

# 特高压换流变压器阀侧套管 末屏铁磁谐振过电压分析

唐 明,丁理杰,汤 凡,陈 刚

( 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

**摘 要:** 研究了特高压换流站高端换流变压器阀侧套管末屏电压由高端阀组充电转连接过程所诱发的铁磁谐振过电压机理,并结合现场实际参数采用 PSCAD 电磁暂态仿真软件进行了详细分析。提出了依靠增大阻尼来抑制铁磁谐振的方法,并分析了其对末屏电压精度和相位的影响。

**关键词:** 特高压; 换流变压器; 铁磁谐振

**Abstract:** Ferroresonance over-voltage mechanism of bushing end shield at valve side of ultra-high voltage (UHV) converter transformer caused by charging to connection is researched and analyzed in detail with PSCAD model based on the actual parameters of the site. A method of increasing the damping resistor is proposed to inhibit the ferroresonance, and its influences on the voltage accuracy of end shield and the phase are also analyzed.

**Key words:** ultra-high voltage; converter transformer; ferroresonance

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0020-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.02.005

## 0 引 言

随着中国“西电东送”能源战略逐步推进和进一步深化,特高压换流站的安全稳定运行成为维持清洁能源持续外送的重要保障。

溪浙特高压直流输电工程,作为目前川内输送容量最大的特高压线路,却经常受到各类线路故障、设备缺陷、通信阻塞等影响而不能满功率运行,其中换流变压器阀侧套管末屏处发生的铁磁谐振过电压故障在系统调试期间和投运之后均有发生。因此,对其进行机理研究和有效治理对特高压换流站的安全稳定运行意义重大。

铁磁谐振是一个长期困扰电力系统安全稳定运行的复杂问题,多发生于非线性电感与电容串联或并联的电路中,其所引发的谐振过电压、过电流可达额定电压、电流的数倍。铁磁谐振过电压不仅会在操作或故障的过程中产生,而且可能在暂态过程结束后的较长时间内稳定存在,不但威胁着电气设备的绝缘,还会产生持续的过电流烧毁设备,造成绝缘闪络、避雷器爆炸等严重的停电事故。

特高压换流变压器阀侧套管末屏是阀侧绕组电压的重要监测节点,与其后的电压采集器共同构成

了典型的电容式电压互感器结构。特高压换流站在投入高端阀厅时进行的充电转连接操作将会通过与换流阀并联的 RC 回路耦合至换流变压器的阀侧绕组产生暂态扰动,使电压采集器中的电感进入饱和区,在换流变压器阀侧套管末屏和电压采集器构成的回路中形成稳定的铁磁谐振现象。

研究了特高压换流站换流变压器阀侧套管末屏铁磁谐振的机理,并基于 PSCAD 电磁暂态仿真软件对故障进行了仿真,给出了多种抑制措施及其优劣分析。

## 1 套管末屏铁磁谐振过电压故障梳理

2015 年 7 月,特高压宜宾换流站极 II 高端阀组由充电转连接的过程中,阀组 A、B、C 3 套保护同时发出“YD 换流变阀侧电压互感器 A 相故障”告警,如图 1 所示。

故障前,极 I 高端、极 I 低端、极 II 低端均为满载运行,直流侧双极功率 6 000 MW。极 II 高端 6 台换流变压器均已充电,但换流阀仍处于闭锁状态。此时宜宾换流站的极 I 出线电压为 +800 kV,极 II 出线电压为 -400 kV。在将极 II 高端投入运行的过程中,转连接过程的操作示意图如图 2 所示(其中

