

变电所的瞬态电磁环境分析

巩学海^{1,2}, 何金良¹, 李雨²

(1. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;

2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

摘要: 变电所的瞬态电磁环境威胁二次系统的安全运行。采用现场测试和数值计算的方法分析了开关操作时和雷电作用时产生的瞬态电磁场。开关操作时产生的瞬态电场的频率范围为小于 15 MHz, 持续时间为 8 μs , 主频为 DC~1 MHz, 上升时间为 0.5~1.5 μs ; 瞬态磁场的频率范围为小于 20 MHz, 持续时间为 8~10 μs , 主频为 0.5~3 MHz, 上升时间为 0.25 μs 。建议的最大瞬态磁感应强度为 400 A/m, 电场强度为 20 kV/m。雷击变电所的雷电瞬态磁场建议取 1 000 A/m。国家推荐性标准 GB/T 17626.9-1998 的要求无法满足变电所实际雷电电磁环境的要求, 建议变电所电子设备电磁兼容测试的脉冲磁场抗扰度的要求取 1 000 A/m, 另外建议对变电所的电子设备的抗扰度试验要增加瞬态电场测试, 其强度取 20 kV/m。

关键词: 变电所; 瞬态电磁环境; 雷电电磁环境; 开关操作电磁环境; 电磁兼容抗扰度试验

中图分类号: TM723

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)05-0039-05

Analysis on Transient Electromagnetic Environment of Substations

GONG Xue-hai^{1,2} HE Jin-liang¹, LI Yu²

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. North China Electrical Power Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: The transient electromagnetic environment of substation threatens safe operation of secondary systems in a substation. This paper analyzes the transient electromagnetic fields generated by lightning stroke and switching operations based on field tests and numerical simulations. The frequency range of switching transient electrical fields is smaller than 15 MHz, their time duration is 8 μs , the main frequency is in the range from DC to 1 MHz, and the rise time is in the range from 0.5 to 1.5 μs . The frequency range of switching transient magnetic fields is smaller than 15 MHz, their time duration is from 8 to 10 μs , the main frequency is in the range from 0.5 to 3 MHz, and the rise time is about 0.25 μs . The suggested maximum transient magnetic and electrical fields generated by switching operations are 400 A/m and 20 kV/m, respectively. The lightning transient magnetic field in substation is suggested as 1 000 A/m. The criterion for electronic system in substation in national electromagnetic compatibility (EMC) standard GB/T 17626.9-1998 is far smaller than the actual value in substation. The transient magnetic field criterion for the EMC test of electronic system is suggested as 1 000 A/m, and the transient electric field of 20 kV/m is suggested as another new criterion for the EMC test of electronic system.

Key words: substation; transient electromagnetic field; lightning electromagnetic environment; switching electromagnetic environment; EMC test

0 引言

发电所的电磁环境分为工频电磁环境和瞬态电磁环境。而瞬态电磁环境则包括变电所开关操作时产生的瞬变电场和磁场, 以及雷击变电所及其附近时产生的脉冲磁场。

变电所中一次回路和二次回路之间存在着电和

磁的联系。瞬变电磁环境, 一方面以空间电磁脉冲的形式直接作用在变电所的二次系统, 另一方面, 在一次回路中发生的任何形式的暂态过程都会通过不同的耦合途径传入二次回路中形成暂态骚扰^[1-3]。

暂态骚扰对二次回路的设备可能造成两种后果, 一种是破坏二次设备的绝缘, 形成永久性破坏; 一种是骚扰其正常的工作, 使其误动作。二次回路中的设备包括继电保护、控制、信号、通信、监测等仪

收稿日期: 2009-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(50737001)。

作者简介: 巩学海(1962), 男, 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事高电压与绝缘技术方面的研究工作。

