

电力设备名医坐堂

—— 电力设备故障诊断与处理实务丛书

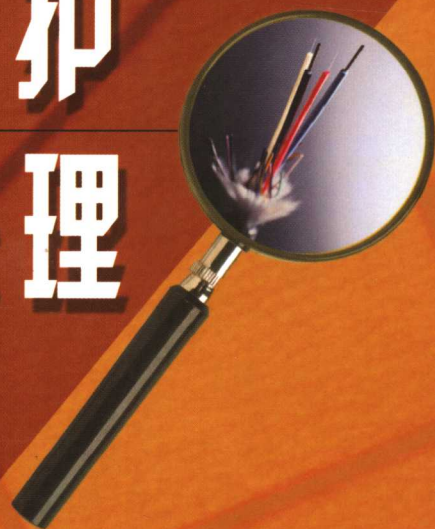
过电压保护 及现场事故处理

GUODIANYA BAOHU
JI XIANCHANG SHIGU CHULI

◎ 主编 孙方汉 陈绍英 韩 芳



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



电力设备名医坐堂——电力设备故障诊断与处理实务丛书

过电压保护 及现场事故处理

GUODIANYA BAOHU
JI XIANCHANG SHIGU CHULI

◎ 主编 孙方汉 陈绍英 韩 芳

过电压保护及现场事故处理	孙方汉
主 编 孙方汉 陈绍英 韩 芳	孙方汉
中国水利水电出版社 (北京市三里河路6号 100044)	中国水利水电出版社
网址: www.waterpub.com.cn	www.waterpub.com.cn
E-mail: sale@waterpub.com.cn	sale@waterpub.com.cn
电话: (010) 63695262 (总机), 68381832 (营销中心)	63695262 (总机), 68381832 (营销中心)
北京水利水电出版社营销中心 (鲁鲁)	北京水利水电出版社营销中心
电话: (010) 88288994, 88305943	(010) 88288994, 88305943
全国各省市新华书店均有代售	全国各省市新华书店均有代售
中国水利水电出版社营销中心	中国水利水电出版社营销中心
北京市丰台区右安门内大街111号	北京市丰台区右安门内大街111号
2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷	2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷
787mm×1092mm 1/16 32开本 11印张 361千字	787mm×1092mm 1/16 32开本 11印张 361千字
ISBN 7-5082-1000-0	ISBN 7-5082-1000-0
定价: 15.00元	定价: 15.00元



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍过电压的发生原因及保护措施,并结合众多现场事故案例,生动、具体地说明对各种不同的过电压事故所应采取的不同预防措施。结合过电压保护技术的最新发展,介绍了防雷保护的新技术,并列举了若干在变配电系统中容易发生的内、外过电压事故及其防止对策。

本书图文并茂,内容简明实用,密切联系现场实际,实例丰富。可供供电企业和用电单位的技术人员及管理人员查阅使用,也可作为技术短训班的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

过电压保护及现场事故处理/孙方汉,陈绍英,韩芳

主编. —北京:中国水利水电出版社,2007

(电力设备名医坐堂——电力设备故障诊断与处理实务丛书)

ISBN 978-7-5084-4229-7

I. 过… II. ①孙…②陈…③韩… III. ①过电压保护
②过电压—事故—处理 IV. TM86

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第017961号

书 名	电力设备名医坐堂——电力设备故障诊断与处理实务丛书 过电压保护及现场事故处理
作 者	主编 孙方汉 陈绍英 韩 芳
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 11印张 261千字
版 次	2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	24.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着国民经济的迅速发展，用电负荷大量增加，供用电设备的使用量也日益增多，负责电气设备运行、维护工作的队伍不断壮大。其中不乏从事电工作业时间不长的新同志，他们亟需熟悉电气设备的技术性能，掌握正确的操作方法，学会对电气设备异常状态的科学判断。另外，由于电气制造技术的迅速发展，新设备大量涌现，电气技术标准和运行规程也在不断地修订和完善，对于从事电工作业时间较长的老同志来说，也希望熟悉新设备，了解新情况，特别是了解电气设备运行中一些疑难的异常状态的分析判断方法，以便采取相应对策，防止事故发生。

为了满足上述需要，我们策划编写了《电力设备名医坐堂——电力设备故障诊断与处理实务丛书》。所谓“名医坐堂”，就是由有经验的医生来“把脉”。但是这里要把的是电力设备的“脉”。希望读者通过这套丛书能了解到供用电主要电气设备，诸如电力变压器、电力电容器、高低压开关设备、电力电缆、电能计量装置、继电保护和过电压保护设备等有关技术标准、产品性能、正确操作使用知识等各方面的基本知识，特别是以实际例子介绍对一些电气设备的疑难故障现象如何分析判断。与其他同类书籍不同之处是，这套丛书由在现场从事实际工作的既有理论知识、又有实践经验的工程技术人员动手编写，内容注重理论联系实际，除了系统介绍与电气设备有关的技术要求、操作方法外，重点突出以实际例子介绍在现场运行中遇到的一些疑难问题的分析判断方法。通过这些例子，读者既可以学到处理疑难电气技术问题的“诀窍”，同时也加深了对一些电气技术理论的理解，从而做到融会贯通，得心应手。

