

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.05.005

真空断路器切除电容器组导致两相重燃的EMTP建模

刘生辉¹, 刘文泽², 王克英²

(1. 广东电网有限责任公司江门供电局, 广东 江门 529000; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 断路器介质恢复强度不能耐受恢复电压的作用,会导致电弧重燃,产生很高的重燃电压。笔者应用 EMTP 对真空断路器切除并联电容器组导致两相重燃过程进行建模,并以广东电网某典型 220 kV 变电站为研究实例。仿真计算了重燃过电压最严重的工况,对比理论分析值,仿真结果真实可信。

关键词: 真空断路器;电力电容器组;重燃;电磁暂态计算软件(EMTP);建模;过电压

Modeling of Two-phase Restrike Caused by Vacuum Breaker Switching off Capacitors Bank Based on EMTP

LIU Shenghui¹, LIU Wenzhe², WANG Keying²

(1. Jiangmen Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guandong Jiangmen 529000, China;
2. Electrical Power Institute of South China University, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Reginiton voltage is high when vacuum breakers are restriking if dielectric recovery strength is less than recovery voltage. In this paper, the model of the process two-phase restrike caused by switching off capacitors bank is built with EMTP and a 220 kV substation of Guangdong grid is researched. The most serious case is stimulated. Compared with theoretical result, simulation result is valid and practical.

Key words: vacuum breaker; power capacitors bank; restrike; EMTP; modeling; overvoltage

0 引言

在 63 kV 电压等级以下,特别是 10 kV 电力系统中,广泛采用电容器组作为电力系统的无功补偿^[1-2]。真空断路器具有体积小、灭弧性能好、电寿命长、维护量小等优点,特别适合于频繁操作,在并联电容器装置中被广泛用于投切电容器组。真空断路器以真空作为触头间的绝缘与灭弧介质,容易发生重燃,导致很高的操作过电压,是真空断路器使用过程中的 1 个突出问题。尤其切除电容器组时,两相重燃可导致更高的过电压^[3]。

大量实验数据表明:国产的 10 kV 真空断路器,其平均重击穿约为 2%~4%,经老炼后可降低到 1%以下,35 kV 真空断路器的平均击穿率可达到 5%~

10%。35 kV 真空断路器分闸时其两相重击穿率约为 0.5%~1%^[4]。因此,对真空断路器两相重燃的研究具有现实指导意义。笔者基于真空断路器重击穿过程的物理分析,在电磁暂态计算软件(EMTP)平台上,建立了能够描述真空断路器两相重燃的 EMTP 模型。采用广东电网某 220 kV 典型变电站 10 kV 母线并联补偿电容器组的元件参数,对真空断路器切除电容器导致两相重燃的最严重的工况进行仿真研究。对比仿真实验的结果与理论推导值,验证了断路器分闸电容器组导致两相重燃模型的准确性,该模型可成为仿真研究的有力手段。

1 真空断路器两相重燃 EMTP 建模

交流电弧重燃存在着两种不同的理论:电击穿理论和热击穿理论。前者认为电弧电流过零后,间

收稿日期:2014-12-13; 修回日期:2014-12-27

基金项目:广东省自然科学基金(10451064101005120);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2012ZM0017);广东省绿色能源技术重点实验室资助项目(2008A060301002)。

Project Supported by Guangdong Natural Science Foundation (10451064101005120), the Foundamental Research Funds for the Central Universities(2012ZM0017), Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology(2008A060301002).

隙已是介质,不存在电导,电弧的重燃是由于外加电场将间隙击穿的结果;后者则认为电流过零后在一定时间内,间隙仍是具有一定电导的导体,在恢复电压的作用下,就有弧后电流流过,当弧隙中所产生的热能大于散出的热能时,间隙就会因热击穿而使电弧重燃^[5-7]。

