

# 换流变套管末屏电压采集器铁磁谐振机理分析及抑制

常 勇<sup>1</sup>, 沈志刚<sup>2</sup>, 张 鹏<sup>2</sup>

(1. 中国电力技术装备有限公司, 北京 100052; 2. 国家电网公司运行分公司, 北京 100052)

**摘要:**特高压换流变压器的阀侧套管安装有电容型末屏分压装置, 用于传变阀侧交流电压。实际运行过程中发现, 在线投入阀组时, 由于在运直流系统的激励, 投入阀组换流变阀侧套管末屏电压采集器会发生铁磁谐振现象, 可能引发充电状态下的换流变压器保护误动作。文中基于实际运行故障录波进行了谐波分析, 得出谐振发生的特征频率; 通过分析末屏分压器及电压变送器电气原理搭建了暂态仿真模型, 利用 PSCAD/EMTDC 建模重现了铁磁谐振发生的工况; 在理论分析的基础上提出了改进分压器避免谐振发生的具体措施。

**关键词:**特高压直流; 换流变压器; 绕组分压器; 铁磁谐振; 试验及校正计算方法

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)05-0081-05

## 0 引言

特高压直流输电系统是特高压电网的重要组成部分, 可以高效、广域、低损耗地传输清洁能源, 是远距离大容量输送电力的重要技术形式。随着国家电网公司坚强智能电网建设的稳步推进, 目前已有 7 回特高压直流输电系统投入运营, 输送容量在 6400~8000 MW 之间, 联系了我国的能源基地与负荷中心, 发挥着巨大的社会效益和经济效益。未来规划建设的跨国、跨区、跨省直流工程超过 30 个, 输电总容量超过 200 GW<sup>[1-6]</sup>。

电力系统铁磁谐振是系统中较常出现的非正常工作状态, 由于直流输电设备可以简化为电感、电容和电阻的组合, 某些非正常工况下容易出现谐振回路, 铁磁谐振在直流换流站中尤其突出(大量的电容和电感类原件)。通常直流系统设计会考核计算谐振发生的可能性, 当直流系统进行倒闸操作或发生故障时, 由于电气设备铁心饱和, 系统元件参数发生改变, 这些电感和电容元件组成的回路就可能形成谐振, 引起谐振过电压。谐振过电压持续时间长, 往往造成电气设备损坏和大面积停电事故, 严重危及电网安全。

换流站一次回路的谐振问题通常通过加装主回路阻波器可以有效遏制, 但是在实际运行过程中站用电及其并联电容式电压互感器(CVT)在站用变空载充电等工况下有可能发生谐振, 气体绝缘组合电器(GIS)中电磁式电压互感器铁磁谐振的情况也有报导<sup>[7-10]</sup>。相应的谐振机理和抑制措施已经有了较深入的分析。

特高压换流变压器的阀侧套管安装有电容型

末屏分压装置, 用于传变阀侧交流电压。早期此类分压器都是有源分压器, 由于实际运行中分压器曾多次烧毁, 导致换流阀闭锁时, 换流变阀侧单相电压信号消失引起换流变跳保护, 后续已改造为无源分压器。在实际换流站运行中, 换流变压器阀侧套管末屏电容式分压器与其后的电压采集变送器之间在激励下也发生了持续谐振, 可能导致空充后的换流变压器不平衡保护动作, 或者烧毁末屏分压器或电压变送器或二次控制保护板卡, 给特高压直流输电系统安全稳定运行带来较大威胁<sup>[11-13]</sup>。文中对一次实际电网故障录波进行了谐波分析, 得出谐振发生的特征频率; 利用 PSCAD/EMTDC 通搭建了末屏分压器及电压变送器的暂态仿真模型, 仿真重现了铁磁谐振发生的工况; 在理论分析的基础上提出了改进分压器避免谐振发生的具体措施。

