

第二版

交联聚乙烯 电力电缆

JIAOLIAN JUYIXI
DIANLI DIANLAN
XIANLU

线路

江日洪 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

更多专业资料请访问电建论坛

JIAOLIAN JUYIXI
DIANLI DIANLAN XIANLU

电力建设论坛

交联聚乙烯

第二版

电力电缆线路

ISBN 978-7-5083-8288-3



9 787508 382883 >

定价：20.00 元

销售分类建议：电力工程 / 输配电

更多专业资料请访问电建论坛



第二版

交联聚乙烯

JIAOLIAN JUYIXI
DIANLI DIANLAN
XIANLU

电力电缆线路

江日洪 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书对第一版内容进行了修改和完善,并结合我国电力系统建设和城市电网改造工作,介绍了交联聚乙烯(XLPE)电力电缆的特点、选用原则、电气试验标准和方法;电缆线路敷设和附件安装,以及投运后的维护、绝缘监测和电力电缆线路的防雷保护、防火措施;交流高压单芯电缆护套感应电压和环流计算等问题。

本书主要供电力系统和电缆生产厂家技术人员学习使用,也可作为大专院校有关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

交联聚乙烯电力电缆线路/江日洪编. —2版. —北京:中国电力出版社,2009

ISBN 978-7-5083-8288-3

I. 交… II. 江… III. 交联聚乙烯-电力电缆-输配电线路
IV. TM247

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第210578号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1997年11月第一版

2009年4月第二版 2009年4月北京第四次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 9.125印张 237千字

印数7921—10920册 定价20.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

20 世纪 70 年代以来，我国在交联聚乙烯电力电缆的生产和应用方面得到了迅速地发展。交联聚乙烯电力电缆已基本上取代了常规的油纸绝缘电缆，其主要原因是：交联聚乙烯电力电缆质量轻，制造工艺较简单，安装敷设容易，且不受落差限制，可减少施工费用，有良好的电气性能和耐热性能，传输容量大，运行维护方便等。至今，我国已先后研制成功 1, 3, 6, 10, 15, 20, 30, 35, 66, 110, 220kV 交联聚乙烯电力电缆，并能进行批量生产。加上从国外引进的产品（主要是 220、500kV 级产品），极大地促进了我国的电力系统建设和城网改造工作。2007 年 2 月 3 日由国网武汉高压研究院主办的“全国 500kV 交联电缆应用技术研讨会”在武汉胜利召开，标志着我国第一个城市电网用 500kV 交联电缆系统应用项目取得了突破性进展，并进入实质性实施阶段，使我国成为继日本后，第二个将 500kV 交联电缆系统大规模应用于城市电网的国家。

为满足国内电力部门有关技术人员工作学习的需要，我们根据调研和多年来的教学和科研成果，于 1997 年编写了本书第一版。由于该书内容较为切合读者实际工作的需要，为同行建立起了一个交流的平台。当然，这一成绩和国内有关单位和专家的关心和支持是分不开的，如上海供电局电缆工程公司李霞娟高工，沈阳电缆厂滕维钧高工，广州供电局陈立护工程师以及北京电力公司杨书全高工等，在此再次向他们表示感谢。

鉴于该书出版距今已有 10 年，书中有些内容需参照

GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》和电力电缆生产技术的发展进行修改再版。在此需要说明的是，由于受某些条件的限制，除保留的原始章节外，其余章节均由武汉大学电气工程学院江日洪教授统一修改定稿。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2008年12月于广州

目 录

-----交联聚乙烯电力电缆线路

前言

第一章 交联聚乙烯电力电缆概述	1
第一节 电力电缆的分类和特点.....	1
第二节 交联聚乙烯电力电缆的特性.....	3
第三节 交联聚乙烯电力电缆的制造工艺.....	5
第四节 中压交联聚乙烯电力电缆的品种和结构	10
第五节 交联聚乙烯电力电缆及附件的发展	15
思考题	20
第二章 交联聚乙烯电力电缆的选用	21
第一节 交联聚乙烯电力电缆型号和选用原则	21
第二节 交联聚乙烯电力电缆线芯数和截面选择	22
第三节 交联聚乙烯电力电缆热特性和载流量的计算	30
第四节 电力电缆线路允许通过短路电流的计算	39
第五节 交联聚乙烯电力电缆金属屏蔽层截面选择	40
思考题	44
第三章 交联聚乙烯电力电缆的电气试验	45
第一节 交联聚乙烯电力电缆额定电压 U_0/U 的制定 和分类	45
第二节 交联聚乙烯电力电缆电气试验分类、试验 标准和方法	49
第三节 交联聚乙烯电力电缆交流耐压试验设备和 试验程序	56
第四节 交联聚乙烯电力电缆线路故障定位方法	63
第五节 交联聚乙烯电力电缆局放测试技术 的现场应用	75

思考题	80
第四章 交联聚乙烯电力电缆敷设与附件选型和安装	81
第一节 交联聚乙烯电力电缆线路的敷设方式与条件	81
第二节 110kV 交联聚乙烯电力电缆的施工工艺	84
第三节 交联聚乙烯电力电缆中间接头的选型和安装	87
第四节 交联聚乙烯电力电缆终端头的选型和安装	97
第五节 110kV 交联聚乙烯电力电缆户外电缆终端 应用现状.....	101
思考题.....	105
第五章 交联聚乙烯电力电缆绝缘老化机理 及监测.....	106
第一节 交联聚乙烯电力电缆绝缘老化机理.....	106
第二节 交联聚乙烯电力电缆水树的形成和电缆 特性的变化.....	107
第三节 水树老化的判断方法和离线监测.....	113
第四节 交联聚乙烯电力电缆绝缘在线监测.....	119
第五节 110/220kV 交联聚乙烯电力电缆 在线监测法的评估.....	129
思考题.....	135
第六章 电力电缆线路的过电压保护.....	136
第一节 电力电缆绝缘冲击电压水平的选择.....	136
第二节 电力电缆线路的冲击特性长度和绝缘配合.....	137
第三节 电缆—GIS 系统避雷器保护范围的计算.....	147
第四节 电力电缆线路上的限流电抗器及过电压保护.....	155
第五节 220kV 长电缆线路过电压保护计算实例	160
思考题.....	164
第七章 高压单芯电缆护层过电压保护及金属护套 环流计算.....	165
第一节 冲击电压作用下的护层过电压.....	166

第二节	金属护套工频感应电压的计算·····	176
第三节	电缆护层保护的接线方式·····	191
第四节	电缆护层保护器的技术要求及其设计·····	194
第五节	电缆金属护套环流分析及计算实例·····	200
	思考题·····	209
第八章	交联聚乙烯电力电缆线路的防火与阻燃措施·····	210
第一节	国内外电缆火灾事故分析·····	210
第二节	电缆防火阻燃措施现状及存在问题·····	212
第三节	防止电缆着火延燃的措施·····	214
第四节	电缆防火材料的选择和应用·····	219
第五节	配网隧道电缆的防火·····	223
	思考题·····	226
第九章	电力系统中的控制电缆和导引电缆·····	228
第一节	1kV 及以下全塑电缆的正确使用·····	228
第二节	电力电缆对同沟敷设导引电缆的影响及防护 措施·····	233
第三节	控制电缆的使用条件、线芯数及截面选择·····	237
第四节	控制电缆的事故分析及保护措施·····	241
	思考题·····	249
附录 A	交联聚乙烯电力电缆结构尺寸及电气 性能（供参考）·····	250
附录 B	电缆线路参数的测量方法·····	263
附录 C	电力电缆直埋敷设有关系尺寸规定·····	275
附录 D	交流系统单芯电缆金属护套正常感应 电压计算·····	278
	参考文献·····	280

交联聚乙烯电力电缆概述

第一节 电力电缆的分类和特点

电力电缆经常用作发电厂、变电站以及工矿企业的动力引入或引出线,当需跨越江河、铁路等时也常用它;而随着城市用电量剧增,又希望减少线路走廊用地,不少国家还将电力电缆用作城市的输配电线路。电力电缆与架空线路相比,其优点是受外界环境等的影响少、安全可靠、隐蔽、耐用;缺点是电缆结构和生产工艺都比较复杂,成本较高,应用不如架空线那样广泛。然而在某些特殊情况下,电力电缆能完成架空线路不易甚至无法完成的任务。

目前电力电缆已应用于交流 500kV 及以下的电压等级。下面对电力电缆的分类和特点作简要介绍。

一、电力电缆的种类

电力电缆按绝缘材料性质、结构特征和敷设环境,可分为不同的种类。

(一) 按绝缘材料性质分

1. 油纸绝缘

- 1) 黏性浸渍纸绝缘型(统包型、分相屏蔽型);
- 2) 不滴流浸渍纸绝缘型(统包型、分相屏蔽型);
- 3) 有油压、油浸渍纸绝缘型(自容式充油电缆和钢管充油电缆)。

2. 塑料绝缘

- 1) 聚氯乙烯绝缘型;
- 2) 聚乙烯绝缘型;
- 3) 交联聚乙烯绝缘型。

3. 橡胶绝缘

- 1) 天然橡胶绝缘型;
- 2) 乙丙橡胶绝缘型。

(二) 按结构特征分

(1) 统包型。在各电缆线芯外包有统包绝缘, 并置于同一内护套内。

(2) 分相型。分相屏蔽, 一般用在 10~35kV 电缆中, 有油纸绝缘和塑料绝缘两种。

(3) 扁平型。三芯电缆的外形呈扁平状, 一般用于较长的水下和海底电缆。

(4) 自容型。护套内部有压力的电缆, 如自容式充油电缆。

(三) 按敷设环境分

(1) 直埋式。将电缆埋在地中或沟内, 并加沙土覆盖。

(2) 沟架式。将电缆敷设在沟内或隧道内的支架上。

(3) 水下敷设。将电缆敷设在湖泊、海洋和河流内。

二、各种电力电缆的特点

(一) 油纸绝缘电缆

(1) 黏性浸渍纸绝缘电缆。该种电缆开发较早, 制造质量比较稳定, 具有较长的制造和运行经验, 工作寿命长。该种电缆的缺点是油易滴流, 不宜作高落差敷设; 允许工作场强较低, 不宜在太高电压下使用。

(2) 不滴流浸渍纸绝缘电缆。浸渍剂在工作温度下不滴流, 适宜高落差敷设; 工作寿命较黏性浸渍纸绝缘电缆更长; 有较高的绝缘稳定性, 但成本较黏性浸渍纸绝缘电缆高。

(二) 塑料绝缘电缆

(1) 聚氯乙烯绝缘电缆。工艺性能好, 易于加工, 化学稳定性高(耐油、耐酸、耐碱和耐腐蚀), 非延燃性, 生产效率高, 价格低廉, 敷设维护简单; 在低压电缆方面已有取代油浸纸绝缘电缆的趋势。

(2) 聚乙烯绝缘电缆。有良好的介电性能, 介质损耗角正切

值 $\tan\delta$ 小，绝缘电阻高；工艺性能好，易于加工，耐湿性好，比重小。但该类电缆抗电晕及耐热性能较差，受热易变形或开裂，因而用于较高的工作电压等级时，必须加入特殊添加剂。

(3) 交联聚乙烯绝缘电缆。电气性能好，击穿电场强度高，介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 小，绝缘电阻高；有较高的耐热性和耐老化性能，允许工作温度高，载流量大，适宜于高落差与垂直敷设，是一种很有发展前途的高压电缆。

(三) 橡胶绝缘电缆

橡胶绝缘电缆的种类很多，绝缘材料主要是天然橡胶加不同的添加剂组成的各种橡胶。该类电缆都具有良好的柔软性、易弯曲，在很大的温度范围内具有弹性，有较好的电气性能和化学稳定性；但耐电晕、耐臭氧、耐油性较差，一般适用于 1kV 及以下电压等级的线路，但人工合成的乙丙橡胶可用于 35kV 及以下电压等级的电缆。

● 第二节 交联聚乙烯电力电缆的特性

如上节所述，交联聚乙烯 (XLPE) 属于固体绝缘，它是由聚乙烯 (PE) 加入交联剂挤出成形后，经过化学或物理方法交联成交联聚乙烯。聚乙烯绝缘虽具有优良的电气性能，但属于热塑性材料，即有热可塑性，当电缆通过较大的电流时，绝缘就会熔融变形，这是由聚乙烯的分子结构所决定的。聚乙烯的分子结构呈直链状，而交联聚乙烯是聚乙烯分子间交联形成网状结构，从而改善了聚乙烯的耐热变形性能、耐老化性能和机械性能，如图 1-1 所示。

聚乙烯交联的物理方法是辐照法，用高能电子射线照射，去除聚乙烯分子中的氢原子，使碳—碳链合，分子间进行交联。这种方法加工性能和经济性都不如化学交联。聚乙烯的化学交联是在聚乙烯中加入少量的有机过氧化物，常用的是过氧化二异丙苯，借助于过氧化物受热分解产生游离基，游离基能与聚乙烯中

的氢原子结合，失去氢原子的聚乙烯分子间就联合起来，变成交联聚乙烯，如图 1-2 所示。

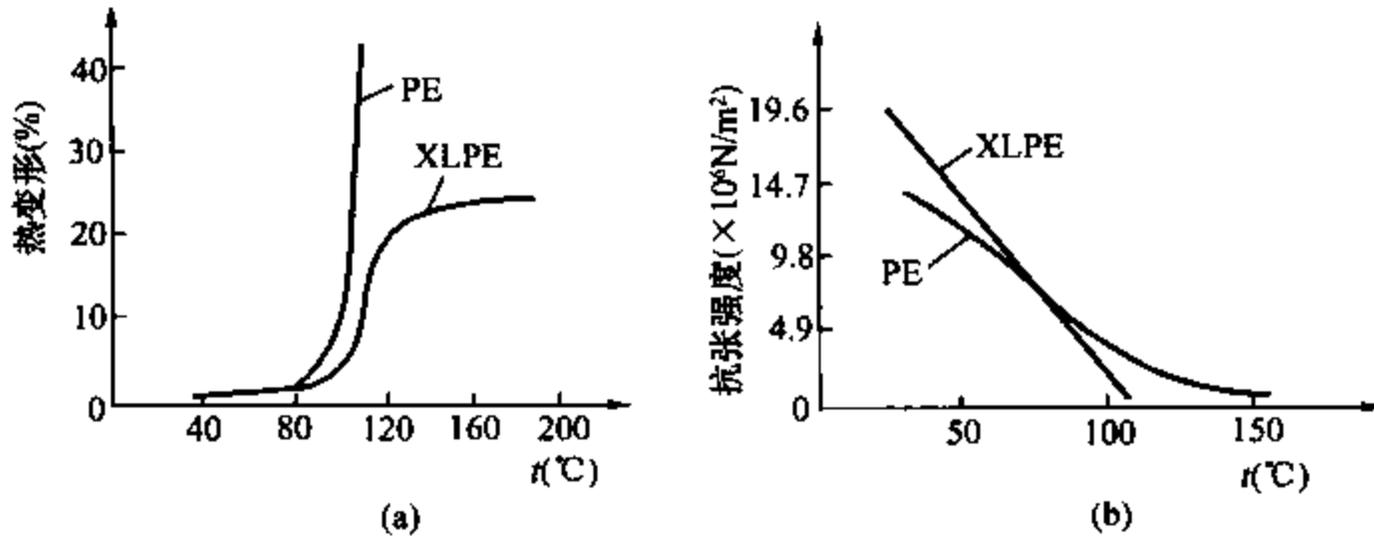


图 1-1 交联聚乙烯电缆热变形、抗张强度与温度的关系

(a) 热变形与温度；(b) 抗张强度与温度

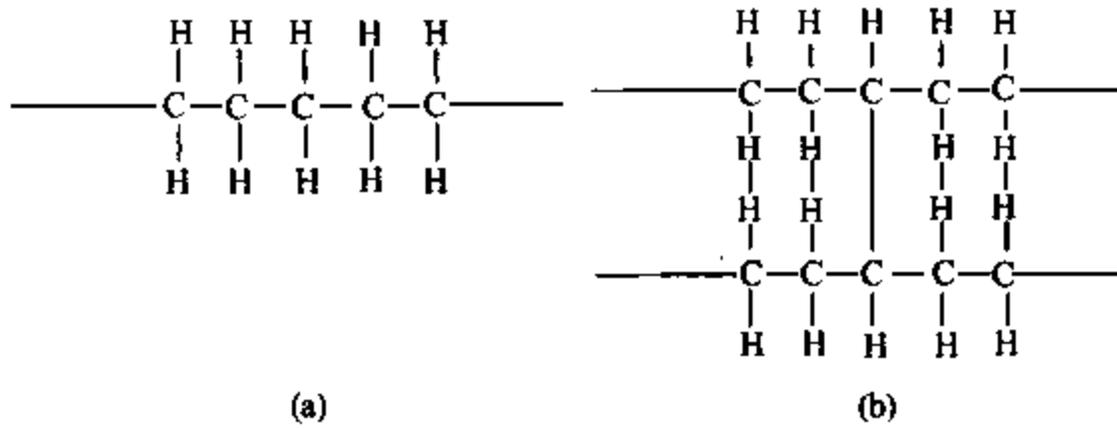


图 1-2 交联聚乙烯电缆分子结构

(a) PE 电缆；(b) XLPE 电缆

交联聚乙烯电缆与油纸电缆相比，具有结构简单，制造周期短，工作温度高，无油，敷设落差不限，运行可靠，质量轻，安装、维护简单和输电损耗小等优点。由于其耐热性和机械性能好，传输容量大，所以不仅适用于中低压系统，还可以应用到高压和超高压系统中。表 1-1 列出了交联聚乙烯与其他绝缘材料的性能对比，也充分地证明了交联聚乙烯是一种优良的绝缘材料。所以交联聚乙烯绝缘电缆不仅能在中低压范围内代替传统的油纸绝缘电缆，而且也能在高压或超高压等级上与自容式充油电缆竞争。

表 1-1 交联聚乙烯与其他绝缘材料的性能对比

性能	单位	交联聚乙烯	聚乙烯	聚氯乙烯	乙丙橡胶	油浸纸
电气性能	体积电阻 (20℃)	$\Omega \cdot m$	10^{14}	10^{14}	10^{11}	10^{12}
	介电常数 (20℃、50Hz)		2.3	2.3	5.0	3.5
	介质损耗角正切值 (20℃、50Hz)		0.000 5	0.000 5	0.07	0.003
	击穿强度	kV/mm	30~70	30~50	—	—
耐热性能	导体最大工作温度	℃	90	75	70	85
	允许最大短路温度	℃	250	150	135	250
机械性能	抗张强度	N/mm ²	18	14	18	9.5
	伸长率	%	600	700	250	850
耐老化性能	100℃		优	良	可	优
	120℃		优	熔	差	良
	150℃		良	熔	—	可
其他性能	抗热变形 (150℃)		良	熔	差	优
	耐油 (70℃)		良	良	良	差
	柔软 (-10℃)		良	差	差	优

第三节 交联聚乙烯电力电缆的制造工艺

一、生产工艺过程

交联聚乙烯电力电缆的生产工艺过程如图 1-3 所示。现对其生产工艺过程分述如下。

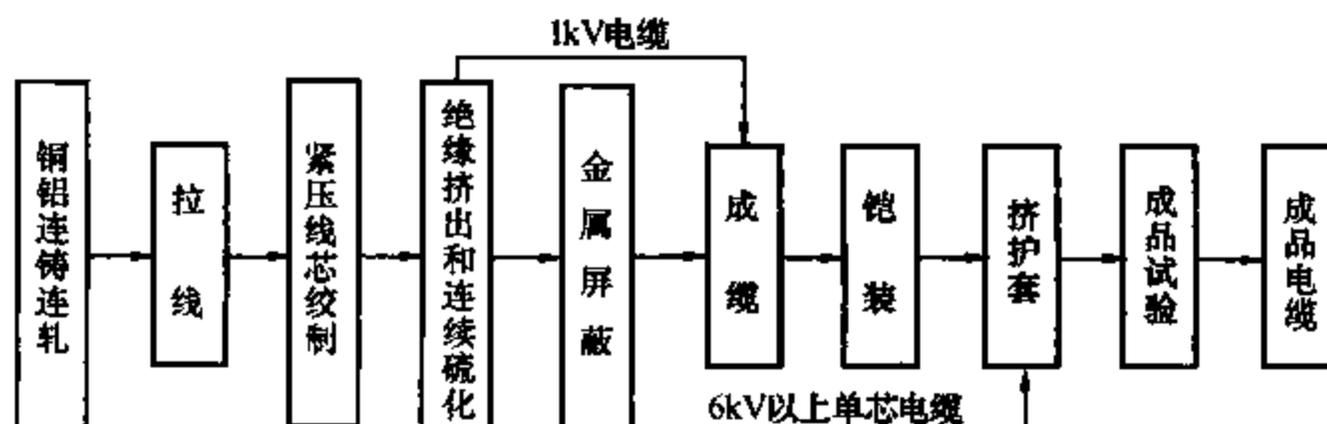


图 1-3 交联聚乙烯电力电缆的生产工艺过程

1. 铜铝连铸连轧

进厂的导体材料铝锭和电解铜板需要经过热加工轧制成一定尺寸,以作为供拉线机进料的杆材。现代化的热轧设备是连铸连轧机,分铜连轧和铝连轧两种。

2. 拉线

对连铸连轧机生产的圆形铜杆和铝杆进行冷加工——拉丝,利用拉丝机,经过多道拉丝模将杆材拉细,再对达到所需直径的铜、铝单线进行退火处理。

3. 紧压线芯绞制

利用绞线机将铜、铝单线多股胶合在一起,并利用金属压轮压制成圆形或扇形的紧压导体。

4. 绝缘挤出和连续硫化

利用交联机在导体上依次挤上导体屏蔽、绝缘层和绝缘屏蔽层,连续地在硫化管中交联,并经冷却制造成所需规格的绝缘线芯。

5. 金属屏蔽

3kV以上电压等级的交联聚乙烯电缆都需要具有金属屏蔽。金属屏蔽结构有多种形式:分相屏蔽可利用铜带屏蔽机,将铜带绕包于每一相绝缘线芯上;扇形结构则应先成缆,将三相的三根缆芯绞合在一起,然后加一统包的金属屏蔽,可以是铜带或者铜线。单芯电缆一般采用疏绕铜丝屏蔽。

6. 成缆

多芯电缆需要绞合在一起,制成一根成品电缆。三芯或四芯电缆的缆芯在成缆机上绞合在一起。圆形缆芯成缆时应填充防水材料,使电缆具有比较圆整的形状。

7. 铠装

对于需要铠装的电缆,在成缆后要绕包或挤包一个内护套,然后在铠装机上包铜带或钢丝。

8. 挤护套

无论交联聚乙烯电缆是单芯还是多芯,有铠装还是无铠装,

其外护层都是用塑料挤出机挤包的聚氯乙烯 (PVC) 或聚乙烯 (PE) 护套。

9. 成品试验

电缆在生产过程中的各道工序都有质量控制。制成完整的产品后, 需要对产品的结构尺寸、电气性能进行试验检查, 保证电缆成品的质量。

二、交联生产工艺

如前所述, 交联聚乙烯是聚乙烯经过物理或化学方法变成的, 这种变化称为交联。交联方法有许多种, 其中用过氧化物作为交联剂, 在高温高压下进行化学反应的化学交联应用最广。用电子束辐射交联是靠电子射线去掉聚乙烯中部分氢原子使聚乙烯交联; 硅烷交联是靠化学接枝方法使聚乙烯分子之间交联起来。这两种方法都不需施加压力, 不需长的硫化管, 但这两种方法只适合于薄的绝缘, 厚的绝缘交联时易不充分, 故只适用于生产薄绝缘的控制电缆和 1kV 交联聚乙烯电缆, 用于生产中、高压电力电缆则十分困难。

化学交联是利用过氧化物分解产生游离基与聚乙烯中的氢原子结合。这个化学反应需要加热, 反应过程中有水和气体生成, 是一种发泡反应, 需要施加压力。在压力作用下, 交联聚乙烯里无宏观可见的气泡, 但微观下仍是多孔材料。湿式法交联使聚乙烯中水分含量高, 微孔尺寸大。干式法交联用氮气和溶盐作为化学反应的压力介质, 使用电加热或用硅油、溶盐等加热。图 1-4 所示为各种交联方法。研究结果表明干式法交联比湿式法交联的电缆性能好, 如表 1-2 所示。

表 1-2 干式法和湿式法交联电缆性能比较

交联方法	微孔数量 (个/mm ²)	微孔尺寸 (mm)	水分含量 (%)	冲击击穿强度 (kV/mm)
干式法	5.5	<5	<0.01	176.4
湿式法	10 ⁵	<20	<0.13	143.8

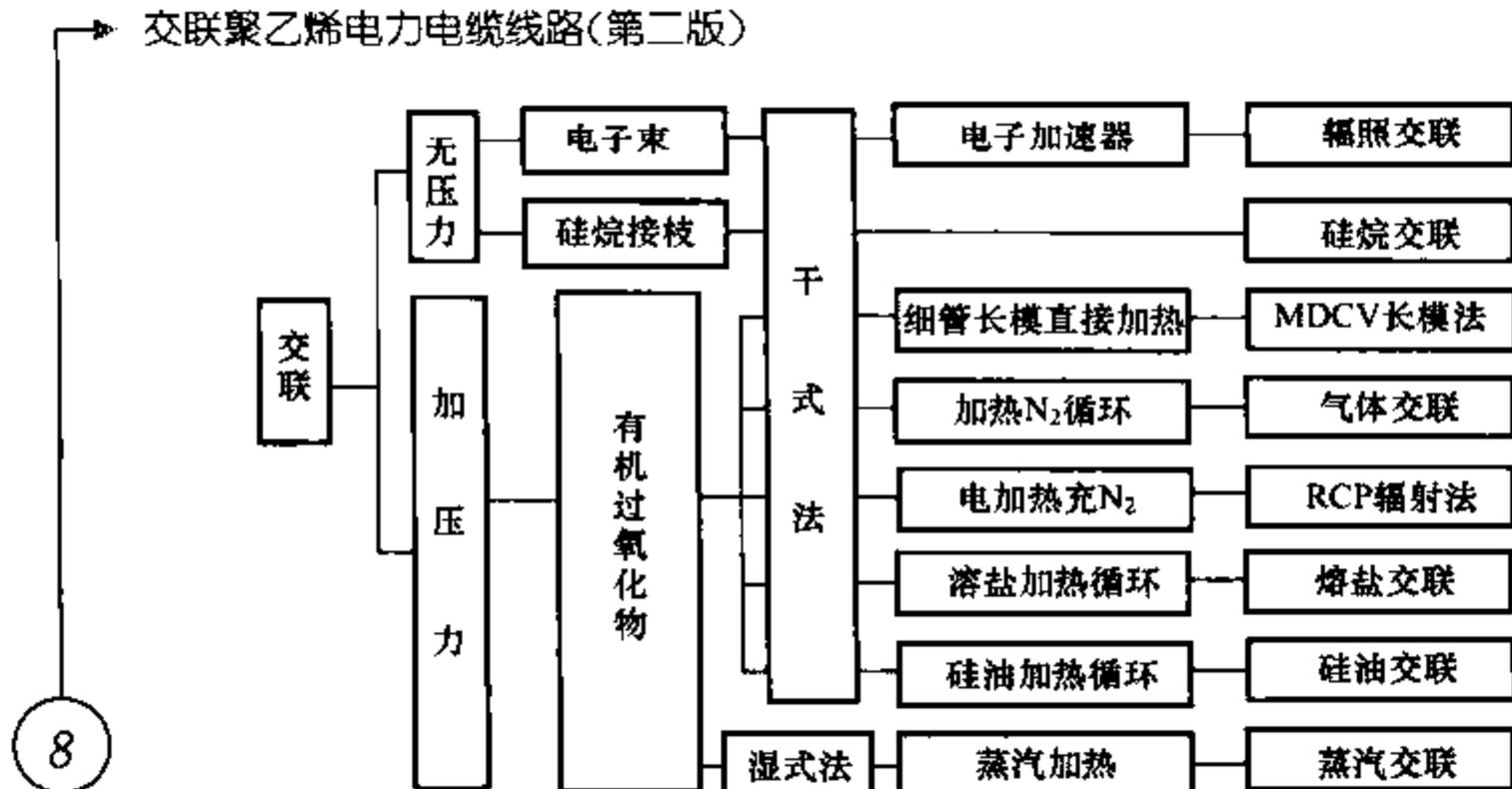


图 1-4 各种交联方法

近 30 年来国内外不少专家和学者从事交联聚乙烯电缆击穿机理的研究，普遍认为绝缘中半导体屏蔽突起、杂质、微孔和水分，是水树生成和游离放电的根源，是导致电缆击穿的主要原因。要使交联聚乙烯电缆运行可靠和应用到更高的电压等级中，交联制造工艺质量必须进一步提高。

三、现代生产线技术特点

1. 干式法交联

干式法交联采用电加热，有两种加热方式。① 加热电缆绕于硫化管外面，电能将管壁加热，热量从管壁向管内传导，传导主要是辐射方式，少量是热传导方式，热量传到电缆绝缘上，对绝缘进行硫化；② 利用不锈钢管通过大电流，硫化管外包有绝缘材料，防止热量向外传导，管内充氮气作为绝缘硫化时的加压介质。干式法交联的冷却方式有两种：① 水冷却；② 氮气冷却。氮气冷却效果不如水冷却，但对降低微孔和含水量有好处。

2. 多层挤出

多层挤出有两种：① 双层挤出；② 3 层挤出。双层挤出可以使导体屏蔽和部分绝缘同时挤出，大部分绝缘和绝缘屏蔽同时挤出；3 层挤出是导体屏蔽、绝缘和绝缘屏蔽 3 层同时挤出。双层挤出多采用 1+2 式串联型式，即导体屏蔽是单层挤出，另一

机头是绝缘和绝缘屏蔽双层同时挤出。这种挤出方式的优点是调整方便，可以检查和控制导体屏蔽尺寸和挤出表面质量。导体屏蔽处于电缆的最大电场强度处，屏蔽表面光滑程度和突起大小对电缆的电气性能影响最大，所以控制和调整屏蔽表面质量是十分重要的，这是1+2式串联挤出的优点。1+2式挤出的缺点是：虽然容易保证导体屏蔽挤出表面光滑，但是导体屏蔽进入第二个机头时表面与机头导管相摩擦，还可能产生新的突起和表面缺陷。双层挤出还有2+2式串联型式，即导体屏蔽和部分绝缘，大部分绝缘和绝缘屏蔽两个双层挤出。这种方式改善了1+2式挤出在导体屏蔽进入第二个机头时，屏蔽表面可能被摩擦的缺点，利用受到摩擦的部分绝缘表面保护了屏蔽表面。绝缘分2次挤出，即使第一部分绝缘表面受到摩擦，在挤出第二部分绝缘后，绝缘的二层在硫化过程中又会融为一体，无分界面。这种方式的缺点是导体屏蔽尺寸和表面控制较1+2式复杂些，操作难些，更需要注意的是两个绝缘层之间的清洁，要求操作车间环境特别清洁，否则需要两机头中间采取有局部净化防尘措施。通常采用使空气过滤器净化过的空气进入一个防护罩的方法，使防护罩的内部压力大于周围环境，环境空气不与电缆相接触，达到第一层绝缘表面清洁，不受周围环境污染。

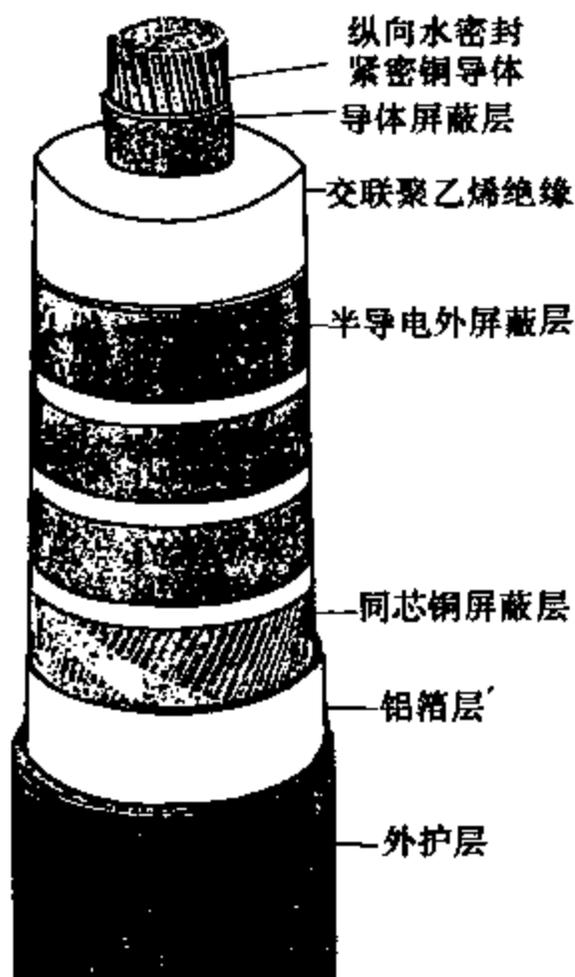
3层挤出是导体屏蔽、绝缘和绝缘屏蔽3层所用的材料通过3个挤出机同时挤到1个机头，3种材料在机头内依次挤包到导体上。挤出机头构造很复杂，3种材料分3个层次，机头较大。这种操作方式难度大，对导体屏蔽和绝缘的尺寸控制困难，要求挤出机精度高，操作人员技术水平高。3层同时挤出可以保证导体屏蔽表面光滑，突起小，导体屏蔽、绝缘和绝缘屏蔽3层配合紧密，分界面上光滑、突起少，达到提高电缆电气性能的作用。