器和仪表都属于弱电设备,其耐压水平和抗骚扰能力都比较弱。在我国,20世纪60年代以来,晶体管继电保护和通信设备在变电所中推广应用,随着电力系统自动化程度和对运行可靠性要求的不断提高,自20世纪80年代开始,以微电子器件(如集成电路、数字电路等)为主要元件的控制、保护、信号、监测等设备在电力系统的变电所中得到广泛应用。这些设备对暂态骚扰具有更加明显的敏感性和脆弱性。因此,在这些变电所中,一次回路和二次回路之间的电磁兼容问题变得十分突出。而且,问题的严重性还在于,越是高压大容量的枢纽变电所,由于它们在电力系统中的地位和重要性,越需要应用更加先进的二次设备对一次系统进行保护和监控,与此同时,由于一次系统电压高、容量大,反过来会对二次回路产生更加强烈的暂态骚扰。

另外,将继电保护/控制设备下放至开关站中,虽然可节约大量电缆,降低工程造价和工程量,提高运行可靠性等,但也更容易受到高压电气设备运行过程中的开关操作、短路故障等暂态过程产生的强电磁骚扰。由于开关操作产生暂态电磁干扰而致使监控设备不能正常工作的情况时有发生。如1993年广西来宾500 kV变电所就曾多次发生过远方操作隔离开关切合220 kV空母线时,其操作机构电动机电源保险在隔离开关拉弧过程中烧断以至操作机构失去电源的现象。广西平果500 kV变电所也曾发生过类似的二次设备受干扰的情况。

对于雷电电磁环境,即使几公里外的高空雷闪也有可能导电子计算机的误动或破坏,0.07高斯的磁场可造成一些电子元件误动,2.4高斯可使一些电子元件击穿。

鉴于以上理由,近年来,变电所中的瞬态电磁环境问题,得到了研究、设计、安装、运行各个部门的普遍关注^[4-12]。笔者主要基于理论分析和现场测量结果来讨论变电所瞬态电磁环境的特征,另外,从电磁兼容抗扰度的要求出发,分析变电所对电子设备的瞬态电磁场抗扰度的要求。

1 典型的操作暂态电磁环境的特征

1.1 隔离开关操作测量结果

结合对变电所投运调试,对变电所的不同开关投切操作时产生的空间电磁场进行了测量。瞬态电场测量采用光电式探头,测量动态范围100 V/m~500 kV/m,测量系统包括光发射机、保偏单模光纤(PMF)、电光幅度调制器(包括天线)、单模光纤(SMF)、光接收机和信号放大电路装置。瞬态磁场测

量采用环天线,测量动态范围1~1 200 A/m,数据记录采用Tek720P示波器。

无论是隔离开关操作还是断路器操作,产生的暂态磁场基本上是类似阻尼振荡过程。隔离开关操作的时间长、燃弧次数多,容易产生频率很高的暂态过程,产生的暂态具有阻尼振荡的特性。开关触头之间在电弧燃烧过程中产生振荡频率很高的暂态,电弧熄灭后则逐渐过渡到稳态。由于电弧的重燃,开断过程要出现很多这样的衰减振荡的暂态脉冲过程。图1所示为隔离开关操作时产生的磁场波形,每次操作过程产生的脉冲数量在100~1 500个之间,平均达到约600个,脉冲数量与开关切换速度有关,切换速度越快,产生的电磁暂态总次数越少。开关操作产生的暂态的持续时间长,每个操作过程从起弧到电弧熄灭,持续时间约1.5~2 s。500 kV变电所断路器每次操作时产生的脉冲数量约为100,持续时间约为40 ms。

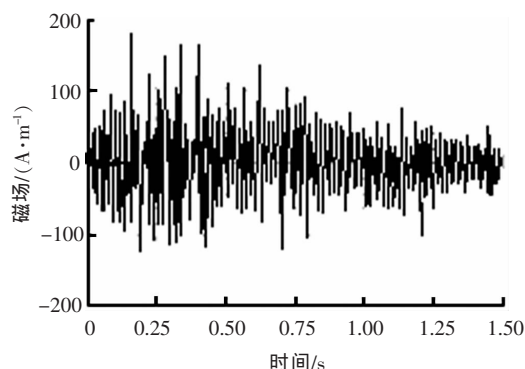


图1 隔离开关操作时产生的瞬态磁场波形

隔离开关操作是变电所正常生产过程中产生电磁骚扰最严重的操作。图2所示为500 kV变电所开关操作时测量得到母线下方离地2 m的空间电场的波形,幅值达到13.5 kV/m,图3为开关操作时测量得到的空间磁场的波形,幅值达到90 A/m,干扰相当严重。如果二次系统没有很好的屏蔽措施,空间电磁场的作用将导致二次设备的失效或破坏。

