

# 800 kV 升压变压器工程设计研究

阮全荣, 施 围

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Study on Engineering Design of 800 kV Step-up Transformer

RUAN Quan-rong, SHI Wei

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 由发电机出线直接升压到 800 kV 的变压器将在西北地区首次采用。该文将结合拉西瓦工程设计的要求, 对一系列的技术问题加以研究与分析。根据工程设计和研究结果, 变压器将采用三相组单相变压器, 铁心采用三柱式, 电压调压范围为  $800/\sqrt{3} - 3 \times 2.5\%$  kV。由于 GIS 的断路器和隔离开关均设置分合闸电阻, 使 GIS 产生的快速暂态过电压 (VFTO) 对变压器绝缘影响较小, 以及我国 800 kV 系统过电压的限制水平, 确定它的绝缘耐受能力。

关键词: 升压变压器; 电压调压范围; 快速暂态过电压; 工程设计

中图分类号: TM451

文献标识码: A

Abstract: Associated with Laxiwa hydropower station, the 800 kV step-up transformer, which directly connects with generator, shall be adopted first in northwest. Some technical considerations are given to solve the problems appeared in design. Besides, according to technical design and preliminary research results, the three single-phase transformers, with a three-column core and a voltage-regulation scope of  $800/\sqrt{3} - 3 \times 2.5\%$  kV, are chosen. As the pre-inserting resistance is used in CB and DS the very fast transient overvoltage produced in GIS will make little influence to the transformer insulation. With the overvoltage level of 800 kV rated voltages in China, preferred rated insulation levels are given.

Key words: step-up transformer; voltage-regulation scope; very fast transient overvoltage(VFTO); engineering design

## 1 前言

由于拉西瓦电站的 800 kV 升压变压器低压侧直接与发电机相连, 因而在工程设计中必须充分考虑变压器电压等级高、额定容量大 (780 MV·A)、海拔高 (安装高度 2 242 m) 以及运输困难等特点。笔者将结合工程需要和国内外制造、运行经验<sup>[1-4]</sup>, 对变

压器的结构型式、技术参数、VFTO 的影响、绝缘水平等问题进行深入的研究和分析。

## 2 型式及主要结构

### 2.1 变压器型式选择

特高压变压器的运输问题是较之其它技术问题更应优先考虑的问题, 不同的运输方式决定了特高压变压器的型式、结构和一些基本参数<sup>[1]</sup>。由于西北地区仅能采用铁路和公路运输, 考虑到变压器的运输, 800 kV 780 MV·A 变压器可采用的型式有: 三相组单相变压器和三相组合式变压器。

该工程使用的场地两种型式布置都满足要求, 但考虑到变压器的制造难度、现场环境及安装要求、安装工期、运行可靠性以及国内制造经验等因素, 确定采用三相组单相变压器 (3  $\times$  260 MV·A)。

### 2.2 变压器结构

800 kV 升压变压器为国内首次生产, 在结构设计时主要考虑铁心结构、主绝缘、纵绝缘及屏蔽措施。

#### (1) 铁心结构

800 kV 变压器由于电压高, 而且受运输尺寸和重量的限制, 可采用的铁心结构有两种: ①四柱结构, ②三柱结构。

目前, 国外通过改进铁心结构及材料或采用外铁心技术, 800 kV 变压器大多数设计成三柱。而国内制造厂经过理论计算, 推荐采用四柱或三柱结构。根据工程招标情况, 变压器铁心采用三柱结构。

#### (2) 主绝缘

大型铁心式油浸变压器, 目前仍以油-隔板绝缘结构为主。为了满足高压电力变压器绝缘性能的要求, 特别是对 800 kV 变压器来说, 不仅要求油-隔板结构具有较高的击穿电压, 而且还要求具有较高的

收稿日期: 2006-02-07; 修回日期: 2006-03-30

基金项目: 国家自然科学基金 (快速暂态过电压下金属氧化物避雷器频率特性研究) 资助项目 (50577051)。

作者简介: 阮全荣 (1964-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 从事水电站电气设计和 750 kV 系统过电压与绝缘配合的研究。