3. 具有双盘收放线装置导体储线设备

适应大批量连续生产，既能保证电缆质量又能减少废品，可降低原材料消耗，使电缆成本降低。

4. 具有半导体材料干燥器和材料密封加料系统

半导体材料干燥器使半导体材料在加入到挤出机之前，经过干燥除去水分，故可减少挤出的半导体屏蔽层中微孔的数量并降低微孔尺寸，提高屏蔽层质量。密封的加料系统是自动加料，材料不与环境空气相接触，使清洁的材料不受空气中杂质污染，从而提高电缆的电气性能。



5. 计算机在线控制

最新的交联生产线具有计算机在线控制，是根据硫化管中硫化速度来自动控制生产速度、保证产品质量的。

为了使读者对交联聚乙烯电缆结构有较全面的了解，现将110kV电压等级交联聚乙烯电缆的基本结构示于图1-5中。

该电缆线芯为紧压400mm²铜导体，绝缘层及内外半导体屏蔽层3层同时挤压，绝缘层外绕包105mm²铜丝屏蔽，最外层为聚乙烯护套。在铜丝屏蔽和聚乙烯护套间有一层由铝箔和聚乙烯组成的复

图 1-5 110kV 电压等级交联聚乙烯电缆的基本结构图

合物膨体防水材料，以防止电缆在故障情况下纵向渗水。

第四节 中压交联聚乙烯电力电缆的品种和结构

众所周知，电力电缆同高压架空输电线一样在电力系统中是传输电能用的，按电压等级可分为低压、中压、高压和超高压电力电缆。中压电缆是指3~35kV范围电压使用的电缆，其品种规格可分为三芯和单芯两种，在配电网中使用的较多。

1. 品种规格

三芯和单芯交联聚乙烯电缆的结构分别如图 1-6 和图 1-7 所示。

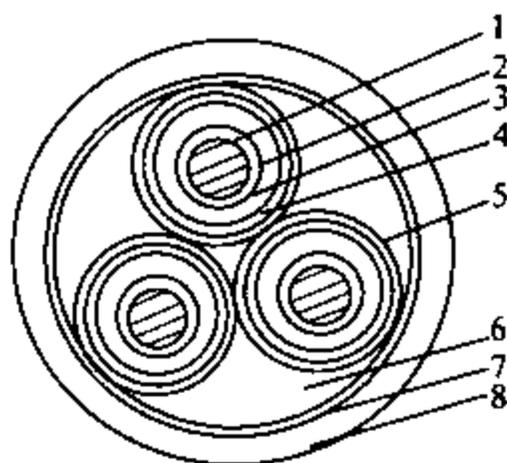


图 1-6 三芯交联聚乙烯电缆结构

1—导线；2—导线屏蔽层；3—交联聚乙烯绝缘层；4—半导电层；
5—铜带；6—填料；7—扎紧布带；
8—聚氯乙烯外护套

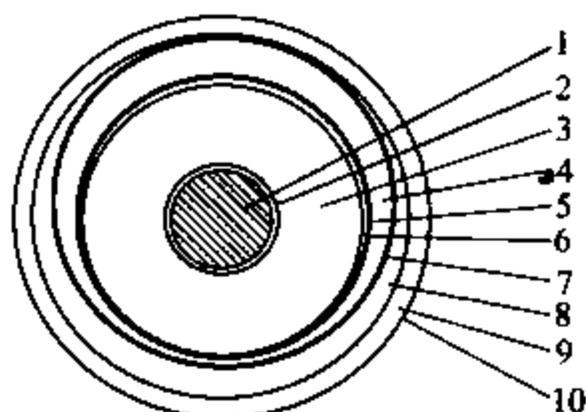


图 1-7 单芯交联聚乙烯电缆结构

1—导体；2—导体屏蔽层；3—交联聚乙烯绝缘层；4—绝缘屏蔽层；
5—金属屏蔽层；6—铜丝编织带；
7—皱纹铝护套；8—防腐层；
9—PVC/PE 外护套；10—石墨层

2. 产品结构

(1) 导体结构。

1) 导体应采用圆形单线绞合紧压导线截面，或实心铝导体、圆铜、铝单线结构。

2) 标称截面 1000mm^2 及以上的铜芯应采用分裂导体结构。

(2) 绝缘结构。

1) 绝缘应用交联聚乙烯料挤包在导体上形成绝缘。

2) 绝缘标称厚度应符合表 1-3 的规定。绝缘厚度平均值应不小于规定的标称值，绝缘最薄点的厚度应不小于 90% 规定标称值 - 0.1mm。导体和绝缘外面的任何隔离层或半导电屏蔽层的厚度不包括在绝缘厚度内。

(3) 屏蔽结构。

1) 导体屏蔽。

(a) 额定电压 U_0 为 1.8kV 以上的电缆应有导体屏蔽。

(b) 导体屏蔽应为挤包的半导电层。标称截面 500mm^2 及以上的电线的导体屏蔽应由半导电带和挤包半导电层联合组成。

表 1-3 绝缘标称厚度

导体标称 截面积 (mm ²)	额定电压(U ₀ /U)(kV)									
	0.6/1	1.8/3	3.6/6	6/6、 6/10	8.7/10、 8.7/15	12/20	18/20、 18/30	21/35	26/35	64/110
	绝缘标称厚度(mm)									
1.5、2.5	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4、6	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	0.7	2.0	2.5	—	—	—	—	—	—	—
16	0.7	2.0	2.5	3.4	—	—	—	—	—	—
25	0.9	2.0	2.5	3.4	4.5	—	—	—	—	—
35	0.9	2.0	2.5	3.4	4.5	5.5	—	—	—	—
50	1.0	2.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	—
70、95	1.1	2.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	—
120	1.2	2.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	—
150	1.4	2.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	—
185	1.6	2.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	—
240	1.7	2.0	2.6	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	19.0
300	1.8	2.0	2.8	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	18.5
400	2.0	2.0	3.0	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	17.5
500	2.2	2.2	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	17.0
630	2.4	2.4	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	16.5
800	2.6	2.6	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	16.0
1000	2.8	2.8	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	16.0
1200	3.0	3.0	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0	9.3	10.5	16.0

(c) 导体屏蔽用的半导体料,对 35kV 及以下 XLPE 电缆应是交联型的或者是非交联型的,对 110kV 及以上 XLPE 电缆应是交联型的。半导体层应均匀地包覆在导体上,表面应光滑,无明显绞线凸纹,不应有尖角、颗粒及烧焦或擦伤的痕迹。

2) 绝缘屏蔽。

(a) 额定电压 U_0 为 1.8kV 以上的电缆应有绝缘屏蔽。

(b) 额定电压 U_0 为 8.7kV 及以下的电缆的绝缘屏蔽可采用挤包型、包带型或包带内加石墨涂层结构。额定电压 U_0 为

8. 7kV 及以上的电缆绝缘屏蔽应为挤包半导体层。

(c) 额定电压为 12kV 及以下的电缆的挤包型绝缘屏蔽应是可剥离的。

3) 金属屏蔽。

(a) 额定电压 U_0 为 1kV 及以上的电缆应有金属屏蔽层，金属屏蔽有铜丝屏蔽和铜带屏蔽两种结构型式。额定电压为 21kV 以上，同时标称截面积为 500mm^2 及以上的电缆的金属屏蔽层应采用铜丝屏蔽结构。

(b) 铜丝屏蔽由疏散的软铜线组成，其表面应用反向铜丝或铜带扎紧。额定电压 U_0 为 26kV 及以下的电缆，其铜丝屏蔽的标称截面积有 16, 25, 35mm^2 及 50mm^2 4 种，可根据故障电流容量要求选用。

(c) 铜带屏蔽由重叠绕包的软铜带组成，铜带标称厚度应按下列要求选用；单芯电缆铜带标称厚度不应小于 0.12mm；三芯电缆铜带标称厚度不应小于 0.10mm。

(d) 采用铅包或铝包金属套时，金属套可作为金属屏蔽层。

(4) 内衬层结构。

1) 具有铠装层或金属屏蔽的多芯电缆，在缆芯上一般应有内衬层。

2) 额定电压 U_0 为 0.6/1kV 以上的非径向电场电缆的内衬层及填充物应用非吸湿材料。

3) 额定电压 U_0 为 0.6/1kV 以上的在缆芯上只有绕包金属屏蔽层的径向电场电缆的内衬层应采用半导体材料，填充物亦可用半导体物。

4) 既无铠装又无绕包金属屏蔽层的 0.6/1kV 多芯电缆以及 1kV 以上分相金属屏蔽电缆，只要电缆外形圆整，且绝缘线芯与护套不粘连，可以省去内衬层。如缆芯中圆形绝缘线芯的导体截面积不超过 10mm^2 ，其热塑性护套允许嵌入绝缘线芯间，假使仍加内衬层，其厚度可不按规定考核。

5) 额定电压 U_0 为 0.6/1kV 的电缆只有当金属带标称厚度

不超过 0.3mm 时，金属带可直接绕包在缆芯上面省去内衬层。

6) 内衬层可以挤包或绕包。钢带铠装电缆的内衬层应采用包带层加强，绕包型内衬层与包带层的总厚度应符合规定。

7) 当金属屏蔽层外有铠装时，在金属屏蔽上应挤包不透水的内衬层，也称隔离层，其厚度应符合规定。

8) 圆形绝缘线芯电缆只有在各绝缘线芯间用基本上成型的填芯材料填充时，才允许采用绕包型内衬层。

(5) 防水层和缓冲层结构。若电缆产品有防水要求，则可根据使用场合不同，选用金属套加缓冲层或综合防水层加缓冲层的防水结构。

1) 金属套。

(a) 采用皱纹铝或铅作为金属套。

(b) 皱纹铝套用铝的纯度应不低于 99.6%；铅套用铅合金应含 0.4%~0.8% 的铋和 0.08% 以下的铜，也可采用与此性能同等及以上的铅合金。

(c) 金属套的标称厚度应符合表 1-4 的规定。

表 1-4 金属套标称厚度 mm

挤包金属套前电缆直径	铅包厚度	铝包厚度
55.01~80.00	3.0	2.0
80.01~100.00	3.5	2.0
100.00 以上	4.0	2.0

(d) 铅套任一点最小厚度应不小于 95% 标称厚度 - 0.1mm。

(e) 皱纹铝套任一点最小厚度应不小于 85% 标称厚度 - 0.1mm。

2) 综合防水层。综合防水层可采用铝塑粘结综合防水层，也可采用铝箔弹性材料综合防水层。

3) 缓冲层。防水层内必须有缓冲层，缓冲层应采用半导体弹性材料，缓冲层内应含有吸水膨胀材料。

(6) 铠装结构。

1) 钢带与钢丝铠装结构尺寸应符合规定。

2) 采用钢带铠装时, 内衬层应采用包带层加强, 绕包型内衬层与包带层的总厚度应符合规定。

3) 当金属屏蔽外有铠装时, 在金属屏蔽上应挤包不透水内衬层(也称隔离层), 其厚度应符合规定。

4) 如采用隔离套或挤包内衬层, 不必加包带垫层。

5) 单芯电缆金属铠装结构仅在特殊条件下使用, 并应设计成非磁性铠装金属带结构。

6) 单芯电缆钢丝铠装结构应设计成有隔磁效果的铠装结构。

(7) 非金属外护套。

1) 护套应用聚氯乙烯(PVC)或聚乙烯(PE)型材料制成。

2) 护套标称厚度应符合规定。

3) 直接挤包在单芯非铠装电缆光滑圆柱体表面上, 加内护套或绝缘上的护套, 其平均厚度应不小于规定的标称值。任一点最小厚度应不小于85%标称值-0.1mm。

4) 护套应有导电涂层。

第五节 交联聚乙烯电力电缆及附件的发展

一、交联聚乙烯电力电缆的发展

交联聚乙烯电力电缆是由美国GE公司开发的, 1957年GE公司采用过氧化物进行化学交联的生产工艺获得成功后, 首先在美国得到了广泛的使用。随后1959年日本、瑞典等国家也开发了这项技术。表1-5所列为较早开发交联聚乙烯电力电缆的公司的开发简况。

交联聚乙烯电力电缆由于结构轻便、易于弯曲、电气性能优良、耐热性能好、传输容量大、安装敷设方便和接头简单, 特别是没有因漏油而引起火灾危险的隐患, 广泛受到用户欢迎。到1979年为止, 美国已有48万km聚乙烯和交联聚乙烯电缆在电

表 1-5 较早开发交联聚乙烯电力电缆的公司的开发简况

国家	公司名称	开发日期	产品开发简况
美国	GE	1957年	发明化学交联
		1960~1969年	69kV以下电缆
		1971年	138kV电缆老化试验
日本	住友	1959年	600V电缆
		1960~1961年	6.6、33kV电缆
		1971~1979年	138、275kV电缆
	昭和	1960年	600V电缆
		1961~1964年	6.6、33kV电缆
		1971~1978年	154、275kV电缆
瑞典	SIEVERFS	1964年	50kV以下电缆
		1969年	52~84kV电缆
		1971~1978年	170、245kV电缆
	ASEA	1964年	12~36kV电缆
		1966年	52~84kV电缆
		1972年	123、170kV电缆

压为3~35kV的系统中使用了。瑞典、日本和法国目前已基本上用交联聚乙烯电缆代替了油纸绝缘中低压电缆。

我国从1970年开始试制生产和使用交联聚乙烯电力电缆,由于当时生产设备更新较慢,原材料供应渠道还没有打开,所以生产数量较少,满足不了电力发展的需要。1982年后,我国沈阳电缆厂、上海电缆厂、哈尔滨电缆厂、广东电缆厂等单位先后和外商签订了24条新的生产线合同,引进成套设备及先进技术,对提高我国交联聚乙烯电力电缆产品质量起到了积极的作用。目前220kV及以下产品已能批量生产。按照统一的国家标准对交联聚乙烯电力电缆进行检验,保证其使用的可靠性,已成为当前十分迫切的任务。

二、中低压交联电力电缆附件的发展

中低压交联电力电缆附件是电缆线路各种接头和终端头的统称。电缆接头是指电缆段与电缆段间互相连接的装置,起着使电

路畅通，保证相间或相对地绝缘，密封和机械保护的作用。电缆终端头是装配到电缆线路首末端，用以保证与电网或其他用电设备的电气连接，并且作为电缆导体线芯绝缘引出的一种装置。

由于电缆使用环境复杂，连接方式要求各不相同，故电缆附件品种繁多。如果按电缆附件的材料、结构、成型工艺及安装工艺来分，目前国内应用于 35kV 及以下电压等级的橡塑电力电缆的附件主要有：① 橡胶自粘带、塑料胶粘带绕包成型的绕包式电缆附件；② 采用弹性材料（如乙丙橡胶、硅橡胶等）将电缆接头和终端的绝缘与内外屏蔽层在工厂内注压或模压成一个整体，现场套装在电缆上的预制件插入式电缆附件；③ 应用高分子材料具有“弹性记忆”的特点，将电缆附件各组成部分，分别在工厂内交联扩张做成管材、手套、雨伞等，在现场安装后加热收缩成型的热收缩电缆附件；④ 利用弹性材料将电缆附件绝缘和应力控制层在工厂内成型并硫化，再扩径加以衬垫物，现场安装后抽出衬垫物而压紧在电缆上形成的冷收缩电缆附件；⑤ 利用热固性树脂（常用的有聚氨酯、环氧树脂或丙烯酸酯等）现场浇铸成型的浇铸式电缆附件。随着工业材料不断更新，可以预计还会出现更多的新型电缆附件。

由于各种电缆附件都有各自的不足之处，所以近几年来，国外采用了集各附件之长而组成的各方面都比较令人满意的组合式附件。如绕包型加热收缩手套和热收缩管组合成 10kV 及以下三芯电缆终端；绕包型绝缘和加热收缩管组合成 35kV 及以下电缆中间接头；预制件加热收缩手套和热缩管组成 10kV 及以下终端头（见图 1-8）；预制式加绕包式终端；浇铸型加热收缩管和绕包式中间接头；模塑式加热收缩管中间接头；热缩应力管加瓷套终端头等，组合式电缆附件是电缆附件今后发展的趋势。

我国辐射交联电缆附件近 20 多年来也有很大的发展，生产厂家有深圳长园电力技术有限公司、吉林市辐射化学研究所、长春辐射化工材料厂、长沙电缆附件有限公司和广东电缆附件厂等单位。他们利用化学法交联制成的热缩产品，在使用时能迅速收

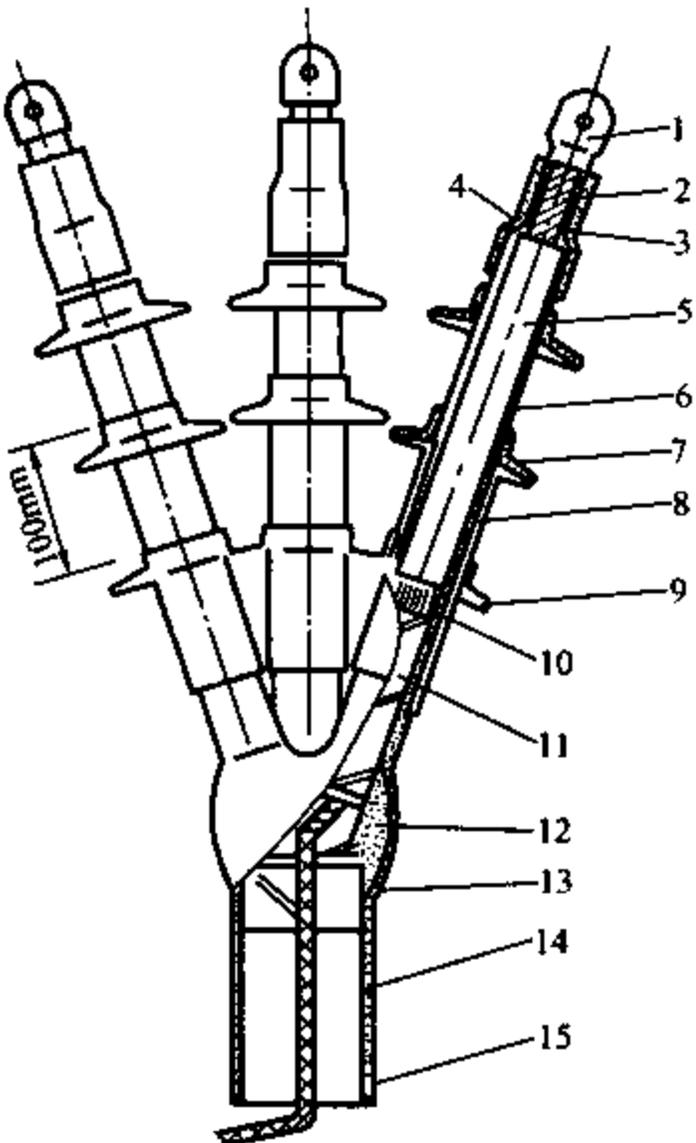


图 1-8 10kV 热收缩终端头

- 1—接线端子；2—线芯；3—密封管；4—填充胶；5—绝缘；6—外绝缘；7—单孔伞裙；8—应力管；9—三孔伞裙；10—半导体屏蔽；11—铜带屏蔽；12—填充胶；13—绝缘三芯分支护套；14—密封胶；15—电缆护套

缩、紧紧包覆在需要绝缘、防潮、密封及保护的物体外，应用范围极广，适用于各种电力电缆（交联聚乙烯电缆和油浸纸绝缘电缆）的户内、户外终端连接以及通信电缆的接头、绝缘护套等部件。上述产品具有体积小、质量轻、性能可靠、适应性强、安装简便和价格便宜等特点，基本上满足了国内中低压电缆线路工程配套的要求。

三、热收缩终端头的外绝缘

热收缩终端头的特点之一是用热缩管和伞裙代替传统瓷套，减小了尺寸和质量，提高了抗污能力。一般电缆终端头外绝缘的设计程序：按干闪电压决定高压对

地的最小距离，以湿闪电压的要求确定伞盘尺寸、个数和安装位置，最后对抗污能力进行核算。根据国外经验，热收缩材料外绝缘表面电场强度按 0.2kV/cm 选取就能满足上述全部要求。由于配电电压等级较低，外绝缘的尺寸往往决定于结构、工艺、安装环境等因素，裕度远大于电性能所要求的尺寸。现将热收缩终端头设计尺寸列于表 1-6，供读者参考。

从热收缩头外绝缘材料方面考虑，一些概念与常规绝缘子设计时有较大区别，如绝缘子伞裙突出部分的长度 a 与伞裙间距 l 两者的比值一般为 $a/l \leq 0.5$ ，这样可保证淋雨时具有较高的闪

表 1-6 热收缩终端头设计尺寸

电缆类别	油纸绝缘电缆		交联聚乙烯绝缘电缆			
	10		10		35	
电压等级 (kV)	10		10		35	
电缆安装地点	户内	户外	户内	户外	户内	户外
最小对地距离 (mm)	350	550	300	550	750	750
伞裙个数	—	3	—	3	3	5
伞裙外径 (mm)	—	115	—	115	130	130
泄漏距离 (mm)	350	520	300	620	1050	1250
外管供应长度 (mm)	400	600	400	600	800	800

络电压。而当选用合成材料特别是选用硅橡胶为基材时，由于这些材料具有较强的憎水性，所以上述概念对其影响不大。污闪试验结果表明伞裙直径小，污闪电压将升高，所以合成绝缘子通常都是采用小直径伞裙。

大量试验表明，合成绝缘子的污闪电压比同等爬距的瓷质绝缘子要高 2~3 倍，主要因为合成绝缘子尺寸小、形状系数大、材料具有憎水性，故它在任何相同的污秽层电导率下都具有较瓷质绝缘子小的表面电导，且表面泄漏电流也较小，因此污闪电压比较高。在污闪放电过程中，表面泄漏电流的大小起主导作用，显然表面泄漏电流与污秽层的电导、大气湿度、介质表面形状、间距等因素有关。污秽层电阻越大，电导越小，泄漏电流越小，放电发展就越困难，污闪电压也就越高。

在外绝缘设计上常用单位泄漏距离（泄漏比距），即每千伏额定线电压的平均泄漏距离来估计污秽条件下外绝缘的耐污能力。热收缩终端头泄漏比距达到 7~9cm/kV，这样的高泄漏比距再加上合成材料的憎水性，能使污闪特性较高，所以热收缩终端头的耐污性能优于其他型式。例如：10kV 交联聚乙烯电力电缆户外热收缩终端头污闪电压为 37kV，6 倍于其工作电压；湿闪电压为 74kV，是其工作电压的 12 倍，所以外绝缘的裕度相当大。

电缆热收缩附件从研制成功以来,深受广大安装运行人员的欢迎,并得到了普遍地采用。经过近 20 多年来的推广应用,初步统计表明,热收缩附件已占中低压电缆附件市场的 60%以上,这也充分说明了热收缩附件的研制是成功的。

此外,我国已开发成功 10、35kV 和 110kV 冷缩交联电缆终端和中间接头,并已进行批量生产。这种附件在材料、工艺、结构等方面均有重大突破,产品质量达到国际先进水平,在城网建设中将有较大的发展前景。

思考题

1. 我国目前常用的高压电力电缆有哪几种(按绝缘材料性质分)? 各有何优缺点?
2. 为什么说交联聚乙烯电力电缆比聚乙烯电力电缆性能优越?
3. 交联聚乙烯电力电缆的工艺生产过程有何特点?
4. 交联聚乙烯电力电缆为什么要有导体半导体层和绝缘半导体层?
5. 为什么说热收缩终端头的耐污性能优于其他型式?
6. 冷缩电缆附件为什么将有较大的发展?

交联聚乙烯电力电缆的选用

第一节 交联聚乙烯电力电缆型号和选用原则

如前所述,目前国内使用的电力电缆主要有3种:油纸绝缘电缆、塑料绝缘电缆及橡胶绝缘电缆。

(1) 油纸绝缘电缆具有较好的电气性能,使用历史悠久,一般场合下均可选用。35kV及以下电压等级,如电缆落差较大时,可选用不滴流电缆;66、110kV电压等级可选用自容式充油电缆;220kV电压等级及以上也可选用自容式充油电缆。

(2) 塑料绝缘电缆又分为聚氯乙烯电缆和交联聚乙烯电缆两种。前者因介质损耗大,在较高电压下运行不经济,故只适用于1kV及以下电压等级线路。交联聚乙烯电力电缆因具有优良的电气性能,传输容量大,敷设落差不受限制,便于安装和维护,故在中高压系统线路推广采用。但对于500kV及以上电压级,选用交联聚乙烯电力电缆应慎重。

(3) 橡胶绝缘电缆适用于35kV及以下电压等级线路,虽然价格较高,但耐湿性能和柔软性能好,可用于水下敷设和弯曲半径较小的场合。

由于交联聚乙烯电力电缆应用广泛,为方便读者选用,下面具体介绍交联聚乙烯电力电缆的型号、名称及选用原则。交联聚乙烯电力电缆的型号、名称及选用原则见表2-1。

表 2-1 交联聚乙烯电力电缆的型号、名称及选用原则

型 号		名 称	选用原则
铜 芯	铝 芯		
YJV	YJLV	交联聚乙烯绝缘铜带屏蔽聚氯乙烯护套电力电缆	适用于架空、室内、隧道、电缆沟、管道及地下直埋敷设

型 号		名 称	选 用 原 则
铜 芯	铝 芯		
YJSV	YJLSV	交联聚乙烯绝缘铜丝屏蔽聚氯乙烯护套电力电缆	适用于架空、室内、隧道、电缆沟、管道及地下直埋敷设
YJV ₂₂ (ZR-YJV ₂₂)	YJLV ₂₂ (ZR-YJLV ₂₂)	交联聚乙烯绝缘铜带屏蔽钢带铠装聚氯乙烯护套(或阻燃型聚氯乙烯护套)电力电缆	适用于室内、隧道、电缆沟及地下直埋敷设, 电缆能承受机械外力作用, 但不能承受大的拉力
YJV ₃₂	YJLV ₃₂	交联聚乙烯绝缘铜丝屏蔽细钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆	适用于地下直埋、竖井及水下敷设, 电缆能承受机械外力作用, 并能承受相当的拉力
YJSV ₃₂	YJLSV ₃₂	交联聚乙烯绝缘铜丝屏蔽细钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆	
YJV ₄₂	YJLV ₄₂	交联聚乙烯绝缘铜带屏蔽粗钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆	适用于地下直埋、竖井及水下敷设, 电缆能承受机械外力作用, 并能承受较大的拉力
YJSV ₄₂	YJLSV ₄₂	交联聚乙烯绝缘铜丝屏蔽粗钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆	

第二节 交联聚乙烯电力电缆线芯数和截面选择

一、电力电缆线芯数选择的规定

1. 3~35kV 三相供电回路的电缆线芯数的选择

(1) 工作电流较大的回路或电缆敷设于水下时, 每回可选用3根单芯电缆。3根单芯电缆虽然比普通三芯电缆投资大些, 但它具有以下优点:

1) 电缆与柜盘内终端连接时, 由于可减免交叉, 使电气安全距离较宽裕, 改善了安装作业条件;

2) 对长线路工程, 可减少电缆接头, 增加运行可靠性;

3) 其载流量较高, 约增大 10% 左右, 可使截面选择降低一档;

4) 一旦发生接地短路, 不易发展成相间短路;

5) 允许弯曲半径减小, 有利于大截面电缆的敷设。

(2) 除上述情况外, 应选用三芯电缆。三芯电缆可选用普通绕包型, 也可选用 3 根单芯电缆绞合构造型。对于绞合型结构, 国外如日本、法国早已采用。其构造特点是把 3 根单芯电缆沿纵向全长采用钢带按恰当螺距以螺旋方式环绕 (日本) 或按适当间距以间隔或捆扎 (法国) 形成 1 根整体, 不像绕包三芯电缆各缆芯之间需有填充料。

绞合式三芯型电缆除具有单芯电缆的上述优点外, 还具有普通绕包三芯电缆敷设简单的特点, 且造价也相近。这在 XLPE 电缆如今趋向采用预制式附件, 以及环网柜等使用情况, 尤显示其优越性。

2. 110kV 和 110kV 以上三相供电回路

110kV 三相供电回路, 除敷设于湖、海水下等场所, 且电缆截面不大时, 可选用三芯型外, 每回可选用 3 根单芯电缆。110kV 以上三相供电回路, 每回应选用 3 根单芯电缆。

3. 电气化铁路等高压单相供电回路

电气化铁路等高压单相供电回路应选用两芯电缆或每回选用 2 根单芯电缆。

二、电力电缆线芯截面选择方法和原则

(1) 最大工作电流作用下的电缆线芯温度不得超过规定允许值。对于持续工作电流的回路, 电缆线芯工作温度不得超过 90°C 。

(2) 最大短路电流作用时产生的热效应, 不应影响电缆继续使用。对于非熔断器保护的回路, 短路电流作用下线芯温度不得超过 250°C 。

(3) 当连接回路很长, 要求限制电压降时, 电压降不应超过允许值。

(4) 对于较长距离的大电流回路或 10kV 及以下电力电缆截面, 除应符合上述 3 项的要求外, 宜按电缆的初始投资与使用寿命期间的运行费用从经济方面综合考虑选择。

众所周知, 多年来我国经济持续高速增长, 发供电随着用电需求虽在不断发展, 但是一些地区仍有电力不足现象。过去一般只按载流量紧凑地选择电缆截面, 导致线损较大, 这一影响不可忽视。而且现今地球“温室效应”日益严重, 其中火力发电厂排放的 CO₂ 的影响不容忽视, 在这一形势下, 要着眼于努力降低损耗, 避免电源增加带来温室效应的加剧, 就需要考虑电缆的经济截面。经济截面比按允许载流量选择的截面增大后, 降低年损耗的同时会引起初始投资的增加, 但从我国宏观经济条件来看, 目前已能适应。但是, 由于经济电流密度受电缆成本、贴现率、电价、电缆使用寿命以及最大负荷利用小时数等多种因素的影响, 很难给出一个合适的经济电流密度数值, 可参照 GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》中推荐的计算方法。在此简要介绍如下。

电流经济密度的计算公式

$$J = \sqrt{\frac{A}{F\rho_{20}B[1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)] \times 1000}} \quad (2-1)$$

$$S_j = I_{\max}/J$$

式中 A ——电缆成本的可变部分, 与截面有关 (由电缆设计部门提供), 元/m · mm²;

F ——计算电缆总成本的辅助量 (由电缆设计部门提供), 元/kW;

θ_m ——允许的最高温度, °C;

I_{\max} ——最大负荷电流, A;

J ——经济电流密度, A/mm²;

S_j ——经济电缆截面, mm²;

B ——系数， B 一般取平均值 1.001 4；

ρ_{20} ——20℃时电缆导体的电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)，铜芯为 18.4×10^{-9} ；铝芯为 31×10^{-9} ，计算时可分别取 18.4 和 31；

α_{20} ——20℃时电缆导体的电阻温度系数 ($1/^\circ\text{C}$)，铜芯为 0.003 93，铝芯为 0.004 03。

在选用截面时宜注意下列要求：

1) 适宜选用按照工程条件、电价、电缆成本、贴现率等计算出来的经济电流密度值。

2) 对于备用回路的电缆，如备用电动机回路等，宜按正常使用运行小时数的 1/2 选择电缆截面。对于一些长期不使用的回路，不宜按经济电流密度选择截面。

3) 经济电流截面比按热稳定、容许电压降或持续载流量等选择的截面要大。当电缆经济电流截面介于电流标称截面之间，可按接近程度选择，接近程度相差不大时宜偏小选取。

三、冲击负荷下电缆芯线截面的选择

1. 电气化铁道牵引供电系统及负荷的特点

(1) 电气化铁道牵引供电系统指由 110kV 或 220kV 电网提供电能，经专门的牵引变电站降压为 27.5kV 送入接触网（一种专用的输电线），以供给运行中的电气化列车所需电力的高压网络系统，所以铁道负荷就是电力机车。

(2) 电力机车上装有变压器和整流器，将接触网送来的高压单相交流电再次降压和整流，得到一个脉动的直流，供给脉动直流电动机来驱动列车运动。所以牵引供电系统负荷不仅存有直流分量，而且还包括一系列高次谐波组成的交流分量。

(3) 由于接触网线路本身的阻抗作用，必然存在一定的电压降。牵引供电系统的标称电压为 25kV，为了使压降不大于其标称电压的 10%，和保证电力机车处于离变电站供电臂最远端时的电压能大于机车正常工作时所要求的最低电压 19kV，所以，对电气化铁道都要采用分段供电。一般每段的供电臂大约长 15~

25km。就牵引供电系统而言,大部分时间是空载的,只有当电气化列车高速通过某段时,担任该段供电的牵引变电站才具有负荷。显然,这种负荷是一种冲击性的非线性负荷。

(4) 电力机车电流是通过受电弓与接触网导线之间的接触,滑动来实现的。由于接触网处于露天环境,气温的变化、风力的大小,以及在隧道与区间、站场与区间接触线高度的变化等多种因素,都会导致接触网导线的对地高度、张力、电流输出值等发生变化。加上电力机车是高速运动的,使得受电弓与接触网导线之间的接触压力出现波动,甚至跳跃、离线,这些因素往往会造成拉弧、刮弓、断线、短路等事故频发。因此,电气化铁道的牵引供电系统将频繁遭受较大的冲击电流和短路电流的作用。