我毕业于20世纪50年代中期，长期从事供用电专业技术的现场工作。50年前，参加工作之初，适逢党和政府号召知识分子要“又红又专”，投身祖国伟大的社会主义建设事业。当时“同学少年，书生意气，激扬文字”，互相鼓励。我的同窗学友沈君曾以一首七律赠我，诗曰：“共庆今生岁月荣，黄金流光去匆匆。红路振飞几多里，青山艰攀若干重。喜怒爱恨日臻心，少壮老弱年事功。愿志不断文字长，未来看取尽笑容！”更有满江红词一首，其中有：

“时难饶，少年人！望万马，耻后尘！问神骥，何时任我骖腾？——激电三峡大荒喧，化雪昆仑戈壁春！……”在如此年少激情的鼓励下，我废寝忘食，在致力于现场工作实践的同时，奋发钻研供用电技术理论。与此同时，毛遂自荐，业余从事电工技术读物的编、译、著工作。至今先后编、译（或合编、合译）出版了近20种电工技术读物。在现场工作中，常常遇到一些本不属于自己工作范围的疑难的技术问题，我也主动请缨，自告奋勇去研究解决。例如20世纪60年代初，有一次我的上级主管工程师派我去某设计院送一份变电所设计图纸的审查计算单。我顺便看了一下其中内容。原来该设计院在设计一座变电所主变压器的继电保护方式时，率先采用了一种新的接线方式，但是在经我单位有关部门审查复核计算后，认为这种接线方式的灵敏系数不符合要求，因此给予否定，并要求改用另外的接线方式。当时为了学习这一计算方法，我先不急于送达，而是回到自己的办公室，抓紧时间将计算书抄录一份。在抄写时居然发现设计院采用的接线方式灵敏系数是符合要求的，而我单位的计算单存在错漏。于是，我把我的校验计算报告向主管工程师作了汇报，并通知了有关部门。经过有关部门的再次验算，改变了原来的审查结论，设计院的设计方案获得了通过。功夫不负有心人，我在解决疑难技术问题时的能力得到周围同志的认可。一些人遇到疑难技术问题时常来找我帮助解决。特别是一些重要用电单位变电所主要电气设备出现异常，无法正常投运时，有的就找我解决，我也欣然答应，以最快速度拿出正确的处理意见。例如某公安局管辖范围内发生一起命案，怀疑是控制屏接线不合理，电击致死，但根据又不充分，因此不能定案，于是将发生命案的场所关闭，贴上封条，保留现场等待调查处理。但是过了一年后，仍无结论。公安部门对此悬案急于有个定论，最后经人推荐，聘我去解决。这时恰逢盛暑，天气酷热，现场的控制屏接线零乱，灰尘很厚，且无图纸。如果要查找接线，至少需半天，而且有破坏现场之嫌，公安人员不会同意。但如果不查找接线，怎么可能找出接线不合理的具体原因呢？在众多公安人员的围观和期待目光下，我曾一度犹豫，甚至有些不知所措，但随即稳定情绪，并在一二分钟内说出造成电击致死的原因，并找出物证。这一类事情处理多了，就有人打趣地戏称我为“神医”。《沈阳电力报》更以“神医”为题专题报导了我处理电气事故的事例。1992年辽宁科学技术出版社正式出版了《安全用电与事故案例》一书，该书由东北电业管理局组编，其中主要内容为收录我在现场处理的数十起电气事故案例及其原因分析。由于各方面对我的支持、鼓励和帮助，对我钻研供用电技术业务创造了一个十分有利的氛围，使我受益匪浅。我十分感

谢老一辈的工程技术人员，例如现已年逾九旬的著名电气高级工程师纪瑞明教授对我的无私帮助。也十分感谢曾领导过我或与我共事过、曾帮助过我的同志，例如老干部单宝惠同志、刘景昌教授级高工、孙成凯、冯祥等同志。“雕塑青云睡眼开”，一个人的能力有大小，但只要全心全意投身到自己所喜爱的事业中去，会是十分愉快的。

本书（《过电压保护及现场事故处理》）是《电力设备名医坐堂——电力设备故障诊断与处理实务丛书》中的一本，主要是系统地介绍了过电压的分类、电力系统和建筑物防雷措施、阀型避雷器的技术参数选择、工频过电压、谐振过电压和操作过电压的产生原因和防止对策。特别是对变、配电系统中发生较多的谐振过电压（如断线过电压）作了较为详细的叙述。行文尽量做到通俗易懂，一般从事电工作业的人员都能看懂。书中介绍的许多过电压事故实例，可供供用电技术管理人员在工作中借鉴参考。

本书由我和陈绍英、韩芳共同主编。担任本书副主编的有权威、刘承轩、王晓东、王城钧、李宏宇、张树军、郭浩。本书参编人员有：左志宏、郭艳娟、李雪芬、沈燕、刘亮、孙晓东、马玉林。对于他们为编写本书所付出的辛勤劳动，一并表示感谢。还有其他许多同志对本书的编写也给予了帮助和鼓励，均表示衷心感谢，这里就不一一列举。

虽然我们为编写本书作了大量工作，但是限于水平，肯定还有许多不足之处。特别是“名医坐堂”这一副题，盛名之下，其实难副。欢迎各地朋友批评指正，我们表示衷心地感谢。愿我们在共同的事业中互相帮助，互相勉励，携手共进！

