

# 二滩电站 GIS TV 铁磁谐振分析

于远鹏 杨 东

(二滩水力发电厂,四川 攀枝花 617100)

**摘要:**二滩电站 500 kV 系统主接线为 3/2 与 4/3 混合接线方式,500 kV GIS 设备包括断路器、隔离开关、接地刀、TV、TA、母线、设备互联短引线等。主变压器高压侧 T 区在倒闸操作中,当处于热备用状态时,一般情况下电压较低,三相电压平衡,约 120 kV 左右;有时电压较高,三相电压不平衡,高的约 260 kV 左右。该现象对运行操作及二次系统产生了影响。分析该现象属于铁磁谐振现象,对其形成原因作了相应分析,并通过仿真得到了验证。

**关键词:**二滩水电站; GIS; TV; 铁磁谐振; 过电压; ATP - EMTP

**Abstract:** The main wiring of 500 kV system in Ertan Hydropower Plant is 3/2 and 4/3 mixed mode, and 500 kV GIS devices include breakers, disconnecting switches, earth switches, TV, TA, buses and short approach lines etc. During the switching operation of T area in high voltage side of main transformer, when in the hot standby, generally the voltage is lower, three-phase voltage is balance and about 120 kV. But sometimes the voltage is higher, three-phase voltage is unbalance and up to 260 kV, which has an impact on the operation and the second systems. Through the analysis of the phenomenon, it is obtained that it is ferro-resonance phenomenon. The causes for this phenomenon is analyzed and verified by the simulation.

**Key words:** Ertan Hydropower Plant; GIS; TV; ferro-resonance; overvoltage; ATP - EMTP

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2015)02 - 0032 - 03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.02.008

## 0 前言

二滩电站 GIS 主接线采用 4/3 与 3/2 混合接线方式,在主变压器停送电过程中,主变压器高压侧 T 区(见图 1)会存在热备用与带电运行状态的转换,在这个转换倒闸操作中多次出现 T 区处于热备用状态(主变压器未接入)时 T 区 TV 电压过高的现象。主要表现三相不平衡,两个线电压约 300 kV,另一个线电压为 480 kV,哪些相电压过高不确定,历史数据见表 1。此时安控装置测量到主变压器高压侧带电且不平衡,从而报 TV 断线,闭锁安控装置。该现象已经影响到安控装置的正常运行和运行人员对断路器是否拉开的正确判断,有必要对该现象的形成原因、影响、防范措施进行研究,以利于设备的安全正常运行。

表 1 主变压器高压侧 T 区电压历史数据 (kV)

	1B	2B	3B	4B	5B	6B
$U_a$	68	69	280	275	67	68
$U_b$	278	279	72	275	68	278
$U_c$	278	278	72	69	274	278

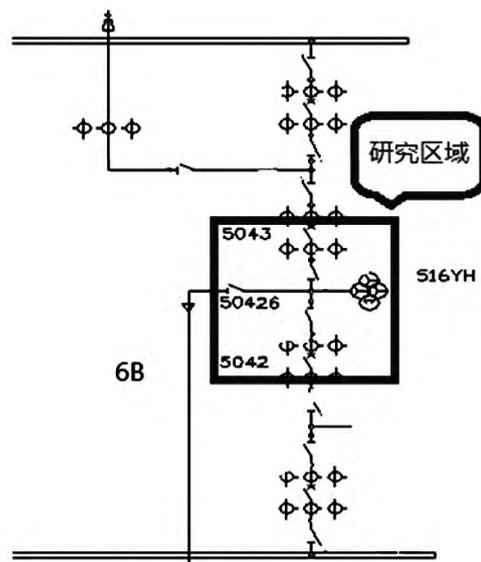


图 1 主变压器高压侧 T 区范围

正常情况下,主变压器高压侧 T 区电压约 120 kV 左右,且三相平衡。相对于这个值,从表 1 可见最高的约 280 kV 达到了 2 倍多,因此提到的电压过高是指这种情况,而不是相对于额定相电压 288 kV(线电压 500 kV)。

从电压不平衡现象、值的大小来看,可以排除因为感应电压、工频过电压等引起,而与铁磁谐振过电压特征比较吻合。

## 1 主变压器高压侧 T 区铁磁谐振分析

铁磁谐振过电压产生的根本原因在于 TV 铁心的饱和特性,随着系统电压的变化、断路器操作、电路参数的变化等,其他部分元件的参数均可能与铁心呈现的非线性电感形成谐振条件,从而导致过电压出现。所研究的二滩电站主变压器高压侧 T 区的电压值虽然并没有超出 TV 额定电压多少,按理说 TV 仍然处于比较接近线性工作区域,但断路器突然的断开引起的暂态电压变化也可能导致 TV 铁心工作特性的变化,加上断路器断口并联电容的突然接入,则还是可能产生铁磁谐振的。