不同电压等级的开关操作产生的瞬态电场和瞬态磁场的波形具有相似性,电场波形都为单极性,而磁场波形则为双极性衰减振荡波。见表1,对于110、220、500 kV变电所,多次地面瞬态磁场幅值(峰-峰值)的平均值分别为25、73、140 A/m,主频率范围在0.5~3 MHz,频率范围在8 MHz以内;多次地面瞬态电场幅值的平均值分别为4.5、5.5、14 kV/m,主频在DC~1 MHz范围,频率范围在15 MHz以内。

无论是操作隔离开关还是断路器,产生的暂态

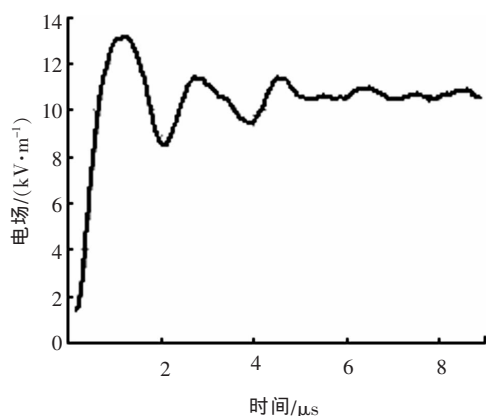


图2 开关操作时测量得到的空间电场波形

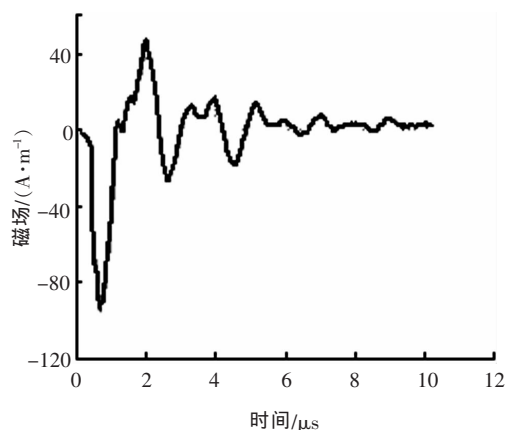


图3 开关操作时测量得到的空间磁场波形

磁场主波形基本相同,母线下地面暂态磁场主波形的频率范围为 $0.5\sim 3$ MHz,地面上 2 m 处的磁场幅值(峰—峰值)在数十至数百 A/m ,而相应的地面处磁场幅值降低约一半以上。

隔离开关操作产生的瞬态电磁场频率分布较广,在隔离开关操作产生的单个振荡过程中,夹杂着高频小幅值的暂态过程^[7],其中频率较高的甚至达到 100 MHz 。瑞士在变电站开关操作时的实测数据表明^[13],变电站内开关操作产生的暂态空间电磁场的频率在几百赫兹到 200 MHz 之间,时延由几个纳秒到几个毫秒。但从笔者的测量结果来看,对于磁场来说, 8 MHz 以上的高频骚扰幅值已经非常小,可以不考虑。

1.2 断路器操作测量结果

断路器的动作速度快,持续时间短,约几十微秒,产生的暂态骚扰的数量较隔离刀闸操作少。断路器操作时产生的瞬态电场为衰减振荡波,幅值在 11.4 kV/m 以内,主频在 $\text{DC}\sim 700\text{ kHz}$ 的范围,而频率范围在 8 MHz 以内。断路器操作时测得的磁场波形的主导频率为 $0.7\sim 2\text{ MHz}$,在 $4\sim 6\text{ MHz}$ 等不同的频率上有时也有较大的幅值。这是因为在不同的

操作中断路器操作的对象稍有不同造成的。瞬态空间电磁场的频率大都在几百赫兹到 20 MHz 之间。瞬态磁场也为衰减振荡波,峰峰值在 130 A/m 以内。可以看出,断路器操作时的瞬态电场和磁场明显低于隔离开关操作时的对应值,因此,开关操作的瞬态电磁环境应考虑隔离开关操作时的值。