加粗部分为带电线路)。

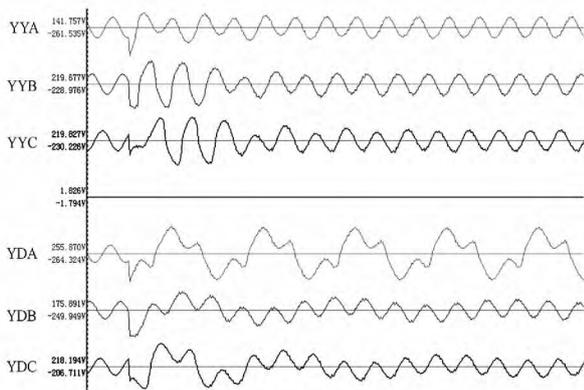


图1 极II 高端各换流变压器阀侧套管末屏电压录波

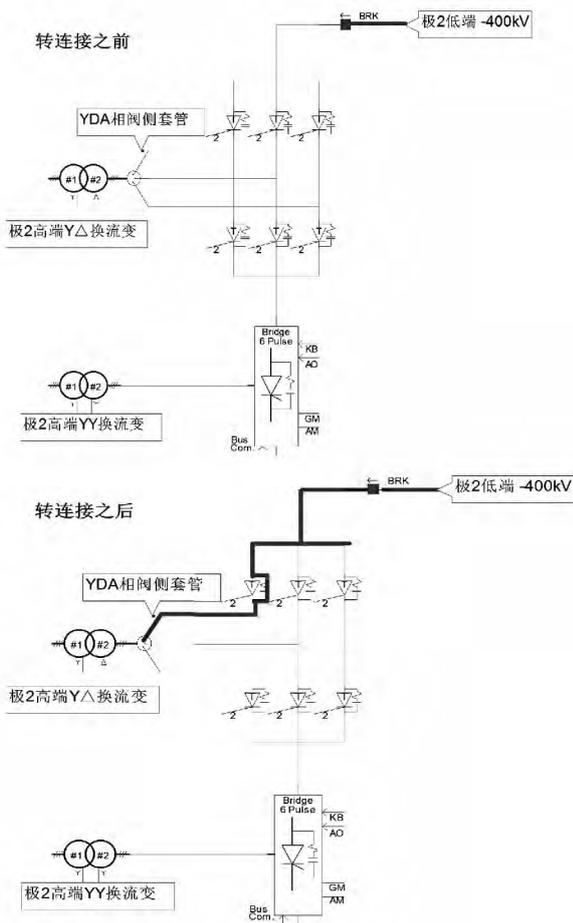


图2 极II 高端阀组充电转连接示意图

转连接操作使极II 高端出线刀闸闭合与极II 低端-400 kV 极线相连,此操作将导致极II 低端的-400 kV 通过阀组间并联的RC 阻容回路耦合至换流变压器的阀侧套管,形成扰动。图2 中加粗部分为-400 kV 电压对极II 高端 YDA 相换流变压器阀侧套管的传导回路(其他换流变压器及其传导回路未画出)。

由图1 所示的极II 高端各换流变压器阀侧电压

录波可以看出,充电转连接的操作给6 台换流变压器均造成一定程度的负向电压跌落,其余5 台换流变压器的阀侧绕组末屏电压经过短暂的过渡过程均能回到稳态。只有 YDA 相换流变压器的阀侧套管末屏电压产生了稳定的谐振过电压现象。对其电压进行傅里叶频谱分析,结果如图3 所示。

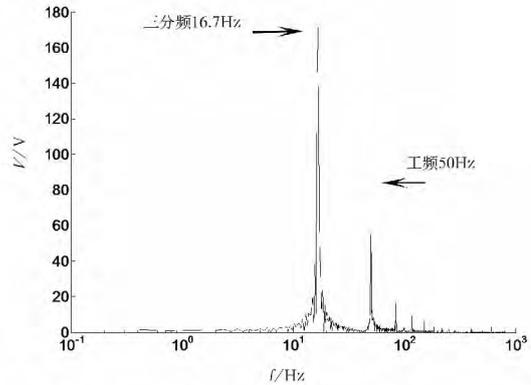


图3 末屏谐振电压的频谱分析

由图3 可以看出,工频分量的幅值约为82.3 V,1/3 次谐波的分量幅值约为167.9 V,约为工频分量的2 倍左右。进一步分析可知,1/3 次谐波的相位约滞后工频分量 $\pi/2$ 。由上述数据分析可以初步认定极II 高端 YDA 相换流变压器阀侧套管末屏发生了典型的1/3 分频铁磁谐振现象。

