

# 电容式电压互感器暂态特性校验

杨刚<sup>1</sup> 冉子凤<sup>1</sup>, 文艺<sup>2</sup> 闫正<sup>3</sup> 李建明<sup>3</sup>

(1. 国网广元供电公司, 四川 广元 628000; 2. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039;  
3. 国网成都供电公司, 四川 成都 611130; 4. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 当电力系统中存在雷击或在操作过程时, 其高频暂态过电压会以静电感应和电磁耦合的方式从高压系统传递到低压系统, 这会给二次系统的测量、保护以及其他二次设备的运行造成严重的影响。在电容式电压互感器(CVT)暂态过电压传递特性试验研究和仿真模拟研究的基础上, 对高频过电压在 CVT 中的传递做了校验和分析, 并对传递特性试验和仿真过程遇到的问题做出了归纳总结, 可为过电压在线监测等工作提供借鉴。

**关键词:** 暂态过电压; 电磁耦合; 电容式电压互感器; 传递特性

**Abstract:** The high-frequency transient overvoltage will be propagated from the primary side to the secondary side by the effect of electrostatic induction and electromagnetic coupling usually, when the lightning stroke or the circuit breaker switching occurs in power system, which has a serious influence on the operation of monitoring, protection and other secondary equipment in the secondary system. Based on the test and the simulation for transfer characteristic of transient overvoltage in capacitor voltage transformer (CVT), the calibration and analysis for the transfer characteristic of high-frequency overvoltage in CVT are carried out. Finally, the questions during the research of transfer characteristic are summarized, which could provide a reference to overvoltage measurement such as online monitoring.

**Key words:** transient overvoltage; electromagnetic coupling; capacitor voltage transformer; transfer characteristic

中图分类号: TM866 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0087-04

在进行电力系统暂态过电压在线监测时, 电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)不仅是过电压分压系统的主要组成设备, 也是一次系统和二次系统之间的联接单元, 其暂态特性的响应情况对整个监测系统的测量精确度和可靠性有重要影响。由于 CVT 电磁单元中含有电感、电容等储能元件、铁芯等非线性元件以及高频时杂散电容的存在, 当一次系统中发生雷击或在操作过程时, 产生的暂态过电压通过静电感应和电磁感应作用从 CVT 的高压侧传递到低压侧, 并伴随有剧烈的高频振荡过程<sup>[1]</sup>。高频状态与工频状态相比, 高压侧暂态过电压通过电压互感器后的输出电压存在较大差别, 也就是低压侧的电压波形会发生失真现象。所以, 有必要对 CVT 暂态过电压的暂态特性的响应进行研究。

## 1 CVT 的过电压传递特性

CVT 在正常工作时, 经电容分压单元分压后得到的中压输入电磁单元的一次侧, 其二次侧电压为

一次侧电压按一定变比降低的同频率电压, 电磁单元基本工作原理与变压器相似, 因此, 可以通过对单相变压器绕组波过程理论的分析, 得到 CVT 电磁单元在冲击电压作用下线圈中过电压的传播特性。暂态过电压传播主要包括静电感应、电磁感应和自由振荡 3 个过程<sup>[2]</sup>, 一般情况下, 这 3 个过程不是同时发生同时消失的, 但总是以某一种过程为主。

### 1.1 静电感应过程

电压互感器暂态过电压的静电感应过程是一种电容传递方式, 是由于互感器存在绕组匝间、层间电容和对地电容, 暂态过电压通过这些电容以静电传递的方式耦合到互感器的二次侧。静电感应电压为瞬间形成, 它主要取决于互感器的结构和线圈的布置, 是互感器绕组中的初始电压分布。冲击电压作用下, 互感器电感中的电流不能突变, 相当于是断开的。因而整个电压互感器的等值电路可以简化为一个电容链。假定电容参数沿线圈均匀分布, 冲击过电压入侵互感器绕组的电容耦合电路如图 1 所示。图 1 中,  $C_1$ 、 $C_2$  为一、二次绕组的对地电容;  $K_1$ 、 $K_2$  为