起始局部放电电压。其主要措施有<sup>[6]</sup>：采用复合绝缘结构。如对端部电场采用专门的绝缘结构，使其局部放电起始电压提高了40%；在不均匀电场区域采用成型绝缘件，它解决了高压绝缘结构及引线方面的技术难题。采用成型件的基本要求是尽量使绝缘隔板与等电位线走向一致，以提高绝缘结构的爬电性能；兼顾变压器冷却系统。绝缘结构的设计要与变压器冷却系统结合起来，以提高变压器冷却效率；研究新的绝缘材料。

### (3) 纵绝缘

对纵绝缘的考虑主要是使其起始分布尽量接近最终分布，以减缓线圈振荡，降低线圈饼间梯度电压。

目前国内外超高压变压器或特高压变压器，普遍采用纵接式或插入电容式线圈，能把饼间梯度控制在8%。无论哪种线圈都希望其纵向电容可调，以进一步降低饼间梯度。

### (4) 屏蔽措施

由于该电站变压器额定电流大，将产生较大的漏磁场，当漏磁通超过某个临界值时，会造成局部损耗偏高引起局部过热。采取合理的屏蔽方式不但能减少杂质损耗，而且能消除局部过热。屏蔽方式的研究还应包括大电流引线途径的金属结构件，以及线圈端部采用磁分路等。在国内有些变压器除拉板、大电流升高座、低压斜屋顶部位采用无磁钢或不锈钢外，有的连夹件也采用无磁钢，不但要研究这些部件是否必须采用低温材料，还要研究其成本，使其能体现出综合效益<sup>[6-9]</sup>。油箱目前都采用磁屏蔽和电磁屏蔽相结合的方式。

## 3 变压器高压调节范围选择

变压器的抗短路强度是保证变压器可靠性的关键指标。而变压器的分接范围对其有直接影响。

据文<sup>[10]</sup>，变压器绕组径向短路抗拉应力为：

$$x = \frac{K_f B_{my} I_d R_p}{mns} \quad (1)$$

式中： $K_f$ 为 $\sqrt{2}$  K非对称短路电流冲击系数； $B_{my}$ 为对应单元的纵向磁通密度(T)； $I_d$ 为对称短路电流； $R_p$ 为绕组的平均半径(m)； $m$ 为并联支路数； $n$ 为每匝并联根数。变压器绕组轴向短路弯曲应力为：

$$y = \frac{K_f B_{mx} I_d^2}{2mna^2} \quad (2)$$

式中： $B_{mx}$ 为对应单元的横向磁通密度(T)； $l=2 R_p/N_s$ 为两垫块间的距离(m)； $N_s$ 为垫块数； $R_p$ 为绕组的平均半径(m)； $a$ 为导线厚度(m)； $b$ 为导线宽度(m)。

根据式(1)和式(2)，对该工程四柱式变压器的计算研究成果，高压采用-2×2.5%分接的抗短路强度明显优于±2.5%的分接方式，见表1。

由于该变压器高压绕组采用串联结构，采用

-2×2.5%分接有利于变压器结构简化。经过系统进一步研究和计算，在变压器的阻抗为14%的前提下，电压调节范围为 $800/\sqrt{3} - 3 \times 2.5\% \text{ kV}$ 。

表1 两种分接方式计算结果

| 系数分类         | -2×2.5%(额定分接/最小分接) | 2×2.5%(最大分接/额定分接/最小分接) |
|--------------|--------------------|------------------------|
| 高压线圈径向安全系数   | 1.8/1.6            | 1.9/1.8/1.6            |
| 高压线圈轴向安全系数   | 2.8/2.3            | 2.9/2.8/2.4            |
| 低压线圈径向安全系数   | 3.1/2.8            | 2.6/2.4/2.1            |
| 轴向安全系数       | 1.9/1.6/1.3        | 1.3/1.7/1.7            |
| 线圈对夹件作用力 /MN | 460/580            | 730/590/640            |