2. 工作电流与短路电流的计算

以某牵引变电站为例,它由 220kV 系统的变电站供电,主接线为双电源 T 形桥接方式,2 台主变压器均为单相变压器,额定容量为 $2 \times 31.5 \text{ MVA}$,额定电压为 220/25kV,经 220kV XLPE 电缆与架空线接在系统的 B、C 两相之间,正常工作方式为—组运行,另一组处于热备用。2001 年和 2005 年该牵引变电站供电负荷为 34.2MW 和 35.9MW,供电回路如图 2-1 所示。

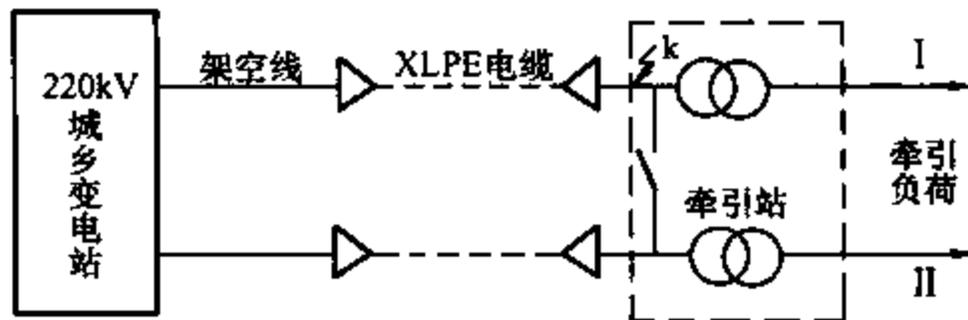


图 2-1 牵引变电站供电回路

(1) 电缆工作电流计算。

1) 按牵引变电站变压器正常运行计入 23% 过载 (4h) 时工作电流为

$$I_1 = 1.23 \times 31\,500 / 220 = 1.23 \times 143.2 = 176(\text{A})$$

2) 考虑 2005 年的供电负荷为 35.9MW,取功率因数为

0.8, 由 1 组“变压器—电缆”负担时的工作电流为

$$I_2 = 35\,900 / (0.8 \times 220) = 204(\text{A})$$

3) 按牵引变电站 2 台变压器额定容量估算今后可能承受的应急负荷时的工作电流为 I 回电缆负担的

$$I_3 = 2 \times 31\,500 / 220 = 286.4(\text{A})$$

现主要以 I_2 作为正常最大工作电流计, 但它不是 100% 连续最大值。 I_3 值只是今后发展可能的应急短时运行工作电流, 对载流能力要求与 I_2 有所区别。

(2) 短路电流计算。已知该电网参数: 电网阻抗为 0.253 p.u., 架空线长 2.5 km, 正序阻抗为 0.451 Ω /km, 零序阻抗为 0.538 Ω /km; 电缆长 2.3 km, 正序阻抗为 (0.222 2 + j0.429) Ω , 零序阻抗为 (0.343 2 + j0.296 2) Ω , 电容为 0.244 2 μF 。当牵引变电站入口处 (如图 2-1 中 k 点) 发生接地故障时, 通过电缆的电流最大, 根据计算最大短路电流为 29 kA。

3. 地铁负荷对电缆线路的影响

(1) 测量结果表明牵引变电站地铁谐波含量见表 2-2。

表 2-2 牵引变电站地铁谐波含量

各次谐波(n)	基波	3次	5次	7次	THD
接触网平均工作电流 $I_n(\text{A})$	502	114	38	23	
谐波含量 α 推算值 (%)	100	22.71	7.57	4.58	24.3

虽然地铁负荷含有较大的高次谐波分量, 使电缆的交流电阻、介质损耗较工频的有所增加, 其影响会导致载流量降低, 但地铁负荷具有随时间变化很大的随机性, 日负荷率远小于 1, 考虑到固体绝缘电缆的允许过载能力小, 按正常工作温度下来估计电缆载流量将是安全的。

(2) 该牵引变电站由两相供电回路接至单相主变压器, 正常运行中形成单相回路。每回 2 根电缆同时具有最大值的反向电流, 这对交流电阻的邻近效应和单相电缆金属护套感应电流影响

将有所减弱。鉴于地铁负荷工作为非持续方式，负荷电流不大，不计入这一有利因素将使电缆实际工作温度比计算值稍低，偏于安全。而且当相邻电缆的中心距大于 200mm 时，邻近效应系数小于 1%，可以忽略不计，这个条件在实际敷设时很容易满足。与通常的三相供电不同的是，要考虑 2 根相邻电缆同时最大电流时的互热或热阻影响。

(3) 按供电臂长 15km，电气化列车运行速度为 150km/h 计算，则牵引负荷持续时间为 6min。地铁负荷虽然在电缆线路中会频繁产生冲击电流，有可能烧损导线，但由于负荷持续时间短，在线路温度尚未升高到临界熔点温度时，电流早已开始下降。因此，考虑冲击电流后电缆所处的工作状态仍是安全的。

4. 电缆芯截面载流量的计算及其参数选择

根据该牵引变电站电缆敷设情况，先以穿管埋地敷设的条件来计算电缆载流量。计算过程：先算出直埋时电缆载流量基础值；然后计入反映本线路地铁负荷含谐波的影响和电缆穿管埋地的校正，就可求得确切的电缆载流量。直埋电缆载流量依 IEC 60287 《电缆额定电流的计算》中算式计算，即

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_M - \theta_0) - W_d(0.5T_1 + T_3 + T_4)}{R[T_1 + (1 + \lambda)(T_3 + T_4)]}} \quad (2-2)$$

式中 R ——电缆在 θ_M 下的交流电阻， Ω ；

W_d ——电缆的介质损耗，W/m；

T_4 ——电缆的外部热阻， $(^\circ\text{C} \cdot \text{m}) / \text{W}$ ；

T_1 、 T_3 ——缆芯导体与金属护套、金属护套与外护层之间的热阻， $(^\circ\text{C} \cdot \text{m}) / \text{W}$ ；

θ_M 、 θ_0 ——缆芯导体允许最高工作温度、环境最高温度， $^\circ\text{C}$ ；

λ ——电缆金属套环流损耗系数；若金属套为单端接地时， $\lambda=0$ 。

这里需要说明的是，本线路的地铁负荷及其供电方式使 T_4 、 W_d 、 R 与通常计算有所差异，参考国内、外文献，简略介绍有关参数的选取如下。

1) 适合 2 根等负荷电流并列单相电缆 T_4 的表达式是引自 IEC 60287。

2) 谐波含量 $\alpha_n = I_n / I_1$ ，可显示谐波影响程度，按各自谐波含量 α_n ($n=1, 3, 5, 7$) 与对应 R_0 值分项计算，其乘积之和的均方根值为包含谐波因素的等值交流电阻，以 $(R_1 / \sum \alpha_n R_n)^{1/2} = K$ 作为谐波分量影响 I 的校正系数。

3) 谐波分量对 W_d 的影响直接以 $W_d \sum n \alpha_n$ 代入 I 的算式求得 I 值。

4) 对穿管的 T_4 值，近几年实测结果表明为 0.9。

5) 基于该电缆最大工作电流 204A 具有短时冲击性而远非 100% 连续最大，电缆允许最高工作温度 θ_M 按 90°C 应属合适，但考虑安全耐久性， θ_M 取 80°C 作为校验更稳妥。

6) 土壤热阻系数 ρ_T 与土质有关，与 T_4 呈线性关系，直埋电缆一般 $\rho_T = 0.8 \sim 1.2 (\text{°C} \cdot \text{m}) / \text{W}$ 。该工程有些特殊情况， $\rho_T = 2.0 (\text{°C} \cdot \text{m}) / \text{W}$ 。

7) 环境温度指电缆周围介绍的温度，该工程所在地冻土层厚度约为 2m，地下 2m 处最热月平均土壤温度为 25°C，而电缆实际埋深为 2.4m，这将使电缆载流能力含有裕度。

根据上述因素，现以绝缘厚度 27mm，波纹铝护套厚 2mm，PVC 外护套厚 4.5mm 的国产电缆为样本，电缆载流量计算结果见表 2-3。

表 2-3 电缆载流量计算结果

铜缆芯截面 (mm^2)			240		300		400
			单端	两端	单端	两端	两端
电缆载流量 (A)	直埋未计入谐波影响时的基础值 I	$\theta_M = 90^\circ\text{C}$	441	380	497	416	456
		$\theta_M = 80^\circ\text{C}$	405	349	456	382	418
	直埋计入谐波影响水的确切值 I_1	$\theta_M = 90^\circ\text{C}$	419	363	472	396	433
		$\theta_M = 80^\circ\text{C}$	385	332	433	362	396
	穿管埋地计入谐波影响时的确切值 I_2	$\theta_M = 90^\circ\text{C}$	377	327	425	356	390
		$\theta_M = 80^\circ\text{C}$	347	299	390	326	356

由表 2-3 可见 240mm^2 的铜缆芯截面按 $\theta_M=80^\circ\text{C}$ 时, 已满足最大工作电流。此外按 GB 50217—1997《电力工程电缆设计规范》附录 D 算出允许截面应不小于 180mm^2 , 所以该工程选用电缆芯截面 240mm^2 是合理的。

第三节 交联聚乙烯电力电缆 热特性和载流量的计算

30

众所周知, 电缆线路线芯截面选择主要取决于热特性及载流量, 而电缆允许载流量又取决于电缆线芯的最高允许温度。电缆工作温度过高, 绝缘材料加速老化, 缩短了电缆的使用寿命, 因此在设计和选用电缆时必须分析其热特性, 使电缆在保证传输容量条件下, 各部分损耗发热不致超过允许值。在实际运行中, 测量电缆绝缘的最高温度很困难, 通常是监视电缆外皮的温度。

分析电缆热特性问题, 本质是根据电缆实际敷设情况进行模拟和计算, 但由于周围环境条件的不稳定性, 要准确计算往往是十分困难的, 下面仅介绍一些基本概念及实用计算方法。

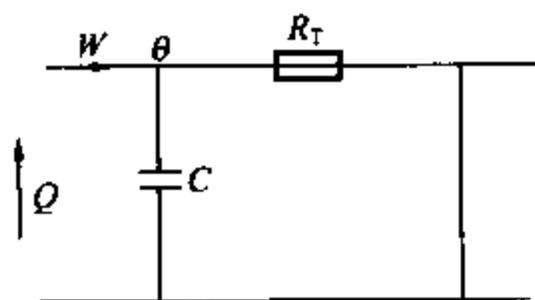


图 2-2 基本热路表达方式

一、基本概念

如图 2-2 所示, 热流 W 通过一个热阻 R_T 引起的温升为 $\theta=WR_T$ 。

根据热欧姆定律, 热阻 R_T 为

$$R_T = \rho_a \frac{l}{S} \quad (2-3)$$

式中 S ——截面积, m^2 ;

ρ_a ——热阻系数, $(^\circ\text{C} \cdot \text{m})/\text{W}$;

l ——长度, m 。

材料的储热能力用热容量 $C[\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})]$ 表示, 如铜的热容量 $C=3.5 \times 10^6 \text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, 则材料储存的热量 $Q=C\theta$ 。热量通

过辐射及对流扩散到外表面，基本热路表达方式如图 2-2 所示。

二、热阻计算

1. 介质热阻

常用材料的热阻系数见表 2-4。

表 2-4 常用材料的热阻系数

材 料	热阻系数 ρ_a [(°C·m) /W]	
绝缘材料	聚乙烯	3.5
	交联聚乙烯	3.5
护层材料	聚氯乙烯	7.0
	聚乙烯	3.5
管道敷设材料	混凝土	1.0
	纤维	4.8
	石棉	2.0
	聚氯乙烯	7.0

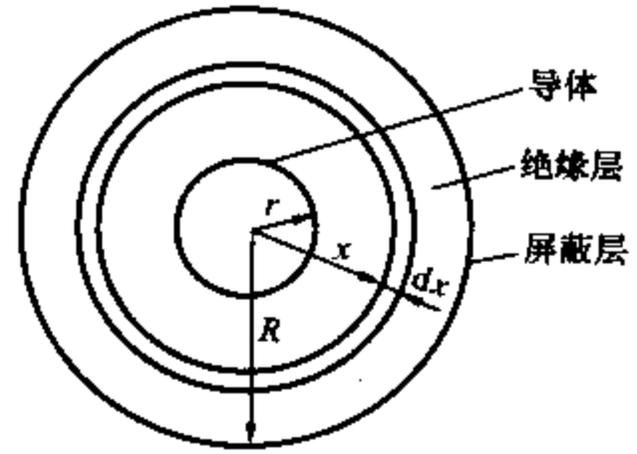


图 2-3 单芯电缆示意图

由于 35kV 及以上电压等级的交联聚乙烯电缆多数为单芯电缆，所以仅介绍单芯电缆介质热阻的计算。如图 2-3 所示，半径为 x 、厚度为 dx 的环形电缆介质热阻为 $\rho_a \frac{dx}{2\pi x}$ ，则介质总热阻为

$$R_d = \int_r^R \rho_a \frac{dx}{2\pi x} = \frac{\rho_a}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad (2-4)$$

式中 ρ_a ——介质热阻系数，(°C·m) /W；

r ——导体半径，m；

R ——电缆半径，m。

2. 电缆周围环境的热阻

电缆敷设方式不同时，电缆环境热阻的计算方法也不相同，

这里着重介绍电缆直埋敷设方式的土壤热阻计算方法。

假设电缆埋设在均匀媒质中，且地面为一等温面，电缆埋设深度为 H ，电缆外径为 D ，如图 2-4 所示，该电缆的热流场与一根离地面为 H 的导体

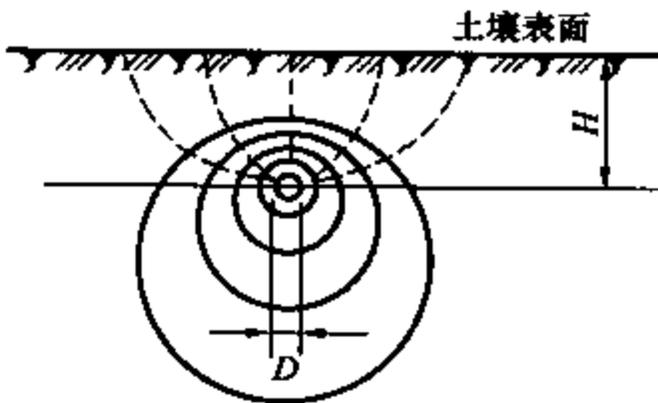


图 2-4 直埋电缆的热流场

所建立的电场相似, 因而电缆的环境热阻可用镜像法原理求得, 如图 2-5 所示。

设 W 是单位长电缆的总损耗, 则电缆外皮与地面的温差为

$$\theta = \frac{W\rho_a}{2\pi} \ln\left(\frac{2H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2H}{D}\right)^2 - 1}\right) \quad (2-5)$$

式中 ρ_a ——土壤热阻系数, 与土壤性质及水分含量有关, 通常为 $0.9 \sim 1.2$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}$) / W ;

D ——电缆外径, m ;

H ——电缆埋设深度, m 。

电缆周围环境热阻为

$$R_T = \frac{\theta}{W} = \frac{\rho_a}{2\pi} \ln\left[\frac{2H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2H}{D}\right)^2 - 1}\right] \quad (2-6)$$

当 $\frac{2H}{D} > 10$ 时, 式 (2-6) 可简化为

$$R_T = \frac{\rho_a}{2\pi} \ln \frac{4H}{D}$$

对于等负荷、相互不接触、同类电缆的电缆群, 也可用镜像法的原理确定第 l 根电缆的热阻 (见图 2-6), 但必须考虑到第 k 及第 m 根电缆对它的影响, 即

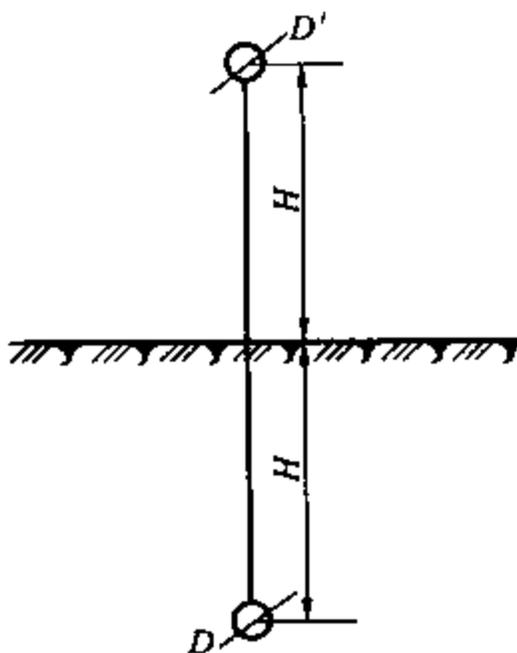


图 2-5 用镜像法确定单根电缆的环境热阻

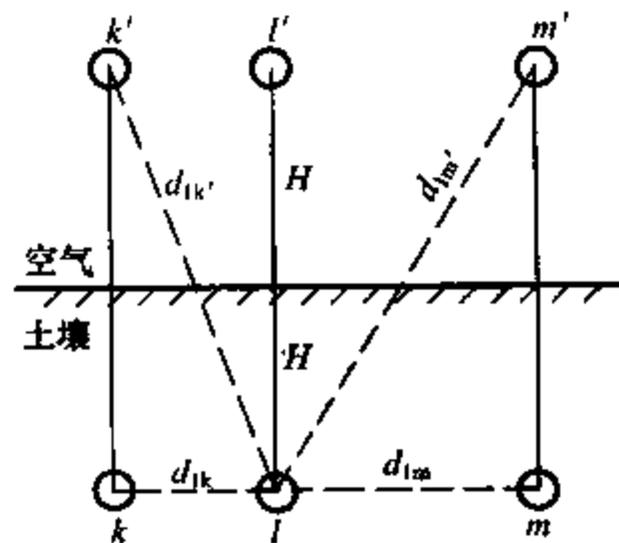


图 2-6 多根电缆的外部热阻

$$\theta_{ki} = \frac{\rho_a W}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{lk'}}{d_{lk}}\right)$$

$$\theta_{ml} = \frac{\rho_a W}{2\pi} = \ln\left(\frac{d_{lm'}}{d_{lm}}\right)$$

因而第 l 根电缆的总温升为

$$\theta_l = \frac{\rho_a W}{2\pi} \ln \frac{4H}{D} + \frac{\rho_a W}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{lm'} d_{lk'}}{d_{lm} d_{lk}}\right)$$

对于 3 根水平排列、间距为 d 、埋深为 H 的单芯电缆，其中间相电缆的温升为

$$\theta_1 = \frac{\rho_a W}{2\pi} \left[\ln \frac{4H}{D} + \ln\left(\frac{2H^2 + d^2}{d^2}\right) \right] \quad (2-7)$$

综上所述，对于多条埋设深度不同的同种电缆来说，其参考电缆 a 相（一般取最深的及中心位置的）的等效热阻为

$$R_{aT} = \frac{\rho}{2\pi} \ln \left[\frac{2H}{D} + \sqrt{\left(\frac{2H}{D}\right)^2 - 1} \left(\frac{d_{ab'}}{d_{ab}} \frac{d_{ac'}}{d_{ac}}\right) \right] \quad (2-8)$$

式中 d_{ab} 、 d_{ac} ——参考电缆 a 相到相邻电缆 b 相和 c 相的间距；
 $d_{ab'}$ 、 $d_{ac'}$ ——参考电缆 a 相到电缆 b' 和 c' 的距离。

对于相互接触的三角形排列的电缆，其任意一根电缆的热阻为

$$R_{nT} = 0.366\rho_a \left[\lg\left(\frac{4H}{D}\right) + 2\lg\left(\frac{2H}{D}\right) \right]$$

式中 H ——三角形排列中心的埋设深度。

在管道内敷设的电缆，从电缆外皮到管内壁之间的有效热阻计算比较复杂，电缆每米长度的有效热阻可用式(2-9)计算，即

$$R_{eT} = \frac{A}{1 + (B + C\theta_a)D_e} \quad (2-9)$$

式中 D_e ——电缆等值外径，当管内有 3 根单芯电缆，则 $D_e = 2.15D$ ，当管内有 2 根电缆，则 $D_e = 1.65D$ ，当管内有 1 根电缆，则 $D_e = D$ (D 为单根电缆的外径，单位为 cm)；

θ_a ——管内充填的媒质平均温度；

A、B、C——常数，由表 2-5 给定。

表 2-5 不同管道时的 A、B、C 值

常 数	A	B	C
金属管道内	5.2	1.4	0.011
空气中的纤维管	5.2	0.83	0.006
混凝土中的纤维管	5.2	0.91	0.010
空气中的石棉水泥管	5.2	1.2	0.006
混凝土中的石棉水泥管	5.2	1.1	0.011

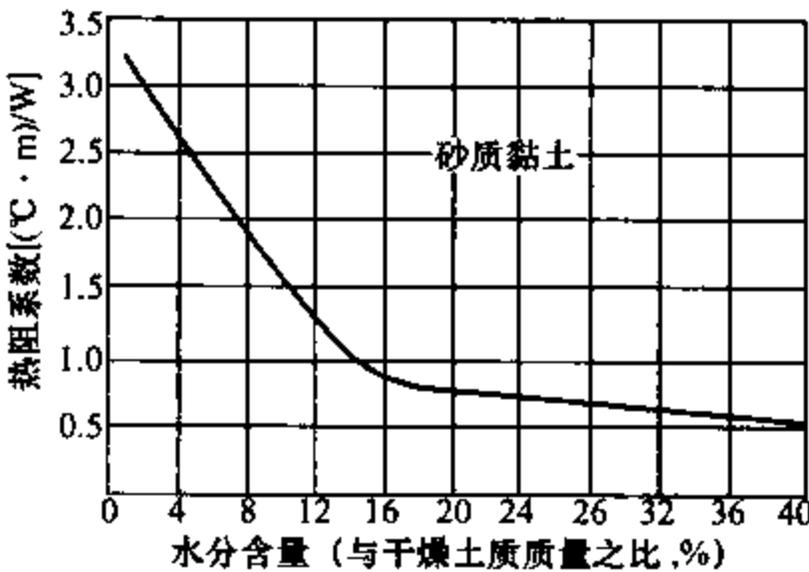


图 2-7 土壤热阻系数与含水量的关系曲线

3. 土壤特性

土壤的热阻系数对电缆的热特性影响很大,因而还需对土壤特性作进一步地研究。影响电缆载流量及土壤稳定性的因素有 3 个:土壤水分含量、土壤密度及热阻系数。而土壤的热阻系数与含水量又有密切

关系(见图 2-7),因而土壤的含水量直接影响电缆的载流量。如一条直埋电缆载流量为 950A,此时土壤水分含量约为 14%,热阻系数 $\rho_a = 1.0(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m})/\text{W}$,但当土壤干燥后,热阻系数增加到 $\rho_a = 3.0(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m})/\text{W}$,该电缆的载流量减少了 34%,允许载流值只有 630A。

土壤或回填材料的密度也同样影响土壤的热阻系数。土壤密度增加,热阻系数减少,能改善热的传导性能。电缆周围的土壤在稳定情况下的热量能正常地向四周传递。但当电缆载流量很大,与电缆相接触的土壤水分首先发生迁移,土壤的热阻系数便增加。如果持续大载流量,进一步引起土壤的水分迁移,则土壤热阻将继续增加,电缆的热量不能传递出去,最后便会导致电缆的热击穿。

电缆外皮温度究竟达到多少时会破坏其热平衡,一般要根据土质情况及含水量的多少而定。运行经验表明,电缆外皮温度不超过 50°C 是安全的。

4. 排管敷设的环境热阻

对于排管敷设的电缆，在计算额定载流量时，环境热阻应为下列 3 项热阻之和：① 电缆表面至管道内壁的热阻 R_{eT} ；② 管道热阻 R_{pT} ；③ 管道外部热阻 R_{oT} 。即 $R_T = R_{eT} + R_{pT} + R_{oT}$ 。管道外部热阻 R_{oT} 可按下式计算

$$R_{oT} = \frac{\rho_c}{2\pi} \ln \left[\frac{H}{r_d} + \sqrt{\left(\frac{H}{r_d}\right)^2 - 1} F_e \right] + \frac{\rho_a - \rho_c}{2\pi} NG \quad (2-10)$$

式中 ρ_c ——混凝土热阻系数；

ρ_a ——土壤热阻系数；

F_e ——式 (2-8) 中的 $\frac{d_{ab'} d_{ac'}}{d_{ab} d_{ac}}$ ；

N ——电缆总根数；

G ——水泥槽的几何因数；

H ——电缆埋设深度；

r_d ——管道内半径。

从式 (2-10) 可看出，管道外部热阻由两项组成：① 当管道外部全部为水泥时的热阻；② 考虑实际情况的校正项，是以电缆中相为中心、 r_b 为半径， r_b 半径区域内为水泥， r_b 半径区域外为土壤，如图 2-8 所示。

水泥槽的几何因数也可用式 (2-11) 表示，即

$$G = \ln \left(\frac{H}{r_b} \sqrt{\frac{H^2}{r_b^2} - 1} \right) \quad (2-11)$$

其中 r_b 可通过作图法确定或采用式 (2-12) 计算，即

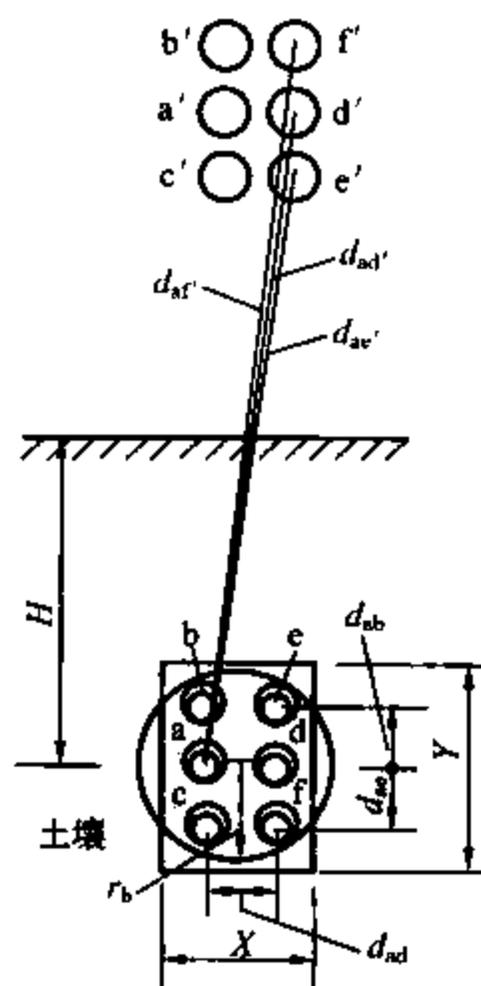


图 2-8 多根电缆镜像法原理

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2} \quad (2-12)$$

式中 x 、 y ——水泥槽截面尺寸。

三、稳定负荷连续载流量计算

电缆的温升可以简化为用一等值集中热路表示,对于直埋(或排管)自然冷却的单芯电缆系统如图 2-9 所示。图中电缆损耗包括三部分:线芯损耗、介质损耗及金属屏蔽损耗。介质损耗从介质热阻的中间部位注入,是一种近似的表达方式;金属屏蔽损耗,当屏蔽的接地方式不同时,如单端互联接地或交叉互联两端接地,其损耗也不相同。图 2-9 中,电缆对周围环境的温升 θ_c 。

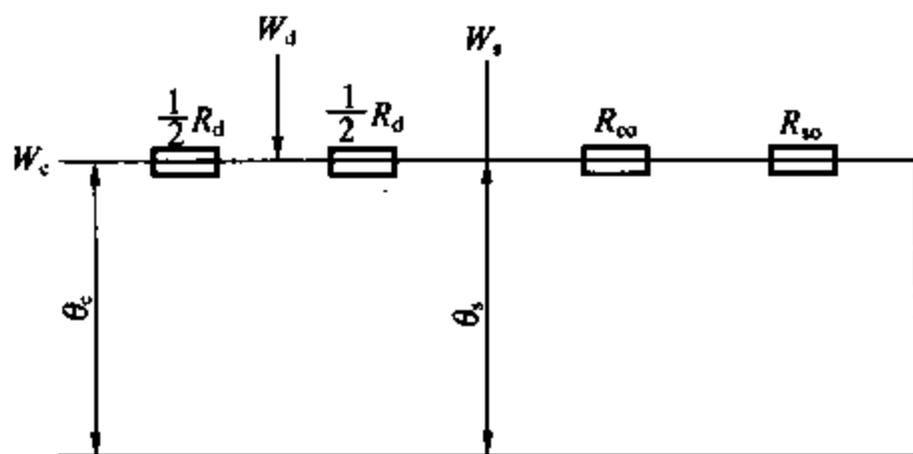


图 2-9 热流和热阻分布示意图

可用下式表达

$$\theta_c = W_c (R_d + R_{co} + R_{so}) + W_d \left(\frac{1}{2} R_d + R_{co} + R_{so} \right) + W_s (R_{co} + R_{so}) \quad (2-13)$$

式中 W_c ——线芯导体损耗;

W_d ——介质损耗;

W_s ——金属屏蔽损耗;

R_d ——介质热阻;

R_{co} ——外护层热阻;

R_{so} ——土壤热阻。

根据式 (2-13),若线芯允许最高温度及环境温度确定后,就可以推算出允许的稳定载流量。

【例 2-1】 两回 110kV 单芯交联聚乙烯电力电缆,平行敷

设在混凝土中的纤维管中，金属屏蔽层交叉互联，试求两回电缆输送容量。设线芯允许最高温度为 90°C ，环境温度为 5°C 。已知电缆及周围环境参数如下：导体截面 $S=760\text{mm}^2$ ，导体交流电阻 $R_{ac}=32.3\mu\Omega/\text{m}$ ，导体外径 $2r=36\text{mm}$ ，绝缘外径 $2x=76\text{mm}$ ，电缆外径 $D=90\text{mm}$ ，土壤热阻系数为 $1.2(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m})/\text{W}$ ，交联聚乙烯热阻系数为 $3.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ ，聚氯乙烯热阻系数为 $7.0(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m})/\text{W}$ ，混凝土热阻系数为 $1.0(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m})/\text{W}$ ，管道内径 $2r_d=0.13\text{m}$ ，水泥槽横截面尺寸 $xy=0.5\times 0.7(\text{m}^2)$ ，槽内管路间距(垂直或水平) d_{ab} 、 d_{ac} 或 d_{ad} 均为 0.25m ，排管中心深度 $H=1.1\text{m}$ (参见图 2-3 和图 2-8)。

解 (1) 热阻计算。

1) 介质(交联聚乙烯)热阻为

$$R_d = \frac{3.5}{2\pi} \ln\left(\frac{76}{36}\right) = 0.42 [(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m})/\text{W}]$$

2) 外护层(聚氯乙烯)热阻为

$$R_{\infty} = \frac{7.0}{2\pi} \ln\left(\frac{90}{76}\right) = 0.19 [(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m})/\text{W}]$$

3) 电缆表面主管热阻为

$$R_e = \frac{A}{1 + (B + C\theta_m)D}$$

式中 θ_m ——管内空气平均温度，根据我国运行经验，设 $\theta_m=40^{\circ}\text{C}$ ；

D ——电缆外径， $D=90\text{mm}=9\text{cm}$ 。

从表 2-5 可知，对于混凝土中的纤维管， $A=5.2$ ， $B=0.91$ ， $C=0.010$ ，故电缆表面主管壁热阻为

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{5.2}{1 + (0.91 + 0.010 \times 40) \times 9} \\ &= 0.41 [(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m})/\text{W}] \end{aligned}$$

以热量散发最不利的 a 相为基准，并考虑其他电缆对其影响，则 a 相电缆热阻为

$$R_a = \frac{\rho_c}{2\pi} \ln \left[\frac{H}{r_d} + \sqrt{\left(\frac{H}{r_d}\right)^2 - 1} \left(\frac{d_{ab'}}{d_{ab}}\right) \right. \\ \left. \times \left(\frac{d_{ac'}}{d_{ac}}\right) \left(\frac{d_{af'}}{d_{af}}\right) \left(\frac{d_{ad'}}{d_{ad}}\right) \left(\frac{d_{ae'}}{d_{ae}}\right) \right]$$

上式中: $H=1.1\text{m}$, $r_d=0.065\text{m}$, 管路间距与其镜像距离之比

$$\text{为 } \frac{d_{ab'}}{d_{ab}} = \frac{2.45}{0.25}, \frac{d_{ac'}}{d_{ac}} = \frac{1.95}{0.25}, \frac{d_{ad'}}{d_{ad}} = \frac{2.21}{0.25}, \frac{d_{ae'}}{d_{ae}} = \frac{1.86}{0.3535},$$

$$\frac{d_{af'}}{d_{af}} = \frac{2.46}{0.3535}, \text{ 则}$$

$$R_a = \frac{1}{2\pi} \ln(16.92 + \sqrt{286.4 - 1} \times 24742.4) \\ = 2.17 [(\text{°C} \cdot \text{m})/\text{W}]$$