一、二次绕组的纵向电容;  $C_{12}$  为一、二次绕组之间的电容。

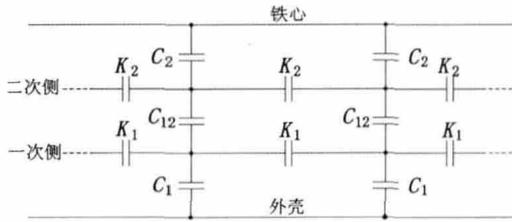


图1 绕组静电感简化等值电路

### 1.2 电磁感应过程

在不考虑互感器内部杂散电容时,CVT 可以看作是理想的变压器。流过线圈绕组的电流会产生磁通,并在别的绕组中感应出电压,因而电磁感应电压与绕组间的变比有关,代表着电压互感器中的最终电压分布。由于流过线圈电感的电流不会突变,铁芯存在磁迟滞效应,故二次侧电磁感应电压不能突变,滞后于一次侧电压信号。在冲击电压作用下,铁芯呈高阻态损耗会很大,所以一、二次侧电磁感应电压并不是与变比成正比关系的,该过程主要取决于互感器的匝数比、漏电感和负载阻抗<sup>[3]</sup>。变压器电磁感应过程传统集中参数模型如图2所示。

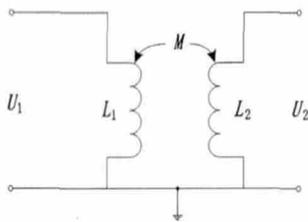


图2 电磁感应过程集中参数等值电路

图2中, $U_1$ 、 $U_2$  分别为一、二次侧电压; $L_1$ 、 $L_2$  分别为一、二次侧线圈绕组自感; $M$  为一、二次侧绕组间的互感。

### 1.3 自由振荡过程

在冲击电压作用下的 CVT,电磁单元初始电压和稳态电压分布不同,一次侧线圈中将产生自由振荡,该自由振荡过程会感应到二次侧当中,在二次侧产生自由振荡电压。此时,整个电磁部分可等效为电阻、电感、电容的串并联电路。故二次侧输出电压在初始电压和稳态电压之间会出现一个振荡过渡过程,且初始电压分布和稳态电压分布相差越大,振荡就越厉害。一、二次侧自由振荡电压的传递特性主要跟一、二次侧绕组对地电容和绕组的自电感组成的振荡回路有关<sup>[4,5]</sup>。

## 2 暂态过电压试验研究

本次试验施加不同的冲击电压在电容式电压互感器上,并在高压侧和低压侧并接不同阻值的电阻,再通过示波器记录的高、低压侧电压波形来分析不同冲击电压下 CVT 的暂态特性响应状况。

### 2.1 试验原理

试验冲击电压应施加在 CVT 的高压端子与地之间。试验前,标准互感器的低压端子、电容式电压互感器的低压端子、各二次绕组的一个端子和底座均应可靠接地,高、低压侧波形记录仪采用 Tek DPO 7054 示波器,整个试验原理如图3所示。

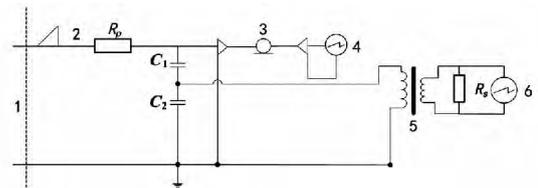


图3 暂态过电压试验原理图

图3中,1为冲击电压发生器;2为引线;3为同轴电缆;5为电磁单元;4、6为示波器; $R_p$ 为阻尼电阻; $C_1$ 为电容分压器高压臂; $C_2$ 为电容分压器低压臂; $R_s$ 为负载电阻。

本次试验用设备主要包括:冲击电压发生器、标准电压互感器、电容式电压互感器、泰克示波器等。ZDI300冲击接地阻抗测试仪提供所需冲击电压,该装置能够提供最高2.0 kV的冲击电压,波前时间为0.5~10  $\mu$ s;选用110 kV和220 kV两种等级 CVT 进行检测;示波器为泰克示波器 Tektronix DPO 7054,该装置采样率最高可达上百兆,并能同时精确记录4个通道的波形。

### 2.2 试验波形图及结果分析

试验中,先后用冲击电压发生器产生波头时间为1.4  $\mu$ s,幅值为1 kV和500 V的冲击电压输入电容式电压互感器的高压侧,并分别在电压互感器的高压侧和低压侧并联不同阻值的调压电阻(高压侧为 $R_p$ ,低压侧为 $R_s$ )。再用 Tek 示波器同时记录电压互感器高、低压侧的电压波形。示波器记录的过电压响应波形数据见表1。如图4为220 kV CVT 在 $U_0 = 1$  kV冲击电压作用下高压侧电压波形和低压侧响应的电压波形;图5为110 kV CVT 在500 V冲击电压作用下高压侧电压波形和低压侧响应的电