换流变压器阀侧套管末屏分压原理及其谐振回路如图4 所示。

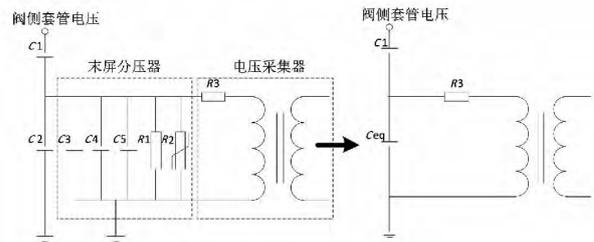


图4 套管末屏谐振回路

电压采集器的核心元件为一台含有铁心的变压器,如图5 所示。

该电压采集器内部由3 个结构参数完全一致的小TV 组成,主要完成ABC 三相电压变换功能,变比为50:1,其中A 通道的具体电路如图6 所示,主要参数如表1 所示。

需要特殊说明的是,特高压换流站均采用3 套保护,且“国家电网公司十八项重大反事故措施”规定3 套保护必须经由3 个不同TV 采集而得,禁止由同一端口引入。因此每台换流变压器的阀侧套管末屏均与3 套电压采集器并联,其等效阻抗将变为

单台阻抗的1/3。

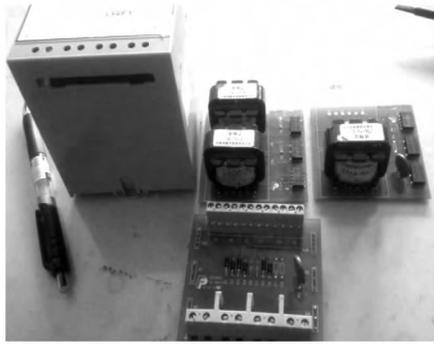


图5 电压采集器实物图

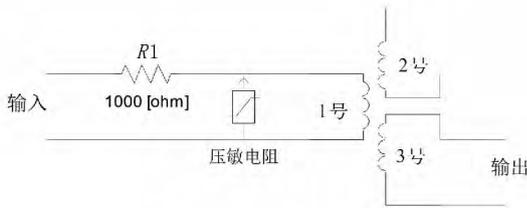


图6 电压采集器一路通道具体电路

表1 电压采集器的主要参数

参数	数值
$R_1 / \Omega$	1 000
一次侧非饱和阻抗/k $\Omega$	333
一次侧漏抗/ $\Omega$	175
一次侧直阻/k $\Omega$	1.42
一次侧额定电压/V	63.51
一次侧非饱和电感/H	1061

