

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.08.027

电容式电压互感器传变特性研究

黄 然, 周仿荣, 张恭源, 赵现平

(云南电网电力研究院, 昆明 650217)

摘要: 电容式电压互感器存在电磁单元, 当过电压达一定值时, 中间变压器及速饱和电抗器可能饱和, 在低频振荡下 CVT 的分压比降低, 二次绕组测量到的电压值将高于实际值, 导致过压保护误动。文中以 500 kV 多乐永丰 I 回线在带高抗切除空线时过压保护动作为切入点, 通过过电压电磁暂态仿真及 CVT 在系统电压偏离工频时的传变特性计算, 分析 CVT 在低频饱和状态下二次侧测量电压被放大的原因, 研究 CVT 饱和后的电压测量偏差。该线路空载分闸过电压现场测试数据, 充分验证了 CVT 低频下传变特性改变引起测量值大于实际值是 500 kV 多永 I 回线在空载分闸时过压保护动作的真正原因。

关键词: 过电压; CVT; 传变特性; 饱和; 低频振荡; 仿真; 实测

Research of CVT Transient Response

HUANG Ran, ZHOU Fangrong, ZHANG Gongyuan, ZHAO Xianping

(Electric Power Research Institute, Yunnan Electric Power Test & Research Institute Group Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: When the over-voltage of power-grid reaches a certain value, the reactor of CVT may be saturated within a very short time; thus the voltage ratio of CVT is reduced under the condition of low frequency oscillation. In this paper, the action of over-voltage protection of the 500 kV Duole-Yongfeng No. 1 transmission line is analyzed to find out the reason why secondary side voltage of CVT is amplified in such circumstance. Simulation of over-voltage and calculation of transfer characteristics of CVT with voltage deviating from the power frequency are conducted to determine the deviation of voltage measurement of the saturated CVT. It is concluded that the action of over-voltage protection of the 500 kV Duole-Yongfeng No. 1 transmission line is due to the change of transfer characteristics of CVT, which results in an amplification of the voltage measurement under the working condition of low-frequency saturated over-voltage. Field test demonstrates that the analysis in this paper is correct.

Key words: over-voltage; CVT; transfer characteristics; saturation; low frequency oscillation; simulation; measurement

0 引言

电容式电压互感器(CVT)以其优于电磁式电压互感器的性价比, 不存在铁磁谐振等优点, 被普遍地应用在超特高压输电系统, 实时监测线路电压作为过压保护的启动信号。由于 CVT 存在电磁单元, 当过电压超过一定倍数时, 其中间变压器及速饱和电抗器会饱和, 导致传变特性改变, 产生测量误差, 容易造成保护误动。

超高压长距离输电线路为抑制电容效应和提高输送功率, 一般都在两端装设并联电抗器, 而带

高抗线路在切除空线时, 线路对地电容和高抗间将形成低于工频的拍频振荡, CVT 在此低频过电压的工况下极容易饱和, 二次侧电压测量值大于真实值, 导致过压保护动作^[1-9]。

文中以一起电网 500 kV 带高抗线路操作过程中过压保护动作出口为案例, 结合电磁暂态仿真计算和线路电压实测结果, 分析事故发生原因, 研究低频状态下 CVT 的传变特性和测量误差, 对继电保护动作可靠性及一次设备安全运行的影响进行分析。

1 500 kV 多永 I 回线过电压仿真计算分析

1.1 过压保护动作分析

500 kV 多乐永丰 I 回输电线路, 全长 137.053 km,

多乐侧线路带高抗,在一次线路检修工作结束恢复运行前,由多乐侧对线路充电,23时15分8.957秒手动分闸后,线路辅A、辅B保护动作,发出过电压信号,分闸过程相电压和零序电压录波见图1。