管道外部总热阻为

$$R_{oT} = \frac{\rho_c}{2\pi} \ln \left[\frac{H}{r_d} + \sqrt{\left(\frac{H}{r_d}\right)^2 - 1} F_e \right] + \frac{(\rho_s - \rho_c)}{2\pi} NG$$

上式中: 两回路电缆总根数 $N=6$; 指定区域内的半径 $r_b =$

$$31.6\text{cm}; \text{ 水泥槽的几何因数 } G = 2.17 + \frac{6 \times (1.2 - 1)}{2\pi} \times 1.92 =$$

$$2.54; \text{ 系数 } F_e = \frac{2.45}{0.25} \times \frac{1.95}{0.25} \times \frac{2.46}{0.3535} \times \frac{2.21}{0.25} \times \frac{1.86}{0.3535} =$$

24742.4, 则

$$R_o = 2.17 + \frac{6 \times (1.2 - 1)}{2\pi} \times 1.92 = 2.54 [(\text{°C} \cdot \text{m})/\text{W}]$$

(2) 损耗计算。

1) 线芯损耗为 $W_c = I^2 R_{ac}$, R_{ac} 为导体交流电阻。已知 $R_{ac} = 32.3\mu\Omega/\text{m}$ 。

2) 介质损耗 $W_d = 2\pi f C U^2 \tan\delta$, C 为电容值, $C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{2x}{2r}\right)}$

$$= \frac{2\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times 2.3}{\ln \frac{76}{36}} = 0.000171 (\mu\text{F}/\text{m}), \text{ 所以有 } W_d = 2\pi$$

$$\times 50 \times 0.000171 \times 10^{-6} \times \left(\frac{110000}{\sqrt{3}} \right)^2 \times 0.0005 = 0.108 (\text{W/m}).$$

3) 金属屏蔽层的损耗, 假设金属屏蔽层换位后, 该项损耗很小, 故忽略不计。

(3) 允许载流量的计算。因为电缆对环境温升 $\theta_c = W_c (R_d + R_{co} + R_c + R_o) + W_d \left(\frac{1}{2} R_d + R_{co} + R_c + R_o \right)$, 而 $\theta_c = 90 - 5 = 85$ ($^{\circ}\text{C}$), 则有

$$I^2 R_{ac} \times 3.56 + 0.108 \times 3.35 = 85$$

将 $R_{ac} = 32.3 \mu\Omega/\text{m}$ 代入上式得

$$32.3 I^2 \times 10^{-6} \times 3.56 + 0.3618 = 85$$

解上式得

$$I = 858 \text{A}$$

(4) 输送容量计算。两回路电缆总输送容量为

$$S = 2\sqrt{3}UI = 2 \times \sqrt{3} \times 110 \times 858 = 327 (\text{MVA})$$

● 第四节 电力电缆线路允许通过 短路电流的计算

电力电缆必须满足当线路发生故障时, 在短路电流作用下, 电缆的温度不超过短时允许的最高温度。在计算短路温度和允许电流时, 由于短路时间短, 可以认为在短路期间线芯损耗产生的热量全部使线芯温度上升, 向绝缘层散发热量可以忽略不计, 则

$$W dt = Q d\theta_{sc} \quad (2-14)$$

$$\text{其中} \quad W = I_k^2 R_{20} [1 + \alpha (\theta_{sc} - 20)] \quad (2-15)$$

将式 (2-15) 代入式 (2-14) 后得

$$\frac{d\theta_{sc}}{[1 + \alpha (\theta_{sc} - 20)]} = \frac{I_k^2 R_{20} dt}{Q} \quad (2-16)$$

式中 W ——短路电流产生的线芯损耗, W/m ;

I_k ——短路电流, kA ;

R_{20} ——单位长度电缆线芯在 20°C 时的交流电阻, Ω/m ;

θ_{sc} ——线芯在短路的允许温度, $^{\circ}\text{C}$;

Q ——单位长度电缆线芯热容量, $\text{J}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m})$;

α ——电阻温度系数, $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ 。

将式 (2-16) 积分, 设 $t=0$ 时, 线芯温度为 θ_0 , 则电缆允许短路电流为

$$I_k = \sqrt{\frac{Q}{R_{20}\alpha t} \ln \frac{1 + \alpha(\theta_{sc} - 20)}{1 + \alpha(\theta_0 - 20)}} \quad (2-17)$$

40

【例 2-2】 在 [例 2-1] 的交联聚乙烯电力电缆计算中, 已知: 短路持续时间 $t=2\text{s}$, 短路允许最高温度 $\theta_{sc}=250^{\circ}\text{C}$, 短路前电缆线芯温度 $\theta_0=90^{\circ}\text{C}$, 铜芯电阻温度系数 $\alpha=0.003\ 93$, 铜的比热 $c=3.5 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$, 电缆芯线截面积 $s=760\text{mm}^2$ 。试求该电缆的允许短路电流值。

解 每米线芯热容量

$$\begin{aligned} Q &= cs = 3.5 \times 10^6 \times 760 \times 10^{-6} \\ &= 2660 [\text{J}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m})] \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} I_d &= \sqrt{\frac{Q}{R_{20}\alpha t} \ln \frac{1 + \alpha(\theta_{sc} - 20)}{1 + \alpha(\theta_0 - 20)}} \\ &= \sqrt{\frac{2660}{32.3 \times 10^{-6} \times 0.003\ 93 \times 2} \ln \frac{1 + 0.003\ 93 \times (250 - 20)}{1 + 0.003\ 93 \times (90 - 20)}} \\ &= 64.81 (\text{kA}) \end{aligned}$$

所以该电缆允许短路电流值为 64.81kA 。

第五节 交联聚乙烯电力电缆金属屏蔽层截面选择

根据 DL 401—1991《高压电缆选用导则》规定, 为了使系统发生单相接地或不同地点两相接地时流过金属屏蔽层的故障电流不至将它烧损, 也就是在短路电流作用下温升值不超过短路允

许最高温度平均值。该屏蔽层最小截面应满足表 2-6 的要求。

表 2-6 电缆金属屏蔽层最小截面推荐值

U (kV)	6, 10	35	66	110	220	330	500
S (mm ²)	25	35	50	75	95	120	150

对于 110kV 及以上电压等级的交联聚乙烯电力电缆，为了减少流经金属屏蔽层的接地故障电流，可加装接地的回流线，但该回流线截面应通过热稳定计算来确定。

交联聚乙烯电力电缆金属屏蔽层的作用：一方面是弥补半导体屏蔽的不足；另一方面则是作为事故电流的通路。国内的 10kV 和 35kV 系统大多为中性点非直接接地系统，在发生单相接地故障时，电容电流均限制在 20A 之内，否则必须安装消弧线圈补偿。从理论上说，屏蔽层不需考虑事故时的回路电流，但运行经验表明，上述情况有必要进一步讨论。因为电缆线路往往分布在由架空线和变电站许多电力设备所组成的电力系统中，因此相间故障不一定发生在同一地点。例如大风季节，树枝碰及架空线，瞬间接地产生过电压；雷雨天气，雷击塔顶及附近避雷线导致绝缘子串闪络。电力设备中的绝缘薄弱环节往往在过电压时被击穿，造成不同地点的相间短路。当电缆和其他电气设备形成相间短路时，电缆的金属屏蔽层就成了短路电流的通道（如图 2-10 所示）。如果不计电力设备的阻抗，接地电阻假定为 10Ω ，35kV 系统相间短路电流约为 2kA，此时屏蔽层的电流可达 1kA，已足够烧损热容量不足的屏蔽层和通道不良的接触件。

例如，35kV、 240mm^2 的电缆，当铜屏蔽层通过 2.3kA 电

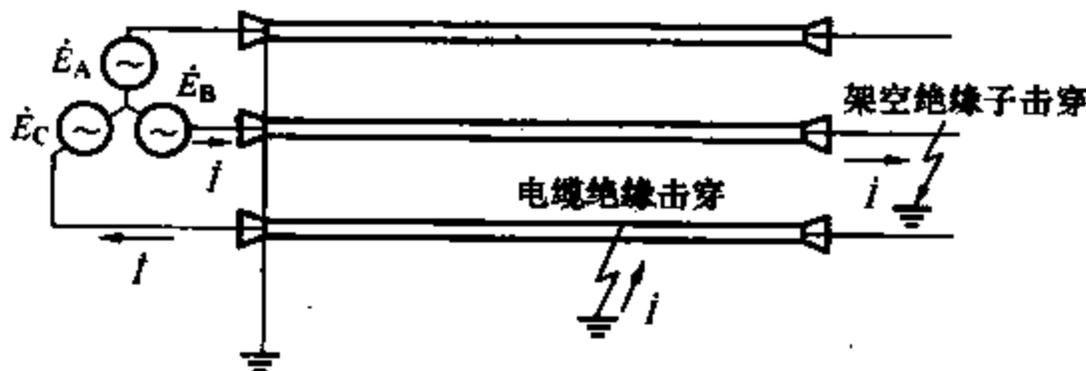


图 2-10 相间短路电流回路

流持续 2s 后, 温度可达 150℃; 3s 后, 可达 200℃。这显然对电缆绝缘和外护套都会带来危害。

如果金属屏蔽层不直接接地, 即经过电容接地, 则正常时会产生感应电压, 故障时感应电压更高, 也会带来一系列问题。因此只有从结构上重视和加强金属屏蔽层, 使它满足事故电流热容量, 才是比较安全可靠的措施。

对于 110kV 及以上中性点直接接地系统的交联聚乙烯电力电缆, 可以根据该系统情况并参照国内外某些典型工程选用金属屏蔽层截面。

例如, 广东某市电力局 110kV XLPE 电缆型号为 CAZV-1×500/120, $U_0/U=71/123\text{kV}$, 则金属屏蔽层截面为 120mm²。选择的依据有 2 条: ① 参照武汉供电局引进瑞典 110kV XLPE 电缆, 型号为 ASEA-1×400/105, $U_0/U=71/123\text{kV}$, 则金属屏蔽层截面为 105mm²; ② 根据《电力工程电气设计手册 1 (电气一次部分)》(水利电力部西北电力设计院编, 水利电力出版社出版), 在短路故障时能满足热稳定要求的最小金属屏蔽截面积可计算如下:

$$S = I_d \sqrt{t} \times 10^3 \sqrt{\frac{C}{ak\rho_{20}} \ln \frac{1 + \alpha(\theta_{sc} - 20)}{1 + \alpha(\theta_0 - 20)}} \quad (2-18)$$

式中 S ——电缆热稳定要求最小截面积, mm²;

I_d ——单相短路电流, 该系统 $I_d=17\text{kA}$, 流过每相金属屏蔽层电流为 17/3kA;

t ——故障切除时间, 该系统 $t=3\text{s}$;

C ——金属屏蔽层的热容系数, $C=3.40 \times 10^6 \text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

θ_{sc} ——聚氯乙烯护套允许短路温度, $\theta_{sc}=120^\circ\text{C}$;

α ——金属护套电阻的温度系数, $\alpha=0.004 \text{1}/^\circ\text{C}$;

θ_0 ——短路前电缆的温度, $\theta_0=65^\circ\text{C}$;

ρ_{20} ——单位长度金属屏蔽层在 20℃时的直流电阻, $\rho_{20}=0.0184\Omega/\text{m}$;

k ——系数, $k=1.05$ 。

将上述各参数代入式 (2-18) 可得

$$S = \frac{\frac{17}{3} \times \sqrt{3} \times 10^3}{\sqrt{\frac{3.40 \times 10^6}{0.004 \times 1.05 \times 0.0184} \ln \frac{1 + 0.004 \times (120 - 20)}{1 + 0.004 \times (65 - 20)}}}$$

$$= 115(\text{mm}^2)$$

所以该市电力局选择金属屏蔽层截面 120mm^2 是较合理的。

下面再举一例说明 35kV 单芯电缆金属屏蔽层截面和短路电流容量的计算方法。

例如某 $\text{YJV-26/35kV } 1 \times 185\text{mm}^2$ 电缆的结构参数见表 2-7。

表 2-7 电缆结构参数

部 位	厚 度 (mm)	标称外径 (mm)	材 质
导 体		16.1	铜
内屏蔽	0.8+0.2	18.1	半导体 PE
绝 缘	10.5	40.2	XLPE
外屏蔽	0.8±0.2	42.0	半导体 pE
铜 带	0.12	42.5	铜
绕包内衬层	—	43.3	—
外护套	24±0.24	48.3	PVC

(1) 金属屏蔽层截面计算

$$S = \pi t' (d + t') / (1 - k) \quad (2-19)$$

式中 S ——电缆金属屏蔽层截面, mm^2 ;

d ——电缆金属屏蔽层外径, mm ;

k ——重叠率, $k=0.6$;

t ——铜带厚度, mm 。

将表 2-7 中的有关数据代入上式可得

$$S = 3.14 \times 0.12(42 + 0.12) / (1 - 0.6)$$

$$= 39.68(\text{mm}^2)$$

(2) 短路电流容量计算

$$I_d = kS \sqrt{\left[\ln \left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta} \right) \right] / t} \quad (2-20)$$

式中 I_d ——短路电流, kA;

S ——载流体截面, mm^2 ;

k ——与载流体有关的常数, $k=226$;

θ_f ——短路后最终温度, $\theta_f=220^\circ\text{C}$;

θ_i ——短路起始温度, $\theta_i=70^\circ\text{C}$;

β ——载流体电阻温度系数的倒数, $\beta=234.5$;

t ——短路电流持续时间, $t=1\text{s}$ 。

将上述参数代入上式可得:

$$\begin{aligned} I_d &= 226 \times 39.68 \times \sqrt{\ln \left[\frac{220 + 234.5}{70 + 234.5} \right] / 1} \\ &= 5.76 \text{ (kA)} \end{aligned}$$

思考题

1. 交联聚乙烯电力电缆的型号、名称是如何划分的? 各适用于什么范围?
2. 交联聚乙烯电力电缆线芯数选择有哪些基本要求?
3. 电力电缆截面选择的原则和方法有哪些?
4. 为什么对电力电缆要进行热稳定校验?
5. 交联聚乙烯电力电缆金属屏蔽层有什么作用? 它的截面是如何选择的?

交联聚乙烯电力电缆的电气试验

第一节 交联聚乙烯电力电缆额定电压 U_0/U 的制定和分类

一、城网系统中性点接地方式

目前国内外城网中性点接地方式一般分为中性点直接接地、中性点经小电阻接地、中性点经消弧线圈接地及中性点不接地等4种,现分别介绍如下。

1. 中性点直接接地系统

一般在110kV及以上电压等级的电网中采用,当发生单相接地故障时能迅速跳闸。在继电保护日益完善的今天,切断时间可控制在零点几秒之内,系统过电压大大降低,使电网造价降低。

2. 中性点经小电阻接地系统

35kV及以下电压等级的电网,为了限制接地故障电流的数值,采用经小电阻(约为几欧到几十欧)接地的方式,当发生接地故障时也能瞬时跳闸。为了保证系统供电的连续性,一定要采用双回路或环网供电。这种接地方式的优点是系统过电压也能较大的降低,从而使以电缆线路为主的电网造价降低。

3. 中性点经消弧线圈接地系统

一般用于35kV及以下电压等级的电网中,单相接地故障后可继续运行,但系统过电压较高,使电缆的老化寿命减少。为了使电网能可靠供电,必须提高绝缘水平,这样就增加了电网的造价。随着电力系统容量增大,电容电流可达数百安,往往给选择消弧线圈带来困难,这时可考虑改为经小电阻接地方式。

4. 中性点不接地系统

中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统基本上是属

于同一类型，我国对其使用条件作了明确的规定：当 35kV 系统电容电流 $I_c < 10A$ 、6~10kV 系统电容电流 $I_c < 20A$ 时采用，否则就难以切断电容电流，必须采用经消弧线圈接地，以补偿线路的电容电流。

由于一个国家的电网并不是单一的，各种接地方式均有。特别是随着电力工业的发展，110kV 及以上电网系统一般均采用中性点直接接地方式，而中低压电网系统国外趋向于使用中性点经小电阻接地方式。我国的电网系统是参照前苏联的模式建制的，中低压电网系统采用较经济的经消弧线圈接地方式，近 20 多年也有采用中性点经小电阻接地的。

表 3-1 和表 3-2 所列为日本和我国电力网中性点接地方式的统计资料。

表 3-1 1967 年日本电网中性点接地方式统计

U (kV)	线路长度 (km)			
	直接接地	电阻接地	消弧线圈接地	不接地
11~33	262	4949	4514	6454
44~77	19	8703	17394	431
110~154	245	9360	2301	—
187~275	5364	—	—	—

表 3-2 我国某些城市电网系统的基本情况

地区	上海	南京	沈阳	北京
经消弧线圈接地系统的过电压	$3 \sim 5U_0$	$4U_0$	$4U_0$	$4U_0$
故障接地时间 (h)	2	2	2	2
采用中性点不接地系统规定 (A)	$I_c < 10$	$I_c < 10$	—	—
采用经消弧线圈接地系统规定 (A)	$I_c > 10$	$I_c > 10$	—	—

从表 3-2 可知，采用经消弧线圈接地方式时过电压较高，使

用单位希望将电缆绝缘水平提高一些是合理的,以保证电缆运行的可靠性。关于接地故障的时间和次数,各个地区提供了一些资料。如:沈阳电业局提供了中低压电网中故障时间每年约为125h,约有20%的故障超过2h,超过8h的故障也存在,在10kV系统中有些故障时间可达24h。从延长老化寿命出发,也应当适当增加非直接接地系统中使用的电缆的绝缘厚度。

二、电缆额定电压 U_0/U 的制定标准

早在1965年国际电工委员会(IEC)就制定了《高压电缆选用导则》,将电缆绝缘等级划分为两类,即 U_0 分为 I、II 两类(如表3-3所示)。I类 U_0 ——短路故障可在1h内切除;II类 U_0 ——不包括I类的所有系统。

表 3-3 三相系统中电缆的 U_0 值

系统最高电压 U_m (kV)	额定电压 U_0 (kV)		系统最高电压 U_m (kV)	额定电压 U_0 (kV)	
	I	II		I	II
12	6	8.7	72.5	26	36
17.5	8.7	12	100	50	
24	12	18	123	64	
36	18	26			

注 1. U_0 为设计时采用的电缆任一线芯与金属护套之间的额定工频电压。

2. U_m 为设计时采用的电缆任两个线芯之间的最高工频电压。

1984年IEC又将 U_0 由原来的两类分成3类,即:

- 1) A类:故障应尽快切除,时间不得大于1min。
- 2) B类:故障应在短时切除,时间不得大于1h。
- 3) C类:除A、B类外任何故障系统。

其实IEC尚未对新分类的3类绝缘水平作出推荐意见,美国则早在1976年修订NEMA标准时就已提出3种绝缘水平的建议,即

(1) 100%绝缘水平。故障切除时间不超过1min,用在直接接地或经小电阻接地系统中。

(2) 133%绝缘水平。故障切除时间不超过 1h, 用在经消弧线圈接地及不接地系统中。

(3) 173%绝缘水平。故障接地时间可任意长, 不作具体规定。

三、我国对电缆额定电压 U_0/U 的划分

电缆 U_0/U 的划分与 U_0 类型的选择实际上是根据电网的运行情况——中性点接地方式和故障切除时间等因素来选择电缆的绝缘厚度。在我国 6~66kV 系统中, 大部分是采用中性点不接地方式, 允许单相接地情况下继续运行, 此时健全相会产生过电压。由于故障切除时间有长短之别, 这就使电缆绝缘承受不同持续时间的过电压, 而对各类绝缘水平的电缆产生累积破坏效应, 不同程度地影响电缆的寿命。

基于上述情况, 我国制定的《高压电缆选用导则》也将 U_0 划分为两类 (见表 3-4), 并明确指出:

(1) 当电缆所在系统中的单相接地故障能很快切除, 在任何情况下故障持续时间不超过 1min 时, 可选 I 类 U_0 , 如中性点经小电阻接地就属于这类情况。

(2) 当电缆所在系统中的单相接地故障持续时间在 1min~2h 之间, 个别情况在 2~8h 之间时, 必须选用 II 类 U_0 , 即 10kV 系统中应选用 $U_0/U=8.7/10\text{kV}$; 35kV 系统中应选用 $U_0/U=26/35\text{kV}$, 66kV 系统中应选用 48/66kV。

(3) 当电缆所在系统是采用中性点直接接地方式时, U_0 只有 I 类。

表 3-4 我国电缆额定电压 U_0/U 值

U (kV)	U_m (kV)	U_0 (kV)	
		I	II
3	3.6	1.8	3
6	7.2	3.6	6
10	12	6	8.7

续表

U (kV)	U _m (kV)	U ₀ (kV)	
		I	II
15	17.5	8.7	12
20	24	12	18
35	40.5	21	26
66	72.5	37	48
110	123	64	—
220	245	127	—
330	363	190	—
500	550	290	—

注 U 为设计时采用的电缆任两个线芯之间的额定工频电压。

第二节 交联聚乙烯电力电缆电气 试验分类、试验标准和方法

交联聚乙烯电力电缆电气试验可分为 6 类，即：例行试验、抽样试验、型式试验、预鉴定试验交接试验和预防性试验。其定义分别为：

(1) 例行试验。又称出厂试验，是制造厂为了证明电缆质量符合技术条件，发现制造过程中的偶然性缺陷，对所有制造电缆长度均应进行的试验。

(2) 抽样试验。也是由制造厂进行的，是对一批产品按一定的取样规定抽出一部分电缆长度进行的试验，以检查成品是否符合设计的技术要求。

(3) 型式试验。是制造厂对任一类型电缆，在大批生产以前或对产品的结构材料、工艺作了改变时所进行的试验，目的是为了检验电缆是否满足预定用途的具有令人满意的运行性能。如电缆材料或影响电缆运行特性的设计文件没有改变时，型式试验在做过一次后就不需要再重复做。

(4) 预鉴定试验。这是一种长期加速老化试验,在完整的电缆线路上进行,以检验线路的性能。它在开发研制过程的最后阶段且在工厂以外有关主管部门的见证下进行。

(5) 交接试验。检查电缆敷设安装质量,以决定电缆能否正常投运的试验。

(6) 预防性试验。电缆线路投运后,为了检查它的绝缘状况所进行的试验。

现将部分试验项目标准和试验方法详细介绍如下。

一、例行试验

1. 导体直流电阻测定

这一项试验很重要,它可以检查制造厂的导体截面是否符合规定尺寸。如果截面偏小或采用不纯的导体材料,导体直流电阻就会增大;反之,如果截面偏大,而电缆外径一定,则绝缘厚度变薄,这两种情况都不符合要求。导体直流电阻应符合表 3-5 的规定。

表 3-5 导体直流电阻值

标称截面 (mm ²)	导体直流电阻 20℃ 时不大于 (Ω/km)		标称截面 (mm ²)	导体直流电阻 20℃ 时不大于 (Ω/km)	
	铜	铝		铜	铝
1×25	0.727	1.20	1×240	0.075 4	0.125
1×35	0.524	0.868	1×300	0.060 1	0.100
1×50	0.387	0.641	1×400	0.047 0	0.077 8
1×70	0.268	0.443	1×500	0.036 6	0.060 5
1×95	0.193	0.320	1×630	0.028 3	0.046 9
1×120	0.153	0.253	1×800	0.022 1	0.036 7
1×150	0.124	0.206	1×1000	0.017 6	0.029 1
1×185	0.099 1	0.164			

2. 交流电压试验

该试验是在整盘电缆上进行的, 110kV 及以下电压等级电缆的试验时间为 15min, 电缆主绝缘应不击穿, 试验电压值 U_t 见表 3-6。

表 3-6 交流电压试验值

U_0 (kV)	0.6	1.8	3.6	6.0	8.7	12	18	21	26	64
U_t (kV)	3.5	6.5	11 (12.6)	15 (21)	22 (30.4)	30 (42)	45 (63)	53 (73.5)	65 (91)	160

注 1998 年 IEC 已将交流电压试验值由 $2.5U_0$ 增加到 $3.5U_0$, 即试验电压采用括号内值。

3. 局部放电试验

该试验是在整盘电缆上进行的, 试验标准为:

- 1) 电缆 $U_0=0.6\sim 18\text{kV}$, 在 $1.5U_0$ 下放电量应不大于 20pC。
- 2) 电缆 $U_0=21\sim 26\text{kV}$, 在 $1.5U_0$ 下放电量应不大于 10pC。
- 3) 电缆 $U_0=64\text{kV}$, 在 $1.5U_0$ 下放电量应不大于 10pC。

2)、3) 两项试验并非考核电缆绝缘水平, 而是检查电缆的生产工艺质量及其在制造过程中有无差错。对每一盘电缆均应进行该项试验, 如不合格就不能出厂。

二、抽样试验

制造厂如接到大批定货时, 应按表 3-7 进行抽样试验, 试验项目分为下列各项。

表 3-7 抽样试验试样数

电缆交货长度 l (km)		试样数
多芯电缆	单芯电缆	
$2 < l \leq 10$	$4 < l \leq 20$	1
$10 < l \leq 20$	$20 < l \leq 40$	2
$20 < l \leq 30$	$40 < l \leq 60$	3

1. 结构尺寸检查

对电缆结构尺寸进行检查, 绝缘厚度的平均值应不小于规定的标准值 δ , 任一点最薄处应不低于 $0.9\delta - 0.1\text{mm}$ 。对于护套的厚度亦应进行检查, 其平均厚度应不低于 $0.85\delta - 0.1\text{mm}$ (护套内表面为圆柱形) 或 $0.85\delta - 0.2\text{mm}$ (护套内表面为不规则的圆柱形)。

2. 4h 交流高压试验

试验是在短段电缆试样上进行, 试验电压见表 3-8。对于 110kV 电缆, 在抽样试验中不进行 4h 高压试验, 但应测量电缆的电容值, 电容值应不超过标称值的 80%。

表 3-8 4h 交流高压试验值

U_0 (kV)	6.0	8.7	12	18	21	26	64
U_i (kV)	24	34.8	48	72	84	104	—

3. 热延伸试验

电缆热延伸试验按 IEC 60540 《电线电缆绝缘及遮蔽之测试方法》的规定进行, 见表 3-9。

表 3-9 热延伸试验项目

试验项目		性能要求	试验项目	性能要求
热延伸试验空气温度 (偏差 $\pm 2^\circ\text{C}$) ($^\circ\text{C}$)		200	载荷下伸长率 (%最大)	17.5
处理 条件	载荷时间 (min)	15	冷却后永久伸长率 (%最大)	15
	机械压力 (MPa)	20		

热延伸试验是检查交联聚乙烯绝缘的交联度, 如绝缘未很好硫化, 交联度很低, 则在规定条件下的伸长率将非常大, 冷却后的永久伸长也很大。如电缆交联度不够, 则电缆的耐热性能和机械性能都很差, 故这也是一项考核电缆绝缘性能的重要指标。

抽样试验是制造厂在大量生产电缆时，部分地抽样检查绝缘水平。对于 110kV 等级电缆，其每批抽样数不得大于 10%，如果抽样检查有一项指标不合格，则应双倍试样复查，如仍有不合格出现，这批产品就判为不合格，不再继续取样试验。

三、型式试验

型式试验是决定该类产品的绝缘水平，并考核其性能是否可以投入生产的一项试验，可分为下列项目。

1. 局部放电试验

在短电缆试样上测量，试验标准同例行试验。

2. 弯曲试验加局部放电试验

在进行弯曲试验时，电缆弯曲倍数为：

1) 单芯电缆： $20(D+d) \pm 5\%$ 。

2) 三芯电缆： $15(D+d) \pm 5\%$ 。

其中 D 、 d 分别为电缆及导体外径，弯曲试验后测电缆局部放电，结果应符合例行试验时的要求。

3. 介损及电容试验

(1) 测量 U_0 时的电容值。

(2) 测量 $\tan\delta=f(U)$ 曲线，在室温下测量，试验标准见表 3-10。

表 3-10 介质损耗角正切值 $\tan\delta$

试验电压 (kV)	$\tan\delta \times 10^{-4}$		
	PVC	XLPE	PE
U_0	≤ 1000	≤ 40	≤ 10
$0.5U_0 \sim 2U_0$	≤ 65	≤ 20	≤ 20

注 1. U_0 下的 $\tan\delta$ 在室温下测量，当电缆 $U_0/U < 21/35\text{kV}$ ，试验电压 U_0 下， $\tan\delta \leq 40 \times 10^{-4}$ ；当电缆 $U_0/U \geq 21/35\text{kV}$ ，试验电压 U_0 下， $\tan\delta \leq 10 \times 10^{-4}$ 。

2. 当电缆 $U_0/U < 21/35\text{kV}$ ，在 2kV 下测量 $\tan\delta$ ，其标准为：环境温度下 $\tan\delta \leq 40 \times 10^{-4}$ ；工作温度下， $\tan\delta \leq 80 \times 10^{-4}$ 。

3. 低值电压和高值电压下 $\tan\delta$ 之差对 XLPE 电缆不应超过 20×10^{-4} 。

4. 加热循环后局部放电试验

35kV 及以下电压等级电缆才进行此项试验，具体方法如下：

(1) 将电缆通电加热到工作温度加上 10°C 2h，自然冷却 4h，如此循环 3 次。

(2) 测量局部放电量应符合例行试验时的要求。

5. 冲击电压试验及交流电压试验

(1) 将电缆加热到最高工作温度加上 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 按表 3-11 进行冲击电压试验，正负极性各 10 次后，电缆主绝缘应不击穿。

(3) 冲击电压试验后在室温下施加工频电压 15min 后，电缆主绝缘应不击穿，其数值同例行试验。

表 3-11 冲击电压 U_0 试验值

U_0 (kV)	3.6	6.0	8.7	12	18	21	26
U_p (kV)	60	75	95	125	170	200	250

6. 4h 交流电压试验

同抽样试验数值。

7. 加速老化试验

按 IEC 新标准要求，对 35kV 及以上电压等级电缆应进行加速老化试验（负荷循环试验）。试验条件为，将电缆加交流电压到 $2U_0$ ，持续 20 天。

上述型式试验是在这类产品投产前取样进行，如果某一项指标不合格，应取双倍试样复验，如仍有不合格出现，这批产品就不能投产。

四、交接试验

按 IEC 规定，交联聚乙烯电力电缆敷设安装后应进行交接试验，试验项目包括：

1. 电缆主绝缘耐压试验

以交联聚乙烯绝缘为代表的橡塑绝缘电缆已成为输配电工程

中高压电缆的主要品种，电缆安装后的现场耐压试验是最重要的试验项目。国内外研究表明传统的直流耐压试验方法对橡塑绝缘电缆是低效而且是有害的。空载运行 24h 的方法有效性较差，且需要使用系统电源进行试验，有可能造成系统短路事故。变频谐振耐压试验方法相对于工频交流试验具有很好的等效性。

关于橡塑绝缘电缆的现场耐压试验技术较新，发展也较快，各项标准、规定和更新速度不一，现行各类标准存在一些差异，为确保电网及试验设备安全，规范现场试验要求是十分必要的。关于橡塑电缆现场试验的要求，我国南方电网公司推荐如下规定，可供参考使用。

(1) 新安装电缆。在进行交接试验时，可用变频谐振试验方法，试验频率范围为 20~300Hz，谐振耐压试验规定见表 3-12。

表 3-12 20~300Hz 谐振耐压试验标准

电压等级 (kV)	试验电压 (kV)	时 间 (min)
35 及以下	$2U_0$	5 (IEC 60502—1998)
110	128	60
220	180	60
300	320	60

(2) 大修新造终端或接头后的电缆。这种情况的试验项目、周期和要求见表 3-13。

表 3-13 试验项目、周期和要求

项 目	周 期	要 求		
主绝缘 交流耐压 试验	1) 大修新造 终端或接头后 2) 必要时	推荐使用 20~300Hz 谐振耐压试验		
		电压等级 (kV)	试验电压	时间 (min)
		35 及以下	$1.6U_0$	5
		110	$1.36U_0$	60
		220 及以上	$1.12U_0$	60

2. 电缆外护层绝缘耐压试验

通常用直流电压 10kV，耐压 1min。耐压前后用绝缘电阻表测量绝缘电阻值，如无异常，则认为合格。

3. 导引电缆耐压试验

各线芯对地加直流电压 10kV，耐压 1min。耐压前后用绝缘电阻表测量绝缘电阻值，如无异常，则认为合格。

第三节 交联聚乙烯电力电缆交流耐压 试验设备和试验程序

一、变频谐振耐压试验技术

1. 变频谐振耐压试验简介

变频谐振耐压试验主要用于对大容量的容性电力设备进行现场交流耐压，如：全封闭组合电器（GIS）、橡塑绝缘电缆（XLPE）、发电机定子和电力电容器等。国际大电网会议（CIGRE）21—09 工作组于 1997 年发表的《高压挤包绝缘电缆竣工验收试验导则》中指出：30~300Hz 交流耐压试验与工频耐压的等效性良好，推荐用此方法进行交流耐压试验，并制定了电压试验标准。IEC 60840《额定电压为 30kV ($U_m=36kV$) 以上至 150kV ($U_m=170kV$) 以下的挤压绝缘的动力电缆试验：试验方法和要求》中推荐 45~150kV 电压等级敷设后电缆试验标准中增加了 $1.7U_0/5min$ 或 $1.0U_0/24h$ 交流试验标准。IEC 62067/CD 草案中将 220kV 电缆交流耐压试验频率定为 20~300Hz。