1.3 数值分析结果

在变电所电磁环境数值分析和计算方面,国内外研究最多的是系统操作或故障时产生的空间电磁场,计算方法也相对成熟。

表1中列出了最高产生 2 p.u. 操作过电压的情况下,不同电压等级母线下方离地 2 m 的瞬态电场和磁场的统计评估结果。与测量结果相比,磁场分析结果略高于测量结果,比较接近,但电场分析结果明显比测量结果高,其原因是分析结果是针对特定母线结构得到的,而测量结果是不同变电所的平均结果。从表中结果可以看出,开关操作时产生的瞬态空间电磁场与系统电压成正比。

表1 开关操作时空间瞬态电场和磁场的测量结果及评估结果

系统电压	电场/($\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$)			磁场/($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)		
	110 kV	220 kV	500 kV	110 kV	220 kV	500 kV
评估结果	10.4	17.4	20.9	46.00	95	240
地面结果平均值	4.5	5.5	14.0	25.00	73	140
离地 2 m 结果平均值	7.1	8.7	18.0	34.00	85	157
离地 2 m 结果峰值平均值	9.5	10.2	21.0	54.00	98	400
离地 2 m 结果最大幅值	9.5	10.2	21.0	54.00	98	400
上升时间/ μs	0.5	0.8	1.0	0.25	0.25	0.25
主频/MHz	$\text{DC}\sim 1$	$\text{DC}\sim 1$	$\text{DC}\sim 1$	$1\sim 3$	$1\sim 2$	$0.5\sim 1.5$
持续时间/ μs	8	8	8	8	8	8
频率范围 /MHz	15	15	15	8	8	8

分析笔者的测试结果及国内外的测试结果,变电站的不同操作产生的瞬态电磁场额度幅值、主频及频率相差较大,主要与操作时的合闸角及系统结构相关,具有统计特性,见表2。开关操作时产生的瞬态电场的频率范围小于 15 MHz ,持续时间为 $8\text{ }\mu\text{s}$,主频为 $\text{DC}\sim 1\text{ MHz}$,上升时间为 $0.5\sim 1.5\text{ }\mu\text{s}$,建议瞬态电场强度取 20 kV/m 。开关操作时产生的瞬态磁场的频率范围小于 20 MHz ,持续时间 $8\sim 10\text{ }\mu\text{s}$,主频 $0.5\sim 3.0\text{ MHz}$,上升时间 $0.25\text{ }\mu\text{s}$ 。建议瞬态磁感应强度取 400 A/m 。

表2 开关操作时空间瞬态电场和磁场的推荐参数

参数	电场	磁场
推荐值	20 kV/m	400 A/m
上升时间	0.5~1.5 μ s	0.25 μ s
主频范围	DC~1 MHz	0.5~3.0 MHz
持续时间	8 μ s	8~10 μ s
频率范围	15 MHz	20 MHz
波形	单极性阻尼 衰减振荡波	双极性阻尼 衰减振荡波

2 雷电电磁环境的特征

2.1 雷击进线段在变电所内产生的瞬态电磁环境分析

雷击进线段闪络时,雷电流由导线进入变电所。100 kA 的雷电流击在进线段的避雷线或塔顶上时,经过杆塔和避雷线、避雷器的分流,CT 和 CCVT 上方母线上的电流大约为原来的 1/10,在这里取 10 kA 进行仿真,雷电流波形分别选择 2.6/50 μ s。当 10 kA 的电流流过母线时,在变电站 CT 二次侧产生的瞬态电磁场见表 3。

表3 雷击 500 kV 变电所产生的最大电磁环境水平

类型	水平方向电场	垂直方向电场	总磁场
数值	17.2 kV/m	33.4 kV/m	210 A/m

2.2 雷击避雷针时产生的脉冲磁场

雷击变电所内避雷针时,全部雷电流都经过避雷针入地,将在变电所内产生最为严重的脉冲磁场。计算时 10 kA 雷电流作用在避雷针上,则在 10 m 高度范围内,离避雷针不同距离时产生的脉冲磁场见表 4,距离避雷针 5 m 处产生的脉冲磁场达 320 A/m。如果设备靠近避雷针等雷电入地的物体附近,考虑到实际入地雷电流可能大于 10 kA,则承受的瞬时磁场远比表 4 中的值高。如果设备与避雷针的距离大于 15 m,考虑到 100 kA 的雷电流作用,则 15 m 处的瞬态磁场强度最大值达 1 000 A/m。

