

# 35kV 母线 CVT 高压侧熔断器异常爆裂原因及解决方案研究

唐朝<sup>1</sup>, 彭勤裕<sup>2</sup>, 焦肃山<sup>3</sup>, 宋小卫<sup>4</sup>, 汤建中<sup>5</sup>, 丁然<sup>1</sup>, 卢继平<sup>1</sup>

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 天水超高压输变电公司, 甘肃 天水 741000; 3. 平凉供电公司, 甘肃 平凉 744000; 4. 西北电网有限公司兰州建设公司, 甘肃 兰州 730000; 5. 天水供电公司, 甘肃 天水 741000)

**摘要:** 为了解决甘肃天水电网 35kV 侧母线 CVT 在电力电容器合闸时, 其高压侧熔断器发生异常爆裂的事故, 通过对电力电容器合闸过电压的 Matlab 仿真分析, 得到了引起该事故的原因。电力电容器合闸过程产生的过电压激发 CVT 中间变压器铁芯饱和, 进而引发 CVT 内部非线性电感和电容铁磁谐振, 产生谐振过电流, 使熔断器发生爆裂。针对这一原因, 文中从限制电力电容器合闸过电压和对 CVT 消谐两个方面提出了解决方案。仿真验证这些方案具有可行性。

**关键词:** CVT; 过电压; 铁磁谐振; 阻尼器; Matlab 仿真

## Research on the reason of the 35 kV bus CVT high-voltage side fuse abnormal bursting and the solution scheme

TANG Chao<sup>1</sup>, PENG Qin-yu<sup>2</sup>, JIAO Su-shan<sup>3</sup>, SONG Xiao-wei<sup>4</sup>, TANG Jian-zhong<sup>5</sup>, DING Ran<sup>1</sup>, LU Ji-ping<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2. Extra High Voltage Transmission and Distribution Company of Tianshui, Tianshui 741000, China; 3. Pingliang Electric Power Supply Company, Pingliang 744000, China; 4. Lanzhou Construction Company, Northwest Power Grid Company Limited, Lanzhou 730000, China; 5. Tianshui Electric Power Supply Company, Tianshui 741000, China)

**Abstract:** The fuse fixed on the high-voltage side of CVT that measures the 35kV bus voltage burst when closing the capacitors in Tianshui power network. Through using Matlab simulation to analyze the over-voltage when closing capacitors, the reason for this accident is gained. The over-voltage which is produced by closing capacitors inspires the transformer core saturation that triggers the nonlinear inductances and capacitances in CVT ferro resonance. Then over-current is produced that leads to burst in the fuse. For this reason, this paper brings forward the solutions from restricting the over-voltage in closing capacitors and eliminating resonance for CVT. Simulation verifies that these schemes are feasible.

**Key words:** CVT; over-voltage; ferro resonance; damper; Matlab simulation

中图分类号: TM451 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)20-0086-05

## 0 引言

随着电网输电电压等级的提高, 对其电压的测量如果仍然采用电磁式电压互感器, 则它的体积会变大, 成本相应地提高<sup>[1]</sup>。为了解决这一问题, 我国 35~500 kV 广泛采用电容式电压互感器 (CVT) 对电压进行测量<sup>[2]</sup>。但实际运行中, 在系统过渡过程 (如: 投切线路、投入或退出某些设备等) 常常由于其自身的结构和工作特点, 发生事故。在甘肃天水陇西 330 变电站中, 对 35 kV 母线电压测量的 CVT, 在系统投运电力电容器进行无功补偿时, 其高压侧熔断器发生爆裂现象, 严重影响系统的安全稳定运行。

笔者从 CVT 自身的工作特性出发, 探讨了由系统过渡过程的过电压所引发 CVT 内部铁磁谐振, 而导致其熔断器爆裂。并利用具有强大的数值运算能力的工具软件 Matlab, 仿真计算得到在不同情况下, 投入电力电容器时, CVT 上电压的波形。以此来形象地观察过电压的情况, 便于有针对性的提出限制电力电容器合闸过电压与 CVT 加设阻尼器相结合的解决方案。