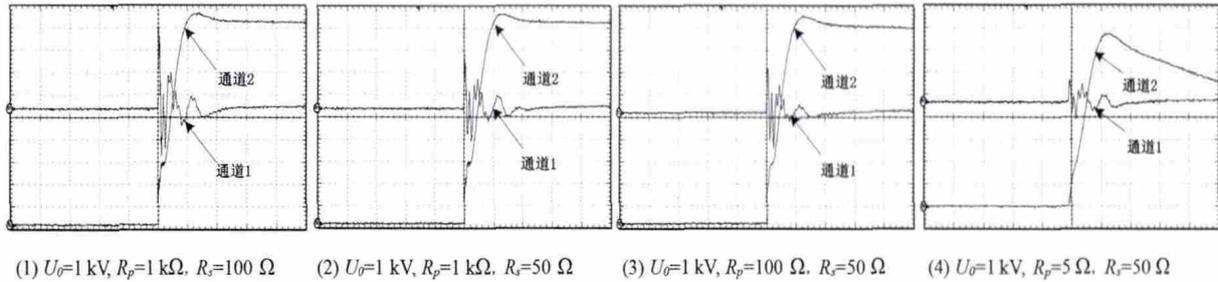


图4 1 kV冲击电压下220 kV CVT高、低压侧电压实测波形

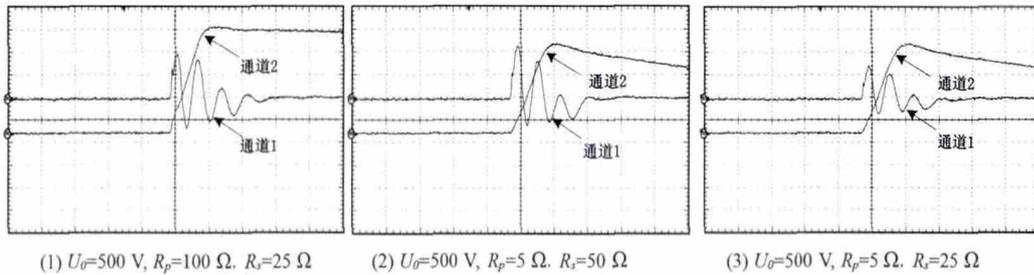


图5 500 V冲击电压下110 kV CVT高、低压侧电压实测波形

表1 暂态过电压响应波形数据记录

电压等级 /kV	原边 电阻 $R_p$	副边 电阻 $R_s/\Omega$	冲击电压 $U_0$							
			1 kV				500 V			
			$U_p/V$	$U_s/V$	$T_{fp}/\mu s$	$T_{fs}/\mu s$	$U_p/V$	$U_s/V$	$T_{fp}/\mu s$	$T_{fs}/\mu s$
220	1 kΩ	100	955	11.7	3.88	65.1	491	3.38	4.08	0.169
	1 kΩ	50	951	7.34	3.88	78.5	490	2.21	4.03	0.37
	100 Ω	50	941	5.93	3.82	87.9	476	1.88	4.03	0.37
	5 Ω	50	779	3.1	3.45	84.3	412	0.94	3.18	0.014
110	100 Ω	25	948	16.7	3.85	0.14	481	6.0	3.91	0.523
	5 Ω	50	783	18.6	3.36	0.16	411	7.02	3.15	0.505
	5 Ω	25	783	13.7	3.29	0.17	411	4.49	3.11	0.537

压波形。图中通道1记录低压侧响应电压波形,通道2记录高压侧电压波形。

从图4、图5的波形记录结果以及表1中数据可以看出,冲击电压经过CVT的转换后波形出现了失真,高压侧电压波形因受引线电感和并联电阻的影响出现了幅值降低和延迟的现象。低压侧响应电压信号与高压侧冲击电压信号同时出现,极性相同;当冲击电压参数和副边电阻 $R_s$ 一定时, $R_p$ 越大, $U_p$ 就越大,波前时间 $T_{fp}$ 亦越长,低压侧输出电压波形振荡变得更剧烈;当冲击电压参数和原边电阻 $R_p$ 一定时, $R_s$ 越大, $U_s$ 就越大,波前时间 $T_{fs}$ 反而越短,但几乎不影响高压侧电压的幅值 $U_p$ 和波前时间 $T_{fp}$ 的大小;在冲击电压和调压电阻相同时,两种不同电压等级的CVT对高压端电压信号的作用不明显,110 kV的CVT的低压侧响应电压幅值 $U_s$ 和波头时间 $T_{fs}$ 均较220 kV大;稳态时,上述各图 $U_p$ 与低压侧输出稳态电压值是按照CVT的额定变比传递的。