总之，不同的试验电压和频率，用于 XLPE 电缆耐压时，其效果是有差别的，见表 3-14。

表 3-14 不同频率用于 XLPE 电缆耐压试验的效果比较

项 目	50Hz	30~300Hz	0.1Hz
与工频等效性	最好	最好	较好
故障检出率	最高	最高	较高

续表

项 目	50Hz	30~300Hz	0.1Hz
对试品损伤	小	小	较小
试验设备功率	太大	小	最小
试验电压	低	低	较高
试验时间	1min	5、15min	45、60min
评 价	现场实施困难	可行性好	推荐,但超高压 中无法实施

2. 变频谐振理论基础及试验设备

(1) 串联变频谐振原理。变频谐振按电路原理分为串联谐振和并联谐振两种。现场耐压试验需要获得高电压,所以大多采用串联谐振。串联谐振原理如图 3-1 所示。

$$\left. \begin{aligned} \text{谐振频率} \quad f_0 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \\ \omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

试品所获得的容量与励磁变压器输出容量之比,称作电路的品质因数。对于串联谐振回路,也可用试品上的电压与励磁变压器的输出电压之比代替。谐振时

$$U_C = U_L = I\omega_0 L \quad U = IR$$

$$\text{则} \quad Q = \frac{U_C}{U} = \frac{I\omega_0 L}{IR} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \frac{L}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3-2)$$

谐振时的电路特点如下:

- 1) 阻抗最小 $Z=R$ 。
- 2) 电压一定时,电流最大, $I = \frac{U}{R}$ 。

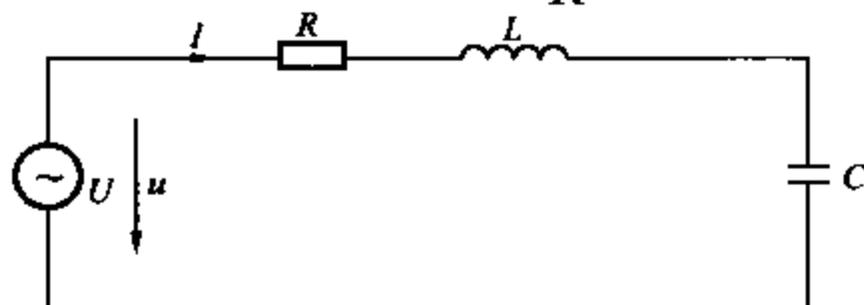


图 3-1 串联谐振原理图

3) 试品电容两端电压为电源电压的 Q 倍, $U_c = QU$ 。

4) 电源功率小, $P = UI = \frac{U_c}{Q} I$ 。

谐振时, 电源功率为试品 C 上电功率容量的 $1/Q$, 所以 Q 越大, 则 P 越小。

(2) 串联谐振装置的组成。串联变频谐振试验原理接线如图 3-2 所示, 现分述如下:

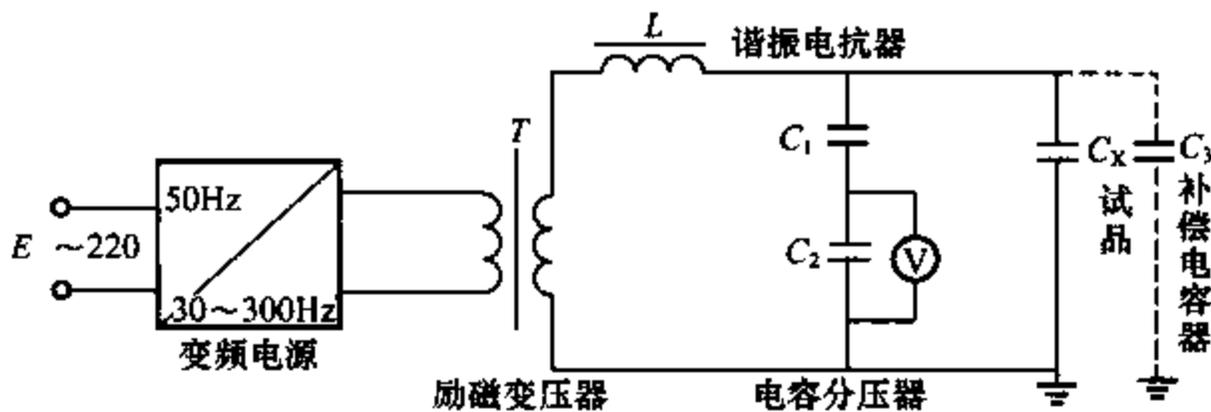


图 3-2 串联变频谐振试验原理接线图

1) 变频电源 (E)。频率在 $20 \sim 300\text{Hz}$ 连续可调的功率电源, 容量一般有 $5, 20, 50\text{kVA}$ 等几种。

2) 励磁变压器 (T)。用于给电感、电容谐振系统提供能量的变压器, 其特点是变压器的铁芯性能适用于较宽频率下的电压响应。

3) 谐振电抗器 (L)。用于对试品电容进行谐振, 以获得高电压的电抗器, 规格一般有 $30\text{H}/20\text{kV}/2\text{A}$, $40\text{H}/40\text{kV}/3\text{A}$ 等。

4) 电容分压器 (C_1, C_2)。用于测量试品端电压值, 规格有 $110, 220\text{kV}$ 等。

5) 补偿电容 (C_3)。由于电缆试品电容大, 一般不需要。但对于发电机, 其电容偏小, 需要补偿电容以增大试品电容, 便于调谐。

(3) 试验程序。

1) 了解被试电缆的电压等级、长度和截面积, 查阅该规格电缆单位长度电容值, 并计算总电容值 (参考表 3-15 ~ 表 3-16)。

表 3-15 三芯 XLPE 电缆每千米电容量 $\mu\text{F}/\text{km}$

电缆导体 截面积 (mm^2)	YJV、YJLV 6/6kV、 6/10kV	YJV、YJLV 8.7/10kV、 8.7/15kV	YJV、YJLV 12/20kV	YJV、YJLV 21/35kV	YJV、YJLV 26/35kV	YJV、YJLV 38/66kV	YJV、YJLV 48/66kV
3×150	0.358	0.284	0.241	0.164	0.153	0.128	0.123
3×185	0.388	0.307	0.267	0.180	0.163	0.138	0.132
3×240	0.430	0.339	0.291	0.194	0.176	0.156	0.146
3×300	0.472	0.370	0.319	0.211	0.190	0.168	0.157

表 3-16 单芯 XLPE 电缆每千米电容量 $\mu\text{F}/\text{km}$

电缆导体截面积 (mm^2)	YJV、YJLV 64/110kV	YJV、YJLV 128/220kV	YJV、YJLV 38/66kV	YJV、YJLV 48/66kV
1×240	0.219		0.156	0.146
1×300	0.139		0.168	0.157
1×400	0.156	0.118	0.186	0.177
1×500	0.169	0.124	0.201	0.191
1×630	0.188	0.138	0.220	0.209
1×800	0.214	0.155	0.242	0.229
1×1000	0.231	0.172	0.264	0.250

2) 依据电缆规格, 查阅本地区规程要求的试验电压 (见表 3-17)。如 8.7/10kV 电缆交接试验电压为

$$U_T = 2U_0 = 2 \times 8.7\text{kV} = 17.4\text{kV}$$

表 3-17 XLPE 电缆的交流耐压试验电压

电缆额定电压 U_0/U	交接试验电压		预防性试验电压	
	倍数	电压值 (kV)	倍数	电压值 (kV)
1.8/3	$2U_0$	3.6	$1.6U_0$	3
3.6/6	$2U_0$	7.2	$1.6U_0$	6
6/6	$2U_0$	12	$1.6U_0$	10
6/10	$2U_0$	12	$1.6U_0$	10
8.7/10	$2U_0$	17.4	$1.6U_0$	14

电缆额定电压	交接试验电压		预防性试验电压	
12/20	$2U_0$	24	$1.6U_0$	19
21/35	$2U_0$	42	$1.6U_0$	34
26/35	$2U_0$	52	$1.6U_0$	42
48/66	$2U_0$	96	$1.6U_0$	77
64/110	$1.7U_0$	109	$1.36U_0$	87
127/220	$1.4U_0$	178	$1.15U_0$	146

3) 按谐振在较低频率时试验电流小, ($I=2\pi f_0 CU$) 的原则, 估算谐振频率。当电抗器串联, 电感量增大, 耐压值升高, 适合做短电缆; 反之, 当电抗器并联, 电感量减少, 耐压值不变, 适合做长电缆。按试验装置所配的电抗器数量 (1~4 个) 及其总电感量估算, 可由下式决定

$$\text{因为} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

$$\text{则} \quad L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \quad (3-3)$$

4) 估算试验电流值, 以判断电抗器及其励磁变压器是否能承受

$$I = 2\pi f_0 CU \quad (3-4)$$

如果都能满足, 则试验就可正常进行。

我国南方电网公司广东电力科研所曾用 500kV 串联谐振耐压试验装置完成 220kV XLPE 电缆交流耐压试验, 其试验结果见表 3-18。

表 3-18 220kV XLPE 电缆交流耐压试验结果

相别	试验电压 (kV)	电流 (A)	频率 (Hz)	电缆绝缘电阻 (MΩ)		耐压时间 (min)
				耐压前	耐压后	
A	146	4.5	47.26	100 000		10
B	146	4.5	47.30	100 000		10

续表

相别	试验电压 (kV)	电流 (A)	频率 (Hz)	电缆绝缘电阻 (MΩ)		耐压时间 (min)
				耐压前	耐压后	
C	146	4.5	47.40	100 000		10
A	230	6.98	47.30		50 000	3
B	230	6.94	47.43		50 000	3
C	230	6.60	47.63		50 000	3

注 1. 表中 A、B、C 各相为同一回路电缆，长度约 200m。

2. 试验电压从零升至 146kV 耐压 10min，无异常再升至 230kV 耐压 3min。

总之，变频谐振技术在 XLPE 电缆试验中的应用相对于传统的工频和调感式谐振 (50Hz) 试验方法具有更多的优越性，应用前景十分广阔。

二、VLF (0.1Hz) 超低频耐压试验

1. VLF (0.1Hz) 超低频耐压试验特点

1) 超低频 0.1Hz 试验电压既有直流电压特点又有交流电压特点。0.1Hz 耐压试验对老化了的 XLPE 电缆绝缘影响比直流耐压试验小。

2) 试验设备消耗功率小。例如输出电压为 52kV (有效值)，试验电缆电容量为 $5\mu\text{F}$ (相当于 8km 长)，而设备只需要 0.6kW 的功率输入，适用于现场测试用。

3) 试验设备的尺寸和质量也小，0.1Hz 试验设备既可作独立设备也可以方便地安装在电缆测试车中。该车除可对中压电缆进行故障定位和耐压试验外，还能对电缆进行介质损耗测量，从而推算电缆整体的绝缘变化。

2. VLF (0.1Hz) 超低频耐压试验标准

关于中低压交联电缆的试验标准各国规定不统一。德国规定为 0.1Hz, $3U_0$, 60min; 而美国推荐如下表 3-19 中所列的数值。

目前国内 0.1Hz 交流试验及介质损耗测试尚无统一标准，但大多单位采用：

表 3-19 美国 0.1Hz 试验电压和试验时间

系统电压 (kV)	安装后试验 (kV)	验收试验 (kV)	维护试验 (kV)	证明试验 (kV)	试验时间 (min)
5	12	14	10	10	15
15	25	28	22	22	
25	38	44	33	33	
35	55	62	47	47	

1) 电缆交接试验: $3U_0$, 60min。

2) 电缆预防性试验: $2.1U_0$, 5min。

3. VLF (0.1Hz) 超低频耐压试验设备简介

我国宝钢在 1996 年引进 BAVR 公司 0.1Hz 电缆测试车, 现将其性能和原理简介如下:

(1) 设备性能。

1) 最大输出电压: 正弦交流, $36\text{kV}/0.01\sim 0.1\text{Hz}$;
方波, $54\text{kV}/0.01\sim 0.1\text{Hz}$;
直流, $\pm 54\text{kV}$ 。

2) 最大容值负载: $C=3\mu\text{F}$ 。

3) $\tan\delta$ 测试精度: 0.01%。

4) 输出显示方式: 全数字化 LCD 显示, 试验结果打印机输出。

(2) 设备原理。图 3-3 所示为 0.1Hz 电压发生器的原理图。由电源产生的 1kHz 电压通过 0.1Hz 正弦振荡器进行调幅, 其调制电压通过两个高压变压器和倍压电路进行升压并解调成 0.1Hz 正弦高电压。压敏电阻 RV1 和 RV2 把发生器正和负的极性输出电压交替地加在试品上。随着发生器的每一半交替地开关, 被试设备通过 RV1 和 RV2 交替地加上和卸去 0.1Hz 正弦电压, 极性转换在正、负峰值电压处实现, 高压部分无机械开关。

控制器控制输出电压 U , 由于采用正弦跟踪与负荷无关的 0.1Hz 振荡电压, 其输出电压波形由 0.1Hz 振荡电压决定, 加上合适的激励电压后可能产生带有一些限制性的任意电压波形

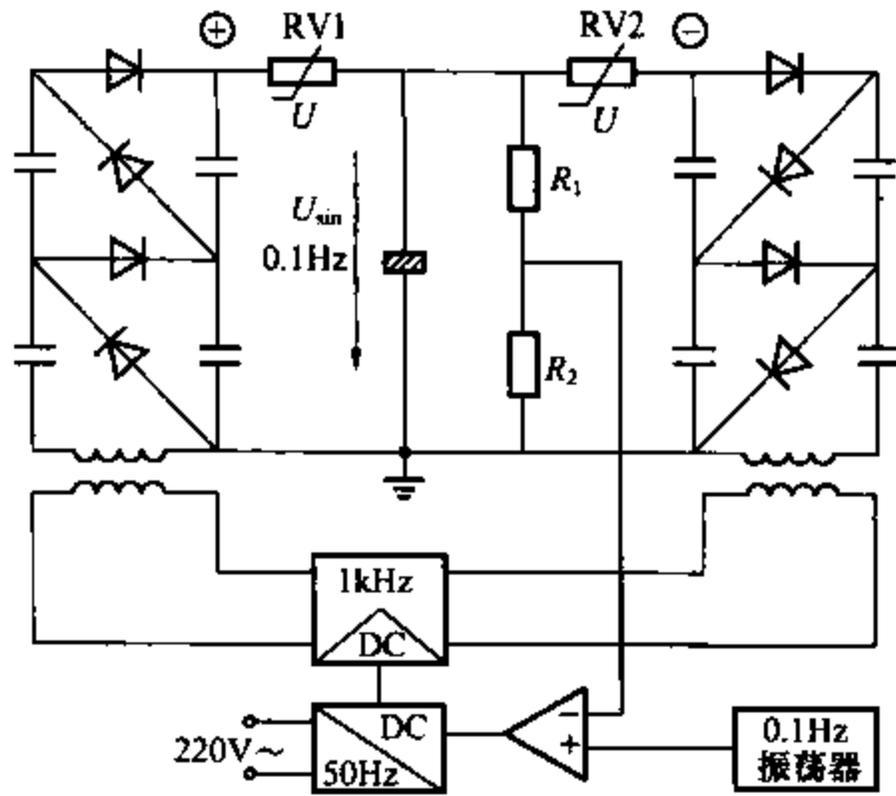


图 3-3 0.1Hz 电压发生器原理图

(如最大 $\frac{dU}{df}$)。因此，该发生器实际上是一个高压函数发生器，该发生器的 C_{\max} 相当于长度约 8km 的电缆，可产生最大输出电压 $U=36\text{kV}$ (即峰值 51kV)。

4. VLF (0.1Hz) 超低频耐压试验评价

VLF (0.1Hz) 超低频耐压试验能够较好地解决中、低压交联电缆的交接和预防性试验问题，是代替交联电缆直流耐压试验的新方法。由于它具有交流特性，能有效地避免直流耐压试验在绝缘层内形成的积累效应，此外它的设备体积小、质量轻，适合现场使用。

● 第四节 交联聚乙烯电力电缆 线路故障定位方法

电力电缆的故障是指线芯间绝缘损坏或线芯与金属屏蔽层之间绝缘损坏。电缆绝缘损坏形式分低阻短路、高阻短路和部分损坏（局部放电），由于绝缘的损坏形式不同，故障点的定位方法也不同。对于低阻短路故障，可以利用直流电阻电桥测出电缆首

端与故障点之间线芯的电阻,确定故障点位置。对于高阻短路故障,先用高电压大电流降低故障点的短路电阻,然后再用直流电桥确定故障的位置。这种故障点定位法称为直流电桥定位法。如果电力电缆绝缘是部分损坏,则可以用加直流试验电压的方法,使其击穿,降低短路电阻,再用直流电桥法确定故障点位置。在某些情况下,电缆中发生局部放电,但仍能耐受试验电压。这种故障只有利用电缆中的行波特性才可能确定故障点。利用行波特性确定故障点位置的方法称为行波定位法。如果在有高阻短路或部分损坏的电缆绝缘上加上直流或交流试验电压,则在故障点会发生放电。绝缘中发生放电,在其附近会出现变化的电磁场,可以利用电声传感器在地面上沿电缆沟移动,找到故障点。这种方法称为声测定位法。

一、直流电桥定位法的原理

如果电缆的某一点发生两相线芯之间或线芯与金属屏蔽层之

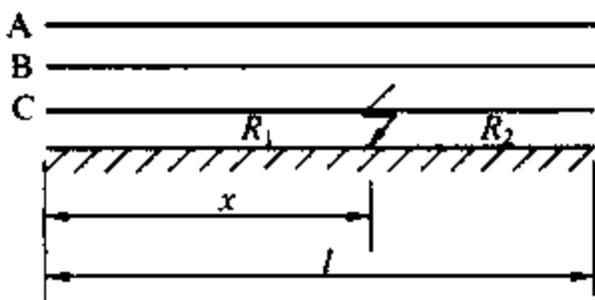


图 3-4 电缆故障点位置

间绝缘击穿短路,则绝缘短路故障点把电缆分成两段(如图 3-4 所示),两段线芯长度比等于两段线芯的电阻比。假设在电缆 x 处发生绝缘击穿短路,电缆线芯单位长度的电阻为 r ,则电缆首端与故障

点之间的线芯段的电阻 R_1 为

$$R_1 = rx \quad (3-5)$$

故障点与末端之间的线芯段电阻 R_2 为

$$R_2 = r(l-x) \quad (3-6)$$

式中 l ——电缆线芯全长。

如果我们已经知道电缆线芯的单位长度电阻 r ,设法测出电缆的击穿短路故障点与电缆两端之间的电阻 R_1 或 R_2 ,则可由式(3-5)或式(3-6)得到故障点离首端的距离 x 。图 3-5 所示是测量电缆首端与故障点之间线芯段电阻 R_1 的直流电桥法的原理接线图。图上 C 相线芯为故障相线芯; B 相线芯为健全相线芯;电

阻 R_A 和 R_B 为直流电桥的桥臂。图 3-6 所示为其等效电路图。由图 3-5 得到直流电桥平衡后的关系式为

$$\frac{R_A}{(2l-x)r} = \frac{R_B}{xr} \quad (3-7)$$

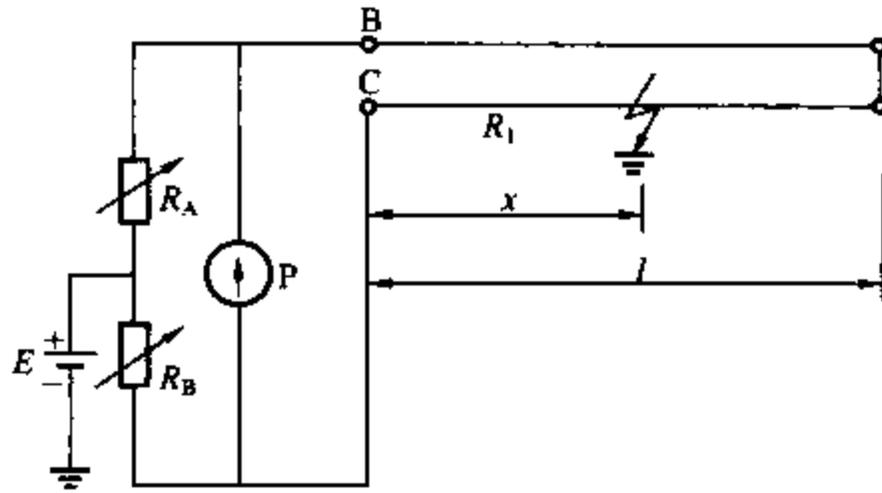


图 3-5 测量电阻 R_1 的原理接线图

由式 (3-7) 得到故障点离电缆首端的距离为

$$x = \frac{2lR_B}{R_A + R_B} \quad (3-8)$$

当电缆中发生线芯之间绝缘的短路故障时，测量方法和一相线芯与金属屏蔽层之间绝缘击穿短路一样，图 3-7 所示为其测量方法。用低压直流电桥进行故障定位的条件是绝缘故障点的短路电阻必须很小，如果短路电阻很大，而直流电源电压较低，则通过桥臂电流很小，直流电桥的灵敏度很低，故障点的定位误差很大。

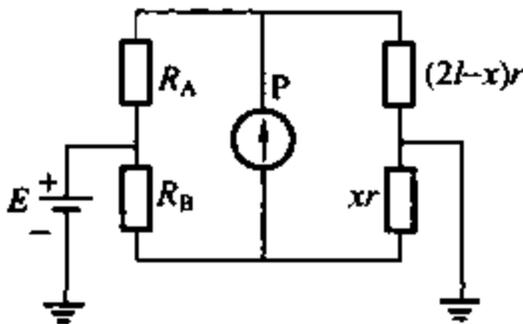


图 3-6 等效电路图

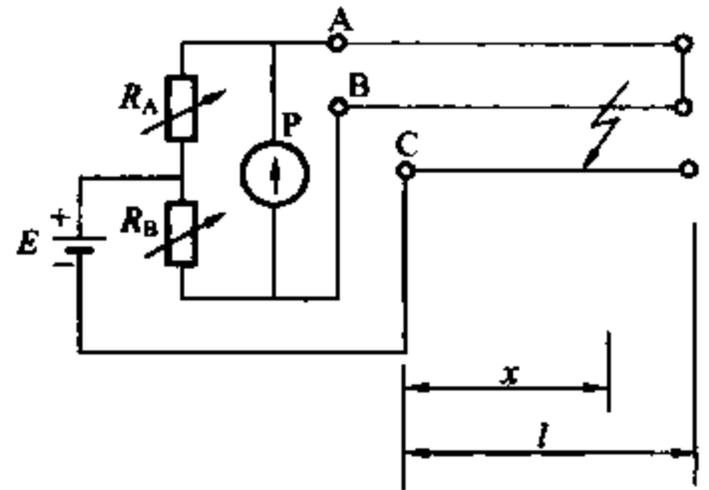


图 3-7 线芯之间短路测量方法

图 3-8 所示也是用低压电桥确定电缆绝缘故障点位置的原理接线图，因通过电桥的电流没有通过故障点，故障的短路电阻仅

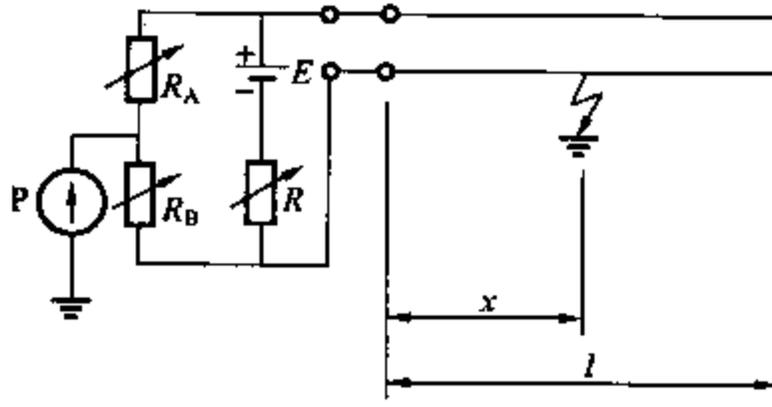


图 3-8 用低压电桥确定
电缆绝缘故障点位置

与检流计 P 串联，所以短路电阻的大小对电桥灵敏度的影响相对减少。

为了提高直流电桥定位的灵敏度，最好设法降低故障点的短路电阻。可以利用图 3-9 所示的冲击法降低故障点短路电阻，而不用直流电压法，因为冲击法的瞬时功率大，通过故障点的电流大，降低短路电阻效果好。

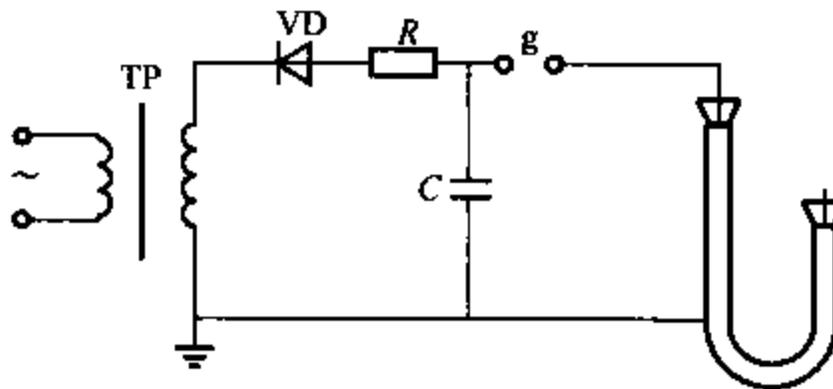


图 3-9 用冲击法降低短路电阻

二、行波定位法的原理

众所周知，电力电缆的电特性可用分布参数电路表示，如果在电缆线芯的首端施加一脉冲电压，则该脉冲电压在电缆中产生一脉冲电压波。脉冲电压波在电缆中传播，遇到短路点或开路点，发生波向首端传播，利用在电缆线芯首端的前行波和反射波到达的时间差确定故障点的位置。也可以利用在电缆绝缘中发生短路故障时出现的暂态过程，从故障点向电缆两端传播脉冲电压

波，用在线的记录仪记录到达电缆两端的时间差确定故障点位置。这种装置称为自动故障点定位仪。

现在国内外利用非周期振荡的短电压脉冲波或衰减振荡的短电压脉冲波在电缆中的传播特性制造故障点定位仪。下面简单介绍这种定位仪的原理。

我们都知道电缆的等效电路是由电容、电阻和电感组成的，而电缆上的电压 u 和电流 i 都与导线上的电荷 q 有密切关系。导线上的电压 u 是导线单位长度的电荷 q_1 与导线单位长度的电容（对地电容或导线之间电容） C_1 的比值 $u=q_1/C_1$ 。因此，当我们把直流电压源接在电缆线芯上时，直流电压源（容量很大）把电荷向电缆线芯传送，使导线电容充电，在导线上出现电压和电流。因为导线电容是由近（相对于导线的首端）向远不断充电的，所以导线上出现电荷波、电压波和电流波（见图 3-10）。当电荷波和电压波到达导线末端时，在导线上出现电荷波、电压波和电流波的反射现象。如果导线末端 B 开路，则电荷波到达导线末端 B 时，向首端方向反射。前行电荷波和反射电荷波叠加，

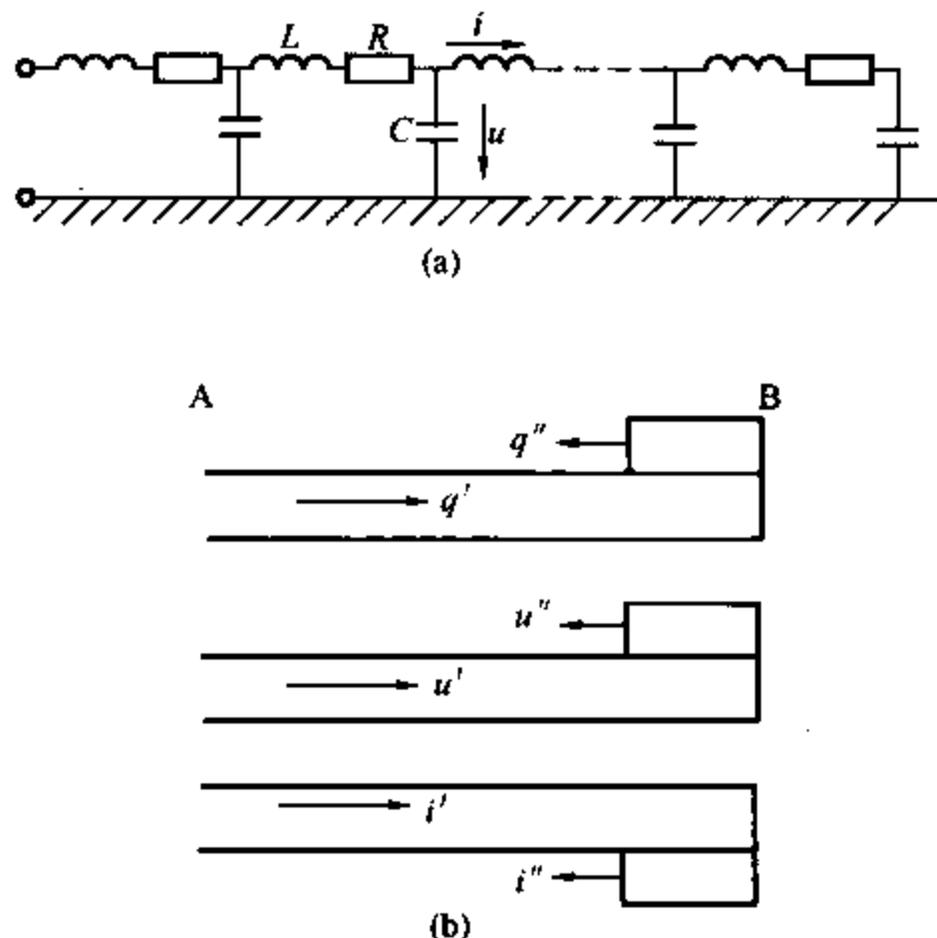


图 3-10 电荷波、电压波和电流波在电缆线路中传播

(a) 等值电路；(b) 波形图

在反射波到达的导线上出现峰值为两倍的电荷波, 由于导线上电荷波的峰值变为两倍, 导线(即电容 C) 上的电压波峰值也变为两倍。电荷的反向流动产生负电流, 因此在反射波到达的导线上, 导线中的前行电流波与反射电流波互相抵消, 导线中的电流变为零。由于导线首端接有阻抗接近于零的直流电压源, 首端 A 始终保持直流电源电压不变。

前行波从导线首端 A 开始传播的时刻与反射波到达首端的时刻的时间差为

$$\tau = \frac{2l}{v} \quad (3-9)$$

式中 l ——导线长度, m;

v ——导线上的波速, m/ μ s。

当运行中的电缆绝缘发生短路故障时, 故障点的电压突然降低, 电流突增, 产生电流脉冲波向电缆两端传播。利用电流脉冲波到达两端的时间差和电缆波速确定短路故障点的位置, 这种方法又称为脉冲回波法, 它的适用范围很广。

三、用数字存储示波器测量电缆故障

使用脉冲回波法, 首先必须有良好的测量仪器, 目前国内普遍用带存储示波器的闪测仪。这种仪器能测量暂态波形, 基本上可以满足脉冲回波法的要求。随着电子技术的发展, 高性能的数字存储示波器的出现, 宽频带、高采样率的数字存储示波器在脉冲回波法测量电缆故障方面不仅性能优异, 而且具有许多使测量变得方便和准确的特点。

(一) 测量方法

采用脉冲回波法测量电缆故障, 可分为电压法和电流法。前者测量电压波在电缆中的来回反射时间, 后者测量电流波在电缆中的来回反射时间。两者没有本质的不同, 只是正负反射问题略有差别。实际以前多用电压法, 但近几年用电流法较多, 因为电流法与电压法比较有以下优点:

(1) 信号耦合装置结构简单, 实际上只是一个简单的电流互

感器。

(2) 电流耦合装置在地线上，且与强电电路完全隔离，有利于仪器的保护。

(3) 电流耦合的时间常数可以做得很小，使其对信号波形具有微分作用，突出了波形的突变部分，有利于波形分析。

采用电流法的测量接线如图 3-11 所示，电流法测量有两种典型状态：远端开路和远端短路。终端开路的完好电缆和断线故障是远端开路状态；而对地短路、高阻接地和闪络故障都可归类为远端短路状态。