## 1 某换流站铁磁谐振故障分析

特高压直流输电系统多采用单极双 12 脉动串联结构, 高低压阀组可以灵活的投入或退出运行, 实现全压或 1/2 电压运行。文中套管分压器铁磁谐振发生前某站双极直流系统 6000 MW 运行; 500 kV1M、2M 母线运行; 交流滤波器场 61M、62M、63M、64M 母线运行。故障发生前, 极 2 高端 6 台换流变均已充电, 但换流阀仍处于闭锁状态。此时换流站的极 1 出线电压 +800 kV, 极 2 出线电压 -400 kV。将极 2 高端投入运行的过程中, 转连接过程的操作如图 1 所示。

转连接操作即将极 2 高端出线刀闸闭合使其与极 2 低端 -400 kV 极线相连, 此操作将导致极 2 低端的 -400 kV 将通过阀组间并联的 RC 阻容回路耦合至换流变的阀侧套管, 形成扰动发生铁磁谐振。

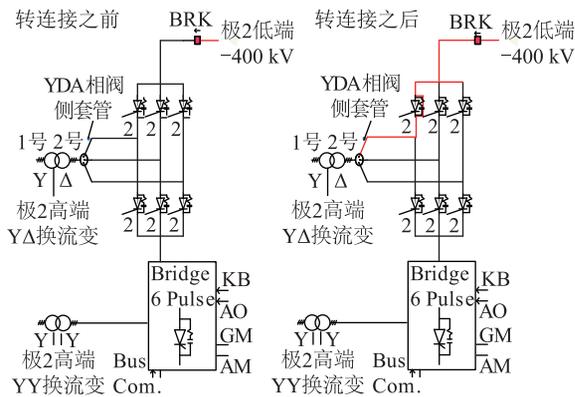


图1 极2高端阀组由充电转连接过程示意

Fig.1 Pole 2 high voltage valve group from charging to connection

阀组 A、B、C 3 套保护同时发“YD 换流变阀侧电压互感器 A 相故障”告警,异常发生后的各台换流变压器阀侧套管分压器电压如图 2 所示。从图中可见此时 A 相电压幅值发生放大,约为正常交流电压的 2 倍标么值,时间由转极连接过度过程后开始,且一直持续。

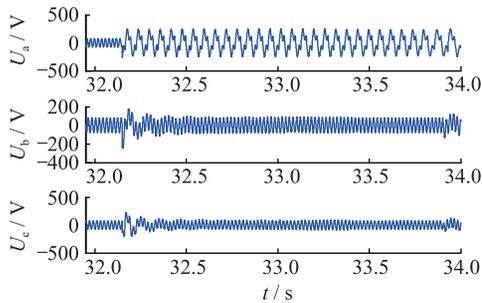


图2 换流站套管末屏电压畸变波形

Fig.2 Bushing tap voltage of the high voltage converter group

图 2 所示录波图表明极 2 高 6 台换流变同时受到的电压扰动(图示为 Y/D 绕组对应的 A、B、C 3 台单相双绕组变压器录波图,Y/Y 绕组类似)。图 1 中红色部分为 -400 kV 电压对极 2 高 Y/D-A 相换流变阀侧套管的传导回路(其他换流变及其传导回路未显示出)。从图 2 可以看出,极 2 高端的 6 台换流变阀侧电压在阀组转连接时均经历了一定程度的负向电压跌落,其中 5 台经短暂调整后均能维持稳定。只有 Y/D-A 相换流变阀侧套管末屏电压产生了稳定的谐振电压。将发生稳定谐振的 Y/D-A 相电压数据导入 MATLAB 中进行频谱分析。

图 3 为对 Y/D-A 相电压进行傅里叶分析的结果:其中工频分量的幅值为 82.3 V,1/3 次谐波的幅值为 167.9 V,其幅值约为工频分量的 2 倍,相位滞后工频分量约  $\pi/2$ 。

