

# 800 kV GIS 中变压器的 VFTO 防护的研究

刘 青<sup>1</sup>, 张玉峰<sup>1</sup>, 施 围<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学电控学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049)

Study on Transformer Protection from VFTO in 800 kV GIS

LIU Qing<sup>1</sup>, Zhang Yu-feng<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

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

摘要: 随着超高压 GIS 的广泛使用, 由开关操作产生的快速暂态过电压(VFTO)引起普遍关注。以拉西瓦 750 kV GIS 变电站为原型, 利用 EMTP 计算了主变端部的 VFTO, 并分析了开关并联电阻、主变与 GIS 的连接方式、MOA 及 R-C 过电压吸收器等保护措施对变压器的保护效果, 为 GIS 以及变压器的安全运行提供了有用的参考。

关键词: 气体绝缘组合电器; 变压器;

快速暂态过电压; 金属氧化物避雷器

中图分类号: TM86

文献标识码: A

Abstract: With the widely used of gas insulated substation, especially for ultra-high voltage level, very fast transient over-voltage generated by switching operations has caused more and more attention. In this paper a 750 kV GIS system has been set up referring to the Laxiwa substation. VFTO at the transformer terminal of different switching operations have been computed. The protective effects of shunt resistor of CB or DS, MOA, R-C surge suppresser and the connections of transformer to GIS have been studied, which provides useful reference for the safe operation of GIS and transformer.

Key words: GIS; transformer;

very fast transient over-voltage(VFTO); MOA

## 0 引言

气体绝缘组合电器(GIS)具有占地面积小、可靠性高、检修周期长、运行费用低等优点, 在电力系统得到广泛地应用。研究表明, 超高压 GIS 中隔离开关和断路器的操作会产生波头极陡并伴有高频振荡的快速暂态过电压(VFTO)。虽然 VFTO 幅值并不高, 一般不超过 2.5 p.u., 但在超高压电力系统中所造成的事

故率却超过了雷电冲击和操作冲击下的事故率<sup>[1]</sup>。

VFTO 不但影响 GIS 本身运行的可靠性, 而且对系统高压设备的绝缘构成很大的威胁, 尤其对绕组式的设备, 如电抗器<sup>[2]</sup>、变压器等更是如此。这主要有以下两方面的原因: 一是 VFTO 到达变压器时, 由于其波前极陡, 造成极不均匀的电压分布, 且大部分降落在靠近入波端的一小部分绕组上; 二是当 VFTO 振荡波的频率与绕组自振频率接近时, 可能激起绕组内部的电磁振荡, 出现比雷电冲击全波和截波更高的局部共振过电压。我国的大亚湾核电站、天荒坪抽水蓄能电站都曾发生过由 VFTO 引起的变压器损坏事故<sup>[3-4]</sup>。变压器等主要电气设备的内绝缘都没有自恢复能力, 修复起来十分困难, 这将造成巨大的经济损失。因此, GIS 变电站中, 尤其对于 500~750 kV 的电压等级, 对变压器的 VFTO 防护措施进行研究具有重要的学术价值, 这对 GIS 乃至整个系统的安全运行具有十分重要的指导意义。

## 1 800 kV GIS 系统模型及参数

结合西北地区发展 750 kV 电网的需求, 以青海拉西瓦 750 kV GIS 水电站为原型, 建立了一个 800 kV GIS 系统模型。750 kV 一级电压接入系统, 主接线采用 3/2 断路器接线, 3 组机组供电, 3 回出线, 其中一回为预留线路。

在高频的 VFTO 作用下, 断路器(CB)、隔离开关(DS)、接地开关(ES)以及电压互感器(PT)、电流互感器(CT)等可简化为集中参数的等值对地电容, 电容值分别为 276, 240, 240, 120 和 100 pF, 套管的

收稿日期: 2006-08-11

作者简介: 刘 青(1978-), 女, 辽宁海城人, 讲师, 硕士, 主要从事电力系统过电压的计算机仿真及防护等方面的教学和研究工作。

对地电容为 450 pF。分析变压器的 VFTO 防护时, 变压器可用其入口电容等效, 入口电容与变压器的类型、电压等级、容量等有关, 一般来说, 电压等级越高、变压器额定容量越大, 电容也相对越大。对于 750 kV 变压器入口电容一般在 7 000 ~ 10 000 pF 之间, 本文选取 9 000 pF。为了限制工频过电压, 出线安装电抗器, 电抗器与变压器模型相同, 入口电容取 5 000 pF。GIS 管线用分布参数线路模拟, 否则会引引起过电压波形的局部畸变。根据厂家提供参数, 单位长度自电感  $L_0$ 、对地电容  $C_0$  分别为  $3.35 \times 10^{-4}$  mH/m 和  $3.90 \times 10^{-5}$   $\mu$ F/m。利用 EMTP 计算暂态过程时, 用波阻抗  $Z$  和波速  $v$  描述 GIS 管线特性, 计算得到  $Z=92.68$   $\Omega$ ,  $v=277$  m/ $\mu$ s。在保证潮流输送正确合理的前提下, 负荷用集中参数的阻抗等效。

