

一起 35 kV CVT 电容分压器爆炸原因分析

赵文华¹, 王子乐¹, 李秋阳¹, 高寅², 杨韬辉¹, 王理丽¹, 马志青¹, 马永福¹, 廖弟¹

(1. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 西宁 810000;

2. 国网青海省电力公司海北供电公司, 青海 海晏 812200)

摘要: 本文介绍了某 110 kV 变电站一起 35 kV 电容式电压互感器(CVT)爆炸事故, 事故导致多条出线瓷瓶、计量箱等发生不同程度损坏。结合故障信息及现场检查试验结果, 初步判定为铁磁谐振故障, 且阻尼器未有效抑制谐振, 并在返厂解体试验后发现了电磁单元绝缘油劣化严重、二次绕组对地绝缘偏低等缺陷。进一步判定事故原因为系统一次侧短路接地引发振荡, 在谐振过电压的持续影响下致使励磁电流不断增大, 电容分压器内部热量累积至极限值最终导致爆炸。利用 ATP-EMTP 软件构建仿真模型并还原事故过程, 模拟在 35 kV 母线侧发生接地短路故障并快速消除的激励条件下, 二次侧电压畸变及励磁电流变化情况, 计算结果与试验分析结果相一致, 完善了事故原因分析, 对以后的安全运行给出相关建议。

关键词: 电容式电压互感器(CVT); 铁磁谐振; 过电压; ATP-EMTP; 阻尼装置

Analysis on Explosion of Capacitor Divider of 35 kV CVT

ZHAO Wenhua¹, WANG Zile¹, LI Qiuyang¹, GAO Yin², YANG Taohui¹, WANG Lili¹,

MA Zhiqing¹, MA Yongfu¹, LIAO Di¹

(1. Institute of Electric Power Science, SGCC Qinghai Electric Power Company, Xining 810000,

China; 2. Haibei Power Supply Company, SGCC Qinghai Electric Power Company,

Qinghai Haiyan 812200, China)

Abstract: In this paper, an explosion of 35 kV capacitor voltage transformer (CVT) at a 110 kV substation is introduced, which caused various damage to a number of outgoing porcelain insulators and metering boxes. Based on the fault information and the results of field inspection and test, the ferromagnetic resonance fault is initially determined, and the damper does not effectively suppress the resonance. It is found after its return to the factory, disassembly and testing that the insulation oil of electromagnetic unit is deteriorated seriously, and the secondary winding insulation to the ground is low. It is further determined that the cause of the accident is the oscillation due to the short-circuit grounding on the primary side of the system, which leads to the continuous increase of the excitation current under the continuous influence of the resonant overvoltage, and the accumulation of heat inside the capacitor to the limit value, eventually causing explosion. The ATP - EMTP software is used to construct a simulation model and restore the accident process, simulating the voltage distortion and excitation current variation on the secondary side under the excitation condition that the ground short circuit fault occurred on the 35 kV bus side and is quickly eliminated. The calculation results are consistent with the test analysis results, which improving the accident cause analysis and giving relevant suggestions for the safe operation in the future.

Keywords: capacitor voltage transformer (CVT) ; ferromagnetic resonance; overvoltage; ATP - EMTP; damping device

0 引言

电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)是电力系中的重要电气设备,广泛应用于变电站内电压测量、继电保护、自动控制等方面。相较于电磁式电压互感器,CVT设计时能有效抵御与外部电路间发生谐振的情况^[1-4],但在一定的外部激励条件下,如一次侧隔离开关合闸、二次侧短路接地等故障,其内部非线性电感元件容易与电容匹配产生铁磁谐振进而造成过热,严重时影响设备安全稳定运行甚至致使设备发生爆炸^[5-10]。

本文从某110 kV变电站内一起CVT爆炸事故

为研究对象,根据故障录波信息、现场勘查结果、本地检查与试验做初步故障分析,并在进一步返厂解体试验后明确主要事故原因,同时利用 ATP-EMTP 软件对故障过程及试验结果进行还原验证^[11-12],最终确定 CVT 受外部激励影响产生铁磁谐振并引发电容单元过热爆炸为事故的具体原因,进而为后续同类型设备故障分析及处置工作提供参考。