基于电击穿理论,则构建断路器重燃模型的关键在于:判断恢复电压超过介质恢复强度,引起重击穿。

基于热击穿理论,则建模的关键在于:判断间隙的输入能量超过阈值,引起热重燃。

笔者基于电击穿理论构建模型。假定 A 相为首开相,当 A 相电流 i_A 过零, A 相电弧熄灭,记录 A 相电流过零时刻 t_0 , 5 ms 后, BC 相线电流 i_{BC} 过零,此时刻 B 相熄弧, C 相未熄弧。断路器熄弧后,断路器间隙的电压将迅速增大,判定 A、B 相断路器介质恢复强度不能耐受恢复电压作用, A、B 相重燃。因此,断路器两相重燃的模型包括 4 部分: ① A 相电弧电流过零的判断; ② A 相熄弧时刻的记录; ③ A、B 相熄弧或重燃信号; ④ 断路器控制分合信号^[8-11]。

1.1 判断 A 相电弧电流过零

在 EMTP 的仿真计算中是采用时间步长 Δt 逐步求解的方法。判断电弧电流过零的一种可行办法也是根据时间的步长来跟踪电流正负的变化。按照时间步长 Δt 来判断 $t-\Delta t$ 时刻和 t 时刻电弧电流的正负符号变化情况。当前后两个时刻电流的乘积 < 0 , 则证明前后两个时刻的电流方向发生改变时,从而断定在这个时间间隔 Δt 内电弧电流过零。采用 EMTP 中的 TACS(暂态分析控制系统)构建的判断电弧过零模型见图 1。

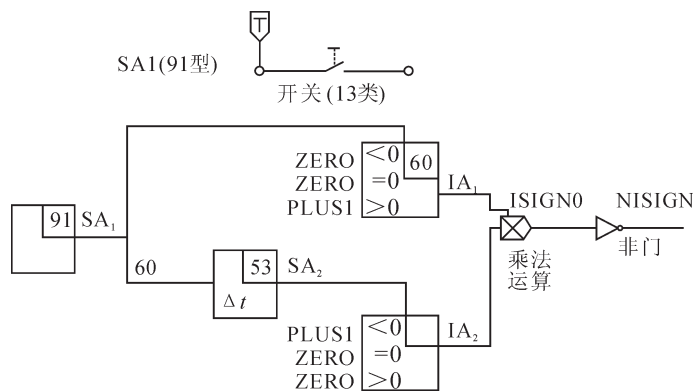


图 1 A 相电弧电流过零模型

Fig. 1 Model of A-phase arc current crossing zero point

①应用 Couple to Circuit 元件, 获取首开相 A 相断路器的电流信号 $SA_1(I(t))$; ②电流信号 SA_1 经过 1 个信号延时器 TACS-DEVICE53, 在延时器内部设

置好步长 Δt 的大小, 得到上一时刻电流信号 $SA_2(I(t-\Delta t))$; ③将信号 SA_1 和 SA_2 分别接入信号选择器 TACS-DEVICE60, 当输入信号 $SA_1 < 0, = 0, > 0$ 时分别输出 ZERO, ZERO, PLUS1; 当输入信号 $SA_2 < 0, = 0, > 0$ 时分别输出 PLUS1, ZERO, ZERO。从而将模拟信号转换为数字信号 IA_1, IA_2 输出, 该模型选择电弧电流由负到正的过零时刻; ④将 IA_1 与 IA_2 进行乘法运算, 乘法运算单元 FT 的输出信号即为 A 相电弧电流过零信号 ISIGN0(1—过零, 0—未过零); ⑤将电弧电流信号取反运算, 得到电弧电流过零控制信号 NISIGN。

1.2 记录 A 相熄弧时刻

当首开相 A 相电弧电流过零, 记录此时刻, 作为整个仿真过程的计时起始时刻。在此时刻电弧熄灭。采用 EMTP 中的 TACS(暂态分析控制系统)构建的记录 A 相熄弧时刻的模型见图 2。