孙方汉

2007年1月于沈阳

目 录

前 言

第 1 章 过电压的危害及其分类	1
1.1 过电压及其危害	1
1.2 过电压的分类	2
1.3 雷电过电压	2
1.3.1 直接雷击过电压	2
1.3.2 全国各地雷电活动强烈程度的划分	4
1.3.3 雷电反击过电压	6
1.3.4 感应雷过电压	6
1.3.5 雷电侵入波(流动波过电压)	6
1.4 内部过电压	6
1.4.1 暂时过电压	6
1.4.2 操作过电压	14
第 2 章 防直接雷击保护装置	18
2.1 避雷针和避雷线	18
2.1.1 避雷针的保护范围	18
2.1.2 避雷线的保护范围	20
2.1.3 不等高避雷针、避雷线及其组合保护范围	21
2.2 滚球法确定避雷针、避雷线的防雷保护范围	22
2.2.1 建筑物的防雷分类和滚球半径的确定	22
2.2.2 用滚球法确定避雷针的保护范围	24
2.2.3 用滚球法确定避雷线的保护范围	28
2.3 消雷器和可控避雷针	30
2.3.1 消雷器	31
2.3.2 可控避雷针	31
2.3.3 优化脉冲提前放电避雷针	32
2.4 建筑物防直接雷击装置的安装敷设	33
2.4.1 接闪器	33
2.4.2 引下线	34
2.4.3 接地装置	35
2.5 交流电气装置防直接雷击装置的安装敷设	35

2.5.1	发电厂和变电所应装设直接雷击保护装置的范围	35
2.5.2	高压架空线路应装设防直接雷击保护装置的范围	36
2.5.3	发电厂和变电所防直接雷击保护装置的安装方式	37
2.5.4	避雷针(线、带、网)的接地	38
第3章	防雷电反击、感应雷和雷电侵入波过电压的保护措施	41
3.1	防雷电反击过电压	41
3.1.1	雷电反击过电压的近似计算	41
3.1.2	防直击雷保护装置的接地电阻值	42
3.1.3	避雷针(线、网)引下线和接地装置与被保护设备之间的空气中距离和地中距离	44
3.1.4	避雷针(线)若与变电所主接地网相连时与电气设备接地点沿地下 接地体距离的规定	48
3.2	防雷电感应过电压	49
3.2.1	交流电力系统的雷电感应过电压	49
3.2.2	建筑物防雷电感应过电压	50
3.3	防雷电侵入波过电压	51
3.3.1	发电厂和变电所高压配电装置的防雷电侵入波过电压保护	51
3.3.2	配电系统和低压用户接户电源的过电压保护	65
3.3.3	建筑物防雷电侵入波过电压保护的措施	68
3.4	避雷器	69
3.4.1	普通阀式避雷器	70
3.4.2	磁吹阀式避雷器	75
3.4.3	保护间隙和排气式避雷器	79
3.4.4	金属氧化物避雷器	83
3.4.5	金属氧化物避雷器的型号表示及产品技术参数举例	85
3.4.6	无间隙金属氧化物避雷器现场试验	88
3.4.7	金属氧化物避雷器的额定电压和持续运行电压	88
3.4.8	无间隙金属氧化物避雷器的参考电流和参考电压、残压比和保护比	92
3.4.9	有间隙金属氧化物避雷器的应用	93
3.4.10	阀式避雷器的选用	94
3.5	电子信息设备的防雷击电磁脉冲	98
3.5.1	电子信息设备雷电感应过电压防护的特点	98
3.5.2	划分防雷区、屏蔽、接地和等电位连接	98
3.5.3	电源线路的电涌保护器	105
第4章	暂时过电压保护及现场案例	110
4.1	暂时过电压的特点	110
4.1.1	暂时过电压的波形和持续时间	110
4.1.2	暂时过电压的特点	110
4.2	工频过电压与系统中性点运行方式的关系	112

4.2.1 单相接地故障时健全相电压升高与系统阻抗的关系	112
4.2.2 接地故障引起的工频过电压与单相或两相接地的关系	113
4.2.3 接地故障引起的工频过电压与中性点运动方式的关系	114
4.3 电压互感器过饱和铁磁谐振过电压	117
4.3.1 电压互感器过饱和铁磁谐振过电压发生的原因	117
4.3.2 电压互感器铁磁谐振过电压的限制措施	120
4.3.3 电压互感器铁磁谐振过电压的消谐措施	123
4.3.4 电压互感器过饱和铁磁谐振过电压的实测数据	123
4.3.5 分频谐振现场事故案例	129
4.4 利用电压互感器定相引起暂时过电压	131
4.5 带有均压电容的断路器与电磁式电压互感器形成铁磁谐振过电压	134
4.6 一相断线过电压	136
4.6.1 三相系统一相断线时的等值电路图	136
4.6.2 断线过电压现场事故案例	138
第5章 操作过电压现场事故案例	143
5.1 操作过电压的特点	143
5.2 3次谐波滤波支路分闸操作时开关重燃过电压	143
5.3 并联电容器合闸操作引起远方电力变压器过电压击穿损坏	144
5.4 变压器传递过电压	147
5.4.1 变压器传递过电压和变换过电压	147
5.4.2 66kV单相接地引起10kV系统过电压	148
5.4.3 变压器负荷侧短路引起电源侧过电压	149
5.5 变压器远方冲击合闸引起击穿损坏	150
附录一 建筑物年预计雷击次数	154
附录二 爆炸和火灾危险环境的区域分级	156
附录三 接地装置冲击接地电阻与工频接地电阻的换算	159
复习题	161
参考文献	163