1 事故概况与分析

1.1 事故概况

110 kV 变电站一次接线图(35 kV 系统侧)见图1。

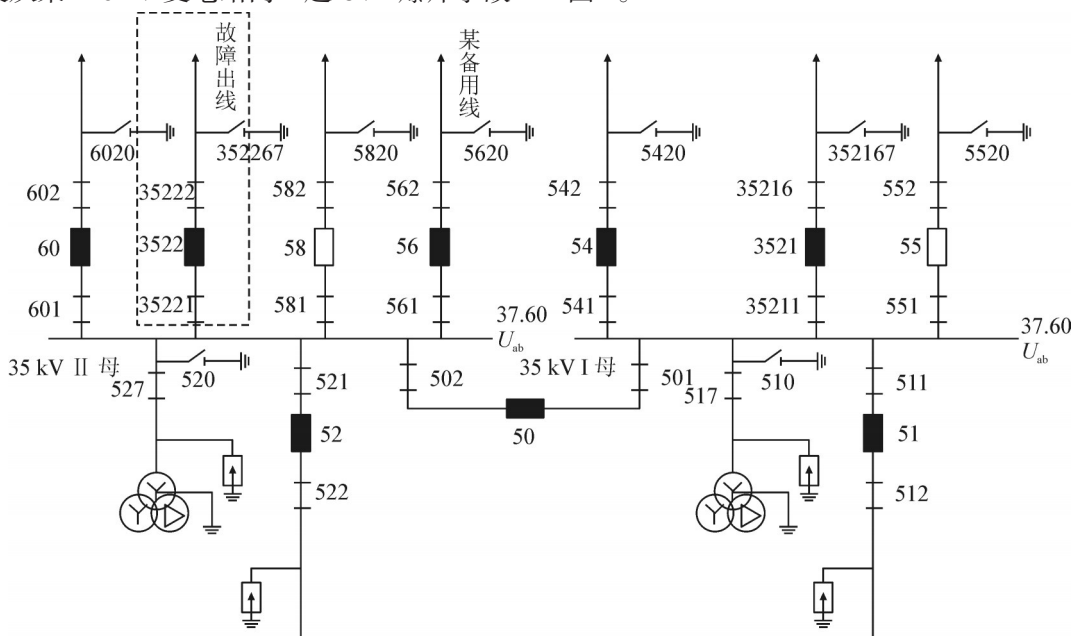
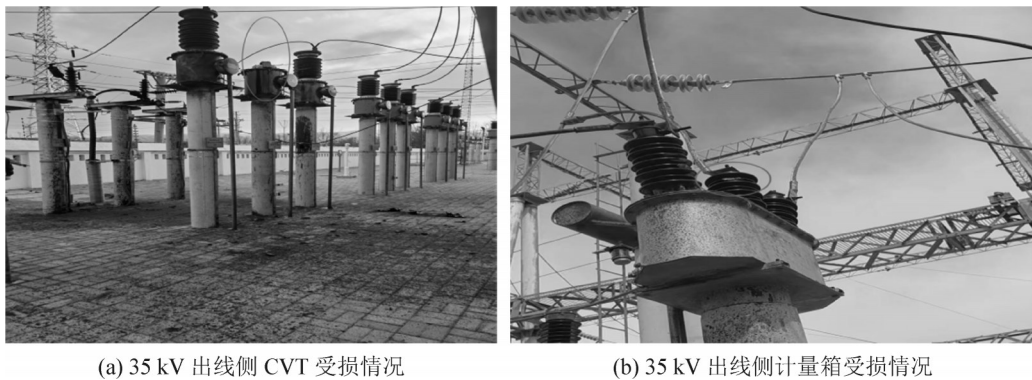


图1 某变电站35 kV系统侧一次接线图

Fig. 1 Primary wiring diagram on the 35 kV system side of a substation

事故前,110 kV 变电站35 kV 系统侧35 kV I、II段母线通过50号母联断路器并列运行。2024年4月13日14时14分,该110 kV 变电站35 kV 出线距离I段保护动作、重合闸动作、重合成功,1号主变、2号主变复压过流I段1/2时限动作,51号、52号、50号断路器跳闸。经运行人员到站检

查,发现该35 kV 出线B相CVT炸裂,A、C相瓷瓶破损,设备区内散落大量绝缘瓷瓶碎片。同时位于旁侧的多条其他出线计量箱瓷瓶、支柱瓷瓶、断路器瓷瓶及35 kV II段母线耐张绝缘子串均存在不同程度的破损及灼烧情况。主要设备损坏情况见图2。



(a) 35 kV 出线侧 CVT 受损情况

(b) 35 kV 出线侧计量箱受损情况

图2 现场故障情况

Fig. 2 Fault condition at site

1.2 事故原因分析

故障录波图见图3,故障前,35 kV I、II段母线C相电压降低为零,其他两相升高至线电压,由此可知,在线路主变保护跳闸前,35 kV线路存在C相单相接地故障,持续时间约38 s。