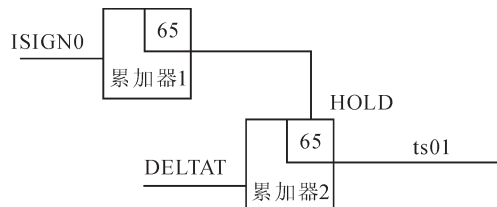


图 2 记录 A 相电弧电流过零时刻模型

Fig. 2 Model of timing from A-phase arc current crossing zero point

①将过零判断信号 ISIGN0 接入到累加器 1 TACS-DEVICE65 的输入端; ②在累加器 2 的输入端中任选 1 个端子输为 DELTAT, 将累加器 1 的输出接入到累加器 2 的 HOLD 端进行累加, 累加过程一直持续到 HOLD 端值变为 1 时停止, 所输出信号即为电弧电流过零时刻信号 ts01, 同时也是断路器熄弧时刻(文中引用的时刻信号需要与 TIMEX 信号逻辑运算后才可转化为真正的时间信号)。

1.3 时刻信号转换为熄弧信号

EMTP 的 TACS 中, 将时间信号转换为重燃信号的模型见图 3。

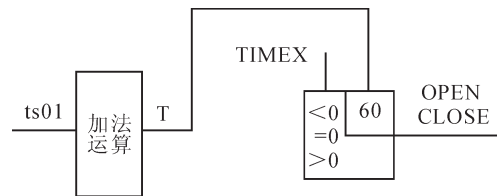


图 3 时间信号转化为重燃(熄弧)信号模型

Fig. 3 Model of changing time signal to arc restrike/ extinction signal

①将时间信号 ts01 的输出端接入到加法运算

单元(输出=时间信号+ Δt_n ;时长可决定哪相重燃或熄弧的时间,需要根据所研究的情况决定 Δt_n 的值;某相重燃或熄弧信号均需建对应模型。),得到电弧电流过零后 Δt_n 的时间信号T;②将时间信号T接入信号选择器TACS-DEVICE60的SIGN₂端,作为一个判断信号;在信号选择器的SIGN₁端子输入TIMEX。TIMEX是EMTP的内部时间信号源 t (可以理解为一个自变量,在这里TIMEX表示1条斜率为1的直线)。

1)A相熄弧信号:当信号选择器的输入信号 $T < 0, = 0, > 0$,分别输出NISIGN, NISIGN, ZERO。信号选择器把A相熄弧控制信号限制在选定的时间段内并输出A相熄弧信号OPENC(1—复燃,0—熄弧)。

2)B相熄弧信号:当信号选择器的输入信号 $T < 0, = 0, > 0$,分别输出PLUS1, ZERO, ZERO。信号选择器把B相熄弧的时刻从输入信号中取出来并输出B相熄弧信号OPENB(1—复燃,0—熄弧)。

3)A、B相复燃信号:当信号选择器的输入信号 $T < 0, = 0, > 0$ 时分别输出ZERO, PLUS1, PLUS1。信号选择器把对应相重燃的时刻从输入信号中取出来并输出,即为对应相的复燃信号CLOSEA(CLOSEB)(1—复燃,0—熄弧)。

1.4 分合A、B相断路器控制信号

通过控制断路器的开断实现电弧的熄弧或重燃,在EMTP中采用的断路器模型为TACS switch (type13)。

A、B相既发生熄弧,又发生重燃,则断路器的控制信号Ctr由熄弧信号和重燃信号经逻辑或运算后输出所得。控制断路器信号模型见图4。

1)当断路器处于合闸状态时,Ctr信号是由熄弧信号OPEN控制(CLOSE=0);

2)当断路器处于分闸状态时,Ctr信号是由重燃信号CLOSE控制(OPEN=0)。

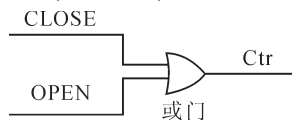


图4 控制断路器信号模型

Fig. 4 Model of controlling breaker signal

C相一直未熄弧,可不必进行建模。

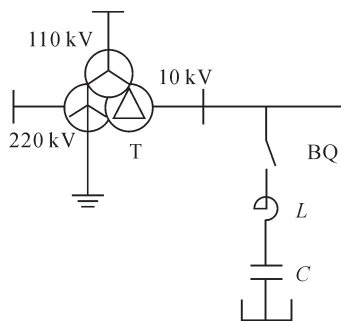
将断路器控制信号Ctr连接到对应相断路器的控制端,整个仿真模型完成。

2 模型应用与检验

2.1 仿真实例

以广东电网的某典型220 kV变电站作为仿真

实例^[12-16]。该变电站从220 kV侧输送电能过来,通过三绕组主变压器将电能送到110 kV侧和10 kV侧。主变压器的高、中压侧为星形联结,低压侧为三角形联结(Y/Y/ Δ 11)。主变压器的型号为SFSZ-180000/220,其额定容量为180 MV·A。10 kV低压侧通过限流电抗器 L_x 联结到10 kV侧母线,母线上接入10回以架空线为主的出线和4组无功补偿并联电容器组,每组电容器组由24只电容器组成双星型接法。变电站简化的系统接线见图5,主要设备的参数见表1。