第 1 章

过电压的危害及其分类

1.1 过电压及其危害

电气设备正常运行时，所受电压为其所在系统的额定电压。由于受各种因素的影响，实际电压会偏离额定电压某一数值，但不能超越允许范围。因此我国《供电营业规则》明确规定了供电企业供到用户受电端的电压允许偏差范围。例如：在电力系统非正常状况下，用户受电端的电压最大允许偏差为额定值的 $\pm 10\%$ 。

为了考核电气设备的工作特性，我国有关技术标准规定了与电力系统额定电压相对应的允许最高工作电压。例如 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定，10kV 对应的最高工作电压为 12kV，66kV 对应的最高工作电压为 72.5kV。表 1-1 为电力行业标准 DL 804—2002《交流电力系统金属氧化物避雷器使用导则》中列出的电力系统标称电压和系统最高工作电压的对应关系。表中 U_n 为系统标称电压， U_m 为系统最高工作电压，指的都是线电压。电力系统标称电压，也就是电力系统额定电压。

表 1-1 电力系统标称电压和最高工作电压

单位：kV（有效值）

电力系统标称电压 U_n	3	6	10	20	35	66	110	220	330	500
电力系统最高工作电压 U_m	3.6	7.2	12	24	40.5	72.5	126	252	363	550

一般来说，电力系统的运行电压在正常情况下是不会超过最高工作电压的。但是，由于雷击或电力系统中操作、事故等原因，某些电气设备和线路上承受的电压可能会大大超过正常运行最高工作电压，使设备或线路的绝缘遭受威胁。电力系统中这种危及绝缘的电压升高称为过电压。图 1-1 所示为雷击架空线路塔顶，



图 1-1 某 66kV 架空电力线路雷击塔顶，引起过电压反击，瓷瓶闪络，第一片被击碎，第三片掉渣，沿面有放电痕迹



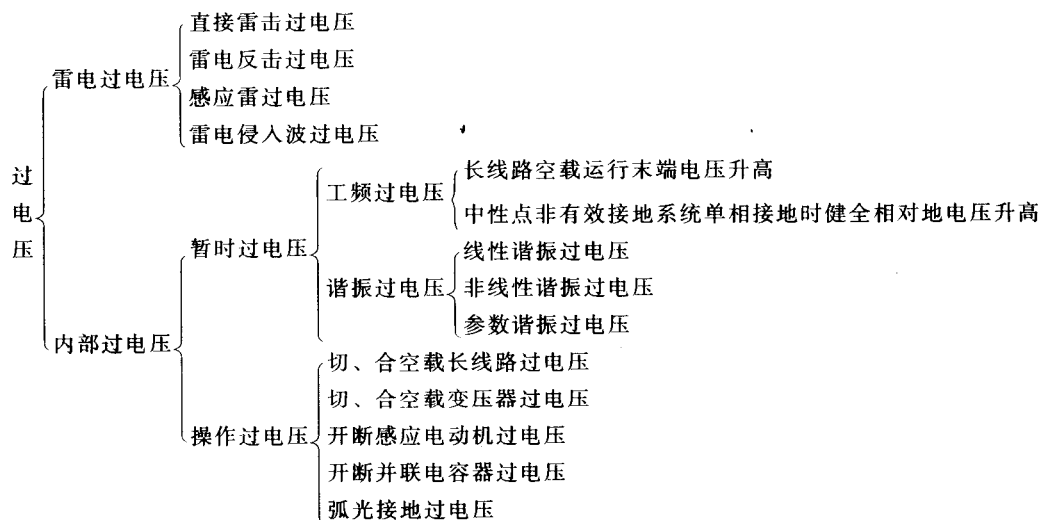
引起过电压反击，瓷绝缘子闪络放电，瓷瓶被击碎的事故实例照片。

过电压对电力系统的安全运行构成极大威胁。研究过电压的目的，是弄清发生过电压的原因，制订对策，在最大程度上防止因过电压造成电气设备和电力线路事故损坏。

1.2 过电压的分类

电力系统出现过电压的原因是多种多样的。除了雷电引起过电压外，还有电力系统内部的原因。一般把电力系统的过电压分成雷电过电压和内部过电压两大类。雷电过电压与气象条件有关，是外部原因造成的，产生过电压的能量来自电力系统的外部，因此也称为大气过电压或外部过电压。

内部过电压与电力系统内部结构、各项参数、运行状态、停送电操作和是否发生事故等多种因素有关，十分复杂。产生过电压的能量来自电力系统内部，因此称为内部过电压。不同原因引起的内部过电压，其过电压数值大小、波形、频率、延续时间长短也不同，防止的对策也有区别。为了便于研究，一般把内部过电压又细分为工频过电压、谐振过电压和操作过电压。这三类过电压中的工频过电压和谐振过电压又称作暂时过电压。意指这两种内部过电压一旦发生，有可能持续一段时间，但应尽快设法消除，以免引起事故扩大。参照电力行业标准 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》中的提法，过电压分类如下：