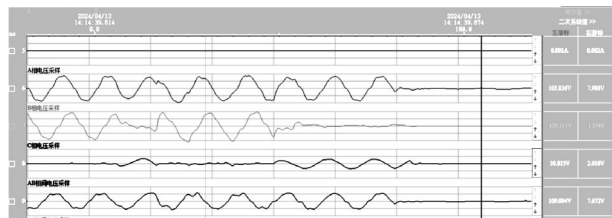


图3 35 kV II母电压波形图
Fig. 3 Waveform of 35 kV II bus voltage

再考虑保护动作情况,故障发展过程中相应保护动作顺序图见图4。结合上述继保动作及现场

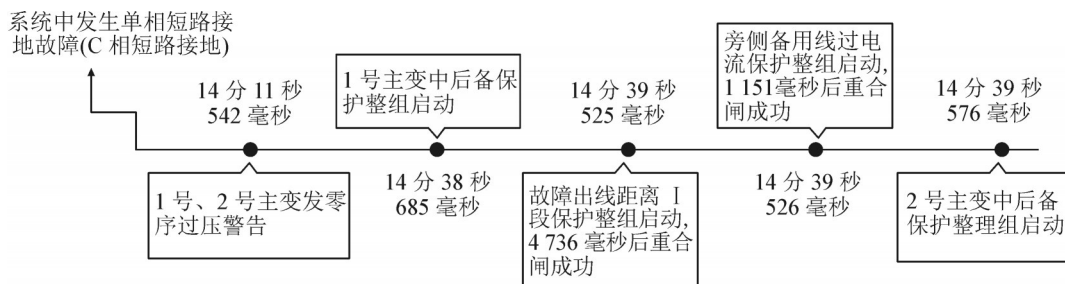


图4 继电保护动作顺序
Fig. 4 Protection operation sequence of relay

2 设备解体试验

2.1 解体前检查与试验情况

故障 CVT 设备返厂解体前,首先开展了现场解体前检查及试验,对 A、C 两相 CVT 进行绝缘电阻、介损试验及变比测试,发现二次绕组对地、二次绕组间的绝缘电阻均低于标准要求值($<500\text{ M}\Omega$); B 相 CVT 受损较为严重,电容分压器整体损坏,只剩下分压器下法兰盘,遂计划返厂后进行解体试验。

2.2 解体试验情况

2.2.1 A、C 相 CVT 解体情况

电容分压器工频耐压和局部放电试验结果均为合格,解体检查电磁单元部分发现绝缘油变色为杏黄色,同时二次绕组对地绝缘电阻试验 $\leq 500\text{ M}\Omega$,结果为不合格。

进一步检测排油后电磁单元二次绕组对地绝缘情况,测量发现二次主扁纸包线与引出镀锡铜绞线接头部位对地绝缘正常,剖析接头绝缘及焊接工艺无异常,因此判断绝缘油劣化是导致二次端子对

地绝缘偏低的原因。检查情况,可初步还原事故过程:首先 35 kV 备用线发生 C 相短路故障,由于继电保护装置切投不及时,事故扩大并延至 35 kV 母线系统侧,进而发展为 35 kV 母线系统出现单相接地故障,持续时间约达 38 s。系统在长时间单相接地故障时可形成各种振荡回路,此时对于 35 kV 故障出线而言,由于遭受了来自于 35 kV 母线系统单相接地短路时带来的冲击影响,CVT 一次侧产生了电压波动,使得 CVT 中间变压器电磁单元中的铁心饱和,线圈会迅速失去电感和电抗,进而与电容单元发生铁磁谐振^[13-16]。因此,可初步判定 CVT 在系统振荡时发生了铁磁谐振,产生的谐振过电压致使线圈铁心深度饱和,励磁电流不断增大,最终导致一次绕组线圈的烧毁及电容绝缘电介质的击穿,是造成爆炸事故的主要原因。

地绝缘偏低的原因。

2.2.2 B 相 CVT 解体情况

B 相 CVT 法兰盘上部电容分压器整体损坏,电磁单元部分绝缘油浑浊发黑,明显为电磁单元线圈烧灼,导致试验项目无法进行。对电磁单元放油吊心解体发现器身整体严重烧毁,如图 5 所示,进一步解体发现主变线圈一次绕组绝缘烧毁尤为严重,如图 6 所示。电抗器线圈、速饱和线圈等正常,二次绕组试验直流电阻正常。

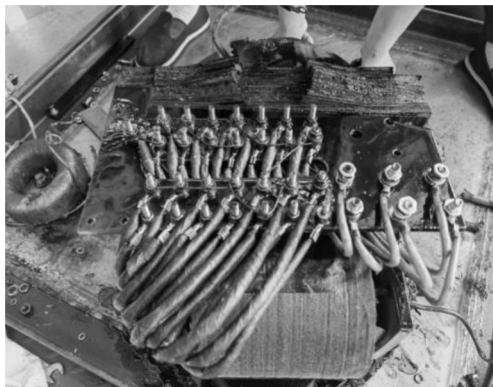


图5 放油吊心器身
Fig. 5 Body of oil discharge core



图6 一次绕组烧毁情况
Fig. 6 Burning condition of primary winding

2.3 故障原因分析

1)CVT 电容单元爆炸原因:受母线侧单相接地故障激励影响,CVT 内部发生铁磁谐振,在谐振过电压持续作用下会导致电磁单元主变线圈铁心深度饱和,致使一次绕组线圈烧毁及电容元件绝缘电介质击穿,电容泄漏电阻变小,泄漏电流变大,电容分压器内部积累大量热量导致绝缘油迅速气化,套管内部压力迅速增大,由于绝缘油具有不可压缩性,因此密封的套管不能及时释放这个巨大的内部压力,最终导致了爆炸^[17-18]。