### 3 仿真模拟实验

#### 3.1 CVT的等值电路

为模拟CVT的暂态过电压响应情况,建立了如图6所示的等值电路图,图中包括一个分压单元即高、低压电容串联组成的电容分压器;一个电磁单元,由补偿装置、一次侧和二次侧绕组、理想变压器、励磁支路、谐振抑制支路等组成<sup>[6,7]</sup>。 $U$ 为冲击电压; $C_1$ 、 $C_2$ 分别为分压器的高压分压电容和低压分压电容; $C_{10}$ 、 $C_{20}$ 分别为一、二次绕组对地电容; $C_{11}$ 、 $C_{22}$ 分别为一、二次绕组纵向电容; $C_c$ 为分压单元与电磁单元间的耦合电容; $R_1$ 为CVT一次绕组电阻和补偿装置电阻以及电容器等值电阻之和; $L_1$ 为CVT一次绕组漏感和补偿装置电感之和; $R_m$ 、 $L_m$ 分别为CVT电磁单元励磁电阻和励磁电感; $R_2$ 、 $L_2$ 分别为CVT二次绕组电阻和漏感; $R_f$ 为阻尼电阻; $C_f$ 为谐振电容; $r_f$ 、 $L_f$ 为谐振电抗器的直流电阻和电

感;  $Z_b$  为负载电阻<sup>[8]</sup>。

### 3.2 仿真实验结果

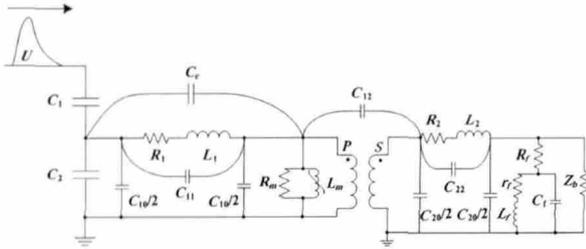


图6 电容式电压互感器(CVT)等值电路图

根据图6 建立基于 ATPDraw 的 CVT 暂态过电压响应仿真电路模型 通过在一次侧和二次侧并联如同实际试验时的不同阻值调压电阻 并记录高、低压侧的电压波形。其仿真电压波形图如图7、图8 所示。

通过对 220 kV 和 110 kV CVT 在幅值为 1 kV 和 500 V 冲击电压作用下的暂态响应特性的仿真 可以

看出图7 和图8 的仿真结果与实测结果基本一致。仿真响应结果中没有出现现象实测结果中那样强烈的振荡过程 这是因为 CVT 中暂态过电压传递时 振荡的形成主要是由于 CVT 的电磁单元中绕组存在对地电容和自感 加之补偿装置等部件以及一些分布参数造成的 振荡过程是一个及其复杂的过程 其传递取决于所有元件的杂散特性。

## 4 试验总结及结论

对 CVT 暂态过电压的传递特性进行了试验和仿真分析 试验过程中遇到了一些问题 现就相关问题做出了归纳总结 以期今后对暂态过电压在 CVT 的暂态特性校验提供参考。

