineering Symposium, 1999.
- [22] Matsuoka R, Kondo K. Influence of nonsoluble contaminants on the flashover voltages of artificially contaminated insulators[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(1): 420-430.
- [23] 蒋兴良, 于亮, 胡建林, 等. 棒-板长空气间隙在低气压下雷电冲击特性及电压校正[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 152-156. Jiang Xingliang, Yu Liang, Hu Jianlin, et al. Lightning impulse discharge performance and voltage correction of long air gaps at lower atmospheric pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 152-156(in Chinese).
- [24] IEC 60507-1991, Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on AC systems[S].
- [25] GB/T4585-2004, 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S].
- [26] GB/T 16927.1-1997, 高电压试验技术 第 1 部分 一般试验条件和要求[S].
- [27] DL/T859-2004, 高压交流系统用复合绝缘子人工污秽试验[S].
- [28] IEC 60060-1-1989, High-voltage test techniques Part 1: general definitions and test requirements[S].
- [29] GB/T 775.2-2003, 绝缘子试验方法 第 2 部分 电气试验方法[S].
- 收稿日期: 2007-09-12。  
作者简介:  
张志劲(1976—), 男, 博士, 讲师, 从事高电压与绝缘技术方面的研究工作, E-mail: zhangzhijiang@cqu.edu.cn;  
蒋兴良(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事高电压外绝缘技术与输电线路覆冰及防护技术方面的研究工作。
- (责任编辑 马晓华)

(上接第 6 页 continued from page 6)

- [11] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [12] 国家电网公司. 特高压交流试验示范工程对日咨询出国报告[R]. 北京: 国家电网公司, 2006.
- [13] 国家电网公司. 日本特高压输电技术考察报告[R]. 北京: 国家电网公司, 2005.
- [14] 国网武汉高压研究院. 特高压输电技术资料汇编[Z]. 武汉: 国网武汉高压研究院, 2005.
- [15] 沈阳变压器厂. 变压器试验[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [16] 保定天威保变电气股份有限公司. 变压器试验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [17] GB1094.3—2003, 电力变压器 第三部分: 绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙[S].
- [18] Yamagata Y, Nakada Y, Nojima K, et al. Very fast transients in 1 000 kV gas insulated switchgear[C]. IEEE Transimission and Distribution Conf., 1998.
- 收稿日期: 2008-01-02。  
作者简介:  
李光范(1955—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 副总工程师, 研究方向为超/特高压输变电技术;  
王晓宁(1970—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为超/特高压输变电技术;  
李 鹏(1975—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为超/特高压输变电技术;  
孙 麟(1964—), 女, 高级工程师, 研究方向为超/特高压输变电技术;  
李 博(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为超/特高压输变电技术;  
李金忠(1974—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为超/特高压输变电技术。
- (责任编辑 马晓华)

## 我国首座高温气冷堆商用核电站通过可研审查

2008 年 1 月 16 日, 华能山东石岛湾核电厂高温气冷堆核电站示范工程可行性研究报告通过了由国家电力规划设计总院、国防科工委、国家核安全局、山东省政府等单位组织的联合审查。华能山东石岛湾高温气冷堆核电站示范工程位于山东省荣成市, 是由华能山东石岛湾核电有限公司负责建设和运营的、具有我国自主知识产权的中国第一座高温气冷堆商用示范电站。该工程于 2006 年 2 月列入国家中长期科技发展规划(2006—2020)的重大科技专项, 是我国建设创新型国家的一项标志性工程。工程计划于 2009 年 9 月正式开工建设, 2013 年年底并网发电。该厂址远期规划容量为 7.80 GW, 包括 3.80 GW 高温气冷堆核电机组和 4.00 GW 压水堆核电机组。

高温气冷堆是国际核能界公认的目前安全性最高的新型核反应堆, 热效率高, 系统简单, 用途广泛, 是最有希望成为适应未来能源市场安全 and 经济需要的先进堆型之一。该堆型在失冷失压的严重事故状况下, 无需借助应急冷却系统即可保持燃料元件的完整性, 不会造成堆芯熔化、核放射性大量释放的严重后果, 可达到第四代核能系统的核安全目标, 无需采取厂外应急技术措施。华能山东石岛湾核电有限公司由中国华能集团公司、中国核工业建设集团公司、清华大学于 2007 年 1 月共同出资组建, 负责建设和运营高温气冷堆核电站示范工程。