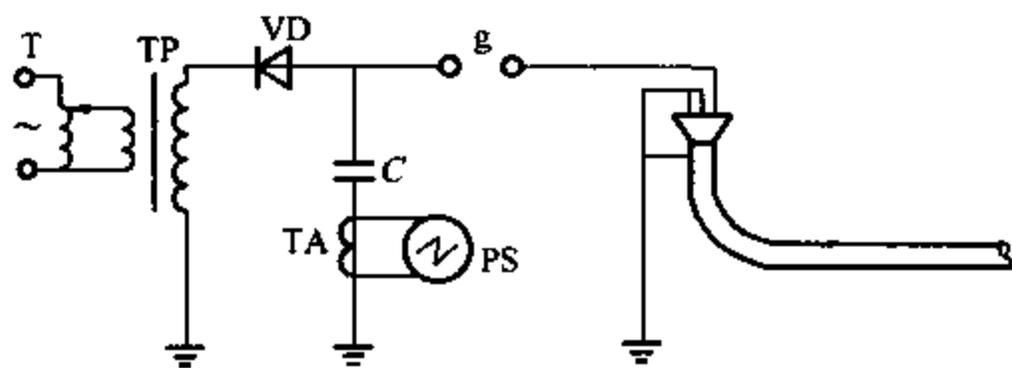


图 3-11 电流法测量接线图

T—自耦变压器；TP—试验变压器；TA—电流互感器；g—间隙；VD—二极管；C—储能电容；PS—数字存储示波器

在电缆远端开路状态下，调节自耦变压器 T，使变压器 TP 升压对电容器 C 充电至一定电压，然后合上开关使 g 击穿，使电容器 C 对电缆放电。由于电缆远端开路，对电流波产生负反射，而电缆近端电容阻抗为零，故近端产生正全反射。电流波在电缆的远端和近端之间来回反射，这种情况相似于电压波在远端短路、近端开路电缆内的反射。如忽略电缆的损耗，则流过储能电容器 C 的电流波形如图 3-12 所示。经电流耦合器微分，在数字存储示波器输入端得到的电压信号波形如图 3-13 所示。由于电缆存在损耗，波形将产生变形，其幅值也将随时间衰减。

远端开路状态反射波形的特点是，每次从反射点反射回来的脉冲极性都与前次相反。测量时只需测量相邻两个脉冲的起始点时间差，即可计算出测量端与反射点的距离。

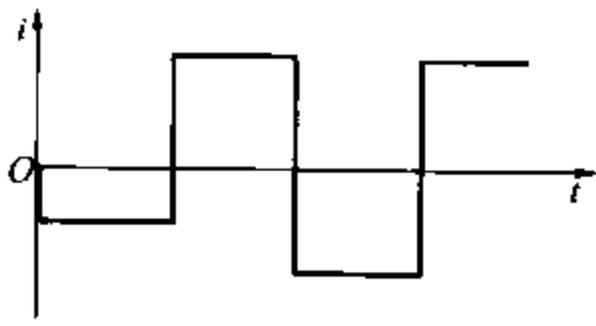


图 3-12 流过储能电容器
C 的电流波形

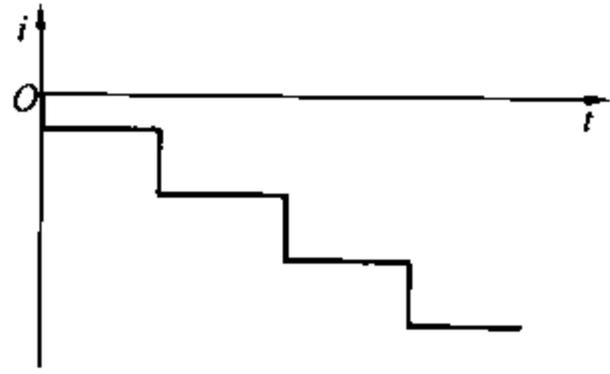


图 3-13 电压信号波形

在电缆远端短路的状态下，电流波在远端是全正反射，在近端也是全正反射。其情况相似于电压波在远端开路、近端也开路的电缆内的反射。理想状态下流过电容器 C 的电流波形如图 3-14 所示。电流耦合器耦合到数字存储示波器输入端的电流波形如图 3-15 所示。对于远端短路状态，其波形特点是各次反射脉冲的极性均相同。

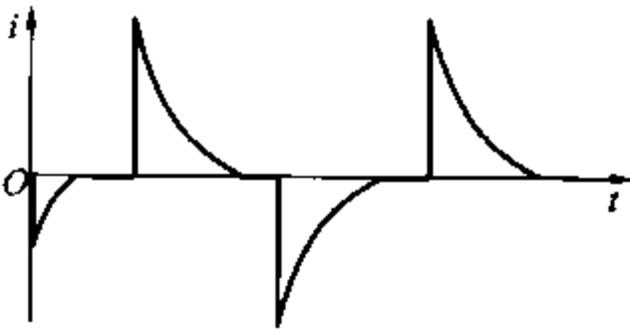


图 3-14 远端短路电流波形图

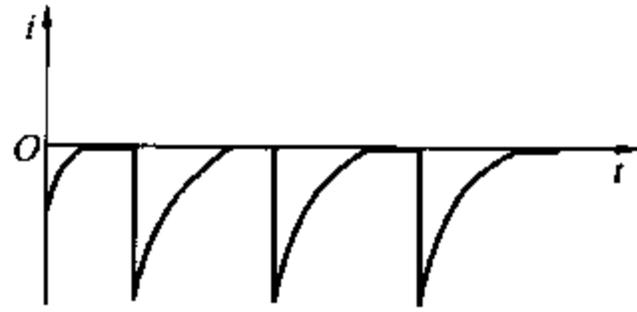


图 3-15 示波器上的电流波形图

(二) 实例分析

下面通过实例分析，进一步说明用数字存储示波器测量电缆故障距离的方法和特点。

某 10kV 截面为 $3 \times 340\text{mm}^2$ 、全长 1009m 的电缆发生高阻短路故障，用冲击闪络法测量，其接线如图 3-11 所示，测量方法如下：

(1) 为了计算电缆的半波速，首先测量电缆的终端反射波，整定时间范围为 $50\mu\text{s}$ ，延时触发为 $-10\mu\text{s}$ 。用较低的电压向储能电容器 C 充电，控制高压脉冲幅值，避免故障点产生弧光放电，测出波形如图 3-16 所示。移动光标，测出发射脉冲和终端开路反射脉冲时间差 $T=12.2\mu\text{s}$ ，如图 3-17 所示。计算半波速为

$$v = \frac{l}{T} = \frac{1009}{12.2} = 82.7(\text{m}/\mu\text{s})$$

式中 l ——电缆全长。

(2) 提高储能电容器电压, 以提高脉冲幅值, 使故障点在电压冲击下产生电弧放电。由于在 $50\mu\text{s}$ 的时间范围内没有观察到故障点的反射波形, 故把时间范围扩大至 $100\mu\text{s}$, 观察后面的波形, 结果看到故障点起弧时的电流突变及其后的反射波, 波形如图 3-18 所示。

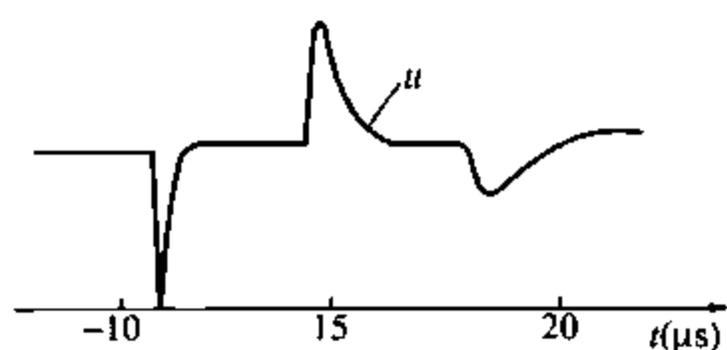


图 3-16 电缆终端
反射波波形图

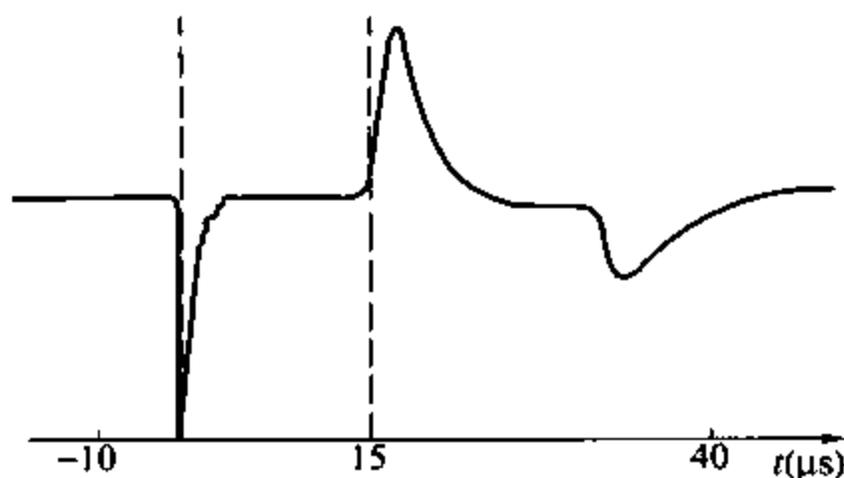


图 3-17 发射脉冲和终端
开路反射脉冲时间差



图 3-18 故障点起弧电流反射波波形图

由于时间范围从 $50\mu\text{s}$ 扩大至 $100\mu\text{s}$, 故使测量精度下降。把延迟触发时间从 $-10\mu\text{s}$ 增至 $50\mu\text{s}$, 测得波形如图 3-19 所示。

移动光标, 测出测量端与故障点电流波一次来回反射的时间

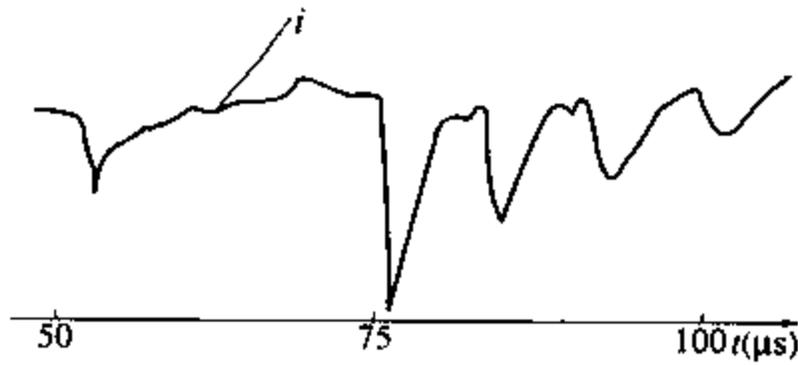


图 3-19 延时触发时间电流波形图

差。测量时应注意使光标落在反射波前沿的小上凸起始点上。为了使小凸起前沿起始点更加明显清晰，利用数字存储示波器的运算功能，对波形作垂直放大，得波形如图 3-20 所示。从图 3-20 测得电流波从测量端至故障点一次来回反射时间 $T=5.7\mu\text{s}$ ，计算故障点距离为

$$l = vT = 82.7 \times 5.7 = 471(\text{m})$$

实际距离为 479m，测量误差为 -8m。

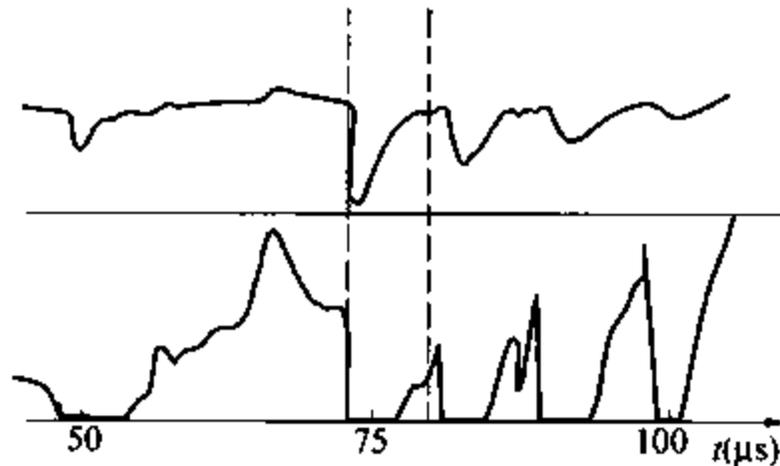


图 3-20 测量端与故障点电流波一次来回反射时间差

通过此实例分析，可以看到用数字存储示波器测量电缆故障点时，有如下特点：

(1) 波形清晰，线条精细。上例实测波形都是数字存储示波器通过打印机用屏幕拷贝直接打印出来的，图中波形线条精细，转折点清晰。实际上由于数字存储示波器采用数字显示技术，在屏幕上显示的图形非常稳定准确，比用打印机印出的图形还要明

亮清楚。这一点对波形分析是非常重要的，只有清晰的波形，才可能有高的测量精度。

(2) 波形可以储存、打印和传送。数字存储示波器的波形显示不受时间限制，自始至终保持清晰准确。有些数字存储示波器还有停电记忆功能，在现场测得波形，可以回办公室分析打印。一般数字存储示波器都配有通信接口，可以和计算机、打印机相连，这样可以保存资料和积累经验。

(3) 时间测量方便准确。数字存储示波器一般都有屏幕读出系统，可以用光标测量屏幕上任意两点的时间差，在屏幕上用数字显示。

(4) 测量准确度高。一般数字存储示波器的时间测量误差都较小，而主要决定测量准确度的的是数字存储示波器的采样率。对于采样率为 10M 次/s 的数字存储示波器，在测量电力电缆时分辨率为 8m，而误差也约为 $\pm 8m$ ，采样率越高，分辨率也越高，误差越小。目前采样率为 100M 次/s 甚至更高的数字存储示波器已有产品。需要注意的是，数字存储示波器频率应具有一定宽度，以减少波形失真，如条件许可，可选择带宽为 100MHz 或以上的示波器。

(5) 波形可以作水平方向放大。这一功能使光标的定位更精细，使时间测量更精确。

(6) 波形也可以作垂直方向放大。这一功能对分析平缓的波形十分有利。

(7) 触发功能完善。波形显示可以从触发前或后的时刻开始，一般触发时刻定为零秒，如把延迟的时间定为负值，则显示从触发前开始，这有利于观察各时刻的波形；若把延迟时间定为正值，可以略去波形的前面部分而集中观察波形的后部。

从 1990 年开始至今广州供电局输电部使用数字存储示波器进行电缆故障点测量已多达 10 次。一般从开始测量到故障点定位不超过 1h。表 3-20 列出了几例实测记录，供读者参考。

表 3-20 几例实测记录

测试日期	电缆线路名称	电缆规格	线路长度 (m)	故障性质	故障部位	测试方法	测量故障 距离(m)	误差 (m)
1990年3月 30日	小港 F ₄ 出线	ZQ、10kV、240mm ²	975	高阻接地	本体	冲闪	533	+3
1990年4月 17日	三元里 F ₉	ZLQ、10kV、240mm ²	1009	高阻接地 200M Ω	中间接头	冲闪	479	-8
1990年7月 13日	东莞宾馆进线	10kV、纸绝缘	—	闪络	本体	直闪	离远端 16	<+8
1990年8月 4日	荔关线乙段	110kV XLPE 500mm ²	1835	高阻接地	中间接头	冲闪	1210	+8
1990年10月 17日	市二研开关 房进线	ZLQ、10kV、240mm ²	1000	三相接地 电阻 2k Ω	本体	冲闪	340	+12
1990年11月 15日	荔塘 F ₂₅ 出线	ZQ、10kV、240mm ²	988	高阻接地 500M Ω	本体	冲闪	645	-8

第五节 交联聚乙烯电力电缆局放测试技术的现场应用

一、测试原理

众所周知，当电缆线路或接头绝缘中出现缺陷时，在试验电压或运行电压下将会出现微弱的局部信号，该信号通过线路阻抗和电缆绝缘接头护层上安装的测试电极反馈到测试仪器，再通过检测仪器放大后送到测试主机（PPDM）进行分析处理。局放测试等效电路和测试接线图分别如图 3-21 和图 3-22 所示。

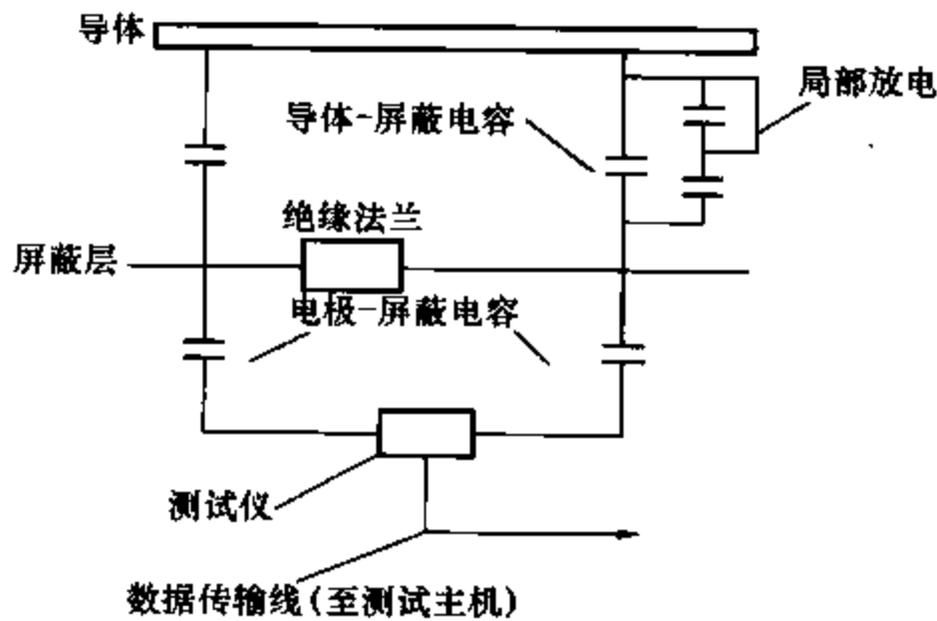


图 3-21 局放测试等效电路

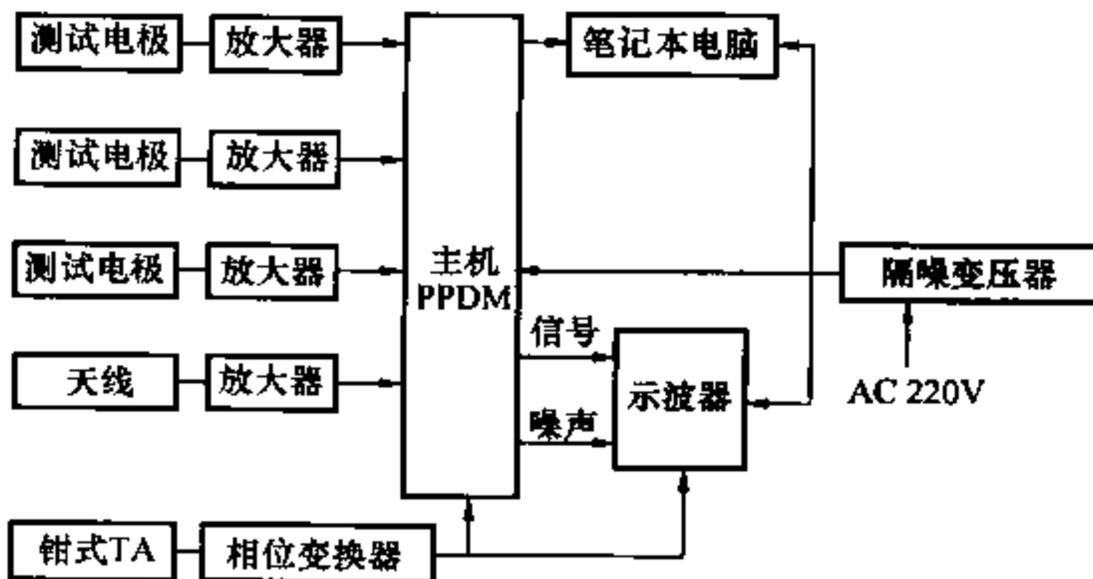


图 3-22 局放测试接线

3 个测试电极同时可以测量 A、B、C 三相接头的局放信号；天线用于提取环境噪声信号；钳式 TA 用于提取参考相位信号。以上信号全部送入主机进行自动分析处理，来判断电缆和接头中是否存在局部放电。

二、测试操作

1. 电极安装

电极安装位置（以绝缘接头为例）如图 3-23 所示。制作良好的电极是关系局放测量能否成功的关键，因此电极制作与安装必须严格要求，且安装完后要测量其对地静电电容是否合格。

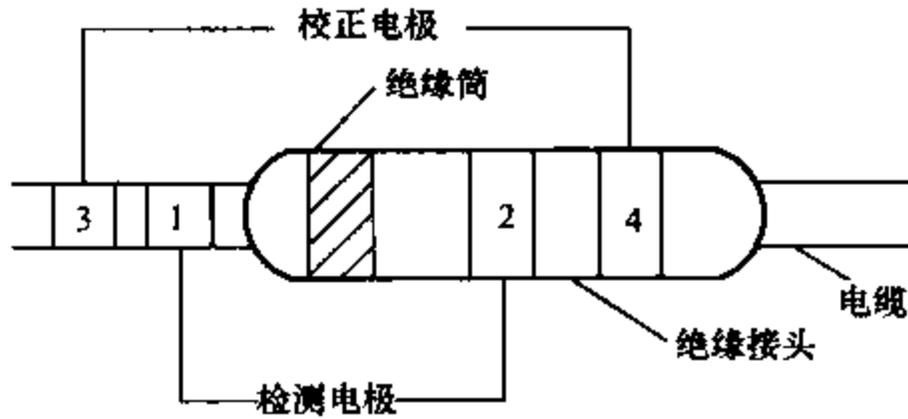


图 3-23 电极安装位置

1、2—测量用电极；3、4—校正用电极

1) 先在电缆绝缘接头热缩管外贴一片尺寸为 100mm × 600mm 的锡铂纸，必须紧贴热缩管，之间不能有任何杂物，否则会影响测量精度。

2) 在锡铂纸上贴 20mm × 150mm 铜电极，铜电极上焊接有与放大器连接的导线和接头。

3) 用拉伸的聚氯乙烯 (PVC) 将铜电极和锡铂纸全部紧紧包裹，电极安装完毕后用静电电容测试仪来测量所制作电极的静电电容值，所测静电电容值必须在 500pF 以上。

2. 选频

局放的发生在频域范围内是一个很宽的频段。PPDM 测试频率在 0~50MHz 范围内连续可调，这样我们就可以根据注入电量产生信号的曲线与背景噪声对比分析。选择信号 (Signal) 与噪声 (Noise) 区分最明显的一个频率点来测试局放。图 3-24

所示为某 220kV XLPE 电缆线路 4 号接头 C 相局放测试时的选频图。参考注入电量产生信号强度 (S) 和现场背景噪声强度 (N) 的频域分布情况, 选择了 $f=23.0\text{MHz}$ 为局放测试点, 该点处信号强度为 -60.6dB , 背景噪声强度为 -102.4dB , 信号强度与背景噪声强度相差 -41.8dB , 能有效避开背景噪声干扰。

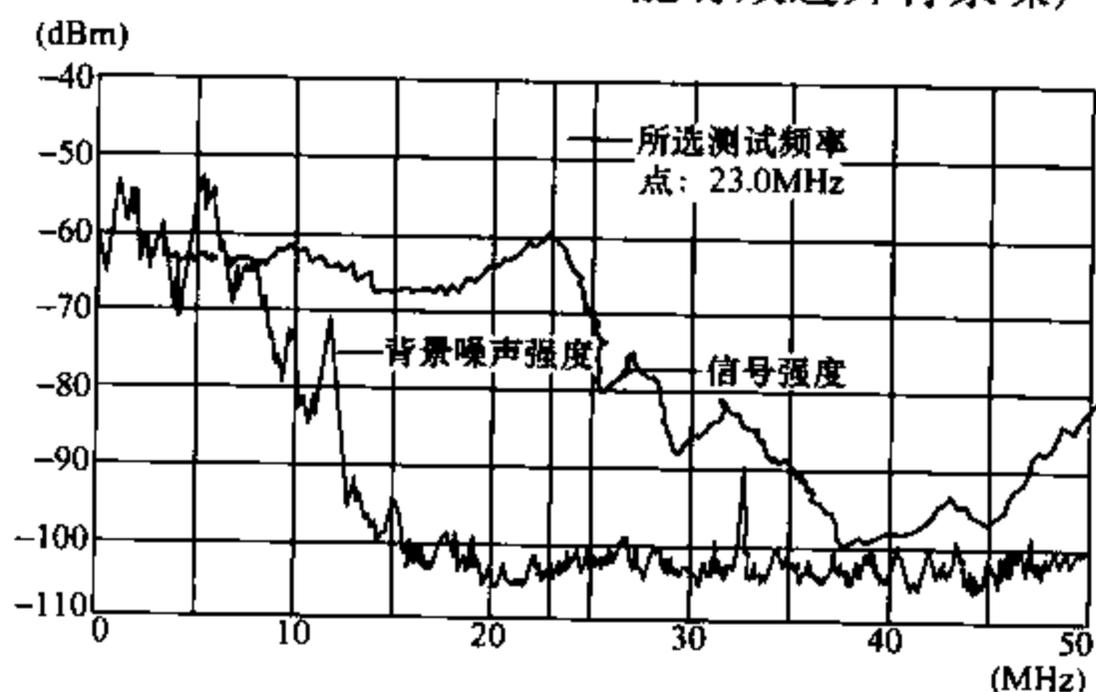


图 3-24 选择测试频率图

经过理论分析和现场实际操作对比, 就能积累一些选择一个好的测试频率点的经验。所选测试频率点应具备以下几个条件:

- 1) $N-S$ 较大, 但不一定最大。
- 2) 在 N 趋于平缓处选点。
- 3) 避免选择 S 的上升沿和畸变点。

3. 校准

该操作用以检验传输通道的有效性, 通过在图 3-23 所示的电缆绝缘接头的 3、4 校正电极注入一定的电荷量, 同时在 1、2 测量电极进行测量, 来检验传输通道是否有效, 即要求注入电荷量和实际局放发生量在检测电极上有相同的响应。

在 3、4 电极注入电荷量 20pC , 通过 1、2 测量电极检测到如图 3-25 所示波形 (1 号通道图形); 波形应无畸变点, 且分布均匀。同理选择再分别注入 15pC — 10pC — 5pC — 0pC , 测试软件上生成的校准曲线, 如果 5 个测试点成一条直线 (如图 3-26 所

示), 则说明传输通道可正常工作。

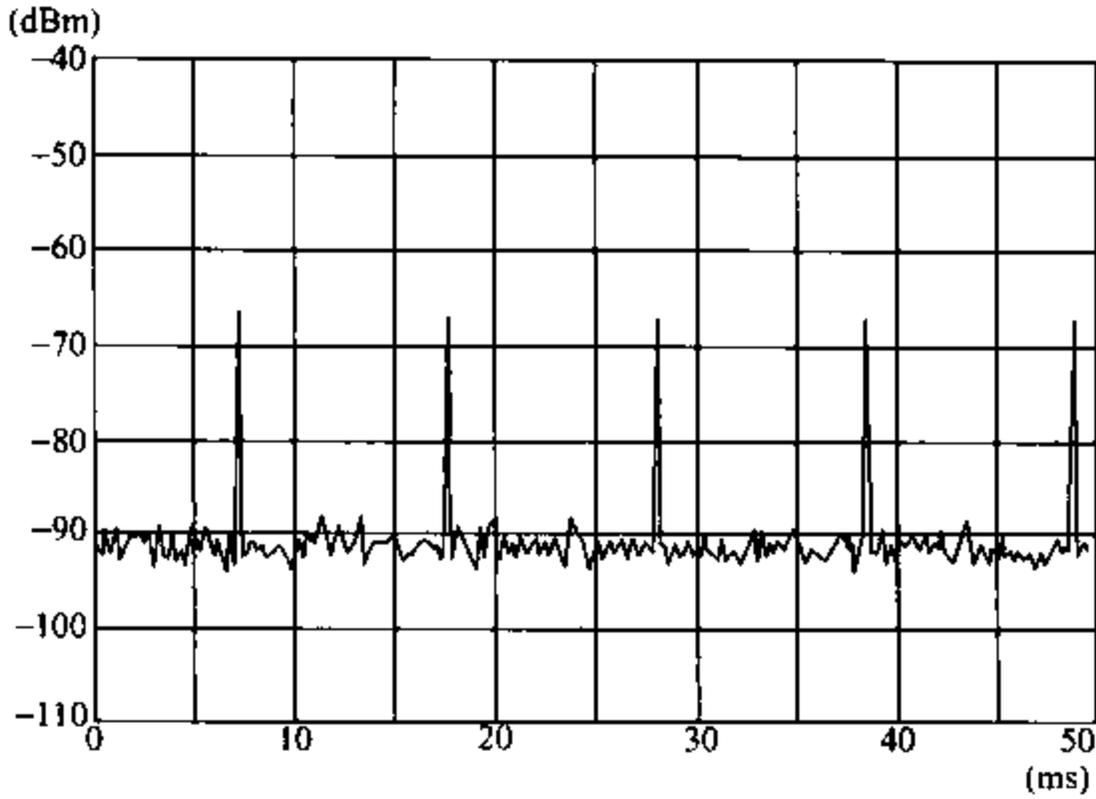


图 3-25 示波器上检测到的校准波形图

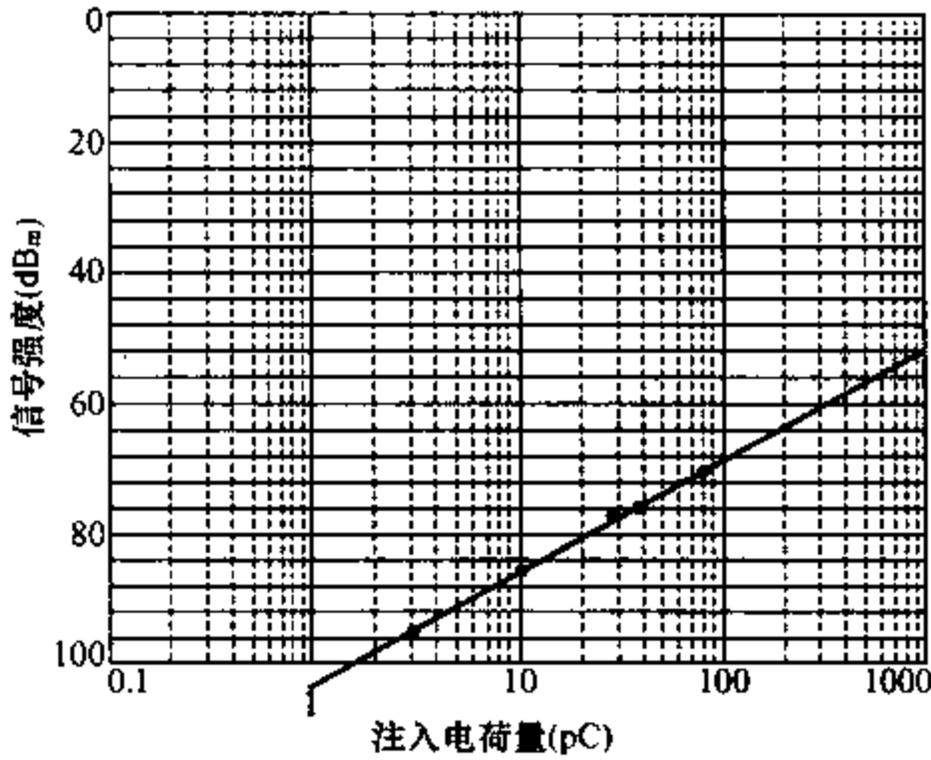


图 3-26 校准曲线图

4. 自动测试和局放诊断

设置主机的扫描(采样)周期后,即可开始测量。被检测信号经过放大器送给主机,主机采用自动分析判别系统,根据局部放电的 $q-e-n$, $q-e-t$ 图谱,采用 N-N(神经网络)进行判定。

例如前述 220kV 电缆线路二路 4 号接头 C 相局放的测试结

果见表 3-21。

表 3-21 某 220kV 电缆线路 4 号接头 C 相局放测试结果

测试对象	测试频率	背景噪声	检测水平	放电量	判断结果
4 号接头 C 相	23.0MHz	0.2pC	0.3pC	0.2pC	无局放

从表中可以看出背景噪声为 0.2pC，检测器检测水平设定为 1.5 倍的背景噪声为 0.3pC，由于所检测到的放电量 0.2pC 低于检测水平 0.3pC，故认为没有发生局放。

三、存在问题及解决方法

1. 存在问题

(1) 测试环境中强电场干扰源很多，典型干扰有：

- 1) 测试用的发电机背景噪声的影响。
- 2) 周围大型机械设备及车辆产生的振动的影响。
- 3) 强大的无线电干扰。
- 4) 在变电站测试时，临近带电设备产生的电磁干扰。

而要防止上述外界电磁干扰难度很大。

(2) 缺乏电缆绝缘局部放电信号的识别技术；缺乏局部放电脉冲信号波形、频率和幅值的判别技术。

(3) 缺乏 XLPE 电力电缆绝缘劣化的评价基础和运行状态判据等实际运行经验的积累。

2. 解决办法

(1) 在现场测试时，用蓄电池代替发电机作为测试电源，可以有效避免发电机背景噪声对测试精度的影响。

(2) 尽量在时间和空间上避开周围大型机械设备和车辆会大大提高测量准确度。

(3) 大量开展 XLPE 电力电缆及其附件的现场局放检测工作，按照接头和终端的生产厂家，规格、型号，投运行年限等对其进行分类，在每一类中抽取一定数量的样品进行测试，以便发现同型号的接头在投运不同年限后其局放有何变化，不同型号接头在投运相同年限后又有什么区别等。同时将这些局放的图谱全

部记录下来建立一个资源库,为以后进行局放测试结果判断积累第一手资料。

上述高压电缆局放测试设备(PPDM)实践证明,它能比较有效地排除现场干扰,操作自动化程度高,现场测试效果较好。

思考题

80

1. 电力电缆的额定电压 U_0/U 是什么含义?为什么同一种 U 的电缆有两个 U_0 值?