### 1) 冲击电压在电磁单元中的传递过程由静电感

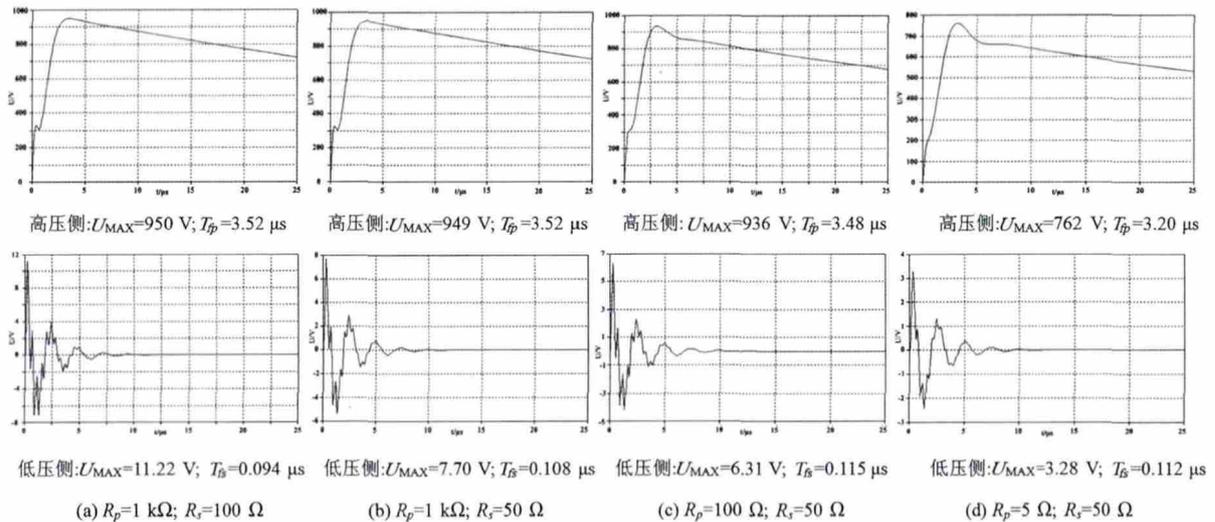


图7 1 kV 冲击电压下 220 kV CVT 高、低压侧电压仿真波形

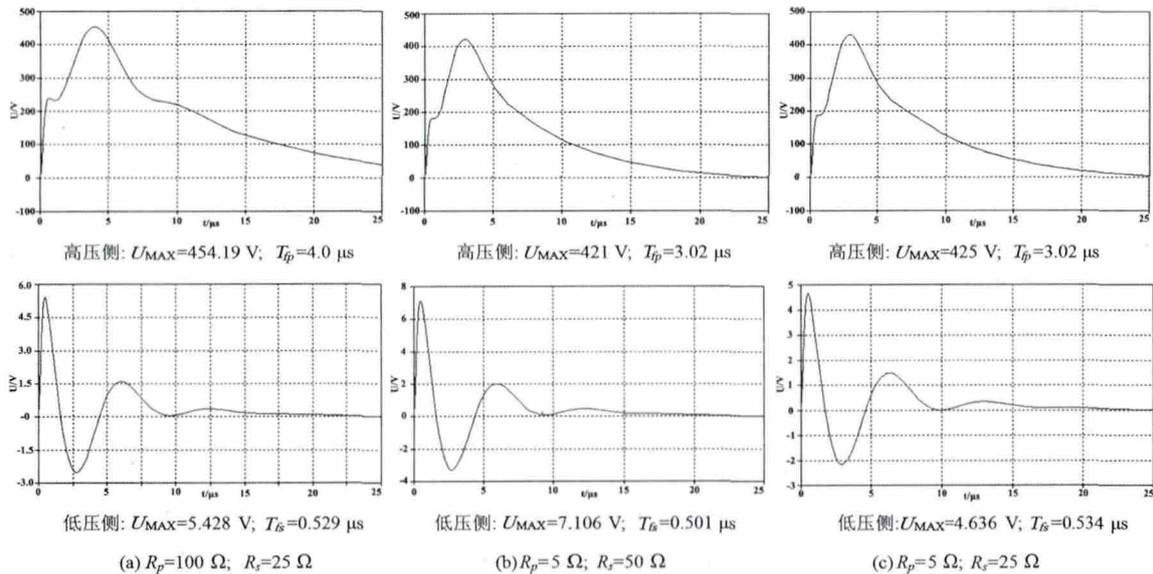


图8 500 V 冲击电压下 110 kV CVT 高、低压侧电压仿真波形

应、电磁感应和自由振荡 3 个过程组成 所以冲击电压通过 CVT 的隔离变换后 低压侧波形出现了失真 暂态过电压在 CVT 中并不是按其额定变比来传递的。

2) 低压侧输出地电压信号与高压侧冲击电压信号几乎同时出现 极性相同。实测结果表明 高压侧电压幅值与低压侧输出的稳态电压值是按照 CVT 的额定变比传递的。

3) 当冲击电压参数和副边电阻一定时 原边电阻越大, 高压侧电压幅值就越大, 波前时间亦越长, 低压侧响应电压波形振荡越剧烈; 当冲击电压参数和原边电阻一定时, 副边电阻越大, 低压侧响应电压幅值就越大, 波前时间反而越短, 但对高压侧电压的幅值和波前时间几乎不影响。