## 4 VFTO对变压器绝缘的影响

### 4.1 VFTO的特点

隔离开关(DS)和断路器(CB)的操作会在GIS内产生特快速暂态现象(VFT)，其中DS操作尤为常见。GIS中所有元器件工作于稍不均匀电场，DS两极均为插入式的同轴圆柱体，操作中触头运动速度慢，断口在SF<sub>6</sub>气体会发生多次的预、重击穿。在每一个电压跳变处将产生波前很陡(一般为3~20 ns)的阶跃电压波，并向断口两侧传播。由于这一过电压的上升速率极快，因此被称作特快速暂态过电压(VFTO)<sup>[11-18]</sup>。GIS中SF<sub>6</sub>的绝缘性能和灭弧性能都远优于空气，故相邻电气设备的间距和母线长度都比同型空气绝缘变电站(AIS)小得多，产生的阶跃电压波会在GIS内不断地产生、来回地传递，并且发生复杂的折射、反射和叠加，最终暂态振荡的频率剧增，可高达数百MHz。

### 4.2 VFTO对变压器的影响

当GIS内部产生的VFTO以行波的方式通过母线传播到套管时，一部分耦合到架空线上并沿线传播，危及外接设备的绝缘。系统中主变直接和GIS相连，受VFTO影响很大。如我国一核电站500 kV GIS，曾先后两次发生了VFTO导致变压器绝缘损坏和线饼烧损的严重事故。VFTO陡度在变压器处可达0.49 MV/μs，沿变压器绕组近似于指数分布，其作用甚至超过截波，因此首端绝缘承受较高的电压；VFTO所含的谐波分量会在变压器绕组的局部引起共振，尤其当变压器通过气体绝缘管道(GIL)与GIS连接时更严重；加上累计效应使变压器绝缘发生击穿。

通过对实际发生绝缘事故的变压器分析，引起故障的主要原因有：

(1) VFTO陡波前冲击电压波侵入变压器线圈，形成沿线圈极不均匀的电压分布。由于GIS开关操作产生的VFTO，虽然它的幅值可能不是很高，以至于变压器过电压保护装置没有阻挡住其进入变压器线圈内部，但由于变压器线圈分布电容的存在，将沿线圈形成高度不均匀的电压分布，使其电压几乎全

部降在线圈端部的部分区域, 从而使其端部匝间绝缘发生击穿。

(2) 由于 VFTO 含有的谐波频率, 将可能与变压器部分绕组的自然频率重合, 引起绕组局部电磁谐振, 可能在变压器线圈内部产生极高的谐振电压, 从而造成变压器绝缘内部击穿。

#### 4.3 目前采取的措施

根据有关研究表明, 变压器线圈在 VFTO 作用下, 匝间梯度电压对线圈绝缘危害最大, 并且实际绝缘事故的击穿部位及匝间梯度最大值都出现在变压器入波绕组进线端第一线饼的入口处, 即第 1 线饼的前若干线匝之间。

因此, 考虑提高变压器线圈绝缘在 VFTO 作用下的可靠性, 目前采取以下措施: ①采用电容分区的绕组结构型式; ②提高靠近变压器线端若干段的匝绝缘厚度; ③增加靠近变压器线端局部线圈的匝间层垫或加小角环; ④合理选择变压器入口电容; ⑤变压器出口装设避雷器。

#### 4.4 初步计算结果分析

由于认识到 VFTO 对变压器的危害性, 因此本工程进行了 VFTO 初步计算研究。根据拉西瓦的接线、运行方式、布置等, 用于计算的方式有 28 种, 计算采用 EMTP 程序。

由于断路器带有合闸电阻, 隔离开关带有分合闸电阻, 使得合闸(1.25 p.u.以下)与分闸时(1.45 p.u.以下)产生的 VFTO 幅值都很低, 其基本频率为 500 kHz。计算表明: 当 CB 和 DS 装设分合闸电阻时, 该工程变压器绝缘设计可满足 VFTO 在变压器绕组中产生的过电压要求。但由于变压器结构, 特别是高低绕组结构和布置对 VFTO 在变压器绕组的电压分布影响较大, 应根据变压器设计的深入进一步研究和计算 VFTO 在变压器绕组的电压分布特性。