带高抗线路空载分闸操作后,线路中的残余电荷在对地电容与高抗之间通过振荡进行泄放,分析录波

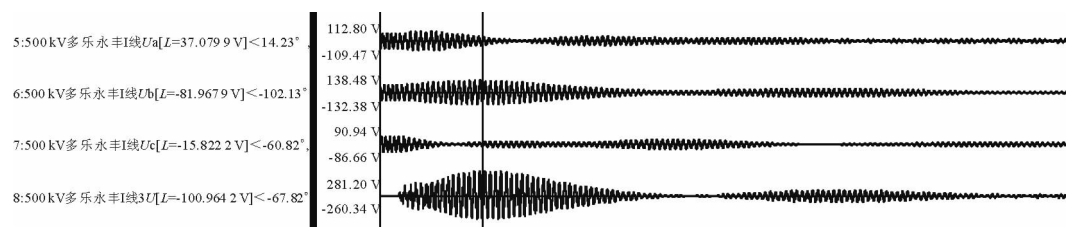


图1 空载分闸保护录波图

Fig. 1 Wave record form of no-load opening

1.2 空载分闸操作仿真计算

针对以上现象,在PSACD/EMTDC电磁暂态仿真平台构建500 kV多永I回线输电系统仿真模型,进行线路空载分闸仿真计算,以进一步分析该次操作过电压及保护动作发生的原因。线路采用分布参数模型,500 kV多永I回与500 kV多永II回有21.537 km长线路为同塔双回架设,多永I回分闸操作过程中多永II回处于运行状态,考虑到双回线路间耦合对过电压造成的影响,搭建500 kV多永I、II回输电系统模型,双回线路参数见表1^[10-12]。500 kV多乐I回线仅多乐侧带高抗,型号为BKD2-40000/550-66,单相容量120 Mvar,中性点小抗一档阻抗674.7 Ω,二档阻抗610.86 Ω,三档阻抗546.55 Ω。

表1 500 kV多永I回线路序参数

Table 1 Sequence parameters of 500 kV Duoyong transmission line

参数	数值
正序	$R/(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$ 1.656 50×10 ⁻⁵
	$X_L/(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$ 2.897 60×10 ⁻⁴
	$X_C/(\Omega \cdot \text{m})$ 229.751 00×10 ⁶
零序	$R/(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$ 2.603 44×10 ⁻⁴
	$X_L/(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$ 9.015 58×10 ⁻⁴
	$X_C/(\Omega \cdot \text{m})$ 379.993 30×10 ⁶

根据保护录波图中多乐永丰I回三相电流波形图,分闸操作三相熄弧时刻分别为A相94.1 ms,B相91.4 ms,C相88.6 ms,按此三相分闸时序及不同期度,设置仿真计算中线路三相断开时刻。多乐永丰II回运行,I回线路高抗中性点小抗处第二档位,按照相间不同期度分别相差2.7、2.8 ms空载断开多乐I回线多乐侧三相,进行过电压仿真计算,结果见图2和表2。

图,分闸后拍频振荡频率为41 Hz,A、B相电压在分闸后出现了畸变,B相过电压倍数为三相最高,达1.56倍,A、C相过电压倍数分别为1.27和1.03。500 kV多永I回线过压保护动作整定值为1.4倍稳态电压,过压保护跳闸出口延时500 ms,B相过电压已超过保护定值且有一定的持续时间,过压保护动作出口跳闸。

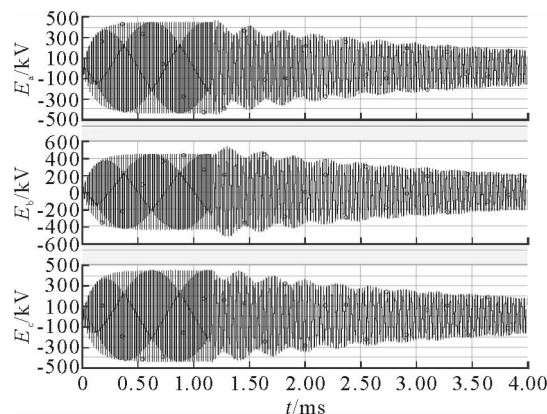


图2 多乐侧三相过电压仿真波形图

Fig. 2 Over-voltage simulation waveform of Duole side

表2 仿真计算与CVT实测结果对比

Table 2 Comparison of the results between simulation and CVT measurement

参数	A相	B相	C相
过电压计算峰值/kV	457.54	525.61	437.57
仿真计算过电压倍数	1.04	1.19	1.00
CVT实测过电压倍数	1.27	1.56	1.03