二滩主变压器高压侧 T 区装设的三菱的电磁式电压互感器,其等效电路及铁心饱和特性测量曲线见图 2。

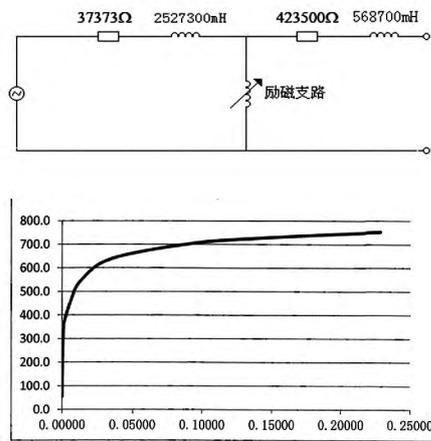


图 2 GIS TV 等效电路及铁心特性曲线图

考虑到 TV 工作电流很小,接近于空载,且一次绕组电抗相对于铁心电抗来说可以忽略,且由于铁心的电气特性没有解析表达式,无法直接从理论上分析其铁磁谐振原因,因此在此采用文献 [1] 提到的方法,对于其工频铁磁谐振进行解析分析,考虑图 1 的结构,可以得到用于研究 TV 铁磁谐振的电路,见图 3 所示。

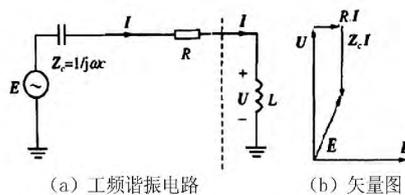


图 3 TV 工频铁磁谐振分析电路图

与文献 [1] 采用的分析方法有所不同,分析采用串联电路,即从图 3 中的 TV 一次绕组电阻向系统侧进行等效,其中电源 E 认为是系统等效的理想

电源  $Z_c$  是图 1 中两个断路器均断开后各自的断口并联电容相并联得后的阻抗,图 3 中的 (b) 即表示的等效电源相量图,则该相量图可以得到各相量间的有效值关系。

$$(U - Z_c I)^2 + (RI)^2 = E^2 \quad (1)$$

对于 TV 铁心饱和特性虽然没有解析表达式,但可以采用分段线性化处理方法,将其模拟为 2 段线性,该处理方法对于 TV 铁磁谐振的定性分析带来的误差可以接受<sup>[2]</sup>。分段线性化处理中要用到 TV 的  $\Phi - i$  特性中的系数,采用 ATP - EMTP 的 SATURATION 程序将 TV 的试验  $U - I$  曲线转换为  $\Phi - i$  曲线,见表 2。

若采用第 3 个点作为线性与饱和的转折点,第 3 个点至第 7 个点为线性化后的第二段,原点至第 3 个点为线性化后的第一段,则两段线性化处理后的  $\Phi - i$  折线第二段的斜率  $k = (3151 - 2025) / (0.5492 - 0.0347) = 2188$ ,第二段在纵轴上的截距  $b = 3151 - 0.5492 \times k = 1949$ ,因此可得 TV 的  $U_p - I_p$  曲线为

$$U_p = 2\pi f k I_p + 4\sqrt{2}bf = 687032I_p + 551177 \quad (2)$$

将式 (1) 表示的  $U_s - I_s$  曲线与式 (2) 表示的  $U_p - I_p$  曲线画在同一个坐标中,在相交点则可以激发工频铁磁谐振,如图 4 表明此时工频铁磁谐振在额定电压附近不太可能发生,大约要在 TV 接近满载情况下才可能发生。

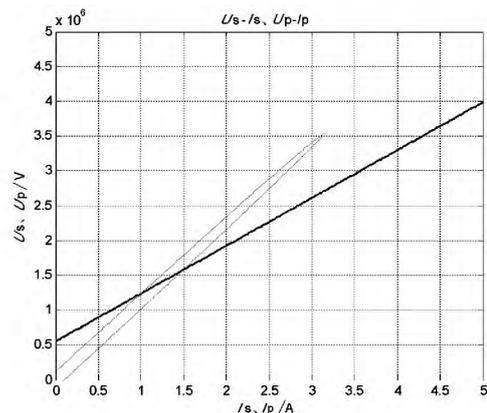


图 4  $U_s - I_s$  与  $U_p - I_p$  比较图

但该分析电路与方法对于其他谐振情况无法进行,比如电路工况的转变导致 TV 出现励磁涌流,可能激发谐振,因此还得依赖于仿真分析。

## 2 主变压器高压侧 T 区铁磁谐振仿真

如图 1 中二滩 GIS 设备,主要考虑断路器断口并联电容 100 pF (一个断路器 550 pF),T 区短引

表2 主变压器高压侧T区TV伏安特性与 $\Phi-i$

TV 伏安特性							
$I/A$	0.001 9	0.002 8	0.005 6	0.007 4	0.013 9	0.020 4	0.083 8
$U/V$	202 079	230 947	259 815	288 684	317 552	346 420	404 157
转换后 $\Phi-i$ 的关系							
$i/A$	0.008 1	0.015	0.034 7	0.037 5	0.090 1	0.116 9	0.549 2
$\Phi/Wb$	157 6	180 0	202 5	225 0	247 5	270 1	315 1