## 1 CVT 工作特性

电容式电压互感器采用的原理是利用电容串联分压来实现电压之间的转换, 根据其具体的结构, 得到工作原理图。

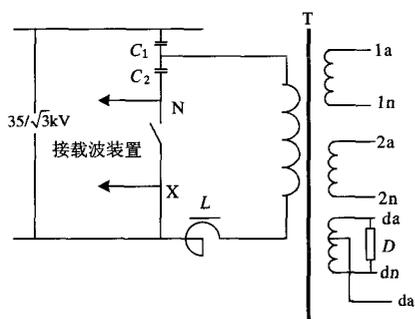


图1 CVT原理接线

Fig.1 CVT principle connection

图1中 $C_1$ 、 $C_2$ 为分压电容； $L$ 为补偿电感； $N$ 与 $X$ 间接电力线载波通信装置； $T$ 为中间电压互感器； $D$ 为阻尼电阻； $1a-1n$ 、 $2a-2n$ 、 $da-dn$ 为二次绕组部分。其工作原理描述为：来自电网的一次侧电压通过分压电容将系统一次电压降到 $5\sim 15$  kV，作为中间电压互感器的输入，这时中间电压互感器的绝缘要求可大大降低。额定状态下，中间电压互感器工作在其磁化特性的线性段，输出 $100/\sqrt{3}$  V的电压，供保护和测量仪器使用。由图1分析，可得到分压后的电压的表达式为：

$$\dot{U}_{C2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \dot{U}_1 \quad (1)$$

式中： $\dot{U}_1$ 为待测电压， $\dot{U}_{C2}$ 为分压电容 $C_2$ 上的电压，当 $\dot{U}_1$ 短路时。从 $C_2$ 侧看过去等值容抗为：

$$X_C = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)} \quad (2)$$

式中： $X_C$ 即是 $C_1$ 与 $C_2$ 并联后的等效容抗。为了分析问题方便，结合线路和变压器的等值模型的相关知识，可以得到等值电路图<sup>[3]</sup>。

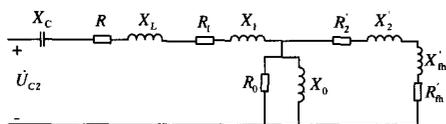


图2 电容式电压互感器的等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of CVT

图2中 $R$ 和 $X_L$ 表示补偿电抗的阻抗； $R_1$ 和 $X_1$ 表示中间变压器一次侧漏阻抗； $R_0$ 和 $X_0$ 表示中间变压器的激磁阻抗； $R_2$ 和 $X_2$ 表示中间变压器二次侧漏阻抗规算到一次侧的值； $R_{th}$ 和 $X'_{th}$ 表示二次侧负荷规算到一次侧的值。由于 $\dot{U}_{C2}$ 与一次电压 $\dot{U}_1$ 成

比例变化，故可以测出相电压，当 $C_2$ 两端与负荷接通时， $C_1$ 、 $C_2$ 上有内阻抗压降，使得 $\dot{U}_{C2}$ 小于电容分压值，造成误差。为解决这一问题，获得理想的电压源，在网络中串入补偿电抗 $L$ ，于是可以得到工频内阻抗（将中间变压器看成是理想变压器）：

$$Z_i = j\omega L + \frac{1}{j\omega(C_1 + C_2)} \quad (3)$$

当 $\omega L = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)}$ 时，输出电压与负荷无关。

实际运行时，感抗和容抗不可能完全相等，造成一定的幅值和相角的误差。

## 2 事故原因研究

### 2.1 电力电容器合闸过电压理论分析

为了分析由于过电压所引起的CVT中间变压器的铁芯饱和，首先要知道过电压的产生原因，结合本起事故，主要考虑电力电容器在合闸过程中所引起的过电压。

#### 2.1.1 三相同期合闸过电压

当三相电源都接通时，即合闸过程同期时，由于此时两中性点电位相同，可转换为单相的情况考虑。

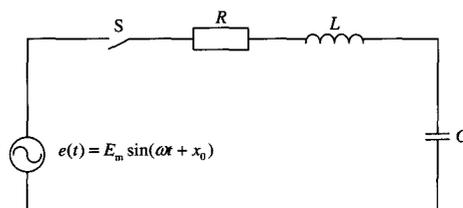


图3 电力电容器单相连接电路

Fig.3 Single-phase connect circuit of capacitor

图3中电网的单相为一等效的电源 $e(t)$ ， $R$ 、 $L$ 为连接电容器组的等效阻抗， $C$ 为电力电容器的电容。由电路原理相关知识，列写微分方程如下：

$$u_C(t) + RC \frac{du_C(t)}{dt} + LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} = e(t) \quad (4)$$