3/2 接线具有高度的供电可靠性和灵活性, 在故障和检修时可能出现多种运行方式。文[5]计算了多种方式下主变端部的 VFTO, 结果表明单机、单变、直接出线方式过电压最严重, 图 1 是此方式的等值电路。笔者以这种方式为例, 利用电磁暂态程序 (EMTP) 进行仿真计算, 研究变压器的防护措施。

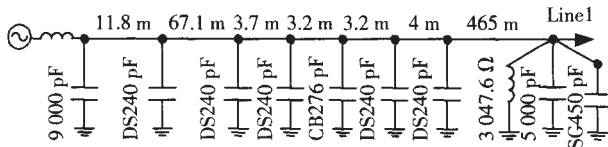


图 1 单机单变直接出线方式等值电路

## 2 主变端部的 VFTO

GIS 中 CB 有专门的灭弧装置, 分闸时一般不会产生重燃, 而 DS 分闸时可能在断口间发生重燃, 产生很高的过电压。故只计算 CB 合闸操作和 DS 分闸操作 (靠近主变的断路器打开的情况下) 过程中的 VFTO。

在分闸操作中, 被开断线路上的残余电荷对 VFTO 幅值影响很大, 计算中考虑了幅值为 -1.0 p.u. 的残余电荷对过电压的影响。图 2 是这两种操作过程中主变端部出现的 VFTO 波形。

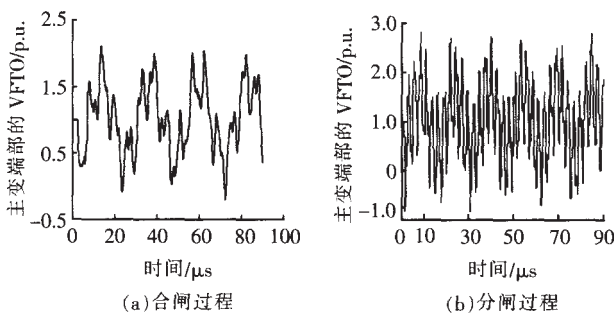


图 2 主变端部的 VFTO 波形

由图可见, 合闸、分闸过程中主变端部的 VFTO

幅值分别为 2.189 p.u., 2.624 p.u.。对 VFTO 波形进行 FFT 分析可知过电压频率高达数十 MHz, 且分闸过程的 VFTO 频率高于合闸过程。因此, 如果对开关操作过程中主变端部的 VFTO 不进行限制, 可能损坏主变的纵绝缘, 给电力系统安全运行带来威胁。

## 3 变压器的 VFTO 防护措施

### 3.1 CB 合闸电阻

限制操作过电压是降低系统绝缘水平的重要前提。超高压电网 CB 加装并联电阻是限制过电压的有效措施。并联电阻的大小与线路长度、线路波阻抗以及电源容量等有关。表 1 是不同阻值合闸电阻对 VFTO 的限制作用。其中  $R$  为合闸电阻阻值;  $I_R$  为流过电阻的最大电流。

表 1 CB 合闸电阻对 VFTO 的限制作用

R/	VFTO/p.u.	$I_R$ /kA	R/	VFTO/p.u.	$I_R$ /kA
0	2.259	0	600	1.174	10.57
400	1.221	14.02	700	1.157	9.06
500	1.195	12.45	800	1.114	7.65

可见, 过电压幅值基本上与并联电阻阻值成反比。为了降低流过电阻的电流, 保证热稳定,  $R$  值选稍大一些好, 这对辅助触头的灭弧能力的要求亦可降低。

### 3.2 DS 分闸电阻

DS 并联 600  $\Omega$  分闸电阻, 重新计算分闸操作时变压器端部出现的 VFTO, 图 3 是 VFTO 波形。

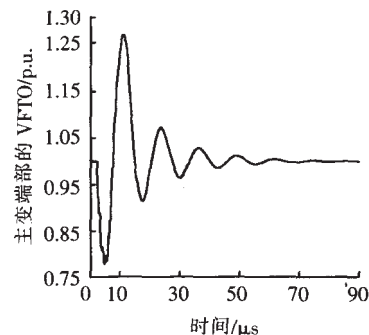


图 3 DS 加装分闸电阻后 VFTO 波形

与图 2(b) 比较可见, 并联电阻的接入加速了暂态过程的衰减, 不但使 VFTO 振荡幅度降低, 而且限制了其陡度, 这对变压器纵绝缘的保护是十分有利的。我国目前投入运行的 GIS 不超过 550 kV, 隔离开关没有使用分闸电阻。但是从计算结果可以看出, 对于更高等级的 GIS, 分闸电阻的作用是显著的。