由上述数据分析可以初步认定,极 2 高端 Y/D-

A 相换流变阀侧套管末屏电压采集器发生了铁磁谐振现象,谐振频率为 16.67 Hz,典型的 1/3 分频谐振。

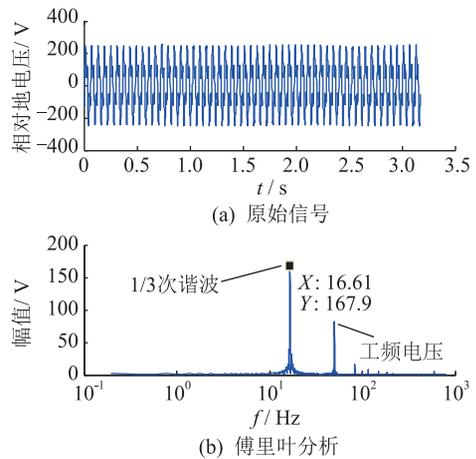


图3 换流变谐振电压的频谱分析

Fig.3 Spectrum analysis of bushing tap voltage of the high voltage converter group

## 2 谐振电路原理分析

### 2.1 换流变压器阀侧套管末屏结构

变压器电容式套管由中心导管、电容芯子、外绝缘及安装法兰等组成,其末屏测量端子将套管的总电容量划分为电容  $C_1$  和  $C_2$  两个部分。其中  $C_1$  为套管中心导管与测量端子间的电容量,是套管的主绝缘电容; $C_2$ 为测量端子(末屏)与连接套筒(法兰)间的电容量, $R_2$ 为末屏与法兰间的绝缘电阻,其等效电路如图 4 所示。

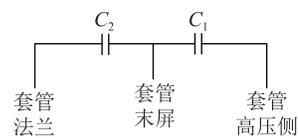


图4 变压器套管电容结构

Fig.4 Transformer bushing capacitor structure

### 2.2 末屏分压器电路结构

由于常规直流及特高压直流工程中换流变容量较大,为了使其套管横向和轴向场强均匀,其绝缘结构一般采用电容型,即在导电杆上包上许多绝缘层,以组成一串同心圆柱形电容器。最外层即末屏通过小套管引出,供测量套管的介损和电容量,末屏是最后一层,运行期间与地等电位连接。为了检测套管电容的绝缘情况及末屏的接地情况,直流工程中将末屏引出线接入阻容分压板,由分压板输出电压信号(Y 接和 D 接换流变压器阀侧套管电压,UVY/UV D)至控保系统,控保系统采集电压信号后供中性点偏移保护及后台监视使用。图 5 为换

流变阀侧套管末屏分压原理,电压变送器与末屏分压电容构成了一典型 CVT 结构。

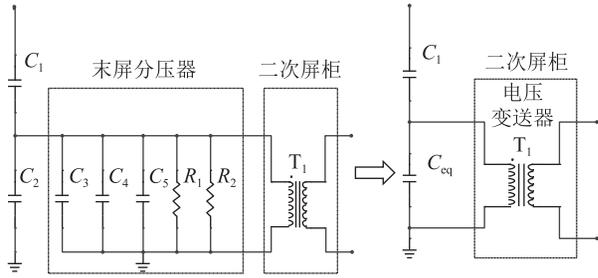


图5 换流变阀侧套管末屏分压器电气原理

Fig.5 Electrical diagram of Bushing tap

分压电容的现场实测参数为: $C_1 = 470 \text{ pF}$ ;等效二次电容  $C_{eq} = 0.76 \text{ }\mu\text{F}$ (从末屏抽头对地测量); $R_1$  为末屏分压器等效并联电阻; $R_2$  为末屏分压器保护用压敏电阻。该电压采集器内部由小 PT 变送器件组成,结构与参数完全一致,主要完成 ABC 三相电压变换功能,变比为 50:1,其中一路通道的具体电路如图 6 所示。每个通道的所采用的小变压器副边均从抽头处引线。

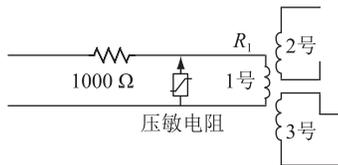


图6 电压采集器一路通道具体电路

Fig.6 Electrical diagram of Voltage transformer

需要特殊说明的是,特高压换流站均采用 3 套保护(且反措规定 3 套保护必须经由 3 个不同 PT 采集而得,禁止由同一端口引入),二次接线如图 7 所示,也就是说,在每一台换流变阀侧的套管末屏有 3 台电压采集器并联使用,分别为 3 套保护提供信号。