解这个微分方程，可以得到电容器两端电压的响应为：

$$u_C(t) = U_{Cm} \cos \omega t + U_{Cm} e^{-\tau t} \cos \omega_0 t \quad (5)$$

式(5)中： $u_C(t)$ 为电容器电压响应， $U_{Cm}$ 为电容器正常运行电压的最大值， $\omega$ 为工频角频率， $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ 为自振角频率， $\tau = R/2L$ 为衰减常数， $t$ 为响应时间。前面一项为稳态分量，后面一项为暂态分量，如果衰减常数 $\tau = 0$ 时， $u_C(t)$ 出现最大值为 $2U_{Cm}$ <sup>[4]</sup>。

### 2.1.2 三相合闸不同期时的过电压

通常，在投运电力电容器时，要做到三相同期合闸是较为困难的，因而形成了三相电路的瞬时不对称，由于这种不对称现象的出现会使个别相在合闸时承受较高的电压，此外由于三相之间存在互感及电容的耦合作用，在未合闸相上感应出与已合闸相极性相同的电压，待该相合闸时可能会出现反极性合闸的情况，以致产生高幅值过电压。

由于影响上面此类过电压的因素较为复杂，单纯用数学表达式来说明，因计算量相当大，要简化很多东西导致误差过大，所以不再推其具体的数学表达式。为了能够了解这些过电压的情况，将利用工具软件 Matlab 搭建仿真模型分析其现象。

### 2.2 电力电容器合闸过电压的仿真分析

上面提到过电力电容器合闸过电压的产生机理。但是，在实际求解过程中，人工计算将会消耗大量的时间且要忽略很多地方，准确度不高。由于工具软件 Matlab 具有强大的数值计算和处理能力，且其中的电力电子建模和仿真工具箱，包含了多种电力系统装置的模块，有良好的人机交互能力，利用它来分析电力电容器来分析合闸过电压具有良好的效果。

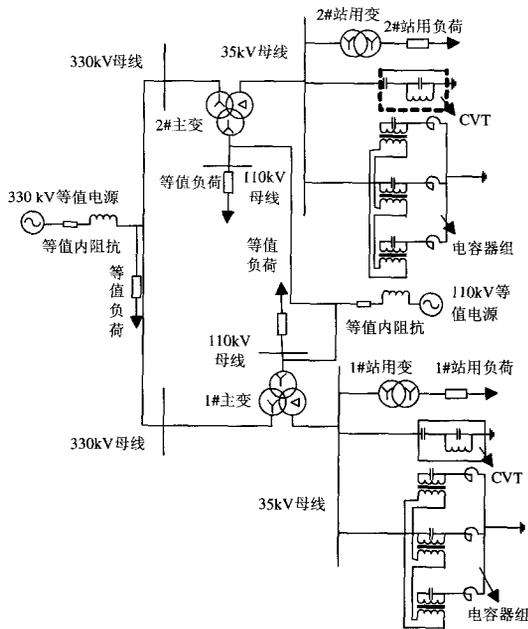


图 4 陇西 330 变电站一次系统简化接线

Fig.4 Simplified wiring for Longxi 330 transformer station

根据图 4 的接线图，结合实际运行中各元件和负荷的相关参数，通过 Matlab 仿真，分别设置电力电容器三相的同期合闸时间为 0.046 s；不同期合闸时设置电力电容器 A、B 相在 0.041 s 时合闸，C 相

于 0.046 s 时合闸；分别得到在各自条件下 CVT 上一次侧的电压的相对地波形（其中稳态最大值为： $35\sqrt{2}/\sqrt{3} \text{ kV} \approx 2.8573 \times 10^4 \text{ V}$ ）。