通过仿真计算,多永I回线多乐侧带高抗空载分闸后,高抗和线路对地电容间产生低于工频的拍频振荡,频率为40.6 Hz。仿真计算与CVT实测结果对比见表2。

由表2可见A、B相过电压仿真计算与CVT实测结果存在较大差异,CVT测量相比仿真计算过电压倍数放大明显。C相仿真和实测的分闸暂态过程电压峰值都与稳态很接近,CVT实测过电压相对仿真计算过电压未出现放大。观察仿真波形,三相电压暂态部分都平滑未发生畸变。

对比500 kV多永I回线空载分闸操作过电压仿真计算与实测结果,除A、B相实测波形发生畸变

且过电压倍数相比仿真计算有放大,暂态过电压总体趋势是相符合的。因 CVT 在低频过电压下发生饱和,导致监测波形发生畸变,过电压监测结果与实际值存在偏差,是产生以上差异的最可能原因。

2 CVT 过电压测量误差分析

2.1 CVT 频率响应特性曲线

500 kV 多乐永丰 I 回路采用的电容式电压互感器型号为 TYD500/ $\sqrt{3}$ -0.005H,出厂时间是 2009 年 3 月,最近一次预防性试验数据正常。在切空线路的过程中系统拍频振荡频率低于工频,在低频振荡下 CVT 的传变特性是否发生变化需进行分析。该型号 CVT 完整等值电路见图 3。

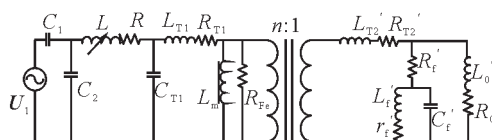


图 3 CVT 完整等值电路图

Fig. 3 Complete equivalent circuit diagram of CVT

图 3 中: U_1 为一次侧线路电压; C_1 、 C_2 为分压电容; C_{T1} 为一次侧线圈的等效杂散电容; L 、 R 为补偿电抗器; L_{T1} 、 R_{T1} 、 L_{T2} 、 R_{T2} 分别为中间变压器的一次侧、二次侧漏感、漏阻; L_m 、 R_{Fe} 为中间变压器的励磁线圈的非线性的电感和铁耗; R_f 、 L_f 、 r_f 、 C_f 组成谐振型阻尼器; L_0 、 R_0 为 CVT 的二次负载^[13-16]。

将该等值电路进行简化后,忽略中间变压器漏抗、阻尼器,并将二次负载等效到一次侧后,简化等值电路情况见图 4。

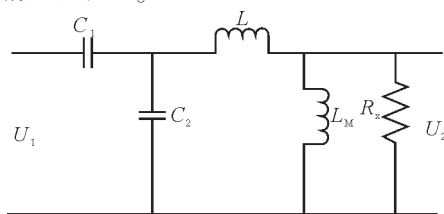


图 4 CVT 简化等值电路图

Fig. 4 Simplified equivalent circuit diagram of CVT

图 4 中: U_1 为一次侧线路电压; U_2 为电磁单元一次侧电压; C_1 、 C_2 为分压电容; L 为补偿电抗器; L_M 为中间变压器励磁电抗; R_x 为等效负载阻抗。

根据简化等值电路,通过 U_2 计算 U_1 可得补偿电抗器 L 上电流 I_L 为

$$I_L = \frac{U_2}{R_x} + \frac{U_2}{j2\pi f L_M} \quad (1)$$

电容器 C_2 上电压 U_{c2} 为

$$U_{c2} = U_2 + \left(\frac{U_2}{R_x} + \frac{U_2}{j2\pi f L_M} \right) \times j2\pi f L \quad (2)$$