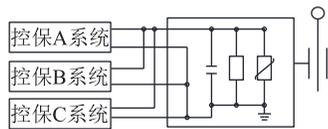


图7 换流变阀侧套管末屏分压器接线

Fig.7 Bushing tap voltage circuit diagram

### 2.3 理论计算

换流变套管末屏分压电容  $C_{eq} = 0.76 \text{ }\mu\text{F}$ ,电压采集器 3 套并联的电感为  $L = 353 \text{ H}$ (断开一次侧从电压变换接线口实际测量),按此参数计算,若能发生谐振,其谐振频率为: $f = 1/(2\pi\sqrt{LC_{eq}}) = 9.72 \text{ Hz}$ 。

在发生 1/3 分频谐振,即  $f = 16.67 \text{ Hz}$  时,电压采集的等效电感应为: $L = 1/(4\pi^2 f^2 C) = 120 \text{ H}$ 。

即当铁磁材料进入饱和区,其等效电感达到

120 H 时,就有可能发生 1/3 分频谐振。由于 3 套保护为并联模式,因此对于单个通道的小变压器来说,只要电达到 360 H,就具备了发生 1/3 分频谐振的条件。

### 3 谐振仿真分析

在 PSCAD 中模拟现场工况,具体模型如图 8 所示。仿真参数全部与现场一致,详见表 1,采用断路器加恒压源的方式来模拟极 2 高端充电转连接的操作,电压采集器的伏安特性采用试验测得的数据。

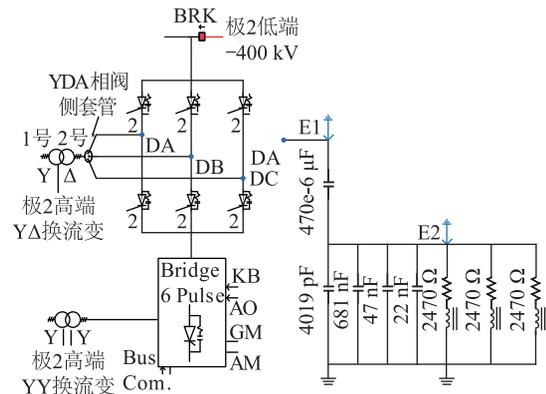


图8 分频谐振的仿真建模

Fig.8 Simulation model of resonance analysis

表1 仿真计算参数

Tab.1 Simulation calculation parameters

参数名	参数取值
额定直流电压/kV	800
整流运行时的触发角 $\alpha/(^\circ)$	15
额定容量/(MV·A)	340.8
阻抗电压/%	19.0±0.9
换流阀电感压降 dx/p.u.	9.8

仿真结果如图 9 所示,可见,在阀组转连接的工况下,电压采集器两端电压确实可能进入稳定的分频谐振状态,1/3 工频的谐振分量幅值约为工频分量幅值的 2 倍。

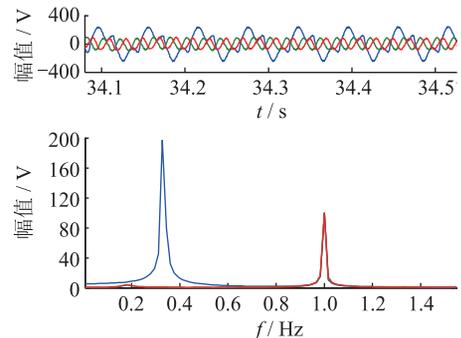


图9 谐振仿真结果的频谱分析

Fig.9 Spectral analysis of resonance simulation results

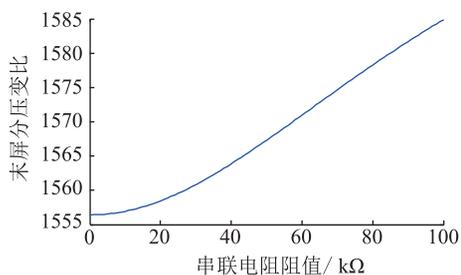
## 4 谐振抑制措施

通常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  $X_C/X_L$  [11-15]:  $X_C/X_L=0.01\sim 0.07$  时,发生分频谐振;  $X_C/X_L=0.07\sim 0.55$  时,发生基频谐振;  $X_C/X_L=0.55\sim 2.8$  时,发生高频谐振;  $X_C/X_L<0.01$  或  $X_C/X_L>2.8$  时,系统较难发生谐振。