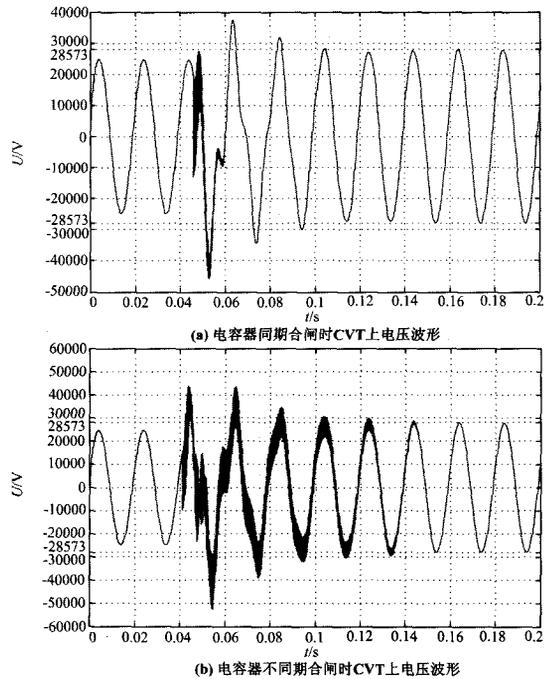


图 5 电容器不同合闸条件下 CVT 一次侧上的电压  
Fig.5 The voltage for the CVT's first side under different closing capacitor conditions

从图 5 可以看出，电力电容器在不同合闸情况下，都将在 CVT 上产生过电压，这些情况都有可能激发 CVT 中间变压器铁芯达到饱和。其中，不同期合闸时，影响较大，情况更为严重。

### 2.3 CVT 铁磁谐振分析

在 CVT 中间变压器达到饱和后，激磁电抗减小，将激发稳定的电容和电感谐振，回路阻抗减小，形成很大的谐振电流，使该电容式电压互感器上的熔断器爆裂。此时由于该电容式电压互感器的铁芯已经达到饱和，激磁电抗相对较小，不能够忽略激磁电流的影响。根据图 2 得到考虑励磁阻抗后 CVT 的等值电路，为方便起见，中间变压器采用  $\Gamma$  型模型进行等效。

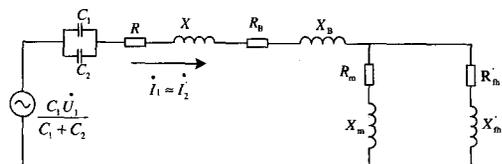


图 6 考虑励磁阻抗的 CVT 等值电路

Fig.6 Equivalent circuit of CVT considering the field excitation impedance

图 6 中,  $R_B$ ,  $X_B$  表示中间变压器的等值漏阻抗,  $R_m$ ,  $X_m$  表示中间变压器的励磁阻抗。此时回路中有可能出现  $X + X_B + X_m$  接近等效电容的容抗  $X_C$  的情况。由于  $X_m \ll X'_m$ , 在不考虑回路电阻的情况下, 该电路构成了一个串联谐振的情况。由于合闸操作可以带来各高次谐波以及分频谐波, 有可能产生多次或者分频的铁磁谐振, 回路中的总阻抗减小, 该电容式电压互感器的一次侧电流可近似表示为:

$$i_1 \approx i_2 \approx \frac{C_1 \dot{U}_1}{R + R_B + R_m} (C_1 + C_2) \quad (6)$$

由于回路中的各个电阻的值均比较小, 故将产生较大的谐振电流通过 CVT 高压侧的熔断器而使其熔断。

#### 2.4 CVT 高压侧熔断器爆裂分析

往往在熔断器熔体熔断时, 还会产生熔管爆裂。出现这种情况的主要原因是在熔断器熔断过程中所产生的电弧的压力和热量对熔管的共同作用。在熔断器起弧过程的弧前阶段, 熔体的温度随电流的增加而上升。当达到熔点时, 由于电磁收缩力和表面张力的作用出现“液珠”现象。电流越大, “液珠”现象越严重, 连接“液珠”之间的金属液体越细, 电流密度越大, 温度越高, 使这部分熔体首先汽化。由于汽化时间极短和周围石英砂的限制, 所以金属蒸汽瞬间对石英砂产生很大的冲击和挤压。同时, “液珠”之间的间隙很小, 金属蒸汽的电导率很低, 该间隙在很高的电场下很快被击穿。于是, 电弧又强烈地冲击周围的石英砂。产生一上升很快、持续时间很短的脉冲形式的爆炸压力。许多串联的“液珠”之间的金属并非同时汽化产生电弧, 而是有先后的, 最后形成一个电弧串。该过程在电弧电压波形上表现为迅速上升, 且电流越大, 上升过程越快。在电弧串的形成过程中, 每一电弧处都产生一爆炸压力, 并各自以自己为中心向周围传播, 这些压力源产生的压力共同作用, 便形成一个比单个压力源的压力大得多的压力<sup>[5]</sup>。当熔管的机械强度达不到爆炸压力所允许的强度, 则会在熔断器熔断过程中发生爆裂现象。