表4 避雷针附近暂态磁场仿真计算结果

场点到避雷针距离/m	磁场强度最大值/(A·m ⁻¹)
5	320
10	150
15	100

3 变电所电子设备瞬态电磁场抗扰度分析

根据前面的分析,对变电所内的瞬态电磁环境参数推荐值见表 5。可以看出,从瞬态磁场的角度,雷电作用时产生的脉冲磁场远高于操作产生的瞬态

磁场。

表5 变电所的瞬态电磁环境指标

电磁环境指标	推荐耐受值
雷电瞬态磁场	1000 A/m
操作瞬态电场	20 kV/m
操作瞬态磁场	400 A/m

关于变电所的电子设备的瞬态电磁场的抗扰度试验,目前只对脉冲磁场提出了要求,在国家推荐性标准 GB/T 17626.9-1998《电磁兼容试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验》^[14]中,对处于发电厂、工业设施、变电所的信息设备提出了相应的抗扰度要求,要求分为 6 级。第 3 级为 100 A/m,第 4 级为 300 A/m,第 5 级为 1 000 A/m,第 6 级为特定,由用户指定。

根据 GB/T 17626.9-1998^[14],对高压变电所计算机房规定为第 3 级试验等级,要求能承受 100 A/m 的脉冲磁场试验。而实际变电所的控制楼并没有像机房那样完整的屏蔽,变电所内的瞬态电磁环境可能直接作用在电子设备上。因此,按照 GB/T 17626.9-1998 测试变电所的电子设备时,瞬态磁场强度应选择第 5 级的 1 000 A/m。

另外,目前只有对瞬态磁场的要求,而对瞬态电场则没有要求。但开关操作产生的瞬态电场达到 20 kV/m,这么强的瞬态电场可能会导致变电所电子设备的破坏,因此建议对变电所的电子设备的抗扰度试验要增加瞬态电场测试,其强度取 20 kV/m。

4 结语

开关操作时产生的瞬态电场的频率范围为小于 15 MHz,持续时间为 8 μ s,主频为 DC~1 MHz,上升时间为 0.5~1.5 μ s;瞬态磁场的频率范围为小于 20 MHz,持续时间为 8~10 μ s,主频为 0.5~3 MHz,上升时间为 0.25 μ s。建议瞬态磁感应强度为 400 A/m,电场强度为 20 kV/m。

雷击变电所的避雷针产生最为严重的瞬态电磁场,建议变电所的雷电瞬态磁场取 1000 A/m。

国家推荐性标准 GB/T 17626.9-1998《电磁兼容试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验》对变电所电子设备的脉冲磁场要求为 100 A/m,无法满足变电所实际雷电电磁环境的要求。建议变电所电子设备电磁兼容测试的脉冲磁场抗扰度的要求取 1 000 A/m。

另外,考虑到变电所的强瞬态电场可能会导致电子设备的破坏,因此建议对变电所的电子设备的抗扰度试验要增加瞬态电场测试,其强度取 20 kV/m。

参考文献:

- [1] 何金良,屠幼萍,曾 嵘.作用在发变电站仪器及控制系统上的主要干扰源[J].电力建设,2000,21(1):3-7.
- [2] 何金良,曾 嵘,屠幼萍.控制发变电站二次系统电磁干扰水平的措施[J].电力建设,2000,21(3):10-13.
- [3] 何金良,曾 嵘,屠幼萍.发变电站仪器和控制设备的接地[J].电力建设,2000,21(6):11-14.
- [4] 卢铁兵,崔 翔.变电站空载母线波过程的数值分析[J].中国电机工程学报,2000,20(6):9-42.
- [5] 孙竹森,张禹方,张广州,等.500 kV 变电站电磁骚扰和防护措施的研究(一) [J].高电压技术,2000,20(1):16-18.
- [6] 孙竹森,张禹方,张广州.500 kV 变电站电磁骚扰和防护措施的研究(二) [J].高电压技术,2000,20(2):26-27.
- [7] 万保权,张广洲,邬 雄,等.500 kV 变电站电磁骚扰水平及输变电设备电磁环境影响研究[R].武汉:武汉高压研究所,2005.
- [8] 孙 涛,万保权.500 kV 变电站电磁环境参数测量[J].高电压技术,2006,32(6):51-55.
- [9] 万保权,邬 雄,杨毅波,等.750 kV 变电站母线电磁环境参数的试验研究[J].高电压技术,2006,32(3):57-59,71.
- [10] WIGGINS C M, THOMAS D E, NICKEL F S, et al. Transient Electromagnetic Interference in Substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4): 1 869-1 884.
- [11] HE Jin-liang, Shuiming, GUO Jian, et al. Electromagnetic Environment Analysis of A Software Park Near Transmission Lines [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2004, 40(4): 995-1 002.
- [12] WIGGINS C M, WRIGHT S E. Switching Transient Fields in Substations [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1991, 6(2): 591-600.
- [13] NAUMOV R M, VUKELJA P I. Experimental Investigations of Transient Overvoltage in Secondary Circuits of 400 and 220 kV High Voltage Substations [C]//CIGRE, International Symposium on Power System Electromagnetic Compatibility, Lausanne Switzerland, 18-20 Oct. 1993: 500-505.
- [14] 国家标准 GB/T 17626.9-1998. 电磁兼容试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验[S].

(上接第 38 页)

见表 1, 从表 1 可以看出检测结果是较令人满意。

表 1 统计结果

衡量指标	CH ₁	CH ₂	CH ₃	CH ₄	CH ₅	CH ₆	CH ₇
PT _i /%	98	99	97	96	94	96	95
PF _i /%	2.0	1.5	4.0	4.1	6.0	1.0	4.7

3 结语

实现憎水性图像水珠形状的有效提取是绝缘子憎水性能检测的重要内容之一。笔者结合模糊数学理论根据图像边缘点的邻域像素群对其影响的程度,提出了基于统计间隙隶属度函数和关联系数分类判定的图像模糊边缘检测模型,较好地解决了水珠图像的阴影对面一侧水珠透明性造成的边界部分缺失问题,从一定程度上克服了经典的边缘检测方法存在的几个问题。实验结果表明,该算法能够准确地提取图像中的水珠(或水迹)的边缘信息,对处理后的图像进行形状因子的提取,依据形状因子法能够准确地检测憎水性等级,在绝缘子憎水性检测方面具有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] 彭克学,王泉德,王先培.基于表面喷水图像分析的绝缘子表面憎水性检测方法[J].绝缘材料,2005(1):47-51.
- [2] 宋 伟,赵林杰,李成荣,等.复合绝缘子在线检测技术的发展[J].高电压技术,2005,31(5):28-30.
- [3] LAJBCYGIER P, MEI Y O. Estimating the Number of Mutual Fund Styles Using the Generalized Style Classification Approach Ang the Gap Statistic[C]//Computational Intelligence for Financial Engineering 2003 Proceedings, 2003: 279-284.
- [4] 黄陈蓉.基于 Gap 统计的图像分割理论与算法研究[D].南京:南京理工大学,2005.
- [5] 史延新.变换的直方图均衡算法在图象增强中的应用[J].西安工程科技学院学报,2006,20(6):806-808.
- [6] TIBSHIRANI R, WALTHER G, HASTIE T. Estimating the Number of Clusters in a Dataset via the Gap Statistic[C]//Palo Alto:Stanford University. SN(2000) JRSSb, 2000: 279-284.
- [7] 吴敏金,白治江.关联熵及其应用[J].华东师范大学学报,1998(2):28-35.
- [8] 黄陈蓉,张正军,吴慧中.多尺度加权邻域 Gap 算子图像边缘检测方法[J].计算机科学,2005,32(7):168-171.
- [9] 吴成茂.基于关联熵系数的图像分割新算法[J].西安邮电学院学报,2007,12(1):76-79.
- [10] 张福林.复合绝缘子外绝缘基材硅橡胶表面的憎水性和憎水迁移性机理分析[J].华北电力技术,1999(1):19-21.