线、TA、隔离开关、断路器等对地电容1730 pF,TV一次绕组电阻37373  $\Omega$ ,TV铁心特性采用非线性电感表示,其 $\Phi-i$ 值见表2,可以得到图5的仿真电路。

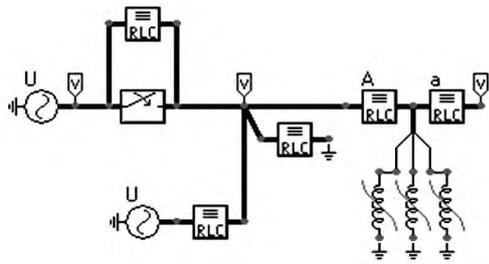


图5 TV铁磁谐振仿真电路

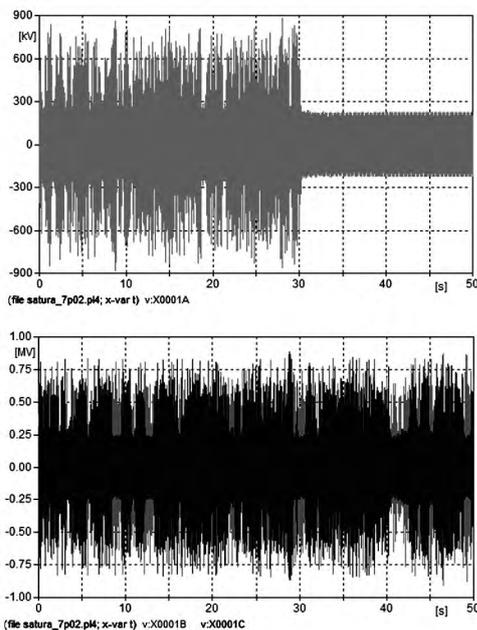


图6 0s时刻拉开断路器三相电压波形

仿真模拟先拉开T区一个断路器,然后拉开另一个断路器的操作。先拉开的断路器相当于已经接入了断口并联电容,另一个断路器采用一个断路器仿真模型来模拟不同的分闸时刻,图6是在0s时刻拉开断路器时三相电压50s的波形,对于其他分闸时刻、电压大小、对地电容的改变等仿真不在此处进行。

从图6可以看出,A、B、C相电压偏高,但A相在30s后正常,而B、C相依然偏高,衰减较慢,幅值最高达到了750kV,有效值与观察到的实际数据280kV接近。该仿真的结果较好地说明了二滩主

变压器高压侧电压因为铁磁谐振原因引起的过高及不平衡的现象。

### 3 结论

通过二滩主变压器高压侧TV工频铁磁谐振解析分析表明,在二滩现有GIS设备参数条件下主变压器高压侧T区进行倒闸操作不会引起工频铁磁谐振过电压,但仿真表明有其他成分的铁磁谐振发生,仿真结果与电压历史数据吻合。

对于二滩主变压器高压侧T区出现的电压过高及不平衡现象,由于电压只是接近额定电压,高出正常情况下T区值的2倍多,不足以危害到TV及断路器断口电容,但不排除在其它谐振条件下引起超过额定电压的过电压值从而危及到TV本身的安全。对于安控装置的影响很严重,安控装置本身被闭锁极有可能对电网的安全稳定运行产生不利影响,因此可以通过T状态转换前,投入相应的发变组检修压板,不让安控装置对该电压进行判断,从而避免因三相电压不平衡而导致安控装置被闭锁。

同时从二滩GIS断路器检修情况来看,曾经发现一个断路器分合闸机械指示不能正确反映断路器触头实际位置,因此对于铁磁谐振判断的研究有利于运行人员快速正确判断断路器的位置,以免影响系统操作。

### 参考文献

- [1] 李云阁,施围.应用解析法分析中性点接地系统中的工频铁磁谐振——谐振判据和消谐措施[J].中国电机工程学报,2003,23(9):142-145.
- [1] 李云阁,施围.应用解析法分析中性点接地系统中的工频铁磁谐振——非线性电感工频励磁特性的求取[J].中国电机工程学报,2003,23(10):94-98.

作者简介:

于远鹏(1974) 学士,主要从事水电站运行管理工作;

杨东(1974) 高级工程师,硕士,主要从事水电站运行工作。

(收稿日期:2014-11-16)