### 3 解决方案研究

通过前面的分析, 知道产生这一事故的原因是在合闸电力电容器时所带来的过电压, 进而激发 CVT 的非线性电容和电感元件铁磁谐振。针对这一情况, 提出了限制电容器合闸过电压且同时进行 CVT 自身消谐的方案, 达到了既治标又治本的效

果。

#### 3.1 电力电容器合闸过电压抑制措施

在电力系统中, 为了抑制电力电容器过电压, 主要采用避雷器的方式, 避雷器的接法通常有以下四种<sup>[6]</sup>。

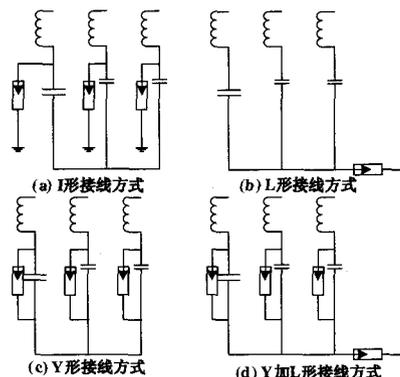


图 7 避雷器接线方式

Fig. 7 Different kinds of arrester connection

图 7 中的四种方式各有特点, 其中 I 形接线方式对电容器相对地过电压有很好的限压效果; L 形接线方式是通过限制中性点的电压来限制相对地过电压。但是这两种方式都不能够限制电力电容器合闸时的相间过电压。Y 形接线方式的优点是能够限制合闸时的相间过电压, 但不能够限制相对地过电压。为了解决以上三种接线的矛盾, 就是避雷器保护既能限制单相过电压, 又能限制合闸及分闸相间过电压, 可采用 Y 加 L 形接线方式, 这种方式的缺点是避雷器较多, 投资较大。但实际运用中首先保证安全性, 建议采用此种方式。另外, 要尽量避免三相不同期合闸。

#### 3.2 CVT 消谐措施

为确保方案的可行性, 在抑制电力电容器合闸过电压的同时, 对 CVT 采取有效的消谐措施。

一般 CVT 回路的固有频率很低, 约为几个 Hz, 因此当回路出现铁磁谐振时, 约为额定频率的分数次谐振如 1/2、1/3、1/5、1/7 次, 据实验测定, 以 1/3 次谐波为主<sup>[7]</sup>。目前消谐电路阻尼器主要有谐振型的铁磁回路的阻尼器和速饱和电抗型的阻尼器两种。

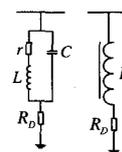


图 8 阻尼器

Fig. 8 Dampers

图 8 左边为一谐振型的铁磁回路的阻尼器, 其

工作原理是，正常运行频率时，其电感和电容发生并联谐振，而将该阻尼电阻断开，不投入运行，在其他频率下，电容和电感不再谐振，使得该电路导通，阻尼电阻  $R_D$  投入运行，破坏电容式电压互感器回路的谐振结构达到了消除谐振的作用。右边为一个速饱和电抗型的阻尼器，在 CVT 正常运行条件下电抗器的电抗  $L'$  很大，通过阻尼器的电流仅为几十毫安，其功耗及储能均很小；而当 CVT 发生铁磁谐振时，在过电压作用下电抗器的电感值急剧下降，将电阻  $R_D$  接入回路消耗足够的功率来阻尼铁磁谐振。因为这起事故产生谐振的频率不确定，所以在实际运用中将原来的谐振型阻尼器改用速饱和电抗型阻尼器，收到了良好的效果。