电容器 C_2 上电流 I_{c2} 为

$$I_{c2} = \frac{U_{c2}}{-j \frac{1}{2\pi f C_2}} = \frac{U_2 + \left(\frac{U_2}{R_x} + \frac{U_2}{j2\pi f L_M} \right) \times j2\pi f L}{-j \frac{1}{2\pi f C_2}} \quad (3)$$

电容器 C_1 上电流 I_{c1} 为

$$I_{c1} = I_{c2} + I_L = \frac{U_2 + \left(\frac{U_2}{R_x} + \frac{U_2}{j2\pi f L_M} \right) \times j2\pi f L}{-j \frac{1}{2\pi f C_2}} + \frac{U_2}{R_x} + \frac{U_2}{j2\pi f L_M} \quad (4)$$

一次电压 U_1 为

$$U_1 = U_{c1} + U_{c2} = \left(\frac{U_2 + \left(\frac{U_2}{R_x} + \frac{U_2}{j2\pi f L_M} \right) \times j2\pi f L}{-j \frac{1}{2\pi f C_2}} + \frac{U_2}{R_x} + \frac{U_2}{j2\pi f L_M} \right) \times \left(-j \frac{1}{2\pi f C_1} + U_2 + \left(\frac{U_2}{R_x} + \frac{U_2}{j2\pi f L_M} \right) \times j2\pi f L \right) \quad (5)$$

考虑电磁单元的变比为 $P_{\text{电磁单元}}$, 则 CVT 的总体变比为

$$P_{\text{CVT}} = P_{\text{电磁单元}} \times \frac{U_1}{U_2} = P_{\text{电磁单元}} \times \left\{ \left[\frac{1 + \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{j2\pi f L_M} \right) \times j2\pi f L}{-j \frac{1}{2\pi f C_2}} + \frac{1}{R_x} + \frac{1}{j2\pi f L_M} \right] \times \left[-j \frac{1}{2\pi f C_1} + 1 + \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{j2\pi f L_M} \right) \times j2\pi f L \right] \right\} \quad (6)$$

根据最近一次该 CVT 的预防性试验数据,利用式(6)对 CVT 在饱和及未饱和和饱和情况下,总变比 P_{CVT} 随频率的变化特性进行计算,绘制频率响应曲线见图 5。

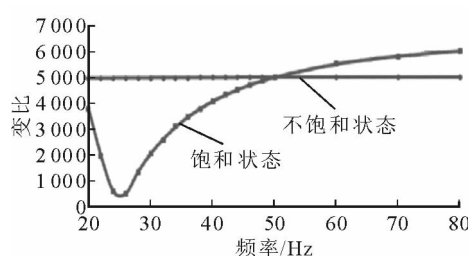


图 5 CVT 频率响应曲线

Fig. 5 Frequency response curve of CVT

由图 5 可看出,在中间变压器不饱和的情况下,CVT 的一次电压与 CVT 电磁单元高压端的传变比在 40 Hz 与 50 Hz 下的变化很小,50 Hz 下 CVT 一次电压与二次电压变比为 4 999.2,40 Hz 下 CVT 一次电压与二次电压变比为 4 995.5。

2.2 CVT 过电压测量偏差分析

根据现有电容式电压互感器技术规范^[17-21],CVT

电磁单元应在 1.5 倍工频相电压峰值下不饱和, 并进行 0.8~1.5 倍额定一次电压下的铁磁谐振试验, 以保证 CVT 在 1.5 倍额定电压下的测量精度。以上要求仅针对工频状态, 对于输电线路来说, 线路开关分合闸操作时产生的暂态过电压, 其振荡频率多是偏离工频的, 在此情况下, CVT 电磁单元及速饱和电抗器将不能保证在 1.5 倍额定电压下不饱和, 变比将发生变化, 使测量值不能真实反映过电压实际值^[22-23]。

将 CVT 饱和后电压测量偏差定义为电压测量值与实际值之比, 则 CVT 饱和后测量偏差分析见表 3。

表 3 CVT饱和和下过电压测量偏差分析
Table 3 Analyses of CVT over-voltage measuring deviation under saturation