2)速饱和阻尼器未有效抑制谐振过电压原因:长期受不定期谐振影响,阻尼器工作性能降低,导致谐振发生时不能快速进入饱和状态,饱和深度越弱,对铁磁谐振的抵御能力就会越低^[19-20]。

3)二次绕组绝缘电阻值不合格原因:为抑制铁磁谐振,阻尼器中的阻尼电阻将消耗大量的谐振能量从而去阻尼铁磁谐振,在此状态下阻尼电阻发热严重,变压器油在高温状态下加速老化产生大量水分,导致二次绕组绝缘电阻降低。

3 故障仿真分析

经过故障解体分析,此次 CVT 爆炸事故原因可能为系统在发生单相短路接地故障时产生振荡,并在此激励条件下诱发了铁磁谐振,虽然 CVT 设计时能有效抵御与外部电路间发生铁磁谐振的情况,但元件内部电容、电磁单元间仍存在发生铁磁谐振的可能性,利用 ATP-EMTP 软件,对 CVT 在系统一次侧发生短路后故障消除的激发方式下的情况进行仿真模拟^[21-25]。

3.1 仿真模型及参数设置

搭建 35 kV II 母线系统,电源选择幅值为 $35 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 28.574$ kV 的三相电压源,系统断口电容与对地电容选择 0.000 9 nF 与 0.039 nF,站内避

雷器选择 HY5WZ-51/134 型氧化锌避雷器,采用与其伏安特性曲线相似的非线性电感替代,LCC 为线路模型,模拟 35 kV 故障出线。中间变压器采用非线性电感来模拟^[26-27],其磁饱和和特性曲线如图 7 所示。

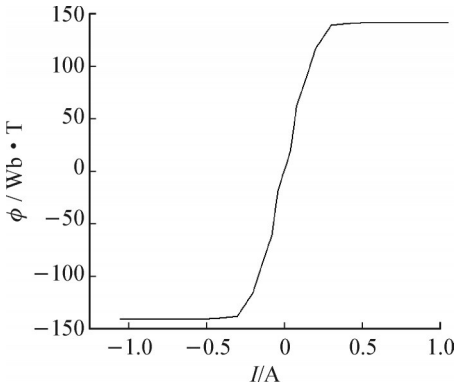


图7 中间变压器磁饱和和特性曲线
Fig. 7 Magnetic saturation characteristic curve of intermediate transformer

速饱和电抗型阻尼器结构图见图 8,当 CVT 发生铁磁谐振时,过电压会使速饱和型阻尼器快速进入饱和状态,导致感抗迅速降低,电阻 R 消耗大量的谐振能量最终成功阻尼铁磁谐振^[28-29]。



图8 速饱和电抗型阻尼器
Fig. 8 Fast saturated reactance type damper

CVT 由电容分压器和电磁单元两部分串联组成,电容分压器是由高压电容 C_1 和中压电容 C_2 构成;电磁单元包括补偿电抗器 L 、中间变压器 T 、速饱和阻尼器 ZD 等部分构成,仿真模型参数见表 1,仿真模型见图 9。

表1 仿真模型参数
Table 1 Parameters of simulation model

参数	数值
C_1/nF	0.040 9
C_2/nF	0.041 3
L_k/mH	80 600
R_k/Ω	6 000
$L_{\alpha 1}/\text{H}$	68.8
R_1/Ω	1 150
$L_{\alpha 2}/\text{H}$	0.06
R_2/Ω	0.28
$L_{\alpha 3}/\text{H}$	0.072
R_3/Ω	0.46
$R_m/\text{M}\Omega$	1.5
R_d/Ω	1