### 3.3 变压器通过电缆线路或 GIL 与 GIS 相连

由于 GIS 设备是封闭的, 外部设备只能通过套管实现与 GIS 的连接。变压器与 GIS 可以通过套管直接相连, 也可以通过线路与 GIS 相连。下面以 DS

分闸操作为例,比较电缆连线和 GIL 连线以及接线长度对主变端部 VFTO 的影响,DS 带 500 分闸电阻。计算结果见表 2。

表 2 不同接线类型和长度时 VFTO 幅值

长度/m	电缆	GIL	长度/m	电缆	GIL
60	1.259	1.304	480	1.170	1.251
150	1.46	1.274	660	1.157	1.260
300	1.215	1.240			

### 3.4 金属氧化物避雷器

MOA 的特性使其特别适用于对伏秒特性平坦的 GIS 设备进行保护。笔者研究的是频率极高的 VFTO, MOA 不能仅用非线性电阻模拟,而且要将阀片的主体电容和杂散电容考虑进去。以直接出线、主变通过 660 m 的电缆与 GIS 相连情况的分闸操作(DS 无分闸电阻)为例,比较 MOA 的不同配置方式对主变的保护效果。表 3 为计算结果,其中方式 1 为 MOA 接在电缆首端,方式 2 为 MOA 接在电缆末端,方式 3 为电缆首、末端均接入 MOA。

表 3 MOA 不同配置方案限制 VFTO 的效果

方式	主变端部 VFTO /p.u.	MOA 通流热量/kJ
无 MOA	1.516	/
方式 1	1.492	3.95
方式 2	1.434	11.44
方式 3	1.417	2.18/9.37

可见,MOA 可以限制 VFTO 的幅值。由于 VFTO 持续时间很短,因此 MOA 的通流热量比较小。比较几种情况,建议在电缆末端投入 MOA。值得注意的是,MOA 仅限制过电压幅值,而对其陡度基本无影响。

### 3.5 R-C 过电压吸收器

R-C 过电压吸收器曾广泛应用于真空断路器重燃过电压的抑制,图 4 是其结构示意图。电阻 R 决定过电压的衰减速度,一般取值 50~400 ;电容 C 为吸收电容,对于不同负荷,取值 0.01~0.2 μF。

将 R-C 过电压吸收器并联在主变旁,改变 R, C 取值计算主变端部 VFTO 幅值。结果表明 R 为

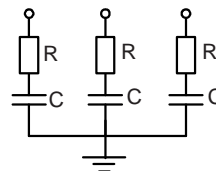


图 4 R-C 过电压吸收器

77.5 , C 为 0.02 μF 时过电压幅值最小,为 1.140 p.u.,比无保护措施时下降了 24.9%,R-C 电路的保护效果最好。通过对过电压的频谱分析可知,VFTO 的最高频率降低,频谱变窄,这主要因为电容吸收了过电压的高频分量,最后在电阻上产生热能被消耗。由于 VFTO 对主变绝缘的危害主要在于其极高的频率,因此从这个角度看,R-C 过电压吸收器比 MOA 对主变的保护更有效。

## 4 结语

以拉西瓦 750 kV GIS 变电站为原型,利用 EMTP 计算分析了多种变压器的保护措施。经过大量计算得到以下结论:GIS 中开关操作时会在变压器端部出现 VFTO,其特性对变压器纵绝缘造成威胁;开关的并联电阻可加速暂态过程的衰减,降低 VFTO 幅值和陡度;变压器通过电缆线路与 GIS 相连有利于主变的 VFTO 防护;MOA 仅能降低过电压幅值,对频率无影响;与 MOA 相比,R-C 过电压吸收器不但可限制 VFTO 幅值,还可降低其陡度,对变压器纵绝缘的保护十分有利。

## 参考文献:

- [1] Fujimoto N. Mechanism and Analysis of Short Rise-time GIS Transients[C]// ICGRE Symposium. 1987: 5-7.
- [2] 刘青,赵峰. 330 kV GIS 中投切电抗器的过电压研究[J]. 高压电器, 2004, 40(5): 358-360.
- [3] 刑如砾. GIS 的快速暂态瞬变过电压对变压器的影响[J]. 变压器, 1993, 30(1): 2-7.
- [4] 杨凌辉,张嘉文. 500 kV GIS 隔离闸刀操作暂态过电压的研究[J]. 华东电力, 2004, 32(1): 38-41.
- [5] 刘青. 750 kV GIS 变电站中变压器的快速暂态过电压防护的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005: 17-19.

## 简讯

### 《高压电器产品手册》编写资料开始征集

为了全面反映目前高压电器产品发展的实际情况,以满足电力用户及其它有关行业设计、计划、基建、生产管理部门对产品选型订货的需要,新一轮《高压电器产品手册》(原名《高压电器产品样本》)即将由机械工业出版社联合西安高压电器研究所共同编写发行。请各单位按照自己的实际生产情况,于 2007 年 4 月 20 日前将本厂相关产品资料报送至西安高压电器研究所信息室。

联系电话:(029) 84225623

资料接收邮箱:gydqpsc@yahoo.com.cn.

报送产品资料的相关要求及其它事项可浏览中国高压器网(www.chinahva.com)。