频率/Hz	饱和		未饱和	
	变比	测量偏差	变比	测量偏差
20	3 759.67	1.33	4 964.65	1.01
30	2 033.74	2.46	4 987.49	1.00
40	4 060.87	1.23	4 995.50	1.00
50	4 999.23	1.00	4 999.23	1.00
60	5 508.99	0.91	5 001.29	1.00
70	5 816.38	0.86	5 002.55	1.00
80	6 015.90	0.83	5 003.40	1.00

由表 3 可知, 电磁单元饱和后, 工频下 CVT 的一次电压与电磁单元高压端的传变比基本没变化, 但在 40 Hz 下 CVT 的一次电压与 CVT 电磁单元高压端的传变比将会根据饱和程度的不同大幅下降, 在饱和情况 50 Hz 下 CVT 一次电压与二次电压变比仍然为 4 999.2, 但 40 Hz 下 CVT 一次电压与二次电压变比就降低为 4 060.8, 这将使得 CVT 二次绕组测量出 40 Hz 的电压值按额定变比折算后比实际值高出约 1.23 倍。这充分解释了 500 kV 多永 I 回空载分闸时 A、B 相 CVT 暂态过电压测量峰值的变化。

3 过电压实试验验证分析

为验证以上结论, 笔者进行了线路空载分闸操作的现场测试, 测试工况为: 500 kV 多乐永丰 I 回线在断开永丰侧断路器的情况下, 通过多乐侧开关合闸对线路充电, 多永 I 回线空载运行, 然后切除空载线路, 监测整个操作过程线路电压。通过在线路高抗套管末屏串联电容, 构成电容分压回路测量线路三相电压, 采用 LDS 的 Genesis 录波装置记录波形。分别进行两次空载切除线路操作, CVT 和高抗

末屏引出线电容分压回路监测到的波形见图 6、7。

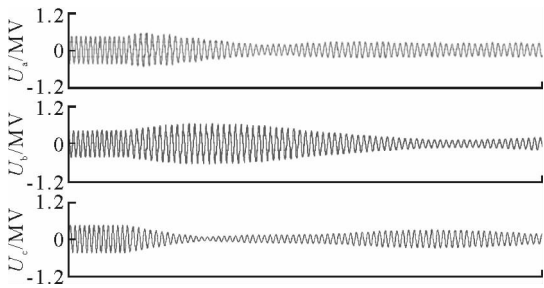


图 6 CVT 测量电压
Fig. 6 Measuring voltage of CVT

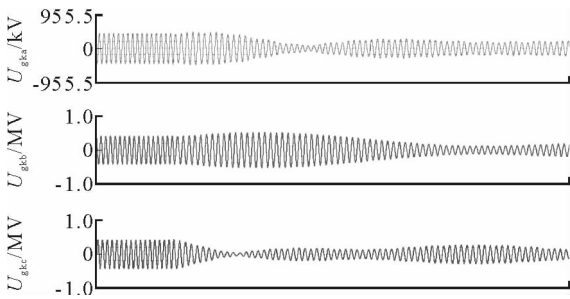


图 7 高抗末屏引出电容分压测量电压
Fig. 7 Measuring voltage of capacitor divider from reactor tapping

根据过电压实测波形, CVT 和高抗串电容分压测量到的多永 I 回线空载分闸三相电压拍频振荡频率一致(约 41 Hz), 但对比图 5、6, CVT 二次侧的输出电压在分闸后出现较明显畸变, B 相波形畸变最显著。两次空载分合闸操作三相过电压峰值测试结果对比见表 4。

表 4 线路空载分闸过电压测试结果对比
Table 4 Comparison of the over-voltage measuring results during no-load opening