2. 10kV 电缆为主的配电网中,为什么要采用中性点经小电阻接地方式?

3. 电力电缆电气试验通常划分为几种?各种试验的目的是什么?

4. 在例行试验中为什么要进行导体线芯直流电阻测定?

5. 为什么说对交联聚乙烯电力电缆主绝缘耐压采用直流电压不适宜?而应该采用交流电压?

6. 电力电缆绝缘短路故障点定位法有哪些?

7. 电力电缆故障点的行波定位法的原理是什么?

8. 为什么要对电力电缆进行局放测试?其局放测试的原理是什么?

交联聚乙烯电力电缆敷设 与附件选型和安装

第一节 交联聚乙烯电力电缆线路 的敷设方式与条件

一、敷设方式

1. 直埋敷设

直埋敷设是一种比较简单的方式，3条电缆（单芯或三芯）均可并列平行敷设，采用水平排列或品字形排列。用砂土覆盖后再铺设水泥板，埋设深度要求大于0.8m（见图4-1），沿线路走向应安装警告标志。实践表明，直埋敷设容易使电缆产生水树老化，故要求电缆有可靠防水层，如在聚氯乙烯外护层上再加装波纹铝金属护套。

2. 电缆沟内敷设

在变电站内或市区变电站出线、人行道上需要敷设多条电缆，排管设置接头工井影响路边建筑时，可采用电缆沟内敷设方式（见图4-2）。

3. 隧道敷设

采用隧道敷设便于安装和运行维护，但土建费用较大，一般适用于发电厂和大型厂矿企业内部的高压电缆线路。隧道采用混凝土结构，电缆安放在支架上，可以水平排列或品字形排

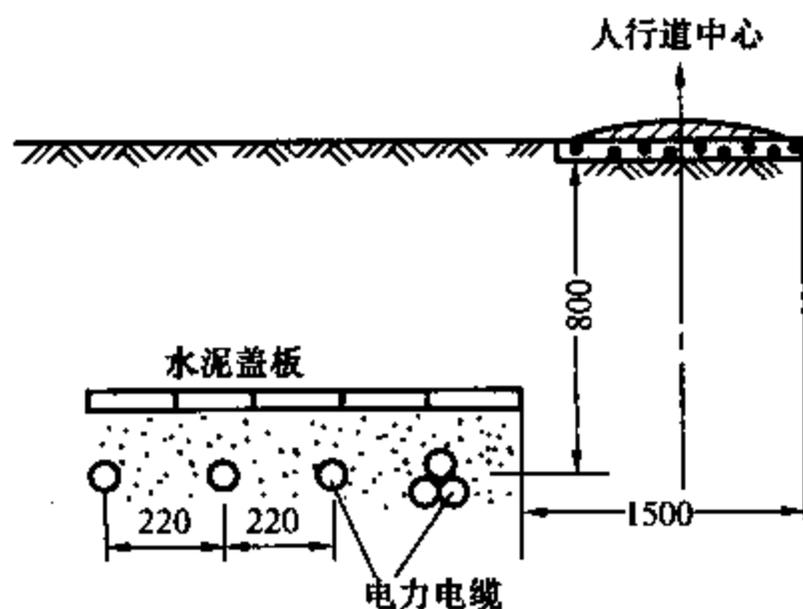


图 4-1 直埋敷设 (mm)

列。品字形排列每隔一定距离应有绑扎带，束紧 3 条电缆。35kV 以上高压电缆应蛇形敷设，一般 20 条以上需建隧道（见图 4-3）。

82

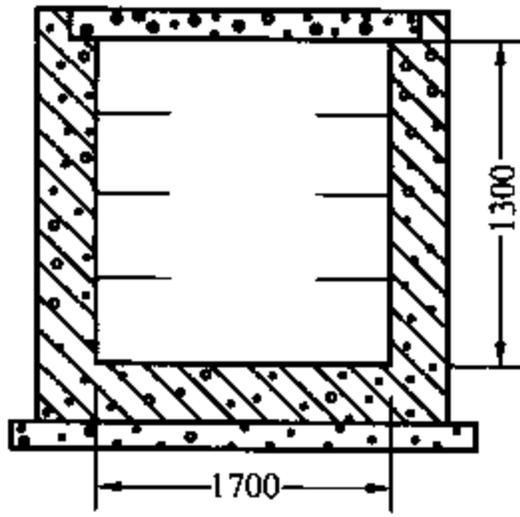


图 4-2 电缆沟内敷设 (mm)

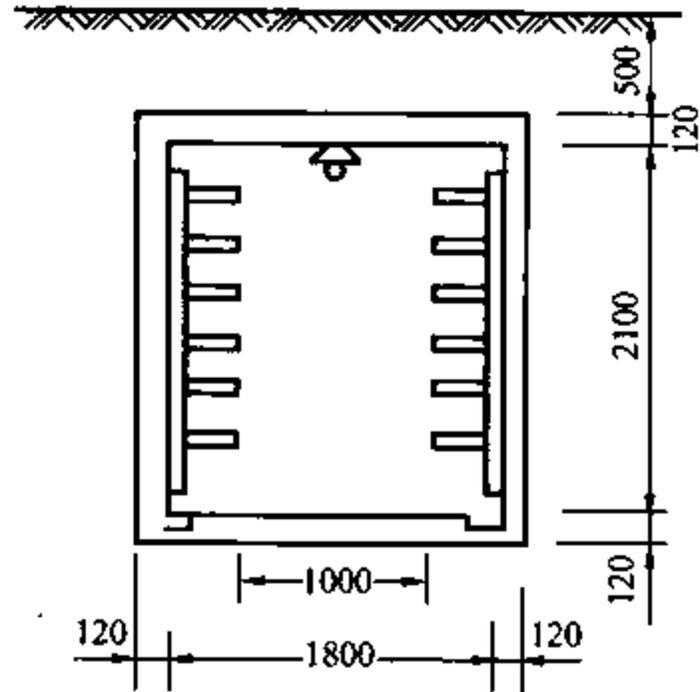


图 4-3 隧道敷设 (mm)

4. 排管敷设

对于十分密集的电线路，采用排管敷设较好（见图 4-4）。排管可以根据电缆敷设的数量（约 6~20 条）做成不同的孔数及层数，其施工方法为在现场用混凝土浇制或将预制块并接。现场浇制的排管均为有内衬管，预制块可做成无内衬管，但要求内表面一定要光洁。

排管线路在一定长度设置接头工井，线路转角比较大时要设

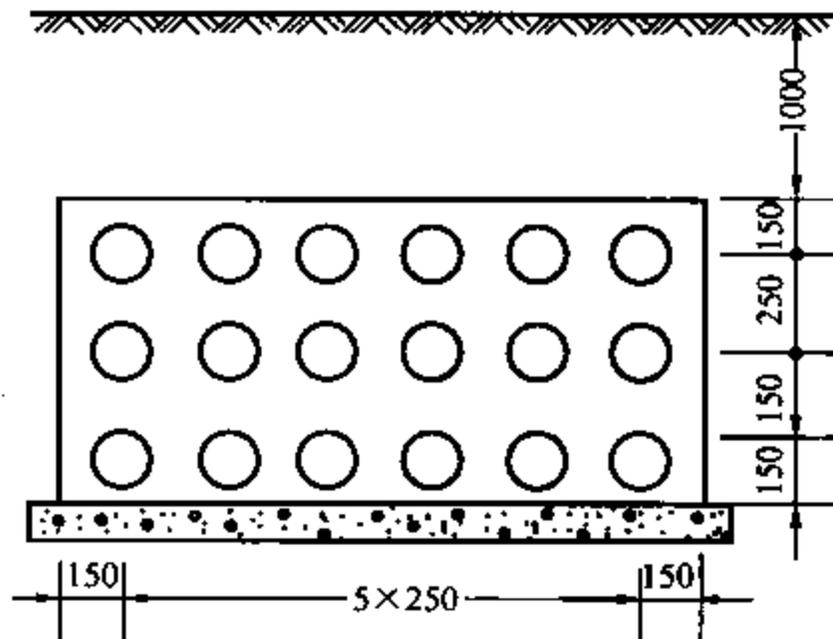


图 4-4 排管敷设 (mm)

置转角井。排管的内径取决于电缆的外径，管内径不应小于电缆外径的 1.5 倍，且不得小于 100mm。每根管宜只穿 1 根电缆，以防止相互刚蹭伤或当 1 根电缆发生故障时烧伤另 1 根电缆。

在工程施工中，排管接口处密封不严密时，地下水可能会渗到管内，所以排管要求具有向两侧工井泄水的坡度，使排管内渗水随时可流到工井。在寒冷地区，也可以防止内排管内积水后导致排管开裂。

当电缆穿过桥梁时，推荐采用玻璃纤维加强型塑料管，其主要优点是质量轻、便于施工和耐振动。若是三芯电缆也可用无缝钢管。

二、敷设条件与要求

1. 敷设前必须掌握的资料

- (1) 电缆线路的长度、走向、地形和高差。
- (2) 城市建设规划部门确认的用地批准书和有关地下建筑物的资料及近期城市建筑用地计划。
- (3) 电缆的排列方式和金属护套接地方式。
- (4) 特殊敷设方式（如水下敷设）及个别线路的特殊要求。
- (5) 敷设时的可能最低环境温度。

2. 敷设施工中的几项要求

(1) 电缆与地下管道的距离。电缆与热力管道及其他管道之间应保持一定的距离，如因条件限制，距离过近，应采取隔热措施，以免电缆散热不良，造成电缆过热。电缆与地下管道的距离应满足如下规定：

管道类别	平 行	交 叉
热力管道	2m	0.5m
其他管道	0.5m	0.5m

(2) 电缆直埋深度及相互距离。1~35kV 电缆直埋深度不小于 0.7m，35kV 以上电缆不小于 1m。电缆相互净距：10kV 及以下电缆不小于 0.1m，10~35kV 电缆不小于 0.25m。电缆相互交叉时的距离不小于 0.5m，但如电缆在交叉点前后 1m 范

围内穿入管内或用隔板隔开,则可缩短为 0.25m。

(3) 电缆的最小弯曲半径。交联聚乙烯电缆的最小弯曲半径为 $15D$ (D 为电缆外径)。

(4) GB 50217—2007 规定了电缆与电缆、管道、道路、构筑物之间的容许最小距离,读者可自行查阅。

第二节 110kV 交联聚乙烯电力 电缆的施工工艺

84

由于交联聚乙烯电力电缆结构上的特点,接头和终端头与全密封组合电器设备(GIS)的连接通常采用预制式终端,其安装必须遵守各项有关工艺要求,对于绝缘层的密度、干燥、清洁和粘结度的要求都十分严格。本节将结合我国 110kV 交联聚乙烯电缆的工程施工经验,简要介绍电缆敷设工艺。

一、敷设前的安全技术措施

(1) 清理电缆沟。除预埋管道已形成的走廊外,直埋段或专门建造的电 缆沟必须平整,清除沟内杂物,沟底铺上约 100mm 厚的一层细砂或软土。

(2) 布放电缆滑轮。除弯曲部分采用滑轮组成适合弧度的滑轮组外,直线部分通常每隔 2.5~3.0m 设置直线滑轮一具,所有滑轮必须形成一条直线。

(3) 安装管口导向喇叭。由两半边组成的管口漏斗形导向器,外端像喇叭形,使电缆穿入管中时不致损坏护套。

(4) 布放钢丝和设置拉力机。①根据电缆长度和截面,一般选用 $\phi 12\text{mm}$ 和 $\phi 16\text{mm}$ 的整根钢丝,长度比电缆长 30~50m,从电缆盘布放至拉力机,多出部分暂留在电缆盘一端。钢丝连接必须牢固,以便于滑行和通过各处滑轮,其连接点应选用特殊接头,滑行时派专人看管。②拉力机功率为 $39.2 \times 10^3 \sim 49 \times 10^3 \text{N}$ 较合适,并且必须有 1~4 挡不同拉力挡供选择,同时配备张力计(拉力表)。

(5) 检查预埋管道是否有下陷移位等不正常现象，一般使用“试通棒”试行通过。

(6) 电缆盘就位。电缆盘重心应对准电缆沟中心，电缆盘和支承架应安置在接头井的外端，采用从盘顶向下引出的方向，故在安装支架和电缆盘就位前必须弄清首端和尾端的确切方向。整盘电缆安装就位后，仍需在主轴上安装防滑动的限位器，并在电缆盘的圆盘外周上安装减速制动装置，然后推动电缆盘转动数圈，以观察其是否正常。为确保电缆盘至电缆沟这段长约 10m 的电缆不致悬空，必须在中间设置一特制滑轮架，以利于电缆滑行，如图 4-5 所示。最新的敷设计方法是使用放缆机敷设大截面大长度的高压电缆，通常在隧道内施工比较理想，电缆受力均匀，易保证施工质量。每台牵引电缆长度约 50m，放线速度为 5~6m/min。

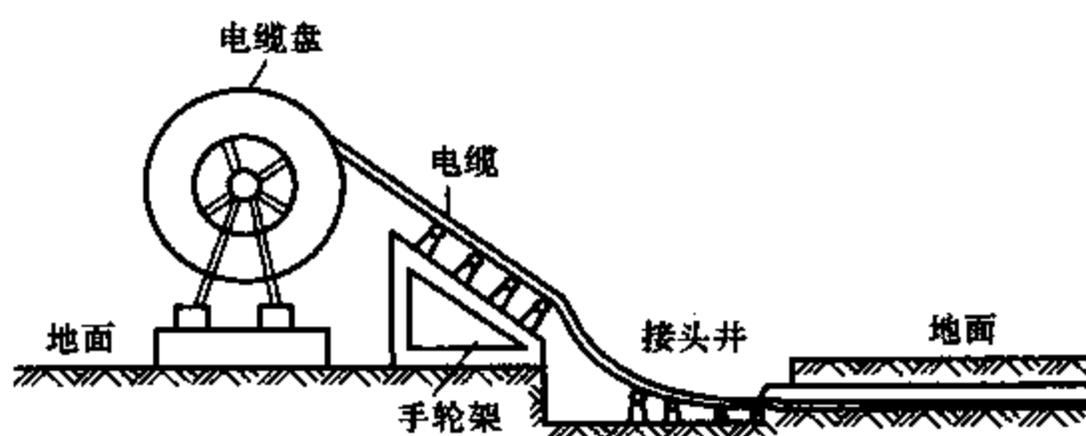


图 4-5 电缆盘布置安装图

(7) 检查验算全线有弯曲半径及穿管部分的侧压力和总的牵引力与设计书是否符合，以确定张力和牵引方式，同时与实际张力作比较。此外，还需注意高压交联聚乙烯电力电缆的允许弯曲半径要保持为电缆外径的 15 倍。

二、电缆的敷设计

1. 协调分工，统一指挥

由指挥者发出试拉一段钢丝绳的命令，沿途各岗位及时配合，调整滑轮位置，对讲机正式投入对话，注意观察钢丝绳与滑

轮转动情况。试拉正常后,将钢丝绳终端串连着的消扭器接上电缆首端的拉环,在连接时需检查拉环是否与导体连在一起,然后命令拉力机以慢挡试拉,各岗位全力配合,开始正式敷设。

2. 明确岗位责任,随时调整敷设速度

根据电缆不同截面允许最高张力的规定(铜芯为 68.6 N/mm^2 , 铝芯为 39.2 N/mm^2),在敷设的全过程应严格监视总的牵引力。在实际牵引力不大,走廊环境较好的情况下,敷设速度可由 $6\sim 8 \text{ m/min}$ 提高到 10 m/min 。弯曲处由多个滑轮组成弧形滑轮组,电缆敷设中务必使滑轮转动正常,不应出现停止转动导致擦伤电缆外护套。电缆经过的途中,凡与地下管线接近或相遇的地方,必须用橡胶片隔开或迁移障碍物。当全线各监视点发现任何会导致损坏电缆外护套的现象时,必须立即停车。

3. 外护层的检查和测试

(1) 外护套的检查:①人工检查;②电气测试。人工检查是在三相敷设完毕后调整相间距离时同时进行,对于一些部位向下的怀疑点应用镜子反射进行检查。聚氯乙烯外护套通常在其外表涂上石墨半导体层(可代替泥土,在盘上便可做电气试验)。覆土和不覆土做电气试验效果一样,但通常选择覆土后做试验合适,主要原因是覆土后有利于故障点的测寻。若未覆土,则当某一点发生电气击穿时,其击穿点电压会沿石墨层向外传导,对邻近工作人员的安全构成威胁。

(2) 外护层进行电气试验应注意:

1) 将电缆的两端刨去约 300 mm 长的石墨混合导电层。试验时,耐张拉环为一极,没刨去导电层的外护套为自然接地极(本来导体应脱离耐张拉环,现在是连同导体一起承受电压)。

2) 聚氯乙烯护套通常以直流 10 kV 、耐压 1 min 不击穿为合格,并以绝缘电阻值作参考。

3) 耐压试验时人体不准接触外护套,另一端设人监护。

4) 由于耐压试验击穿外护套,形成金属屏蔽层接地,所以在测寻故障点时最好将耐张拉环除掉,将波纹铝护套当作导体,

接受耐压及电气测试。

● 第三节 交联聚乙烯电力电缆 中间接头的选型和安装

一、110kV 交联聚乙烯电力电缆接头的选型

我国各大中城市过去 20 多年来引进的 110kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆的接头有如下几种：

1. 绕包型

绕包型接头是以乙丙橡胶为基材的绝缘带作为接头的绝缘。绝缘带在常温条件下施加一定压力后能自行粘合。在绝缘带拉伸的状态下绕包，带内的残留张力在绕包后成为绝缘带层间的压力，绕包后粘合成一整体。绝缘带在拉力下厚度减薄、宽度缩小，施工时以宽度的收缩率来控制绕包时的张力。为使张力均匀，必须用绕包机绕包绝缘。乙丙橡胶的绝缘性能虽好，但在绕包过程中与空气摩擦会产生静电，使绝缘带的表面粘上很多的灰尘。在带上的灰尘会夹在绝缘接头中间造成隐患。这类接头虽易于操作，但工艺质量受环境的影响较大。绕包过程中张力控制必须均匀，现场应有适当的防尘措施。

2. 模塑型

模塑型接头是以交联聚乙烯带为绝缘，绕包后用模具加热使其在高温及压力（绝缘材料膨胀产生的压力）下硫化成与电缆工厂绝缘相似的交联聚乙烯绝缘的接头。该类接头对加热的温度、时间和冷却过程有严格的工艺要求，如掌握不当则会影响硫化质量。它对环境的要求与绕包型相似。由于有加热及冷却过程，因此安装时间要比其他类型接头长。

3. 组装式预制型

组装式预制型接头是由工厂浇铸的以环氧树脂为绝缘、中段和两端以弹簧压紧的预制应力锥组成的接头。这类接头的主要绝缘都在工厂内制造。现场除剥切及压接的工作外，主要是组装工

作。与上述两类接头相比,这类接头对安装工艺的依赖性相对要少些。其绝缘部分分为3段,在出厂时无法做整体绝缘的出厂试验。

4. 整体预制型

整体预制型接头的半导体内屏蔽、主绝缘和半导体外屏蔽及应力锥全都在工厂内预制成一整体的接头。在现场施工中电缆经过剥切处理后,将在现场用临时衬管扩张的整体预制接头套入电缆一端。两端电缆压接头后装上带有凸缘的金属屏蔽电极,电极上的凸缘扣入电缆绝缘的两条槽内,它能防止电缆绝缘的回缩。然后将衬管及预制接头移至接头中心,以专用工具抽出衬管,预制件即自行收缩在电缆上。接头的屏蔽和主绝缘即制作完成。安装过程中预制件与电缆绝缘的界面暴露的时间很短,接头工艺简单,安装时间短。主绝缘及屏蔽均在工厂预制,能做出厂试验以检验制造质量。这类接头对现场安装、工艺条件的依赖性较低。与其他类型的接头相比,其独特之处是金属屏蔽电极有防止电缆绝缘回缩的功能。

由于电缆线路现场施工环境较为恶劣,加上要求夜间施工,这给电缆接头安装工作带来很大的困难,因此,接头设计应满足现场安装时间短的要求。与绕包型接头比较,整体预制型接头的最大优点是工效高、安装简便,所需时间约为绕包型的 $1/3$,缩短了电缆绝缘和外加绝缘暴露在空气中的时间,提高了接头的安全可靠。此外,也减少了品种繁多的绕包型接头用的带材,避免各种带材在安装时的错用,还避免了不同类型绕包机的不同操作方法引起的差错。同时在备品管理上解决了储存的问题。绕包型接头的绝缘带及半导体带的储存期一般为 $2\sim 3$ 年,有作为备品的材料要不断更新以防止材料过期的问题,而整体预制型接头的耐老化性能很好,不存在此类问题。整体预制型接头结构紧凑,接头的半导体内屏蔽、应力锥、主绝缘及外屏蔽全在工厂内预制成标准化组合部件,非常规范化,尺寸比绕包型小得多。综上所述,整体预制型接头是一种理想接头,当条件允许时应尽量

选用。国内广州供电局自 1987 年起分两次引进意大利比瑞利电缆厂 110kV $1 \times 630\text{mm}^2$ XLPE 电缆两个回路及其配制的 EPDM 整体预制型绝缘接头和直线接头共 30 多个。该电缆线路自 1988 年投入后一直可以正常运行。1993 年武汉供电局为武钢安装 4 回 110kV $1 \times 400\text{mm}^2$ XLPE 电缆，也从日本引进整体预制型接头，大大缩短了施工期限，保证了工程质量。

二、35kV 及以下交联聚乙烯电力电缆接头和终端头的配套

在一般场合下使用的交联聚乙烯电缆的接头和终端头在国内可以配套供应，不需像 110kV 交联聚乙烯电缆一样从国外引进中间接头，但在一些特殊场合下敷设和运行的电缆，如水底敷设和封闭电器配套连接时及对运行安全可靠性的要求非常高时（如核电厂厂用电电缆），应向外商提出配套供应符合要求的终端头。对这些线路应特别要求制造厂提供制造长度能满足线路长度要求的整根电缆以避免采用接头。对于线路特别长而必须在中间用接头连接的水底电缆，则应要求在工厂内做“软接头”进行连接，以满足线路长度要求的整根电缆交货。但为了在运行中发生故障时便于修理，可以向制造厂订购 1~2 套备用接头。

目前国内生产的中低压塑料电力电缆接头和终端头的类型有：

1. 绕包式

终端头的应力锥、绝缘保护及中间头的绝缘全用自粘性橡胶带、塑料带包绕而成。户外头雨罩和中间头保护外壳用硬塑料制成。该类终端头的工艺简单、成本最低，适用于各种电缆规格、形状。国内已有近 30 年的使用经验。其缺点是制作工时较长，中间头外壳体积大（终端头形小），主要适用于 1~10kV 橡塑电力电缆，35kV 电缆也可用。

2. 模塑式

终端头的应力锥和中间头的绝缘用辐照交联聚乙烯包绕后用特制的加热模加热（因热膨胀而受压）成一整体。户外头的外绝缘和中间头外保护要另加其他部件。绕包工艺同绕包式，因增强

绝缘采用模塑法,因而电性能较好,国内已有30多年的运行经验。

3. 热收缩式

接头用的绝缘管、保护管、分支套、雨罩等部件用高分子材料(如交联聚乙烯、硅橡胶等)预制成热收缩型,其内壁涂有热熔密封胶。其优点是施工简单,时间短,规格少,因热收缩有一定范围,所以适用性强,安装工具少,接头外形尺寸小;缺点是价格较贵,电性能和密封性能一般。国内应用较多,适用于10kV及以下户内终端,也可用于户外头和中间头。建议推广绕包和热收缩混合方式。

4. 冷收缩式

接头用的管材、雨罩等预制成具有能冷收缩的结构。收缩的类型有:①机械嵌填材料装上后抽出而收缩;②密封包装,拆开后与空气接触反应而收缩。其优点是不用明火,不需加热器材,其他性能同热收缩式接头,施工更方便;缺点是价格比热收缩式还贵。国内已能批量生产。

5. 浇注式

接头的增强绝缘和密封保护主要用浇注树脂灌入一定的模壳中固化。树脂常用丙烯酸、聚氨酯等。应力锥可用绕包式或预制式。其优点是密封防潮性最好,施工时间快,浇注树脂均为冷浇注,工艺方便,适用规格宽。

6. 瓷套式

塑料电缆终端头制好应力锥,装入瓷套内,并灌充填剂(如硅油)。由于35kV及以上电压等级户外终端外绝缘要求高,故采用瓷套结构。其外形尺寸大,施工和维护工作量大,只用于35kV及以上电压等级中。

7. 预制式

整个接头采用乙丙橡胶等分层注胶工艺,形成内屏蔽、绝缘、外屏蔽3层紧密结合的结构,现场只要套装,紧固即可。其优点是施工方便,时间短,无特殊工艺要求,批量生产后价廉,

外形尺寸小，拆卸方便；缺点是对电缆尺寸准确性要求严格，接头规格多。其主要适用于 10kV 及以下电压等级中，国外也有用于 35~63kV 电压等级的。

总之，塑料绝缘电力电缆的接头和终端头比油纸电缆接头工艺简单，外形尺寸小，接头工艺简单，施工时间可大大缩短，密封要求相对稍宽一些。但是，电缆线路中的接头，其基本性能要求仍然是应具有良好的导电能力和绝缘性能以及具有可靠的密封保护和防护外界环境因素损坏的能力，因此用户绝不能轻视接头技术的要求，必须严格地执行安装工艺规程。

三、35kV 及以下交联聚乙烯电缆的中间接头的安装

如前所述国内 35kV 及以下交联聚乙烯电力电缆的中间接头基本上有绕包型、模塑型、热缩型、浇注型和初装配型等。各施工单位和电缆运行部门可根据地区情况，选用不同类型接头制定各自的接头工艺。现简单介绍较常用的模塑型和热缩型两种接头形式及其安装。

(一) 模塑型

要达到接头绕包绝缘和电缆绝缘牢固结合，模塑法是一种较好的方法。图 4-6 所示为 10kV 单芯交联聚乙烯电缆中间接头的结构，以此例来说明该接头及所用材料的特点。图 4-6 所示接头的主绝缘采用未硫化的乙丙橡胶带与辐照聚乙烯带复合热塑，其击穿强度比用单一材料高，主要原因是两种聚乙烯材料通过乙丙橡胶在硫化过程中能牢固地粘结为一体。接头的加热、保温，是

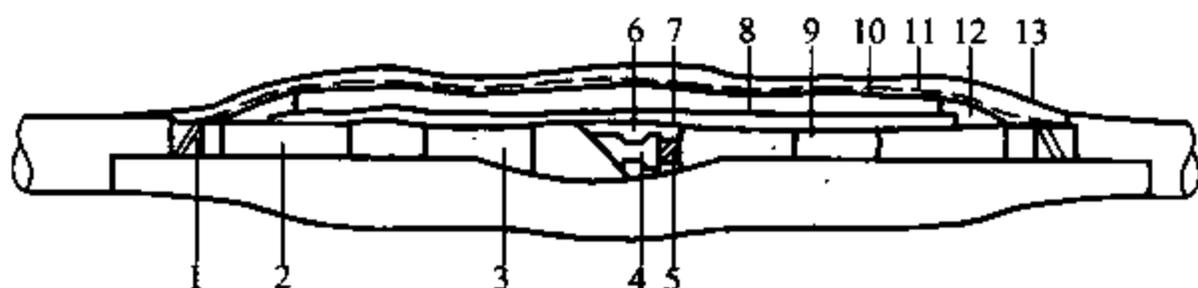


图 4-6 10kV 单芯交联聚乙烯电缆中间接头的结构

- 1—铜带屏蔽；2—半导电屏蔽；3—电缆绝缘；4—连接管；
5—导体；6—导电材料填充；7—导电屏蔽管；8—热缩绝缘管；
9—应力松弛材料；10—外导电屏蔽管；11—铜屏蔽网；
12—防水填充料；13—外护套管

为了使包带材料与电缆本体热塑成一体。采用热模具加热，加热温度的高低应根据乙丙橡胶的硫化温度确定。安装时应注意交联聚乙烯的粘合温度必须使接头靠近导体表面的温度达到接近一致，加热时间取决于绝缘的厚度。

(二) 热缩型

对于热缩型中间接头国内已积累了较丰富的经验，但安装时还应重视以下几点。

1. 导体压接和高压屏蔽

接头导体压接必须高质量，避免运行中接头过热使材料过早老化。目前压接有点压和围压两种，若金具、模具、工具经过周密设计和严格检查，两者基本无差别，均可采用。但采用围压时连接管伸长较多，对安装热缩接头极为不利，因接头结构中电缆各部分剥切尺寸控制较为严格，各层热缩管长度是根据搭接需要确定的。若连接管伸长较多，必将影响整个接头结构尺寸，其变化有时会超出允许范围。如高压屏蔽导电管和电缆绝缘搭接20mm，是考虑电缆绝缘回缩时不产生空隙，若连接管伸长，搭接部分必然减少，甚至无搭接，造成结构不合理。

热缩接头对附加绝缘（厚壁热缩管）和电缆各部分间的接触面要求较高，因在不平坦部分上附加较厚热缩管在界面凹处易产生气隙，这种情况应绝对避免。连接管压接后变形较大，难于处理平坦，为此先用导电胶填充，使连接管区段基本平坦，然后再覆盖收缩导电管，既解决了绝缘回缩问题，也使连接管区内平

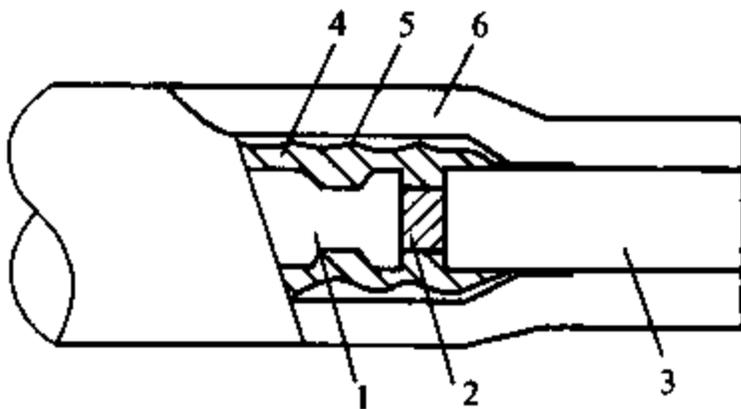


图 4-7 连接管处填平

1—连接管；2—导线；3—绝缘；4—导电填充；5—导电屏蔽；6—厚绝缘管

坦，改善接触界面效果甚佳，如图 4-7 所示。

2. 接头中的电场处理

接头中的电场情况与终端情况不一样，关键部位除电缆屏蔽端外，还有连接管区域，另外附加绝缘层还有接地屏蔽，所以处理方法不

同。考虑到缩短接头尺寸，减少层间界面，接头内用应力泥（减缓松弛电场胶泥）处理屏蔽端部，包绕时应与电缆屏蔽搭接 10mm 左右，由厚到薄自然均匀过渡，因外附有应力锥（两层厚壁热缩管和外屏蔽自然构成），所以尺寸较短，即可满足要求。

3. 附加绝缘和防水密封

一般要求接头绝缘厚度不少于电缆绝缘的 1.5 倍，层数不宜多于 3 层，为此采用两层厚壁热缩管，安装时连续操作，三相同时完成，这使接头使施工大为简化。因绝缘管壁厚，考虑热传导需要时间，加热收缩时应注意缓慢进行。可三相交替烘烤确保收缩紧密，待内层绝缘管表面温度略低时用溶剂进行清洁，去除火焰燃烧喷沉在绝缘表面的导电碳粒，随后迅速拉出外层绝缘管就位收缩使两层管构成整体。

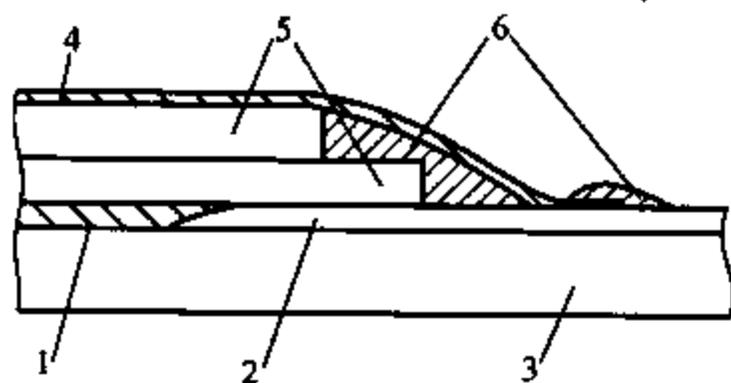


图 4-8 附加绝缘端部防水措施

1—附加绝缘；2—外屏蔽；3—主绝缘；
4—外护套；5—应力锥；6—防水填充

如图 4-8 所示，两层附加绝缘管内长外短，在端部形成台阶，该部位应用绝缘胶或自粘橡胶带包绕成锥形，这是为避免当电缆护套破损时水分侵入绝缘。

4. 铜屏蔽、铠装的连续和护套密封

国际规定电缆接头两端铜屏蔽和钢铠装应分别连续不得中断。在热缩接头中铜屏蔽是用编织铜网绕包恢复，两端应与铜带焊接，按工艺顺序三相铜屏蔽恢复后应收紧线芯，恢复填充，并用耐热带材（如玻璃丝带、白布带）绑扎牢固，但不要塑料带，因加热护套管时，塑料遇热要破裂。对无铠装电缆随后恢复护套即告完成；对铠装电缆还应恢复内衬层和钢铠跨接线。电缆内衬层多为挤包型，起密封作用。因此接头内也应采取适当措施恢复其作用，推荐选用热缩内护套密封。接头配套件中未提供铁壳时，接头两端的钢铠应用跨接线连通，不得中断。恢复热缩护套时，端部密封应处理好，电缆护套要打毛清洗 100mm，热熔