## 5 变压器的绝缘水平

根据国家电网公司企业标准(Q/GDW)<sup>[19]</sup>, 在 750 kV 的系统中, 最高运行电压 800 kV, 工频过电压变电所侧、线路侧分别不超过 1.3 与 1.4 p.u. 值, 操作过电压限制到分别为 1.7 与 1.8 p.u. 以下, 结合 GIS 装置的特点, 国内外的运行经验, 国际 IEC2003-62271-203 的建议, 800 kV 变压器绝缘水平初步确定为: 工频耐受电压相对地与相间为 960 kV; 操作耐受电压相对地为 1 550 kV、相间为 2 420 kV; 雷电耐受电压相对地与相间为 1 950 kV。

## 6 结论

由于该工程用变压器电压等级高、容量大, 结合电站具体要求, 通过计算和研究, 得出结论: ①变压器采用三相组单相变压器; ②铁心采用三柱结构;

③变压器高压调节范围为  $800/\sqrt{3} - 3 \times 2.5\% \text{ kV}$ ; ④VFTO 在变压器端部产生过电压幅值较低; ⑤确定了变压器的绝缘水平; ⑥分析认为, VFTO 在变压器绕组中产生的匝间过电压幅值较小, 但频率较高, 还需根据变压器的具体结构进一步计算和研究。

## 参考文献:

- [1] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] Grandl J. Studies of Very Fast Transients (VFT) in a 765 kV Substation[C]// International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, France, 1988: 33-12/1-6.
- [3] Murayama Y. 800 kV GIS Design and Field Measurements for Transient Overvoltage [C]// 8th International Symposium on High Voltage Engineering, Yokohama, Japan, 1993, ISH 33 (10): 23-27.
- [4] Yamagata Y, Tanaka K. Suppression of VFT in 1100 kV GIS by Adopting Resistor-fitted Disconnecter [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(2): 872-880.
- [5] Shibuya Y, Fujita S, Hosokawa N. Analysis of Very Fast Transients Overvoltage in Transformer Windings [J]. IEE Proceedings-generation Transmission and Distribution, 1997, 144(5): 461-468.
- [6] Biro O. Globle Element Analysis of Transformer Leakage Field and Tank Losses [J]. Electrical Eng., 1983, 27 (3/4): 281-295.
- [7] 李文海. 变压器短路强度研究成果简介 [J]. 变压器, 1997 (10): 18-32.
- [8] Karsei K. Large Power Transformers [M]. Netherland Amsterdam, 1987.
- [9] 齐振曦. 大型变压器油箱结构分析与优化设计 [J]. 变压器, 1994(6): 14-18.
- [10] 余国铨. 抽水蓄能电站设计特点[J]. 阶段水电气, 2002(2): 51-61.
- [11] Shibuya Y, Fujita S, Shimomura T. Effects of Very Fast Transients Overvoltage on Transformer [J]. IEE Proceedings-generation Transmission and Distribution, 1999, 146(5): 459-464.
- [12] Fujita S. Voltage Oscillation in Transformer Windings Affected by Fast Transient Surges [J]. Transactions of IEE Japan, 2000, 120-B(5): 766-772.
- [13] 何善庆. GIS中的快速暂态过程[J]. 高压电器, 1995, 31(2): 41-46.
- [14] 钟连宏, 欧世饶, 周红霞. GIS中的快速暂态过电压的分析计算[J]. 高电压技术, 2000, 26(2): 60-62.
- [15] 尹小芳, 于力, 刘广维. 封闭式组合电器隔离开关产生的过电压[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 111-114.
- [16] Povh D, Schmitt H, Valcker O, et al. Modeling and Analysis Guidelines for Very Fast Transients [J]. IEEE Trans. on Power Delivery. 1996, 11(4): 2 028-2 035.
- [17] 史保壮, 李智敏, 张文元, 等. 超高压 GIS中快速暂态过电压造成危害的原因分析[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 1-3.
- [18] Fujita S, Hosokawa N, Shibuya Y. Experimental Study of Very Fast Transient Phenomena in Transformer Winding[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1 201-1 207.
- [19] 中华人民共和国国家电网公司标准(Q/GDW). 750 kV 变电所设计暂行技术规定(电气部分)[S]. 2003.