操作次数	相别	A相	B相	C相
第 1 次操作	多乐侧高抗末屏/kV	476	543	442
	多乐侧 CVT/kV	535	657	447
	高抗末屏过电压倍数	1.08	1.24	1.01
	CVT过电压倍数	1.22	1.50	1.02
	CVT过电压放大倍数	1.13	1.21	1.01
第 2 次操作	多乐侧高抗末屏/kV	493	559	440
	多乐侧 CVT/kV	569	662	456
	高抗末屏过电压倍数	1.12	1.27	1.00
	CVT过电压倍数	1.30	1.51	1.04
	CVT过电压放大倍数	1.15	1.19	1.04

以高抗末屏串电容分压测量到的电压为基准, A、B 两相由 CVT 二次侧输出的测量电压都存在不同程度的波形畸变及电压放大, 波形畸变最严重的 B 相电压放大最高达 1.21 倍。两次线路空载分闸操

作,过压保护都启动发信但未出口跳闸,是由于未达到保护出口动作时间。

4 结论

1)过电压导致 CVT 饱和,低频振荡破坏 CVT 的谐振工作状态,出现这些工况时 CVT 极可能偏离正常传变特性,导致电压波形畸变,测量电压与实际电压存在较大差异。为避免 CVT 在低频饱和状态下传变特性发生变化对过压保护产生干扰,可考虑在线路过压保护中采用频率闭锁判据,当测量得到的电压频率低于某一定值时,闭锁过压保护,避免因 CVT 测量误差导致的保护动作。

2)带高抗线路空载分闸时由于 CVT 监测到的电压高于实际值导致保护动作出口跳闸,不会给一次设备带来大的影响,主要因为此时断路器已处于分闸状态。

3) 选购超特高压线路电容式电压互感器时,建议考核其电磁单元的频率特性,速饱和电抗器的饱和特性,了解 CVT 在低频饱和状态下的测量偏差范围。

参考文献:

- [1] 姚建光,邹逸云,冯伟,等. 电容式电压互感器的暂态特性及其对微机继电保护装置影响的研究[J]. 高压电器,2009,45(4):34-36.
YAO Jianguang,ZOU Yiyun,FENG Wei,et al. Research on transient characteristics of CVT and corresponding impacts on microchip relay protection[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(4):34-36.
- [2] 何建,余睿,杨漪俊. 电容式电压互感器常见故障及监测[J]. 电力电容器与无功补偿,2009,30(5):38-42.
HE Jian,YU Rui,YANG Yijun. The common faults and its monitoring of CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2009,30(5):38-42.
- [3] 王德忠,王季梅. 电容式电压互感器速饱和电抗型阻尼器的研究[J]. 电工技术学报,2000,15(1):41-46.
WANG Dezhong,WANG Jimei. A study of the protective device with inductor in series resistance for capacitor voltage transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2000,15(1):41-46.
- [4] 李一泉. 电容式电压互感器(CVT)对超(特)高压输电线路保护影响的研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [5] 杨育霞,马朝华,许珉. 电容电压初值对 CVT 铁磁谐振影响的仿真研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):10-13.
YANG Yuxia,MA Chaohua,XU Min. Simulation research on influence of initial capacitor voltage value on CVT ferroresonance[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(4):10-13.
- [6] 刘胜军,霍春燕,何燕,等. 一起 220 kV CVT 二次电压偏高的分析处理[J]. 电力电容器与无功补偿,2013,34(4):69-74.
LIU Shengjun,HUO Chunyan,HE Yan,et al. Analysis and treatment on higher secondary voltage of one 220 kV CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2013,34(4):69-74.
- [7] 张金祥,黄德顺. 浅析电容式电压互感器二次电压偏高现象[J]. 高电压技术,2006,32(1):115-116.
ZHANG Jinxiang,HUANG Deshun. Discussion on higher secondary voltage of capacitance type voltage transformer[J]. High Voltage Engineering,2006,32(1):115-116.
- [8] 王晓辉,赵卫华. 500 kV 电容式电压互感器二次电压异常状况的分析与处理[J]. 上海电力学院学报,2009(1):10-12.
WANG Xiaohui,ZHAO Weihua. The analysis and disposal of 500 kV capacitor voltage transformers secondary voltage abnormality condition[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power,2009(1):10-12.
- [9] 周春雨,郭洁. 隔离开关操作 CVT 引起二次电压异常的分析研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2008,29(10):54-57.
ZHOU Chunyu,GUO Jie. Analysis of the abnormal secondary voltage of CVT caused by disconnect switching[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2008,29(10):54-57.
- [10] 李红斌,刘延冰,叶国雄,等. 电容式电压互感器铁磁谐振的数值仿真[J]. 高压电器,2004,40(2):124-125.
LI Hongbin,LIU Yanbing,YE Guoxiong,et al. Numerical simulation on ferromagnetic resonances of capacitive voltage transformer[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(2):124-125.
- [11] 王丹江,崔志铭,蔡冰冰,等. 合闸时 CVT 分压电容暂态过电压的仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(12):46-51.
WANG Danjiang,CUI Zhiming,CAI Bingbing,et al. Simulation study on transient overvoltage of dividing capacitance of CVT at closing operation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2014,35(12):46-51.
- [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] 蔡汉生,胡玉峰,史丹,等. 龙滩电站送出工程调试过电压问题计算和分析[J]. 南方电网技术,2008,2(2):67-81.
CAI Hansheng,HU Yufeng,SHI Dan,et al. Analysis on and calculation of debugging over-voltage issue on longtan