虽然, CVT 不能完整地传变高频暂态信号, 但低压侧响应波形波头部分的特性与一次侧是一致的。在合理配置 CVT 电路参数的情况下, 依然能够使低压侧响应波形满足相关标准的要求, 并运用于暂态过电压的在线监测中。

#### 参考文献

[1] 郭克勤, 刘翔, 陈鹏, 等. 电容式电压互感器传递过电

(上接第 69 页)

由计算结果可知, 由于紧凑型线路减小了交流三相线路对直流线路电磁耦合影响的不平衡, 交流紧凑型线路要比常规线路对特高压直流线路的电磁影响明显减小。

## 5 结 论

(1) 交/直流平行架设后, 特高压直流线路电压、电流中的工频分量明显增加。超高压交流线路会在平行架设特高压直流线路产生工频感应电压、电流。特高压直流线路换流变压器阀侧产生直流偏磁电流。

(2) 特高压直流线路工频感应电压、电流和换流变压器阀侧直流偏磁电流随着交/直流线路平行架设长度的增加而增大, 两者基本呈线性关系; 随着交/直流线路接近距离的增加而减小, 呈非线性关系。

(3) 并行段土壤电阻率和杆塔接地电阻对特高压直流线路工频感应电压、电流以及直流偏磁电流的影响很小。

(4) 对平行段特高压直流线路的电磁影响, 超高压交流紧凑型线路比常规线路明显减小。

#### 参考文献

[1] 陆国庆, 何宏明, 张军. 交直流输电线路相邻架设或共

压试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(4): 25-28.

[2] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.  
[3] Martinez, J. A; Walling, R; Mork, B. A, et al. Parameter Determination for Modeling System Transients - Part III: Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2051-2062.  
[4] 姚晓健, 蔡祖安, 陈红. 电容式电压互感器的高频暂态特性仿真分析[J]. 湖南电力, 2011, 31(2): 13-16.  
[5] 曾祥君, 刘正谊, 屈明志, 等. 互感器暂态行波传输特性仿真分析与实验测试[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2004, 1(1): 71-75.  
[6] 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.  
[7] Hassan Khorashadi Zadeh, Zuyi Li. A Compensation Scheme for CVT Transient Effects Using Artificial Neural Network [J]. Electric Power Systems Research, 2008(78): 30-38.  
[8] D. Fernandes Jr, W. L. A. Neves, J. C. A. Vasconcelos. Coupling Capacitor Voltage Transformer: A Model for Electromagnetic Transient Studies [J]. Electric Power Systems Research, 2007(77): 125-134.

(收稿日期: 2013-09-27)

用走廊的探讨[J]. 高电压技术, 1997, 23(4): 68-70.

[2] 黎小林, 黄琦, 唐剑, 等. 交流线路对邻近并行直流线路影响[C]. 中国电机工程学会 2006 无线电干扰和变电站电磁兼容研讨会 2006.  
[3] 周沛洪, 修木洪, 聂定珍. 同廊道架设交直流线路的相互影响[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 5-9.  
[4] 马为民. 换流变压器中直流偏磁电流的计算[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 48-49.  
[5] 赵松涛. 交流输电线路对并行直流输电线路电磁感应的仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006: 1-2.  
[6] ±800 kV 直流输电技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.  
[7] Tiebing Lu, Songtao Zhaoxiang Cui. Simulation of Electromagnetic Induction on DC Transmission Lines from Parallel AC Transmission Lines [C]. Electromagnetic Compatibility 2007: 114-117.  
[8] E. V. Larsen, R. A. Walling, C. J. Bridenbaugh. Parallel AC/DC Transmission Lines Steady-state Induction Issues. [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 667-673.  
[9] 曾嵘, 唐剑, 张波, 等. 交直流输电线路并行对换流变直流偏磁影响及对策[J]. 陕西电力, 2008, 36(9): 1-5.  
[10] 王琦, 曾嵘, 唐剑, 罗百. 交流线路对云广 ±800 kV 直流电磁干扰研究[J]. 南方电网技术 2007, 3(1): 27-31.  
[11] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

(收稿日期: 2013-07-01)