该变压器的励磁特性曲线如图7所示。

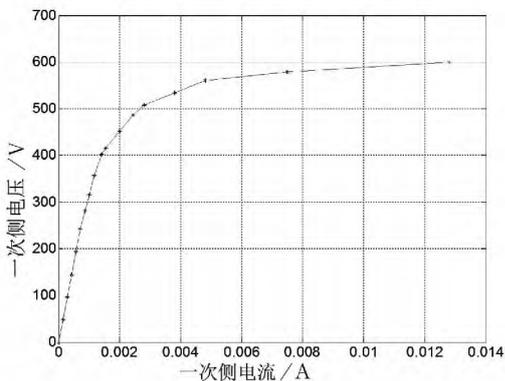


图7 单台电压采集器的励磁特性曲线

## 2 铁磁谐振的 PSCAD 仿真

图8所示为铁磁谐振的PSCAD模型主体部分,为充分模拟现场工况,各元件参数均与现场实际保持一致。

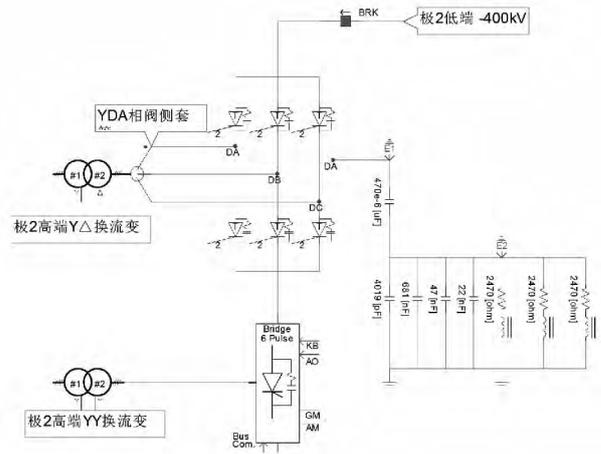
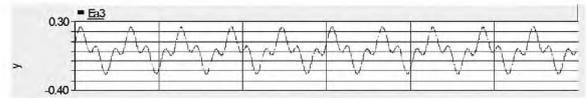


图8 换流变压器阀侧套管铁磁谐振的PSCAD模型

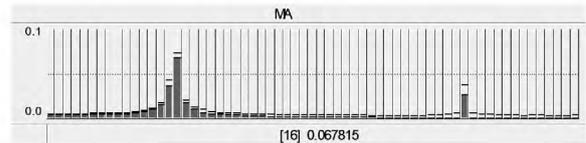
采用断路器加恒压源的模式来模拟换流站极II高端阀组充电转连接的操作,电压采集器的伏安特性曲线采用图7中的测试结果,仿真结果及其与录波图的对比如图9所示。



(a) 套管末屏电压的仿真结果



(b) 套管末屏电压的录波图



(c) 仿真结果的频谱分析

图9 套管末屏电压的PSCAD仿真结果及录波图

仿真结果表明,套管末屏两端电压,在充电转连接的操作下,确实有可能进入稳定的分频谐振状态,在现场参数的条件下,仿真结果也是三分频的幅值约为工频分量幅值的两倍。

## 3 铁磁谐振抑制措施及其优劣分析

通常,工程界认为铁磁谐振现象的产生主要取决于回路的容抗和感抗的比值 $X_c/X_L$ :

- 1) 当 $X_c/X_L = 0.01 \sim 0.07$ 时,发生分频谐振;
- 2) 当 $X_c/X_L = 0.07 \sim 0.55$ 时,发生基频谐振;
- 3) 当 $X_c/X_L = 0.55 \sim 2.8$ 时,发生高频谐振;
- 4) 当 $X_c/X_L < 0.01$ 或 $X_c/X_L > 2.8$ 时,较难发生谐振。

因此,可以通过调整容抗和感抗的比值来降低铁磁谐振发生的概率。

### 1) 减小容抗及其优劣

增大阀侧套管的末屏电容或在末屏分压器两端并联更多的电容可以达到减小容抗的目的。然而阀侧套管的末屏电容很明显无法改变,在其两端并联更多的电容虽然可以实现但将改变其分压系数,二次屏柜的保护、测控等系统需要重新整定,且过低的电压对其 AD 采样精度也带来更大的挑战。

### 2) 增大感抗及其优劣

对电压采集器的励磁特性进行重新设计可以增大其感抗,也可以通过串联更多的电压采集器来实现,但均会导致设备体积的增大。

增大电抗可以限制励磁电流,等效于提高了铁磁材料的饱和点,但这种方法受限于铁磁材料的特性,不能无限提高其饱和点。而在阀组充电转连接的操作过程中, -400 kV 的电压扰动能量非常大,电压采集器将无可避免地进入饱和区。因此增大感抗的方法作用有限。