### 3.3 加装保护后的效果分析

经过加装上述保护，各种设置与 2.2 节相同。通过仿真研究，得到 CVT 上相对地电压的波形。

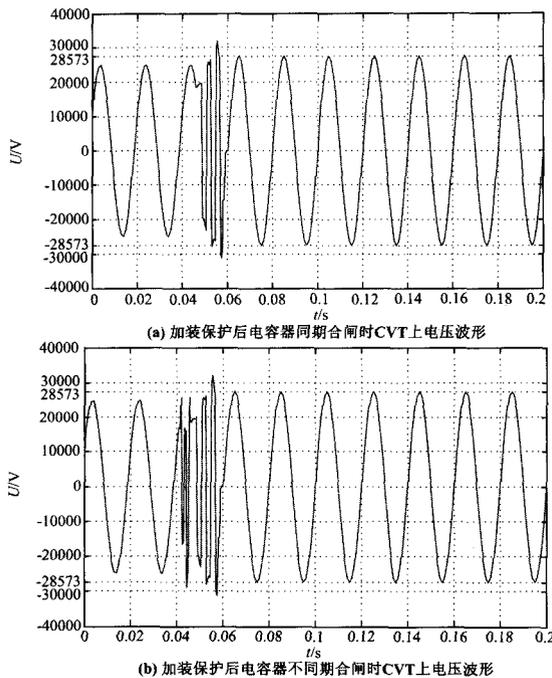


图 9 加装保护后电容器不同合闸条件下 CVT 一次侧上的电压

Fig. 9 The voltage for the CVT's first side under different closing capacitor conditions after protecting

对比图 5 和图 9，可以看出加装保护后，在电容器合闸过程中，CVT 上电压过渡期减少，过电压幅值明显降低。由此可明显减少激发其中间铁芯饱和，进而带来铁磁谐振的可能性。方案的可行性也就得到了论证。

## 4 结论

结合理论知识和工程实际情况，分析了 CVT

的工作特性和电力电容器合闸过电压。其中在分析电力电容器合闸过电压时，为了更直观地了解其现象，应用了先进的计算机仿真分析手段，节约了大量的时间，研究问题的经济性得到了提高。在此基础上，得到了该过电压激发 CVT 中间变压器铁芯饱和，进而引起内部铁磁谐振，而导致熔断器爆裂的原因。再结合该变电站的具体情况，提出了抑制电容器过电压和对 CVT 进行消谐的标本兼治的方式，并对其作用后的效果进行了分析。

### 参考文献

- [1] 熊信银. 发电厂电气部分(第三版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 房金兰, 蔺耀宏. 国内外电容式电压互感器目前水平及发展趋势[J]. 电力电容器, 1999, (1): 1-5. FANG Jin-lan, LIN Yao-hong. CVT Current Level and Development Trend at Home and Abroad[J]. Power Capacitor, 1999, (1): 1-5.
- [3] 夏长根, 蔡秀雯, 谭伟璞, 等. 一起 35kV 电容式电压互感器爆保险分析[J]. 电力电容器, 2006, (3): 32-35. XIA Chang-gen, CAI Xiu-wen, TAN Wei-pu, et al. Analysis of a Case of Fuse Burn Out of 35kV Capacitor Voltage Transformer[J]. Power Capacitor, 2006, (3): 32-35.
- [4] 张纬钺, 何金良, 高玉明. 过电压与绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [5] 张俊民, 尚振球, 王其平. 石英砂熔断器开断过程中压力特性的研究[J]. 电工技术学报, 1999, 5(12): 48-50. ZHANG Jun-min, SHANG Zhen-qiu, WANG Qi-ping. Characteristics of Pressure in Fuse Filled by Quartz Sand when Breaking Short Circuit Current[J]. Transactions of Chinese Electrotechnical Society, 1999, 5(12): 48-50.
- [6] 冯庆燎, 胡少强. 电力电容器过电压的研究[J]. 广东电力, 2006, 19(8): 1-7. FENG Qing-liao, HU Shao-qiang. Study on Power Capacitor Over-voltage[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(8): 1-7.
- [7] 王德忠, 王季梅. 电容式电压互感器速饱和电抗型阻尼器研究[J]. 电工技术学报, 2000, 15(1): 41-46. WANG De-zhong, WANG Ji-mei. A Study of Protective Device with Inductor in Series Resistance of Capacitor Voltage Transformer[J]. Transactions of Chinese Electrotechnical Society, 2000, 15(1): 41-46.

收稿日期: 2008-01-07; 修回日期: 2008-02-22

作者简介:

唐朝(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定与控制; E-mail: 84924888@163.com

彭勤裕(1964-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事继电保护方面的工作;

卢继平(1960-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统继电保护。