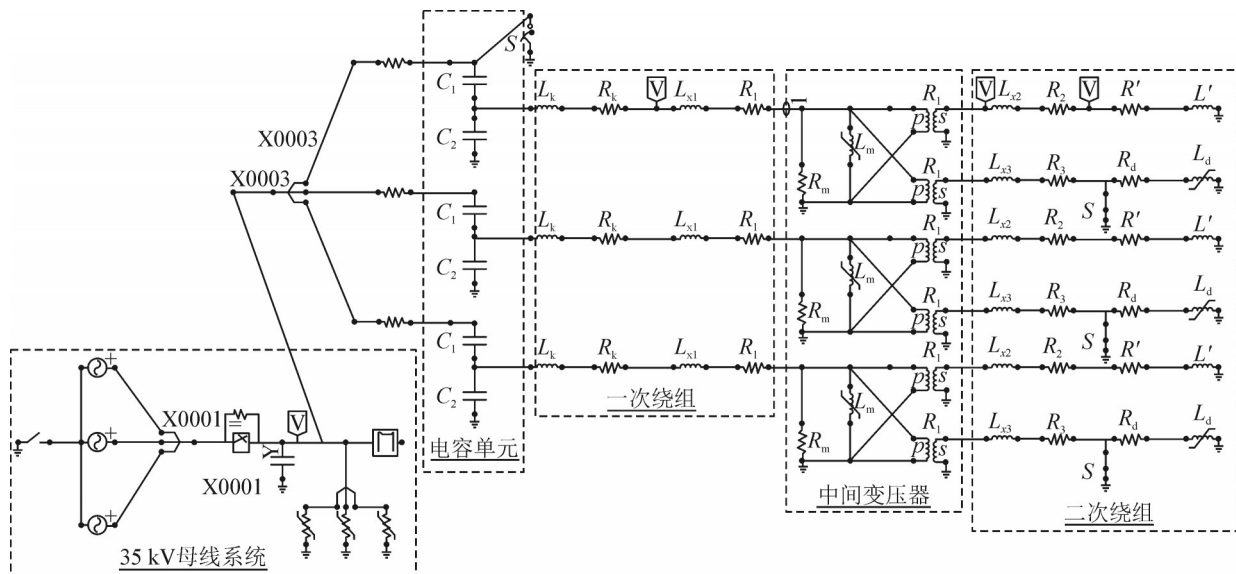


图9 仿真模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of simulation model

3.2 仿真计算结果分析

故障设置:模拟 35 kV 故障出线一次侧发生单相(C相)接地短路故障,仿真时长设置为 1 s,故障持续时长为 0.1 s,仿真波形见图 10。

由图 10 可得,在系统发生单相短路接地故障时,一次侧故障相电压为 0,非故障相电压上升至额定相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,此时 U_a 、 U_b 相电压幅值分别为 49.45 kV、49.21 kV,而额定相电压幅值为 28.57 kV,符合比例关系,进而重点考虑二次侧测量电压及一次侧励磁电流变化情况,观察有无谐振情况的出现,仿真计算结果见图 11。

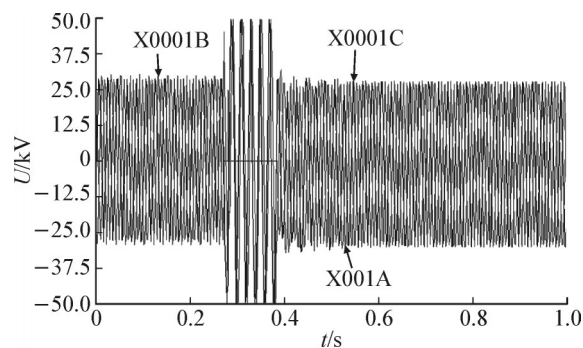


图10 单相短路接地时三相电压变化情况

Fig. 10 Three-phase voltage variation during single-phase short-circuit grounding