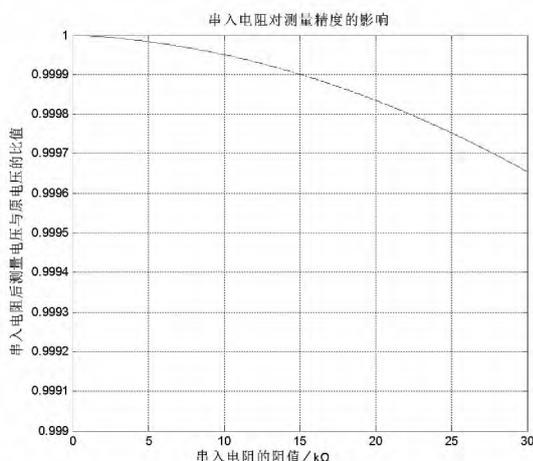


图 10 串入电阻对电压采集器精度的影响

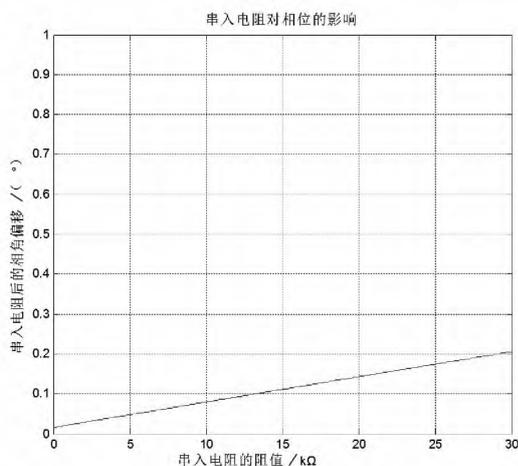


图 11 串入电阻对电压采集器相位的影响

### 3) 增大阻尼

既然 -400 kV 的扰动无法避免,那么限制和尽快消耗饱和区储存的多余能量才是防止其进入稳态

谐振的有效方法。在现有的电压采集器中,一次侧串联了 1 kΩ 的电阻,适当增大该电阻的阻值是提高阻尼最简单易行的办法。PSCAD 仿真结果表明,将电阻阻值提高至 5 kΩ 以上,将不会发生稳定的谐振。阻值增加之后对电压采集器精度和相位的影响如图 10 和图 11 所示。

由图 10、图 11 可知串入电阻对电压采集器的精度和相位的影响非常有限。在串入电阻为 10 kΩ 时对精度的影响在万分之一以内,相位误差在 0.1° 以内。在有效抑制铁磁谐振的同时对二次侧保护和测控的影响非常小。

## 4 结 论

特高压换流站高端阀组在充电转连接的操作时所产生的激励电压会对高端阀厅中的 6 台换流变压器阀侧绕组造成很大扰动,容易造成换流变压器阀侧套管末屏电压进入稳定的铁磁谐振状态。前面分析了该类故障的诱因及其形成机理,并通过 PSCAD 电磁暂态软件结合现场实际参数进行了仿真,结果表明在一定的参数配合下,阀侧套管末屏电压确有进入稳态谐振的风险。提出了增大电压采集器内部电阻来抑制谐振的方法,分析了其对电压采集精度和相位的影响,为特高压换流站的安全稳定运行提供了有力的理论支撑。

### 参考文献

- [1] 李俊. 500kV CVT 铁磁谐振问题研究[J]. 电测与仪表 2010, 47(7A): 65-68.
- [2] 张业. 电力系统铁磁谐振过电压研究[D]. 成都: 西南交通大学 2008.
- [3] 秦祖泽, 黄绍平. 电容式电压互感器分频铁磁谐振新的分析方法[J]. 高压电器, 1997(4): 19-22.
- [4] 黄治国, 雷红才, 苗青, 等. 电容式电压互感器分频谐振的分析与对策[J]. 高电压工程 2004, 30(7): 58-59.
- [5] 杨鸣. 铁磁谐振过电压非线性特性及其柔性抑制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学 2014.
- [6] 王世凯. 小电流接地电力系统铁磁谐振消谐装置的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学 2007.
- [7] 张博, 鲁铁成, 杜晓磊. 中性点接地系统铁磁谐振非线性动力学分析[J]. 高电压技术 2007, 33(1): 31-35.
- [8] 刘凡. 中性点直接接地系统铁磁谐振过电压的混沌特性与控制检测方法[D]. 重庆: 重庆大学 2006.

作者简介:

唐明(1986), 博士、工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期: 2015-11-13)