1.3 雷电过电压

雷电过电压包括直接雷击、雷电反击和感应雷过电压。此外，发电厂和变电所遇到较多的还有来自电力线路的雷电侵入波。

1.3.1 直接雷击过电压

雷电放电是雷云所引起的放电现象。直接雷击是大气中的雷云通过地面上的物体对大地直接放电。

那么雷云是怎么形成的呢？所谓雷云，就是带有电荷的乌云，其成分含有水的各种不



同状态。由于宇宙射线的作用，大气中会有游离电荷；此外，由于太阳光的照射，接近地面的水蒸气受热急剧膨胀上升，而在高空，由于温度很低，甚至在零摄氏度以下，水蒸气遇冷凝结成小水滴迅速下沉。小水滴在下沉过程中，遇上升的热气流互相摩擦，也会产生正、负电荷。这些电荷与云结合，于是出现带有电荷的雷云。根据雷电观测资料，靠近地面的绝大多数雷云为负极性。

常言道：迅雷不及掩耳。这是形容雷电来得十分迅速，瞬间就完成击穿放电。实际上我们肉眼看到的耀眼的雷闪（见图1-2），其中常常包含有若干次击穿放电。根据雷电观测资料，雷云对地放电大多数要重复2~3次，每次放电都有先导放电和主放电两个阶段。所谓“先导放电”，就是指在雷云与大地之间强电场的作用下，带电粒子快速运动，引起碰撞游离，使游离通道逐级发展的过程。

发生雷电时较多的是自雷云向下开始发展先导放电，这称为下行雷。自雷云下行到大地的电荷的极性，90%左右是负极性，称为负极性雷。当下行负先导接近地面时，会从地面突出的地方发出向上的迎面先导。迎面先导与下行先导相遇，形成强烈的中和过程，出现雷鸣和电闪。这就是雷电的主放电阶段。

根据雷电观测资料，雷云对地放电大多数情况都是重复出现几次主放电，其中第一次主放电之前的先导放电是分级发展的（见图1-3），每一级先导的长度约10~50m，也有长达100~200m。发展速度一般为 10^7 m/s，间隙时间约30~90 μ s。

如果地面有高耸的突出物，则在雷云的强烈作用下，地面突出物有时也可能向上发出上行先导，与雷云中的异号电荷发生强烈中和，称为上行雷。

由图1-3可见，第一次主放电电流最大。主放电时间很短， T_2 一般为50~100 μ s。第一次主放电之前的分级先导时间 T_1 的长短与雷云离地高度等多种因素有关，大约在0.005~0.01s之间。第一次和第二次主放电之间的间隔时间 T_3 相对比较长，一般约为0.03~0.05s。第一次主放电结束后，经过0.03~0.05s间隔时间，沿第一次主放电通路先后出现第二次、第三次主放电。第二次及以后的主放电不再分级进行，先导都是自上而下连续发展而主放电仍是由下往上发展。图1-3的上半部阴影部分是主放电到达云端之后，云中的残余电荷沿刚才的主放电通道流下来，称为余辉放电，电流很小，因此发光微弱，但时间较长。图1-3下半部是雷电放电时的雷电流曲线。第一次主放电时的雷电流很大，能达几千安甚至几十、几百千安。第二次、第三次主放电电流较小。地面上的物体被雷击中时，强大的雷电流快速流过被击物体时，产生很高的冲击电压。冲击电压大小与雷电流大小和被击物体冲击电阻大小有关。由于这个缘故，雷电的强度一般以雷电流表示，而不用雷电压表示。至于被雷电击中的电气装置（例如架空线路）所承受雷电过电压对电气绝缘的危险程度则与雷电流的幅值

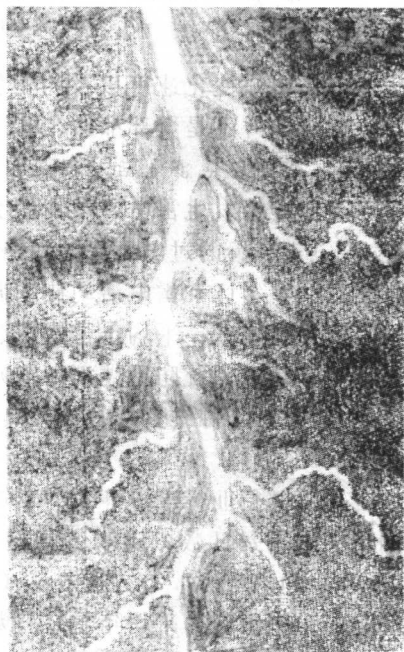


图1-2 耀眼的雷闪

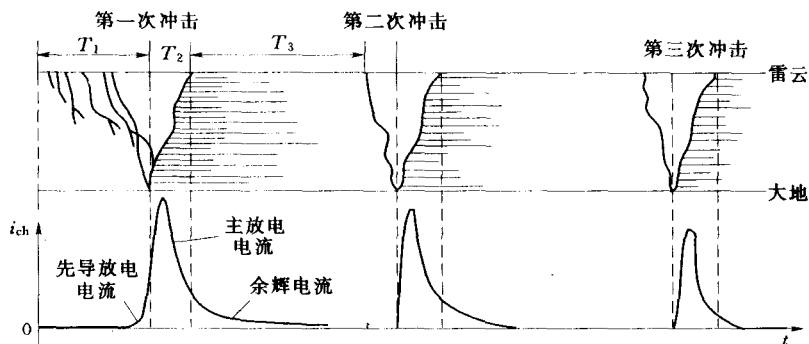


图 1-3 雷云对地放电随时间的发展过程

i_{ch} —雷电冲击电流； t —时间；横线阴影—主放电余辉； T_1 —第一次主放电之前的分级先导时间；

T_2 —第一次主放电时间； T_3 —第一次和第二次主放电之间的间隔时间

大小和雷电流变化速度以及防雷保护装置的保护性能、接地电阻的大小等有关。也就是说，雷电压并不是全部都加在电气设备的绝缘上。

1.3.2 全国各地雷电活动强烈程度的划分

各个地区发生雷电的频繁程度用年雷暴日数来表示。电力行业标准 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》按照各地平均年雷暴日数的不同，分为少雷区、中雷区、多雷区和雷电活动特殊强烈地区。