T—变压器;BQ—开断并联电容器组的真空断路器;
L—串联电抗器。

图5 简化系统接线图

Fig. 5 Connecting diagrams of simplified system

表1 变电站主要设备的电路参数

Table 1 Circuit parameters of major equipment in transformer substation

设备名称	型号	参数
主变压器	SFSZ-180000/220	$U_{12}\% = 13.72, U_{13}\% = 24.0, U_{23}\% = 8.21$;
限流电抗器	XKK-10-4000-12	$S_c = 2\ 768\ \text{kV} \cdot \text{A}, I_c = 4\ 000\ \text{A}, L = 0.57\ \text{mH}, R = 1.162\ \text{m}\Omega$ (单相);
串联电抗器	CkSC-480/10-6	$I_c = 420\ \text{A}$, 电抗率 $k = 6\%$, $L = 2.24\ \text{mH}, R = 2.839\ \text{m}\Omega$ (单相);
并联电容器	BFM11/ $\sqrt{3}$ -334-1W	$C_c = 26.36\ \mu\text{F}, U_c = 11/\sqrt{3}\ \text{kV}, Q_c = 334\ \text{kvar}$;
放电线圈	FD2-3.4/11 $\sqrt{3}$	$Z = 1\ 570\ \Omega$ 。

在应用模型时,模型中的元件参数均参考改变电站实际设备参数。其中,将220 kV侧等值为系统电源,对110 kV以及10 kV侧的负荷使用恒定阻抗模型,串联电抗器的电抗率为6%,电容器组等效为电容器, $C = 210.88\ \mu\text{F}$,采用Y型不接地接线,且忽略放电线圈的作用,但必须计及中性点与大地之间的杂散电容为 $0.01\ \mu\text{F}$ 。其等效系统图见图6。

2.2 仿真工况及仿真结果

现对断路器分闸电力电容器组最严重的工况进行仿真。根据需要研究的工况,选择合适的模型组合。

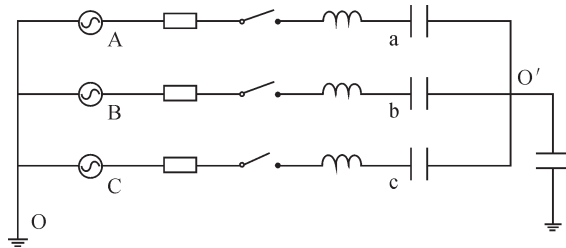


图6 等效系统图

Fig. 6 Diagram of equivalent system

工况 0 ms 时刻:A 相电流过零熄弧;5 ms 时刻:B 相熄弧,C 相未熄弧。11.667 ms 时刻:A 相重燃;15 ms:B 相重燃,C 相未重燃。仿真的断路器恢复电压以及电容器极间电压波形见图 7、8, 各相电容电压见表 2。