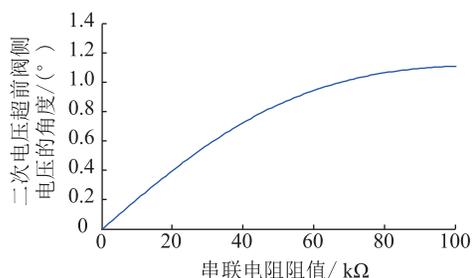
可以通过调整容抗和感抗的比值来降低铁磁谐振发生的概率。增大阀侧套管末屏电容(或在电压采集器两端并联更多的电容)能够减小容抗,但该方法将改变阀侧套管末屏电压的分压比,测控系统需要重新调整比例系数,保护装置需要重新设定保护整定值。也可以通过减小并联 PT 的数量来增大感抗,但反措规定,特高压换流站 3 套保护的信号必须由独立的 PT 转换而来,因此该方法不可行。

由于在转接过程中存在 -400 kV 的电压激励,电压采集器必然将进入深度饱和区。在铁磁谐振激励无可避免的前提下,增加回路的阻尼效果比单纯的调整容抗和感抗好。给谐振回路加装足够的阻尼来提高谐振能量的消减速率才是有效抑制谐振的根本方法。末屏电压变送器中,一次侧串联了 1 kΩ 的电阻,可以适当增大该电阻的阻值,其对分压比精度的影响非常有限。

阀侧套管末屏电容的工频阻抗为 4.1 kΩ,三路电压采集器并联之后的阻抗为 110 kΩ 左右,因此选择 1~10 kΩ 的串联电阻,对阀侧套管现有分压比基本没有影响,如图 10 所示。



(a) 串联电阻对末屏分压变比的影响



(b) 串联电阻对二次电压相位的影响

图 10 串联电阻对阀侧套管分压比和相位的影响

Fig.10 Influence of series resistance on partial pressure ratio and phase of valve side casing

PSCAD 仿真结果表明,在串联 10 kΩ 电阻的情况下,即使是最恶劣的合闸相位,也不会发生持续稳定的谐振。

## 5 结论

文中对一次特高压直流换流变阀侧套管分压器谐振异常进行了理论和仿真分析,主要结论如下:

(1) 换流变压器末屏分压器及其电压变送器在电气上形成了谐振电路的可能。由于特高压换流变压器特有的高低压阀组换流变在线投入和退出的特殊运行工况,在线投入阀组时,运行阀组和直流电压会传变到投入阀组换流变的阀侧套管。当阀侧套管分压器的电压变送器发生饱和时,末屏电容与电压变送器有发生谐振的可能,有可能导致换流变误跳闸或烧毁电压测量回路。

(2) 采用实测参数结合理论计算确定,当铁磁材料进入饱和区,其等效电感达到 120 H 时,就有可能发生 1/3 分频谐振,已经通过仿真计算证明。

(3) 综合比较调整末屏电容、调整电压变送器参数等方法的可行性后,确定给谐振回路加装足够的阻尼来提高谐振能量的消减速率才是有效抑制谐振的根本方法。

### 参考文献:

- [1] 舒印彪,刘泽洪,高理应,等. 800 kV 6400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术,2006,30(1):1-8.  
SHU Yinbiao, LIU Zehong, Gao Liying, et al. A preliminary exploration for design of 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6400 MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1):1-8.
- [2] 刘振亚,秦晓辉,赵良,等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):1-7.  
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-feed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10):1-7.
- [3] 舒印彪,刘泽洪,袁竣,等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证综述[J]. 电网技术,2006,30(5):1-12.  
SHU Yinbiao, LIU Zehong, YUAN Jun, et al. A survey on demonstration of UHV power transmission by state grid corporation of china in the year of 2005[J]. Power System Technology, 2006, 30(5):1-12.
- [4] 舒印彪,张文亮,周孝信,等. 特高压同步电网安全性评估[J]. 中国电机工程学报,2007,27(34):1-6.  
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, et al. Security evaluation of UHV synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34):1-6.
- [5] 周长春,徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术,2003,27(11):18-21.