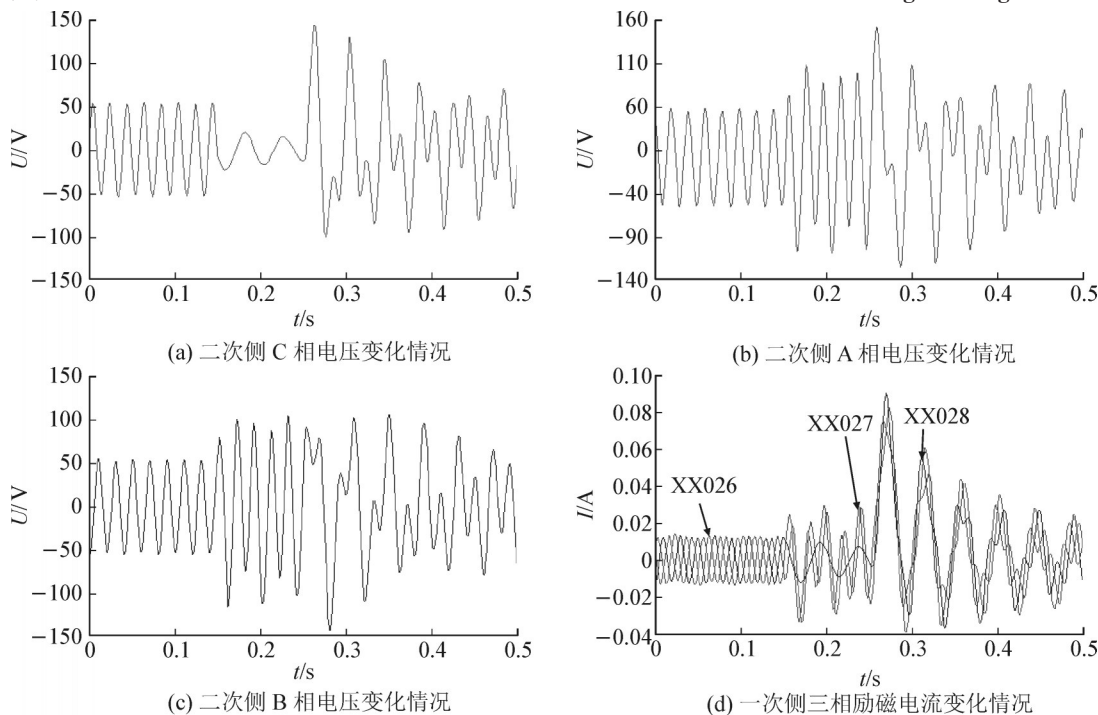


图11 仿真计算结果

Fig. 11 Simulation calculation result

由上述结果可得,当短路故障消失后,二次侧出现较为明显的谐振过电压波形,最大过电压幅值为 156.24 V,谐振过电压幅值达到了正常额定电压幅值(57.74 V)的 2.7 倍。同时一次侧励磁电流也呈明显增大的趋势,励磁电流最大幅值约为 91.21 mA,达到额定电流幅值的 7.6 倍,且谐振状态持续存在,说明速饱和阻尼器没有成功抑制住谐振状态,而在谐振过电压的持续作用下,一次侧线圈铁心发生饱和,电感值不断减小,励磁电流将会进一步增大,长时间累积作用下可能会导致线圈烧毁。此外由于电源会不断地向 CVT 提供能量,所以一旦发生铁磁谐振,即使诱发条件消失了,谐振仍然会持续下去,严重影响设备安全稳定运行甚至使设备爆炸。仿真计算结果与前期解体试验分析结果保持一致。

4 结语

继电保护装置未及时动作原因分析:经过排查,排除了控制回路断线、保护装置本身质量原因或存在整定误差、稳压电源可靠性等影响因素,考虑到保护装置运行年限较长及受运行环境影响,可能造成继电器元器件的老化,进而对装置运行性能造成影响,导致保护拒动,进而使故障范围扩大至 35 kV II 母线系统侧,对母线侧其他出线带来较大扰动影响。

CVT 发生爆炸事故的根本原因为:在一次侧单相接地短路故障的激励下,CVT 中间变压器电磁单元中的线圈铁心深度饱和,线圈迅速失去电感和电抗,进而与电容单元发生内部铁磁谐振,产生较大的谐振过电压,导致一次励磁电流增大,在过电流的持续作用下热量不断累积最终导致一次线圈绕组烧毁以及电容元件绝缘电介质的击穿。电介质击穿后电容泄露电阻变小,泄露电流变大,使得电容分压器内部发热严重,产生的巨大热量会使内部绝缘油迅速汽化膨胀,由于电容单元套管内部密闭,压力将不断增大直至极限状态,最终导致电容单元发生爆炸^[30-34]。

针对本次故障分析结果,建议如下:

1)为避免系统在振荡时发生谐振,可对系统的容抗和感抗进行检测,判断试验结果是否在谐振范围内,进而采取安装补偿电抗器等方式改变系统电容、电感参数,抑制铁磁谐振的发生;

2)有必要可在系统线路可加装一次保护(0.5 A 或 1 A 熔丝,鉴于现场设备运行环境的特殊性,建议采用 1 A 熔丝),在铁磁谐振或其他未知故障发生时立即切断一次线路与设备间的电源,可有效保护设备完好;

3)建议运维单位加强现场巡视并缩短巡视周期,重点做好红外测温及异常电压冲击后的检测工作,同时结合设备状态评价工作,开展例行试验,对试验不合格设备及时进行更换处理。对于继电保护装置,应按照标准的检验规程及规范进行检验,对问题装置及超年限设备及时进行性能评估及改造更换,进而提高保护装置的安全可靠性。

参考文献

- [1] 庄飞虎,马金财,何龙,等.一起 10 kV 避雷器击穿与互感器烧毁故障原因分析[J].电瓷避雷器,2022(6):8-14.
ZHUANG Feihu, MA Jincai, HE Long, et al. Cause analysis of a 10 kV surge arrester breakdown and transformer burn-out fault[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 8-14.
- [2] 李良书,韩彦华,李晋,等.电容式电压互感器典型故障案例分析[J].变压器,2020,57(9):72-76.
LI Liangshu, HAN Yanhua, LI Jin, et al. Typical fault case analysis of capacitor voltage transformer[J]. Transformer, 2020, 57(9): 72-76.
- [3] 李威,胡润阁,刘亚林,等.500 kV CVT 电压异常分析与处理[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(3):74-78.
LI Wei, HU Runge, LIU Yalin, et al. Analysis and treatment on abnormal voltage issue of 500 kV CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3): 74-78.
- [4] 陈璐,李光茂,张梦慧,等.一起 110 kV 电容式电压互感器异响原因分析[J].变压器,2023,60(12):68-72.
CHEN Lu, LI Guangmao, ZHANG Menghui, et al. Cause analysis of abnormal noise of a 110 kV capacitor voltage transformer[J]. Transformer, 2023, 60(12): 68-72.
- [5] 王贵山,李应宏.一起 220 kV CVT 的铁磁谐振故障分析[J].电力电容器与无功补偿,2016,37(1):37-41.
WANG Guishan, LI Yinghong. Fault analysis on ferromagnetic resonance of 220 kV CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(1): 37-41.
- [6] 杨家硕,胡岩,王佳琪.110 kV 变电站的铁磁谐振分析与抑制[J].变压器,2022,59(2):19-23.
YANG Jiashuo, HU Yan, WANG Jiaqi. Ferromagnetic resonance analysis and suppression of 110 kV substation[J]. Transformer, 2022, 59(2): 19-23.
- [7] 苗静,赵文彬,鲍伟.基于风险策略的配电网铁磁谐振故障分析与抑制措施研究[J].电瓷避雷器,2024(2):72-80.
MIAO Jing, ZHAO Wenbin, BAO Wei. Ferromagnetic resonance fault analysis and suppression measures of distribution network based on risk strategy[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(2): 72-80.
- [8] 姜磊,石勇,侯炜,等.一次消谐装置对小电流接地系统单相接地故障检测影响分析[J].电瓷避雷器,2024(4):114-121.
JIANG Lei, SHI Yong, HOU Wei, et al. Influence of prima-