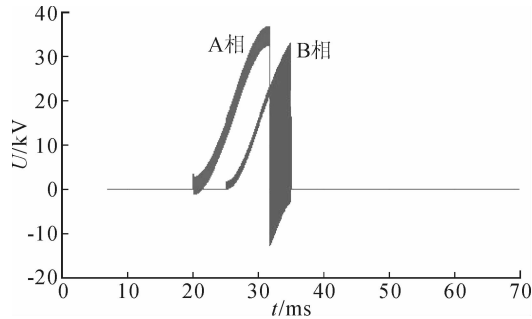


图7 A相B相断路器恢复电压变化波形

Fig. 7 A-phase and B-phase circuit break recovery voltage waveforms

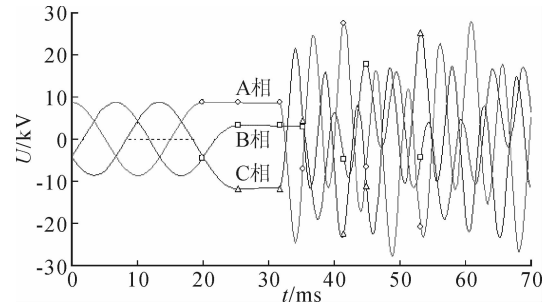


图8 三相电容极间电压变化波形

Fig. 8 Three-phase capacitor voltage waveforms

2.3 模型验证

结合仿真波形和数据进行综合分析,20.04 ms 时刻 A 相熄弧,25.116 ms 时刻 B 相熄弧。31.712 ms 时刻 A 相电弧重燃,A 相电源经电弧与一直导通的 C 相接通,形成自由振荡,电容器中性点电压开始振荡。断路器恢复电压为 $4.125U_m$;34.948 ms 时刻 B 相电弧重燃,断路器恢复电压为 $3.769U_m$ 。

断路器恢复电压的理论值可由式(1)推导得出

$$\begin{cases} u_{trA}=u_{a0'}+u_{o'o}-u_{A0}=2.37U_m+1.74U_m\cos(\omega t-120^\circ) \\ u_{trB}=u_{b0'}+u_{o'o}-u_{B0}=1.73U_m+1.73U_m\cos(\omega t-120^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

重燃前三相电容极间电压理论值可由公式(2)推导得出

表2 三相电容极间电压

Table 2 Three-phase capacitor voltage

状态	A熄弧	B熄弧	A重燃	B重燃	B峰值	A峰值	C峰值
时间 t/ms	20.040	25.116	31.712	34.948	37.598	41.607	53.168
A相电容极间电压	U_m	U_m	U_m	$-1.70U_m$	$1.73U_m$	$3.18U_m$	$-2.37U_m$
B相电容极间电压	$-0.49U_m$	$0.37U_m$	$0.37U_m$	$0.37U_m$	$-2.18U_m$	$-0.74U_m$	$-0.53U_m$
C相电容极间电压	$-0.51U_m$	$-1.37U_m$	$-1.37U_m$	$1.34U_m$	$0.45U_m$	$-2.44U_m$	$2.91U_m$

$$\begin{cases} u_{a0'}=U_m \\ u_{b0'}=-\frac{U_m}{2}+\frac{1}{2}u_{BC}=-\frac{U_m}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}U_m\cos(\omega t-90^\circ) \\ u_{c0'}=-\frac{U_m}{2}-\frac{1}{2}u_{BC}=-\frac{U_m}{2}-\frac{\sqrt{3}}{2}U_m\cos(\omega t-90^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

对比仿真结果与理论公式^[7],仿真结果真实可信。

3 结语

EMTP 仿真模型所用元件均限定在 EMTF 已有功能的范围之内,并结合电力系统实际情况选定参数,可以保证模型的准确性和稳定性。模型是针对断路器开断电容器组触头间恢复电压最大值时刻重燃的情况建立的^[8],基于该模型计算所设计的过电压防护措施,如阻容吸收装置、避雷器等,均具有可靠的安全裕度。

文中仿真的工况选定在断路器端口恢复电压最大的时刻重燃,具有较强的分析意义。对比各相重燃前模型仿真结果与理论推导值,表明仿真结果真实可信,证明模型准确可靠。选择模型组合并对应修改时间参数,可以模拟切除电容器的各种不同的工况,甚至可以仿真三相重燃以及多次重燃的情形。

参考文献:

- [1] RWETAL A. Synchronous closing control for shunt capacitors [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(9): 2619.
- [2] DMETAL D. Magnification of transient voltage in multivoltage-level shunt-capacitor-compensated circuits[J]. IEEE Trans. on PWD, 1992, 7(2): 664.
- [3] 张利生. 高压并联电容器运行及维护技术[M]. 北京: 中