(1) 少雷区：平均年雷暴日数不超过 15 的地区。根据国家标准 GB 50343—2004《建筑物电子信息系统防雷技术规范》提供的数据^①，属于少雷区的地区有（括号内为平均年雷暴日数）：新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市（9.3），甘肃省酒泉市（12.9），青海省格尔木市（2.3）。

建设部行业标准 JGJ 46—2005《施工现场临时用电安全技术规范》附录 A 也提供全国年平均雷暴日数，属于少雷区的还有：新疆维吾尔自治区哈密市（6.9）、吐鲁番市（9.9）、和田市（3.2）、且末县（6.0），甘肃省敦煌市（5.1）。

(2) 中雷区：平均年雷暴日数超过 15 但不超过 40 的地区。GB 50343—2004 提供的数据属于中雷区的地区主要有：

北京市（36.3）。

天津市（29.3）。

上海市（28.4）。

重庆市（36.0）。

河北省石家庄市（31.2）、保定市（30.7）、邢台市（30.2）、唐山市（32.7）、秦皇岛市（34.7）。

山西省太原市（34.5）、临汾市（31.1）、长治市（33.7）、阳泉市（40.0）。

内蒙古自治区呼和浩特市（36.1）、包头市（34.7）、海拉尔市（30.1）、赤峰市

^① GB 50343—2004《建筑物电子信息系统防雷技术规范》附录 D“全国主要城市年平均雷暴日数统计表”中提供的各地雷暴日数，与建设部行业标准 JGJ 46—2005 和 JGJ/T 16 中提供的数据略有不同。