- power output project[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 67-81.
- [14] 邓万婷. 某 500 kV 线路电容式电压互感器二次回路铁磁谐振分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(1): 63-65.
- DENG Wanting. Secondary circuits ferro resonance analysis of 500 kV line capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(1): 63-65.
- [15] DL 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 1997.
- DL 620—1997 Over voltage protection and insulation coordination for AC electrical installations[S]. 1997.
- [16] 李顺尧, 万四维. 220 kV CVT 不拆线试验时电容值误差分析与计算[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 468-469.
- LI Shunyao, WAN Siwei. Analysis and calculation of the capacitance inaccuracy in the test of 220 kV CVT without disconnecting wire[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 468-469.
- [17] GB/T 20840.5—2013 互感器 第 5 部分: 电容式电压互感器的补充技术要求[S]. 2013.
- [18] 熊小伏, 周家启, 周永忠, 等. 电容式电压互感器暂态误差的数字校正方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 154-158.
- XIONG Xiaofu, ZHOU Jiaqi, ZHOU Yongzhong, et al. Digital revision method on transient error of capacitive voltage transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 154-158.
- [19] 许 明, 高厚磊, 邹贵彬, 等. 基于积分等值变换的电容式电压互感器暂态误差校正方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 71-76.
- XU Ming, GAO Houlei, ZOU Guibin, et al. An integral equivalent transformation based method for capacitor voltage transformer (CVT) transient error correction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 71-76.
- [20] 苏凤飞, 高 鹏, 周 浩. 几种电压互感器典型故障类型分析[J]. 陕西电力, 2014, 42(1): 65-68.
- SU Fengfei, GAO Peng, ZHOU Hao. Analysis on several fault types of potential transformer[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(1): 65-68.
- [21] 刘桂林. 空投变压器时线路距离 I 段保护误动原因分析及对策[J]. 陕西电力, 2013, 41(8): 60-63.
- LIU Guilin. Cause analysis on line distance zone I protection maloperation in transformer no-load operation and its countermeasures[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(8): 60-63.
- [22] 洪乐洲, 吴贻志, 李靖翔, 等. 电容式电压互感器二次电压异常分析处理[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(3): 73-76.
- HONG Lezhou, WU Yizhi, LI Jingxiang, et al. Analysis and treatment on abnormal secondary voltage of capacitor voltage transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(3): 73-76.
- [23] 罗苏南, 南振乐. 基于电容分压的电子式电压互感器的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 7-8.
- LUO Sunan, NAN Zhenle. Research on electronic voltage transformer based on capacitive voltage divider[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(10): 7-8.
- 黄 然(1986—), 女, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为电力设备外绝缘、电力系统过电压。

(编辑 吴俊丽)