- ry harmonic elimination device on single-phase grounding fault line detection in neutral ungrounded system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(4): 114-121.
- [9] 童涛,徐碧川,袁思凡,等. 一起电容式电压互感器二次电压异常事故分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 98-104.
- TONG Tao, XU Bichuan, YUAN Sifan, et al. A CVT secondary voltage abnormal accident[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 98-104.
- [10] 郭亮,李哲,李骁,等. 雷电过电压引发电容式电压互感器铁磁谐振特性分析与防护研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(6): 147-151, 158.
- GUO Liang, LI Zhe, LI Xiao, et al. Analysis and prevention research of ferroresonance in capacitor voltage transformer caused by lightning overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 147-151, 158.
- [11] 李睿,叶国雄,王晓琪,等. 用 ATP-EMTP 研究 1 000 kV CVT 的暂态特性[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1850-1855.
- LI Xuan, YE Guoxiong, WANG Xiaoqi, et al. Transient characteristics of 1 000 kV capacitor voltage transformer based on ATP-EMTP[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1850-1855.
- [12] 王黎明,方斌. 500 kV 电容式电压互感器暂态特性仿真[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2389-2396.
- WANG Liming, FANG Bin. Simulations on transient characteristics of 500 kV capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2389-2396.
- [13] 张健能,李春阳,梁丽雪. 一起 220 kV 电容式电压互感器二次电压异常波动分析[J]. 变压器, 2020, 57(5): 79-83.
- ZHANG Jianneng, LI Chunyang, LIANG Lixue. Analysis of abnormal fluctuation of 220 kV CVT secondary voltage[J]. Transformer, 2020, 57(5): 79-83.
- [14] 刘继平,魏菊芳,郝晓光,等. 一起 220 kV CVT 二次电压波形畸变的故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 70-73.
- LIU Jiping, WEI Jufang, XI Xiaoguang, et al. Fault analysis of a 220 kV CVT secondary voltage waveform distortion [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 70-73.
- [15] 赵海林. 35 kV 及以下电压互感器熔丝熔断原因分析及对策[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(5): 64-65.
- ZHAO Hailin. Analysis and countermeasures of fuse breakage of transformers with voltages of 35 kV and below [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2011, 30(5): 64-65.
- [15] 赵森. 一起 110 kV CVT 内部故障引起母线电压异常分析及处理[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 110-114.
- ZHAO Miao. Analysis and treatment of abnormal bus voltage caused by internal fault of 110 kV capacitor voltage transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 110-114.
- [16] 高一壹,咸日常,咸日明,等. 一起 35 kV 电磁式电压互感器爆炸事故案例及仿真分析[J]. 变压器, 2019, 56(4): 81-86.
- GAO Yiyi, XIAN Richang, XIAN Riming, et al. Simulation analysis of a 35 kV electromagnetic potential transformer explosion accident[J]. Transformer, 2019, 56(4): 81-86.
- [17] 可翀,张博闻,张庆军,等. 35 kV 电容式电压互感器二次电压异常分析与处理[J]. 河南电力, 2022(S02): 61-64.
- KE Chong, ZHANG Bowen, ZHANG Qingjun, et al. Analysis and treatment of secondary voltage anomaly of 35 kV capacitive voltage transformer[J]. Henan Electric Power, 2022(S02): 61-64.
- [18] 何智强,李欣,范敏,等. 基于消谐器抑制铁磁谐振过电压研究分析[J]. 电瓷避雷器, 2017(5): 77-84.
- HE Zhiqiang, LI Xin, FAN Min, et al. Research on suppression of ferromagnetic resonance overvoltage based on harmonic elimination[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(5): 77-84.
- [19] 刘松美. CVT 异常分析及设计优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(6): 50-54.
- LIU Songmei. Abnormal analysis and design improvement of CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(6): 50-54.
- [20] 郭晓君,吴文斌,许军,等. 一起基于 ATP-EMTP 仿真的电容式电压互感器故障的分析研究[J]. 电气技术, 2016(4): 87-91, 114.
- GUO Xiaojun, WU Wenbin, XU Jun, et al. Analysis and research of a capacitor voltage transformer failure based on ATP - EMTP simulation[J]. Electrical Engineering, 2016(4): 87-91, 114.