(32.4)。

辽宁省沈阳市 (26.9)、大连市 (19.2)、鞍山市 (26.9)、本溪市 (33.7)、锦州市 (28.8)。

吉林省长春市 (35.2)、四平市 (33.7)、通化市 (36.7)、图门市 (23.8)。

黑龙江省哈尔滨市 (27.7)、大庆市 (31.9)、齐齐哈尔市 (27.7)、佳木斯市 (32.2)、伊春市 (35.4)。

江苏省南京市 (32.6)、苏州市 (28.1)、常州市 (35.7)、南通市 (35.6)、徐州市 (29.4)、连云港市 (29.6)。

浙江省杭州市 (37.6)、宁波市 (40.0)。

安徽省合肥市 (30.1)、蚌埠市 (31.4)、芜湖市 (34.6)、阜阳市 (31.9)。

山东省济南市 (25.4)、青岛市 (20.8)、烟台市 (23.2)、济宁市 (29.1)、潍坊市 (28.4)。

河南省郑州市 (21.4)、洛阳市 (24.8)、安阳市 (28.6)、信阳市 (28.8)、三门峡市 (24.3)。

湖北省武汉市 (34.2)、十堰市 (18.8)。

四川省成都市 (34.0)、绵阳市 (34.9)、达州市 (37.1)、自贡市 (37.6)。

陕西省西安市 (15.6)、宝鸡市 (19.7)、汉中市 (31.4)、延安市 (30.5)、安康市 (32.3)。

甘肃省兰州市 (23.6)、天水市 (16.3)、金昌市 (19.6)。

青海省西宁市 (31.7)、德令哈市 (19.3)。

宁夏回族自治区银川市 (18.3)、石嘴山市 (24.0)、固原县 (31.0)。

新疆维吾尔自治区克拉玛依市 (31.3)、伊宁市 (27.2)、库尔勒市 (21.6)。

香港特别行政区 (34.0)。

台湾省台北市 (27.9)。

(3) 多雷区：平均年雷暴日数超过 40 但不超过 90 的地区。GB 50343—2004 提供的数据属于多雷区的地区集中在我国中南部和西南部地区，主要有：

浙江省温州市 (51.0)、丽水市 (60.5)、衢州市 (57.6)。

福建省福州市 (53.0)、厦门市 (47.4)、漳州市 (60.5)、三明市 (67.5)、龙岩市 (74.1)。

江西省南昌市 (56.4)、九江市 (45.7)、赣州市 (67.2)、上饶市 (65.0)、新余市 (59.4)。

湖北省宜昌市 (44.6)、恩施市 (49.7)、黄石市 (50.4)。

湖南省长沙市 (46.6)、衡阳市 (55.1)、邵阳市 (57.0)、郴州市 (61.5)、大庸市 (48.3)。

广东省广州市 (76.1)、深圳市 (73.9)、汕头市 (52.6)、珠海市 (64.2)、韶关市 (77.9)。

广西壮族自治区南宁市 (84.6)、桂林市 (78.3)、北海市 (83.1)、柳州市 (67.3)。

四川省攀枝花市 (66.3)、西昌市 (73.2)、康定县 (52.1)、乐山市 (42.9)。



贵州省贵阳市 (49.4)、遵义市 (53.3)、六盘山市 (68.0)、兴义市 (77.4)、凯里市 (59.4)。

云南省昆明市 (63.4)、大理市 (49.8)、丽江 (75.8)、个旧市 (50.2)、东川市 (52.4)。

西藏自治区拉萨市 (68.9)、日喀则市 (78.8)、那曲县 (85.2)、昌都县 (57.1)。

海南省三亚市 (69.9)。

(4) 雷电活动特殊强烈地区：平均年雷暴日数超过 90 的地区及根据运行经验雷害特殊严重的地区。平均年雷暴日数超过 90 的地区主要有：

广东省湛江市 (94.6)、茂名市 (94.4)。

广西壮族自治区梧州市 (93.5)。

云南省景洪市 (120.8)、海口市 (108)。

海南省海口市 (104.3)、琼中市 (115.5)。

1.3.3 雷电反击过电压

如果雷云对电力架空线路的杆塔顶部放电，或者雷云对电力架空线路杆塔顶部的避雷线放电，这时雷电流经杆塔入地。雷电流流经杆塔入地时，在杆塔阻抗和接地装置阻抗上存在电压降。因此，杆塔顶部出现高电位，这个高电位作用于线路的导线绝缘子上，如果电压足够高，有可能产生击穿，对导线放电，这种情况称为雷电反击过电压。

1.3.4 感应雷过电压

感应雷过电压，是指在电气设备（例如架空电力线路）的附近不远处发生闪电，虽然雷电没有直接击中线路，但由于静电感应和电磁感应，在导线上会感应产生过电压，形成感应雷过电压。另外，当巨大的雷电流在雷击点快速流动时，其周围也会感应产生很高的感应电势，也有可能产生过电压。

1.3.5 雷电侵入波（流动波过电压）

在架空电力线路附近发生雷击时，雷云对地面物体放电，雷云电荷和地面的异种电荷互相中和，强电场瞬间消失。这时，架空电力线路上被雷云感应而集中的束缚电荷，由于失去雷云电荷的吸引，失去束缚，迅速向线路两侧流去。迅速流动的感应电荷称为流动雷电波或雷电进行波。当线路上遭遇直击雷时，雷电波同样也会向两侧流动。雷电进行波对其前进道路上的电气设备构成威胁，因此也称为雷电侵入波。对于一般的变电所，如果有架空进出线，则必须考虑对雷电侵入波的预防。雷电侵入波对电气设备的严重威胁还在于：当雷电侵入波往前引进时，例如遇到处于分闸状态的线路开关，或者来到变压器线圈尾端中性点处，则会产生波的反射。这个反射波与侵入波叠加，过电压增高一倍，极易造成击穿事故。

1.4 内部过电压

内部过电压包括暂时过电压和操作过电压。暂时过电压又分为工频过电压和谐振过电压。

1.4.1 暂时过电压

在 GB 311.1—1997《高压输变电设备的绝缘配合》中指出暂时过电压是指存在时间



在 0.03s 以上, 一般不超过 1h 的低频过电压。其频率范围为 $10\text{Hz} < f < 500\text{Hz}$ 。属于这一范围的过电压有工频电压升高(工频过电压)和谐振过电压。实际上工频电压升高, 例如空载长线路的电容效应引起工频电压升高, 或者中性点不接地系统中由于单相接地故障引起另外两个健全相对地工频电压升高都属于稳态性质, 如果不采取措施改变电网运行状态, 例如改变线路的空载状态, 或者投入并联电抗器, 以改变线路中的电容电流, 对于中性点不接地系统中的单相接地故障如果不及时消除, 则工频电压升高会持续存在。

在过去的过电压保护规程中, 没有“暂时过电压”这个名称。例如, 我国于 1959 年由水利电力部颁布的《过电压保护规程》, 将内部过电压分为操作过电压和谐振过电压, 没有“暂时过电压”的名称。1976 年该规程被修订, 改名为 SDJ 7—1976《电力设备过电压保护设计技术规程》; 1979 年, 又进行了修改补充, 仍取名 SDJ 7—1979《电力设备过电压保护设计技术规程》, 这两本规程中没有对过电压进行分类, 也都没有出现“暂时过电压”的名称。1997 年电力工业部颁布的电力行业标准 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》中对电力系统运行中出现于设备绝缘上的电压分为四类, 除了正常运行的工频电压外, 其他三类为过电压: 雷电过电压、暂时过电压和操作过电压。其中的暂时过电压包括工频过电压和谐振过电压, 都是持续时间有可能较长的过电压。

1.4.1.1 工频过电压

电力系统中的工频过电压一般是由于长线路空载时的电容效应、三相系统中的单相或两相不对称接地短路时非故障相电压升高, 以及突然甩负荷时引起的工频电压升高。

1. 空载长线路电容效应引起工频过电压

超高压输电线路既具有电阻和电感 L , 同时又具有对地电容 C , 因此形成感性阻抗与容抗串联电路, 而且容抗远大于感抗。空载长线路中虽然没有负载电流, 但是却流过线路电容电流。在电感电容串联的回路中, 如果容抗大于感抗, 则回路中流过容性电流, 而且这个电流在感抗上的压降 $\dot{U}_L$ 将使对地容抗上的电压 $\dot{U}_C$ 升高(高于电源电压), 这就是电感—电容电路的电容效应, 如图 1-4 所示。图中忽略了电阻, 并将输电线路的电感、电容分布参数用集中参数 L 和 C 表示。由图中相量分析可见, 对地电压 U_C 比线路始端的电源电压 U 高出很多, 这就是空载线路电容效应引起工频电压升高的原因。对于超高压、