- ZHOU Changchun, XU Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength [J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 18-21.
- [6] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.  
YUAN Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in china [J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3.
- [7] 刘 凡, 孙才新, 司马文霞, 等. 铁磁谐振过电压混沌振荡的理论研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 103-108.  
LIU Fan, SUN Caixin, SIMA Wenxia, et al. Theoretical analysis of chaotic oscillation of ferroresonance overvoltage in power systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 103-108.
- [8] 李国庆, 彭 石, 张少杰. 变压器与并联电容器的铁磁谐振分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 26-33.  
LI Guoqing, PENG Shi, ZHANG Shaojie. Analysis of ferromagnetic resonance between transformer and shunt capacitor [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 26-33.
- [9] 杨斌文, 李文圣. 电压互感器铁磁谐振的产生与消除[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(3): 134-137.  
YANG Binwen, LI Wensheng. Causes of PT ferroresonance and countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 134-137.
- [10] 张星海, 甄 威, 马御棠, 等. 换流站中 500 kV 站用变铁磁谐振过电压的研究[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 56-63.  
ZHANG Xinghai, ZHEN Wei, MA Yutang, et al. Research on ferroresonance overvoltage occurred in 500 kV transformer for power supply of converter station [J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 56-63.
- [11] 曾祥君, 杨先贵, 王 文. 基于零序电压柔性控制的配电网铁磁谐振抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1666-1673.  
ZENG Xiangjun, YANG Xiangui, WANG Wen. Zero-sequence voltage flexible control based ferroresonance suppressing method for distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1666-1673.
- [12] 刘 凡, 司马文霞, 孙才新, 等. 基于常值脉冲法的铁磁谐振过电压混沌抑制[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 57-61.  
LIU Fan, SIMA Wenxia, SUN Caixin, et al. Controlling chaos in ferroresonance overvoltage based on constant pulse method [J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 57-61.
- [13] 郝 毅, 张艳霞. 基于小波包分频特性的中性点不接地系统铁磁谐振检测[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 72-76.  
HAO Yi, ZHANG Yanxia. Detection of ferroresonance in neutral non-grounding system based on decomposition characteristic of wavelet packet [J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 72-76.

## 作者简介:



常 勇

常 勇 (1979—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事高压直流输电系统的运行研究工作 (E-mail: changyong@cet.sgcc.com.cn);

沈志刚 (1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高压直流输电系统的运行研究工作 (E-mail: zg-shen@sgcc.com.cn);

张 鹏 (1986—), 男, 本科, 工程师, 从事高压直流输电系统的运行研究工作。

## Ferromagnetic Resonance Mechanism of Voltage Divider of the Converter Transformer Bushing and its Suppression

CHANG Yong<sup>1</sup>, SHEN Zhigang<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Technology and Equipment Co., Ltd., Beijing 100052, China ;

2. State Grid Operation Company, Beijing 100052, China)

**Abstract:** In the valve-side busing of the UHV converter transformer, a capacitor-type bushing tap voltage divider is installed. In order to transmit the valve-side voltage to the control and protection equipment, after the converter is charged, a voltage transformer is connected to the bushing tap. During the actual operation, it was found that the ferro-magnetic resonance phenomenon occurred between the bushing tap capacitor and the voltage transformer of the converter valve side bushing, which may lead to the malfunction of the converter transformer in charging state. The article carries on the harmonic analysis based on the actual transient fault recording, and obtains the characteristic frequency of the resonance. By analyzing the electrical principle of the voltage divider and voltage transmitter of the bushing tap, a transient simulation model is built, and the working condition of the ferroresonance is reproduced by using PSCAD / EMTDC simulation. Based on the theoretical analysis, the concrete measures of improving the voltage divider to avoid the resonance are put forward.

**Key words:** UHVDC; converter transformer; bushing voltage divider; ferroresonance; test and adjust methods

(编辑 方 晶)