- [21] 雷娟,郭洁,高媛,等. 铁磁谐振仿真模型的探讨[J]. 电瓷避雷器, 2007(4): 33-37.
- LEI Juan, GUO Jie, GAO Yuan, et al. Approach to simulation model of ferroresonance[J]. Insulators and Surge Arresters, 2007(4): 33-37.
- [22] 李博文,贺达,杨智,等. CVT 铁磁谐振过电压的抑制与不同故障下二次电压特征分析[J]. 浙江电力, 2023, 42(7): 38-46.
- LI Bowen, HE Da, YANG Zhi, et al. Suppression of ferromagnetic resonance overvoltage in CVT and feature analysis of secondary voltage under different faults[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(7): 38-46.
- [23] 冯宇,王晓琪,陈晓明,等. 电容式电压互感器电路参数对电网谐波电压测量的影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4968-4975.
- FENG Yu, WANG Xiaoqi, CHEN Xiaoming, et al. Influences of circuit parameters of capacitor voltage transformer on grid harmonic voltage measurements[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2014, 34(28): 4968-4975.
- [24] 薛峰, 谢伟伦, 谢培成, 等. CVT分压电容对谐波传变特性影响修正方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 129-134.
- XUE Feng, XIE Weilun, XIE Peicheng, et al. Study on correction method of influence of CVT dividing capacitor on harmonic transfer characteristics[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 129-134.
- [25] 朱保军, 咸日常, 刘兴华, 等. 35 kV PT爆炸事故及其谐振过电压分析和预防[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 185-190.
- ZHU Baojun, XIAN Richang, LIU Xinghua, et al. Explosion accident analysis and prevention of resonance overvoltage of 35 kV potential transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 185-190.
- [26] 夏君宇, 吴奇松, 赵国庆, 等. 补偿电抗器对电容式电压互感器误差的影响[J]. 变压器, 2022, 59(2): 44-46.
- XIA Junyu, WU Qisong, ZHAO Guoqing, et al. To the effect of capacitive voltage transformer error compensation reactor[J]. Transformer, 2022, 59(2): 44-46.
- [27] 王骏强. 35 kV 配电网铁磁谐振过电压研究[D]. 广西大学, 2016.
- [28] 王欢, 王忠东, 卢树峰, 等. 基于误差状态模糊分析的电容式电压互感器内绝缘状态评价方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 73-80.
- WANG Huan, WANG Zhongdong, LU Shufeng, et al. Internal insulation condition evaluation method for capacitor voltage transformer based on fuzzy analysis of error condition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 73-80.
- [29] 刘春, 崔志铭, 王丹江, 等. CVT速饱和电抗型阻尼器的优化理论研究[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 114-119.
- LIU Chun, CUI Zhiming, WANG Danjiang, et al. Optimization theory of CVT speed reactance clamper [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 114-119.
- [30] 张超. 电容式电压互感器参与铁磁谐振的机理分析研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
- [31] 刘根根, 李英, 张向阳, 等. 几起典型电力系统谐振案例分析[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 282-292.
- LIU Gengen, LI Ying, ZHANG Xiangyang, et al. Analysis of several typical resonance cases in power system[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 282-292.
- [32] 夏经德, 苗思雨, 邵文权, 等. 基于纵向阻抗的变压器虚拟相位保护[J]. 西安工程大学学报, 2023, 37(2): 54-62.
- XIA Jingde, MIAO Siyu, SHAO Wenquan, et al. Transformer virtual phase protection based on longitudinal impedance[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2023, 37(2): 54-62.
- [33] 董兴建, 舒勤. CVT谐波测量仿真分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(1): 69-75.
- DONG Xingjian, SHU Qin. Simulation and analysis on harmonic measurement of CVT[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 69-75.
- [34] 丁涛, 杨雷, 王献军, 等. 一起220 kV CVT额定输出容量校核异常的处理分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(3): 72-77.
- DING Tao, YANG Lei, WANG Xianjun, et al. Treatment and analysis on abnormality of rated output capacity check of 220 kV CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 72-77.
- 作者简介:
- 赵文华(2000—), 男, 助理工程师, 主要从事电气试验及过电压计算工作。E-mail: MAC1004868564@163.com。
- 王子乐(1998—), 男, 助理工程师, 主要从事电气设备诊断试验工作。
- 李秋阳(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事高压试验及高电压绝缘技术信息工作。