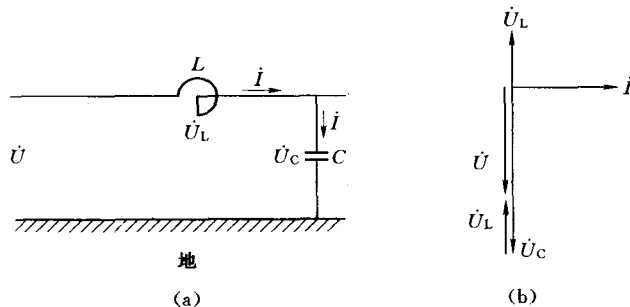


图 1-4 空载长线路电容效应引起电压升高
(a) 电路示意图; (b) 电压相量分析



长距离的输电线路, 需要考虑电感、电容分布参数的影响。线路空载时, 沿线各点电压都有升高, 末端电压升高最多。而且这种电压升高还与电源容量有关, 电源容量愈小, 情况愈严重。这是因为电源阻抗愈大, 相当于增加了导线的长度, 流过电容电流时, 线路电压愈高。

2. 三相系统单相或两相不对称接地故障时引起非故障相对地工频电压升高

在三相电力系统中, 当发生不对称短路故障时, 一般都伴随发生单相或两相接地故障, 这时常常引起非故障相对地电压升高。特别是单相接地故障发生较多, 引起的工频过电压较高, 而且持续时间有时会很长。

三相电力系统发生单相接地故障时, 引起非故障相的对地电压升高, 其数值大小与中性点接地方式, 以及电网结构、线路阻抗参数等有关。具体来说, 与电网的零序电抗 X_0 和正序电抗 X_1 的比值 X_0/X_1 的数值大小和符号有关。对于 3~10kV 中性点不接地的三相电力系统, 零序电抗 X_0 由导线的对地电容决定, 因此 X_0 是容性的, 而且由于对地电容一般较小, 因此容抗很大, 所以 X_0/X_1 的比值很大, 这时非故障相的对地电压一般略高于线电压, 约为线电压的 1.1 倍 (见后面图 4-1 及有关说明), 即这时的工频过电压为 $1.1\sqrt{3}p.u.$ 。这里, $p.u.$ 是标么值的符号。对于工频过电压 $1.0p.u. = U_m/\sqrt{3}$ 。这里 U_m 为系统最高电压 (线电压)。

对于 35~66kV 系统, 一般采取中性点经消弧线圈接地。这时零序电抗 X_0 的数值大小和符号与消弧线圈的补偿度有关。当消弧线圈电感电流与线路对地电容电流完全相等, 即全补偿时, $X_0 \rightarrow \infty$, 在这种情况下, 当发生单相接地故障时, 非故障相的对地电压上升到线电压。在一般情况下, 消弧线圈是在过补偿下运行, 即消弧线圈的电感电流略大于单相接地电容电流, 亦即零序电抗 X_0 呈感性, 这时, 非故障相的对地电压升高到略低于线电压。如果一旦出现消弧线圈欠补偿运行, 对地电容电流大于消弧线圈电感电流, 这时零序电抗 X_0 呈容性, 其情况与中性点不接地系统类似, 如发生单相接地故障, 非故障相对地电压一般略高于线电压, 约为线电压的 1.05~1.1 倍 (见后面图 4-1)。

对于中性点直接接地系统, 零序电抗 X_0 总是呈感性。对于 110~220kV 架空线路, X_0/X_1 大约在 2.5~3.2 之间。而电网中变压器的 X_0/X_1 比值, 则取决于中性点直接接地的变压器与中性点不接地的变压器总容量之比。中性点直接接地的变压器越多, X_0/X_1 的比值越小。一般情况下, 如果中性点直接接地的变压器占总容量的 1/3~1/2 则单相接地故障时非故障相的对地电压会升高到正常时相电压的 1.3~1.4 倍。

3. 突然甩负荷引起的工频过电压

在输电线路传输重负荷时, 如果断路器突然跳闸甩掉负荷, 这时会引起工频过电压。这一方面是因为电源侧发电机原动机的调速系统有惰性, 甩负荷后不能立即控制减少原动力, 防止发电机转速增加, 从而出现发电机频率和电势上升; 另一方面如果线路断路器跳闸是由短路故障引起的, 则发电机的强行励磁作用, 可能使工频电压还要提高。如果是长线路末端跳闸, 则由于长线路空载时电容效应引起工频过电压更为严重。

上面介绍了电力系统中引起工频电压升高的主要三种情况。工频过电压的数值一般不会很大, 对正常绝缘的电气设备是没有危险的。例如, 对于 3~10kV 系统, 一般采取中性点非直接接地系统, 主要考虑单相接地故障时, 健全相的电压升高, 一般零序电抗 X_0