- 国电力出版社,2006.
- [4] 平绍勋.电力系统内部过电压保护及实例分析[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [5] 王学军,陈德桂.多纵缝灭弧室中电弧重燃过程的分析与模拟[J].电机与控制学报,1997(3):167-170.
WANG Xuejun, CHEN Degui. Experimental analysis and numerical simulation of arc reignition for multinarrow slot arc chamber[J]. Electric Machines and Control, 1997(3): 167-170.
- [6] 王季梅,苑 舜.大容量真空开关理论及其产品开发[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [7] 林 莘.现代高压电器技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [8] Working Group 3.4.17 of IEEE. Impact of shunt capacitor banks on substation surge environment and surge arrester applications[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(4):1798-1806.
- [9] GREBE T E, GUNTHER E W. Application of the EMTP for analysis of utility capacitor switching mitigation techniques [J]. International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1998(1):583-589.
- [10] CHANG G W, SHIH M H, CHU S Y. An efficient approach for tracking transients generated by utility shunt capacitor switching[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2006, 21(1): 510-512.
- [11] CYGAN P, LAGHARI J R. Models for insulation aging under electrical and thermal multistress[J]. IEEE Trans. Dielectrics Electrical Insulation, 1990, 25(5):923-934.
- [12] 刘文泽,蔡泽祥,冯顺萍.变电站中电网谐波谐振分析与EMTP建模仿真[J].电力电容器与无功补偿,2009,30(2): 18-20.
LIU Wenze, CAI Zexiang, FENG shunping. Resonant analysis and EMTP model simulation of grid harmonics in transformer substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(2):18-20.
- [13] 孔飘红,韩雪莲,李 芳.电容器组群爆的故障分析与运行建议[J].电力电容器与无功补偿,2010,31(6):43-46.
KONG Piaohong, HAN Xuelian, LI Fang. Fault analysis of external fuse group explosion in capacitor banks and operation suggestion[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(6):43-46.
- [14] 李凯宇.某变电站10 kV集合式电容器故障分析[J].电力电容器与无功补偿,2010,31(2):59-62.
LI Kaiyu. Failure analysis of 10 kV assembling capacitor at a certain substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(2):59-62.
- [15] 田兴旺,郝江涛.天生桥换流站直流滤波电容器故障原因分析及改进建议[J].电力电容器与无功补偿,2009,30(6):62-65.
TIAN Xingwang, HAO Jiangtao. The fault analysis and improvement suggestion on DC filter capacitor at converter station of TSQ[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(6):62-65.
- [16] 王 伟.变电站电容器的运行维护与故障处理[J].电力电容器与无功补偿,2009,30(2):50-52.
WANG Wei. Operation maintenance and fault treatment of the capacitor in substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(2):50-52.
- [17] 徐国政,张节容,钱家骊,等.高压断路器原理及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [18] 周志敏,周纪海,纪爱华.无功补偿电容器配置·运行·维护[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- 刘生辉(1983—),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统运行分析与继电保护。
刘文泽(1973—),男,博士,主要研究方向为电力设备故障诊断与控制。
王克英(1963—),男,博士,教授,主要从事电力系统监测与控制的研究。
- (编辑 吴俊丽)

(上接第25页)

- live lines[J]. Northeast Electric Power Technology, 1999(8):49-52.
- [25] 吴 昊,陈名铭,张 敏,等.接地模块冲击特性的试验研究[J].电瓷避雷器,2013(3):110-115.
WU Hao, CHEN Mingming, ZHANG Min, et al. Experimental study on impact characteristics of grounding module[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(3):110-115.
- [26] 高伟锋,陈荣锋,许海林.不同塔型对输电线路雷击特性差异影响分析[J].电瓷避雷器,2013(6):76-86.
GAO Weifeng, CHEN Rongfeng, XU Hailin. An analysis on the effect of different tower type on lightning performance differences of transmission lines considering[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(6):76-86.
- [27] CHISHOLM W A, CHOW Y L, SRIVASTAVA K D. Lightning surge response of transmission towers[J]. Power Engineering Review, 1983, PER-3(9):56-57.
- 吴 昊(1989—),男,硕士研究生,从事电力系统接地技术方面的研究工作。
- (编辑 吴俊丽)