胶要充分烘烤加热。隧道内接头应放在专用托架上，直埋时应装机械保护盒。

四、110kV 及以上交联聚乙烯电缆中间接头的安装

110kV 及以上交联聚乙烯电缆的中间接头有直线接头、绝缘接头、过渡接头，有绕包型、模塑型和组装预制型。接头施工方法也很多，例如我国武汉供电局引进瑞典 110kV XLPE 型电缆，就是采用 ASEA 电缆公司近几年来研制的一种先进工艺。这种工艺是在老式绕包式的基础上，用模注法将缠绕的绝缘带部分加以恒温、恒压，而使其绝缘带和电缆本体原有的绝缘融为一体，使之制成的电缆中间接头处与原来的电缆具有相同的外径、相同的电气性能，而且其机械强度还胜于原来的电缆。不过，这种接头工艺的施工现场要比一般工艺的条件要求高些。它要求环境温度控制在 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ ，场地最大湿度不大于 60%，最好在无尘室内工作，只有这样才能确保这种工艺的施工质量。

这种电缆中间对接的施工工艺主要流程如下所述。

1. 电缆端头的矫直

(1) 将待连接的两根电缆端头相互重叠 900mm，沿各自的端头剥去 1000mm 聚乙烯护层及膨胀带，并将铜屏蔽线折回到电缆聚乙烯护层上面。

(2) 用铝质哈夫管包夹住剥去护层的电缆末端，将加热带均匀缠绕在哈夫管上，在加热带和哈夫管间插入热电偶。

(3) 将加热带和热电偶加热控制仪连接，接通 220V 交流电源，将加热矫直的温度整定在 90°C ，时间调整在 6h。

(4) 把压力软管和热收缩管分别套在两根电缆上。

2. 电缆导体的焊接

(1) 剥去聚乙烯护层矫直过的电缆端头留下 550mm 后，截去多余的长度，在留下的两根电缆端头上剥掉 70mm 的绝缘层后，裸露出电缆芯，将缆芯清洗后烘干。

(2) 用专用焊模夹住电缆芯，两缆芯的端间留有 $4\sim 8\text{mm}$ 的间隙。缆芯和焊模的接合处要用耐温泥封堵。

(3) 将模具用气体火焰加热到 100°C 左右后, 放入金属托盘, 缓慢倒入 0.6kg 预热到 100°C 的焊接药粉, 在焊粉表面均匀撒一层点火药粉, 并撒至模具的点火孔边, 用火石枪点火燃烧 $1\sim 2\text{s}$ 后, 即可烧融焊接成功。

(4) 用电动手锯或砂轮切去焊接处多余的部分, 并逐步用从粗到细的砂布将焊接处的表面打磨光滑, 使缆芯焊接处的直径和缆芯原来的直径一样大。

3. 电缆导体芯内屏蔽层的恢复

(1) 将焊接处两侧 XLPE 绝缘层切削成锥形。用小刀和砂布将紧靠锥头的内屏蔽层表面的绝缘体磨削干净。

(2) 用丙酮将焊接处电缆导体芯及内屏蔽层洗干净。然后按 50% 重叠, 绕 1 层导电尼龙带, 再平绕 2 层导电塑料带, 用特制烙铁将导电带间的缝隙熔融粘成一整体。再用细砂布将熔融的导电带砂光磨平, 不容许有毛刺和凹凸处。

4. 缠绕绝缘带

(1) 将接头处的内屏蔽层和两锥体的表面用丙酮洗清干净后, 用有机玻璃罩罩住电缆接头的部位 (此前罩内应洗净干燥), 并把空气滤清器和有机玻璃罩接通, 要尽量保持罩内空气清洁无尘。参加绕带的工作人员应戴洗净的乳胶手套进罩内工作, 一人将手伸进罩内持盘送带, 另一人的手在罩内缠绕包带。绕好后的带层直径应比电缆原绝缘的直径大 $6\sim 8\text{mm}$, 绕完带后, 用两块聚氯乙烯对叉将绕好的带层全部包住。

(2) 根据压力软管的长度, 在接头处两侧装好哈夫锥体。在哈夫锥体间, 按下列顺序逐一进行缠绕: 按 50% 重叠绕 1 层硅酮带, 包 3 层锡箔纸, 再全绕 3 层硅酮带并包住哈夫锥体。

(3) 用铝质哈夫管夹住接头处的带层, 在哈夫管上均匀地缠绕上加热带, 加热带不准折叠。将热电偶从哈夫锥体端头插入, 插在加热带和哈夫管间, 热电偶的端头要和哈夫管接触好。

(4) 将两侧哈夫锥体的表面涂密封胶后, 套上压力软管, 并在两侧哈夫锥体上用铜带包箍将压力软管两端扎紧, 不准漏气,

装上加强铝质哈夫管和拉杆夹具后,启动空压机通过锥体向压力软管内充气,使其恒定保持在6个大气压($6.0795 \times 10^5 \text{ Pa}$)。

(5) 在加热硫化时,若有下列条件之一都应在硫化的同时在接头处的两侧用加热带加温协助硫化:

- 1) 电缆芯导体截面积 $\geq 500 \text{ mm}^2$ (铝质线芯);
- 2) 电缆芯导体截面积 $\geq 400 \text{ mm}^2$ (铜质线芯);
- 3) 电缆的绝缘厚度 $> 10 \text{ mm}$;
- 4) 施工环境温度 $< 15^\circ \text{C}$ 。

96

辅助加温的具体方法是:分别在两端哈夫锥体外侧300mm处各包1块聚氯乙烯后,再包上5层铝箔纸,再均匀地缠上加热带,并插入热电偶,加热带不许重叠。

(6) 将控制仪和加热带、热电偶以及空压机等设备连接后再接通电源进行加热硫化。在导线芯面积小于 630 mm^2 的情况下,分段硫化时间为:180 $^\circ \text{C}$ 时,9.5h;115 $^\circ \text{C}$ 时,4h。此时空气压力为0.6Pa。两侧辅助加热温度控制在90 $^\circ \text{C}$,13.5h。注意硫化过程中不允许停电。

(7) 硫化过程结束后,首先检查记录纸上的曲线形状,如果曲线圆滑、变化平缓,且压力曲线恒定不变,则可初步判定接头硫化质量基本合格。

(8) 用专用刨刀将接头硫化后的绝缘层表面刨圆,使其光滑,并用细砂布(非金钢砂)打磨光滑后用加热带加温100 $^\circ \text{C}$,24h。然后涂2遍导电涂料,包1层半导体膨胀纸带、1层半导体尼龙带和1层导电膨胀带。3种不同的带子均按50%的重叠缠绕。

(9) 用铜网带按10mm重叠在膨胀带表面绕包1层。铜网带层的两端要和两侧原来的铜屏蔽线接触好。再将原来两侧的铜屏蔽线压接连通。

(10) 在已绕好的铜屏蔽线上再绕包1层膨胀带和1层自粘铝箔纸带,铝箔纸带的两端用钻孔板和两侧聚乙烯护层下面的铝箔终层连接好。

(11) 将事先套入的两根热收缩管按先后收缩的顺序分别拉

到位进行加热收缩。

● 第四节 交联聚乙烯电力电缆 终端头的选型和安装

一、110kV 交联聚乙烯电缆终端头的型式

110kV 交联聚乙烯电缆终端头的型式主要有以下 3 种：

(1) 连接 GIS (全封闭组合电器) 母线槽的三相共体式全封闭气体绝缘终端头。

(2) 连接大容量主变压器的单相密封式、液体绝缘终端头。

(3) 连接架空设备的单相瓷套式固体绝缘终端头。

在安装过程中，都必须完成剥去外护层、处理金属护套以及屏蔽层、增强绝缘等工序，其实施方法与中间连接工艺基本相同，但根据不同的终端头类型和结构特点都有各自不同的工艺要求。例如：

(1) 与 GIS 连接的终端头，其连接箱底部下 1.2~1.5m 长度的一段电缆要求完全垂直，并可靠固定，以保证密封。

(2) 进行 GIS 与电缆终端头连接的安装时，工作人员应戴无纤维手套，并必须使用专用工具，以确保良好的接触。

(3) GIS 连接箱连接电缆有抽真空要求时，必须严格达到真空度的要求。

(4) 连接大容量主变压器的电缆终端头，其连接应选择实体铜棒，加工成接线端进行压接。

(5) GIS 连接箱及主变压器连接箱的连接均属特制的精工铸件，拆卸过程中需用软性材料包裹，以保护接触面。

(6) 对预制应力锥的安装，应遵守有关尺寸和规定，安装过程中自始至终保持清洁。终端头的安装宜选用力矩扳手。

二、户外终端头的施工工艺流程

(1) 将电缆终端头在施放过程中损坏的部分截除后，对电缆端 1500mm 处进行加热矫直，其操作方法和电缆中间接头施工

中的矫直法一样。

(2) 根据电缆终端头连接的型式, 结合绝缘子的实际尺寸, 选取剥离电缆终端头聚乙烯护层的长度 (见表 4-1)。

表 4-1 剥离电缆终端头聚乙烯护层的长度 mm

连接型式	重叠压接型(A)	焊接型(A)	重叠压接型(B)	焊接型(B)
APEC 841	1150	1100	985	935
ABEC 1452	1480	1420	1315	1255
APEC 1703	1720	1660	1555	1495

(3) 将膨胀纸带剪齐后, 把铜屏蔽线折回到聚乙烯护层上, 用导电胶布将屏蔽线和铜网带扎缠 3 层, 并把终端头的附件、法兰盘和主体依次套在电缆终端头上。

(4) 检查应力释放锥的尺寸是否符合电缆型号的要求。在导电胶布标记外 100mm 处到端头的导电层全部刨削干净后, 再用刮刀继续将标记处削成长 40mm。

(5) 在标记处靠近铜屏蔽线侧 40mm 处用导电胶布按 100%重叠缠绕 10 层。将削除导电层的绝缘层表面, 用从粗到细的砂纸磨平并打光滑, 直到绝缘体的外径符合应力释放锥内径尺寸的要求。

(6) 将电缆的端头剥除 80mm 的绝缘层, 靠近导体芯的绝缘体削成 60mm 的锥体, 用灰色硅酮带将锥体覆盖。用丙酮洗净应力锥内外表面, 戴专用手套在其内孔涂润滑油, 套上滑动锥体, 装上助推夹具后, 套在经过清洗和涂有润滑油的电缆端头上, 向前推至导电胶布 100mm 处, 取出滑动锥, 再将应力锥推至导电胶布边。

(7) 用丙酮洗净所涂的润滑油, 用 ET 带按 50%重叠, 在应力锥上端绕包 500mm 5 层将其固定。然后用绝缘胶布按 50%重叠, 将锥体下端和铜网带缠 5 层 100mm 使其接触良好。最后再覆盖 1 层导电胶布。

(8) 将电缆导体芯和端头铜棒用丙酮洗净后烤干,用焊模夹具固定,按中间接头的焊接方法进行焊接。焊接时要用隔热罩保护好绝缘体表面和压力锥。然后对焊好的接点进行磨光清洗处理,在焊点靠端头 20mm 处到锥形端头 30mm 处用灰色硅酮带按 50%重叠绕 5 层,用丙酮全部清洗一遍。

(9) 把法兰盘套在应力锥末端,盘边和铜屏蔽线折弯处相距 80mm。盘的上端和应力锥相距 40mm,用软管夹将应力锥下端和法兰盘上端夹紧固定。接地片应钩住应力锥的下边缘。

(10) 将主体尾端的槽口对准铜屏蔽线后套在法兰盘上。靠近主体下端的电缆表面缠沥青纸带,其厚度要与主体裙部内径相配。铜屏蔽线理成一束后置入主体下端的槽口中,用主体裙部夹住沥青纸和主体下端部,用螺栓夹紧。

(11) 拆除应力锥端头的半导电胶带,将端头全部清洗一遍后,把绝缘子平直地套在锥体上,用 30~40N·m 扭矩扳手成对角拧紧绝缘子固定螺栓。然后将装配好的电缆终端头起吊安装固定在终端架上。再将硅油加热到 80℃ 后冷却到 30℃ 时注入电缆终端头内。

三、35kV 及以下交联聚乙烯电缆终端头的安装

35kV 及以下电缆终端头目前大多采用热缩终端头和冷缩终端头两种,因为热缩终端头结构简单,安装方便,所以应用较多,在此主要介绍其工艺程序。

1. 准备工作

安装电缆终端头时,剥切电缆的准备工作要花费较多的时间,主要困难在于剥除半导电屏蔽层。操作时不得损伤绝缘,应避免刀痕及凹凸不平的情况,不能残留碳粒。必要时可用细砂布将绝缘表面打磨光滑平整。屏蔽端部应平整,削平凸起。对包带石墨层的屏蔽,剥除包带后,清除石墨层更要慎重细心。

2. 焊接地线

塑料绝缘电缆端铜屏蔽和钢铠必须良好接地,对短线路也应遵循这项原则,避免三相不平衡运行时钢铠端部产生感应电动势

甚至“打火”及燃烧护套等事故。接地引出线要采用镀锡编织铜线(厂家配套供应),和电缆铜带连接时应用烙铁锡焊,不要直接使用喷灯封焊,以免烧损绝缘。

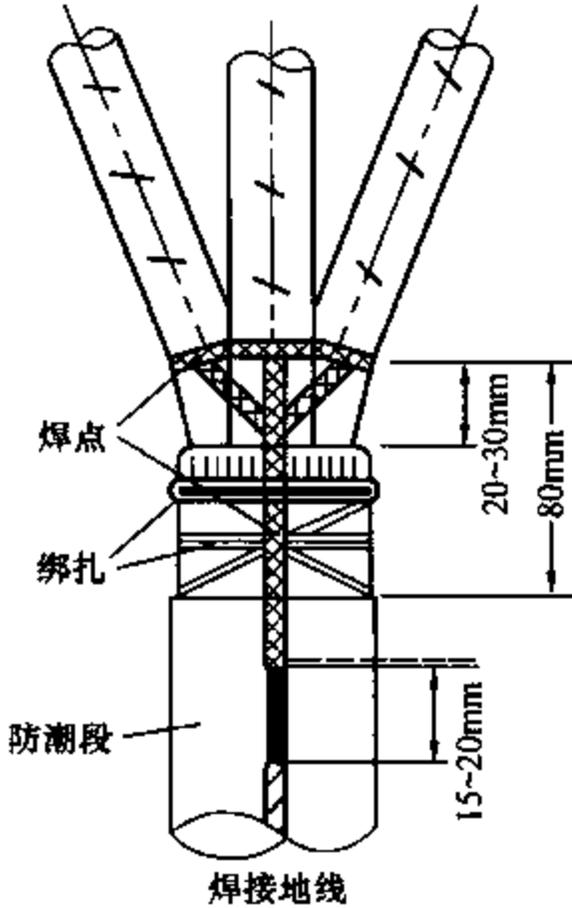


图 4-9 焊接地线位置

三相铜屏蔽应分别与地线相连,注意屏蔽接地线和钢铠接地线应分别引出,相互绝缘。焊接地线的位置应尽量靠下,否则会使分支套位置偏高,密封段缩短,如图 4-9 所示。

塑料绝缘电缆热缩头的密封也极为重要,若密封不良,由于呼吸作用会在电缆绝缘和热缩管界面处凝聚水分而引起故障。因此应对接地引出线密封处进行妥善处理。由铜丝编织的地线,单靠埋入胶层尚不能满足要求,因除呼吸作用外,毛细作用也会将潮湿引入电缆内,

建议采用焊锡扎束,彻底封死沿引出线进潮的途径。扎束置于护套端部 30mm 左右,长度应不小于 20mm。

3. 三相线芯分叉处的填充

三芯交联聚乙烯电缆分叉处适当填充有两个目的:①在焊接地线绑扎钢铠处包缠一些材料,将金属尖刺盖上,保护分支套;②使分支套造型美观。为此对填充材料没有特殊要求,一般用电缆内的填充料或塑料带均可。

4. 电缆屏蔽端部的填充

电缆屏蔽端部电场强度高,为了使应力管充分发挥减缓电场强度的作用,必须确保应力管无气隙地和屏蔽层紧密接触。因为电缆绝缘半导体层有 1mm 左右的厚度,使端部高出绝缘,如不妥善处理就套装应力管,必然在直径突变处形成气隙,在最关键部位隐藏气隙,这种情形危害甚大,应绝对避免。

试验证明,在正常情况下电缆头在局部放电时,一般仅几个皮库(pC),但屏蔽端部处理不好有气隙存在时,放电量可达十几个皮库(pC)甚至超过标准。避免产生这种气隙的办法是在套装应力管之前,用胶在屏蔽端部少量填充,使应力管从屏蔽均匀严密过渡到绝缘层。对10kV热缩头用填充胶消除气隙即可,对35kV电缆则使用导电胶(或漆)为好,以确保接触良好。

5. 伞裙位置

由于热缩头外绝缘的裕度较大,故具有优异的湿闪特性和抗污能力。户外头伞裙的安装位置对其性能影响不大,安装在外管的上部或下部均能满足要求。工艺说明中给出的裙边间距离关键是要确保相间距离,为避免伞裙边缘接触,可适当上下错开或提高伞裙位置。此外,三芯塑料电缆用户外热缩头可不必安装三孔伞裙。这是因为三孔伞裙的设置主要是针对油纸电缆热缩头的,是起机械保护分支套和确保相间距离作用的,而交联聚乙烯电缆属分相屏蔽绝缘结构,三相分叉前内钢铠已扎固(无铠装电缆焊接地线后也应将三相扎固),所以扳弯线时不会损伤分支套,且因交联聚乙烯电缆本身就比较硬,装三孔伞裙后反而会给线芯引出带来困难。

总之,电缆中间接头和终端头的质量,不仅涉及材料、结构,安装技术也是决定性因素。在热缩附件推广应用中,广大现场安装运行人员通过实践积累了丰富的经验,对产品的发展和完善起着积极促进作用。

● 第五节 110kV 交联聚乙烯电力 电缆户外电缆终端应用现状

随着我国城市电网改造和建设不断加快,高压交联聚乙烯电力电缆在输配电线路中的用量增加,如何选择合适的电缆户外终端型式,从而节省工程投资,提高系统运行可靠性,减少维护工作量,是一个十分重要的问题。

本节对 110kV 交联聚乙烯电力电缆户外终端的结构特点及生产、安装和使用中应注意的问题进行了分析，下面分别进行介绍。

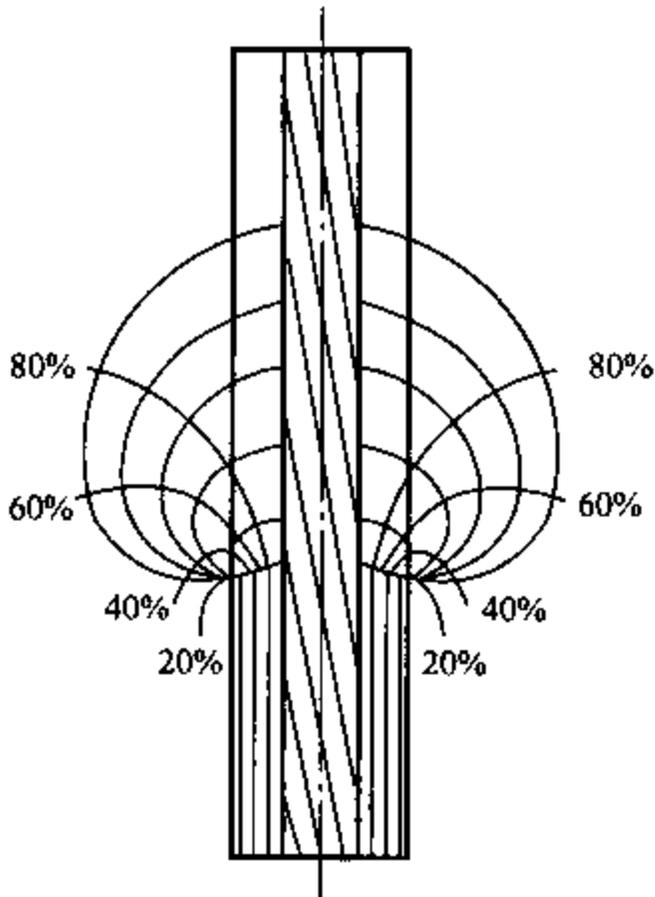


图 4-10 终端电场分布

一、户外终端的主要性能

1. 电缆终端选择要着重考虑其电场分布是否合理

如图 4-10 所示为剥去金属护套和绝缘外屏蔽后的电缆终端的电场分布。从图中可以看出，在绝缘屏蔽的末端处，由于屏蔽断开，电场分布发生畸变，且在屏蔽断口处场强最集中。该处电场不但有垂直分量，而且出现切向分量，使得绝缘较为薄弱的界面上承受很高的场强。电缆终端的首要作用就是

是通过物理方法改变该处的电场强度，使之能够承受电缆长期运行的需要。因此终端选择应重点考虑户外终端的电场分布是否合理，改善电场分布的措施是否恰当，电缆户外终端材料的电气强度，介质损耗，化学，物理性能，结构的稳定性和产品的绝缘裕度。

2. 电缆终端耐候性能和老化性能

由于电缆户外终端长期曝露在气候环境下并受阳光直接照射，终端密封防潮性能，外绝缘材料防污、憎水、防紫外线和防老化性能，都直接影响电缆附件的电气性能和使用寿命。

3. 电缆终端的热性能和机械性能

电缆户外终端的热性能（如介质损耗、导体连接的接触电阻及其稳定性，热量的传导释放、热胀冷缩对各部件性能的影响）及终端抗弯、防振等机械性能决定了终端承受输配电系统负荷周期变化和故障冲击的能力。

二、户外终端主要型式及特点

电缆户外终端按其电场控制元件不同可分为应力锥式终端和电容式终端两大类。

1. 通过应力锥改善电场的户外终端

如图 4-11 所示, 此类终端通过依据电缆尺寸设计应力锥的形状曲线来改善电缆终端屏蔽端部电场分布。根据应力锥制造材料、应力锥固定方式和终端外绝缘不同可分为如下种类。

(1) 传统的应力锥式充油户外终端。此种终端采用硅橡胶或乙丙橡胶通过注塑或挤塑制造应力锥, 现场安装时将橡胶预制应力锥机械扩张后套在电缆绝缘层上, 依靠应力锥材料自身弹性保持应力锥与电缆绝缘层之间界面上的应力和电气强度。外绝缘采用瓷套管或硅橡胶复合套管。套管与应力锥之间一般都灌注硅油或聚丁烯、聚异丁烯之类的浸渍油。现场安装时根据工艺要求分步装配完整终端。

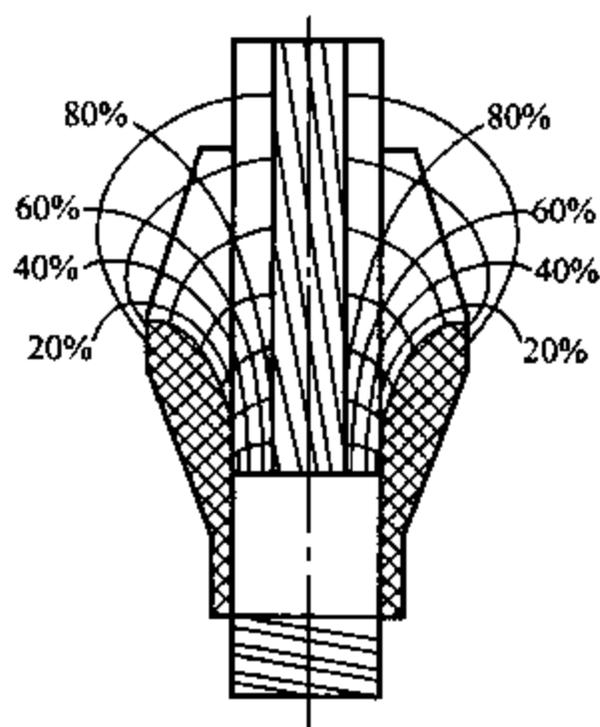


图 4-11 应力锥改善后的电场分布

(2) 应力锥式干式户外终端。20 世纪末, 随着硅橡胶材料和制造水平的不断提高, 为彻底解决合成橡胶应力锥和交联聚乙烯与浸渍油的相容性问题, 并降低终端造价, 出现了一种新的应力锥, 集伞裙和绝缘层于一体的整体预制件干式合成绝缘户外电缆终端。

2. 通过电容锥控制终端电场

干式电容型电缆终端通过在电缆终端屏蔽端部添加相互串联的电容形成电容锥来改善终端电场分布。从原理上讲, 电容锥控制电场的效果优于应力锥, 但制造和安装困难, 一般在超高压电缆终端中较常采用。但近年国内 110(66)kV 也出现由一次绝缘

包绕、硅橡胶伞裙、接线端子、均压球、接地引线等构成的干式电容型电缆终端。

此类终端主绝缘处理采用的是现场绕制，因此现场制作人员技术水平和流程控制决定了终端质量，并且此类终端一般局放量较大。

三、应注意的问题

1. 安装工艺

厂家提供的部件，经过施工人员现场安装后才能成为完整终端。而户外终端一般在杆塔上高空施工，施工环境差，难度大，工期紧，因此安装工艺应尽量简单，便于施工，对现场环境要求和安装工人技术水平要求不高。但安装工艺简单决不意味着降低安装工艺标准，操作精度和关键点的质量控制。

2. 厂家的质量保证体系

一般认为电缆系统质量是由型式试验和质量保证体系保证的。在制造过程中出现的偶然差错通过抽样试验进行检验；制造过程中的重大缺陷由出厂时的例行试验检测。安装后的电气试验仅对出厂后的运输、安装负责。IEC 60840 最新版（第3版2004年发布）也根据上述理念进行了修正，明确提出了电缆附件的抽样试验，并将附件局放试验的要求提高到“不允许存在超过声明检测灵敏度的可以检测到的局部放电量”。因此厂家是否具有完备的质量保证体系也是选择终端的重要因素。终端使用方参加并监督制造厂对附件进行例行和抽样试验也是保证终端质量的有效方法。

3. 户外终端在杆塔上的固定

为满足占地少、施工快和景观效果，目前电缆户外终端被大量安装在钢管杆上。应重视户外终端采用这种安装方式时终端动稳定的校验，并充分考虑是否便于投运后的检修和维护。起吊过程中电缆金属护套（尤其皱纹铝护套）相对于电缆芯线不可避免的位移，可能造成终端应力锥移位，密封损伤。所以应避免采用终端地面组装后与电缆整体吊装就位的方式。

综上所述,高可靠性是 110kV 电缆户外终端选型的首要因素。在高可靠性的基础上才谈得上工程的经济性和安装施工的方便性。终端的高可靠性是由终端电气性能、密封防潮性能、机械性能、工艺性能、安装质量和使用环境等多方面因素综合决定的。当今市场上的 110kV 电缆户外终端各有特点,很难确定哪一种最佳或哪一种最差,这也是这些终端能在近十多年时间里并存发展的原因。因此电缆附件的选型应该遵循安全、可靠、实用、经济、先进的原则,根据实际的应用环境、使用习惯、系统造价和施工、维护人员技术水平等条件选择,不必盲目求新、求贵,适用才是最好的。

思考题

1. 通常电力电缆有哪几种敷设方式? 各有何优缺点?
2. 电力电缆敷设施工中有哪几项要求?
3. 模塑法制作的电缆接头性能上有何特点? 为什么目前 35kV 交联聚乙烯电力电缆中间接头仍优选模塑法?
4. 6~10kV 中间接头为什么要切削应力锥? 绕包后为什么外层要包半导体带和金属屏蔽带?
5. 你所在的工作单位交联聚乙烯电力电缆用何种类型接头? 有何经验与教训?
6. 110kV XLPE 电力电缆户外终端有哪些类型? 各有何特点?

交联聚乙烯电力电缆 绝缘老化机理及监测

第一节 交联聚乙烯电力 电缆绝缘老化机理

国外应用交联聚乙烯电力电缆已有 30 多年的历史,我国近 20 年来 110kV 及以下的产品已能批量生产,可以预料在今后高压电力网中,将有更多的交联聚乙烯电力电缆线路出现。但是,这种电缆由于敷设环境的影响,在绝缘层中会产生水树,使其绝缘性能下降,因而在研究这种老化机理的同时,有必要在交联方法及选材方面采取相应的对策。

目前,因水树引起事故的原因,几乎都是电缆在制造、运输、保管、敷设过程中水分侵入电缆内部所致;或者由于在导体上使用以布带为基体的半导电屏蔽层,在毛刺突出处产生水树并伸延而导致绝缘击穿。实际上,绝缘老化的原因有两方面。

一、电气方面

1. 游离放电老化

这是在绝缘层与屏蔽层的空隙产生游离放电,而使绝缘受到侵蚀所造成的绝缘老化现象。不过在正常相电压下,游离放电一般不会发生,仅在电缆内部有缺陷时才会成为问题。

2. 树老化

所谓树,主要有电树、水树两种。电树是在局部高电场(绝缘与内半导电层的界面等)作用下,某些缺陷在绝缘层中呈现树枝状伸展,最终导致绝缘击穿。水树的形成与敷设环境有关,在有水分和电场共存的状态下,可分为从导体的内半导电层上产生的内导水树、从绝缘的外半导电层产生的外导水树、从绝缘层中

空隙等产生的蝴蝶结形水树 3 类。特别是从内半导电层上产生的内导水树，将使电缆的绝缘强度大幅度地降低。

图 5-1 所示为交联聚乙烯电缆绝缘层中产生水树的位置。

二、化学方面

化学老化是由敷设环境所引起的，如把电缆敷设在含有石油化学物质的地下而造成聚氯乙烯护套产生膨胀。有一种称为硫化的老化现象，对电缆绝缘影响最大。由于硫化物（硫化氢等）透过护套及绝缘层与电缆的铜导体产生化学反应，生成硫化铜和氧化铜等物质，这些物质在绝缘层中从内导一侧向护套一侧呈树枝状伸展，如同水树一样，这种老化现象称为化学树。

化学老化的程度也因油、药品的种类不同而异，但它对电缆的影响都是使组成电缆的材料膨胀、物理特性和电性能降低。

此外，还有物理老化、机械老化以及由于生物的侵蚀所引起的老化等。

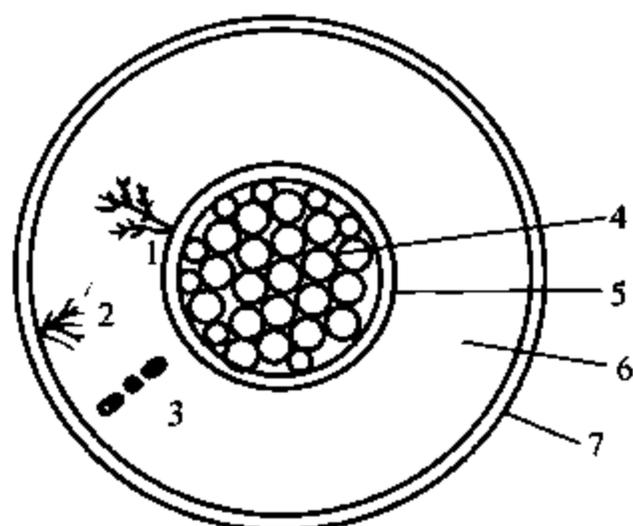


图 5-1 电缆绝缘层中产生水树的位置

- 1—内导水树；2—外导水树；
3—蝴蝶结形水树；4—导体；
5—内半导电层；6—绝缘；
7—外半导电层

第二节 交联聚乙烯电力电缆水树的形成和电缆特性的变化

一、水树的形成与发展

如前节所述，水树就是交联聚乙烯电缆在进水的情况下，由于电场的作用，使绝缘体内形成树枝的现象。迄今为止，还在对这方面进行大量的研究工作，目前已能确定的有：

- (1) 在水和电场同时存在的条件下发生水树。
- (2) 水树是由直径为数微米的水填满的空隙群所组成的。

(3) 即使在比较低的电场下也能发生水树。

(4) 绝缘中的杂质、半导体层的缺陷、空隙等高电场处，是引发水树的起点。

(5) 水树在直流电压作用下难于产生，但在交流电压作用下较易产生，高频电压也能促进水树的发生。

(6) 在高温水中（例如导体浸水）水树较易发生，而且也容易延伸。

(7) 水树在形成过程中，由于放电而观察不到脉冲现象。

(8) 发生水树的部位会产生机械变形。

基于上述初步结果，国外不少学者和专家提出了水树形成及发展的各种机理，但至今还没有一个统一的理论。其中具有代表性的论点可以归纳为如下几点：

(1) 认为绝缘体中水树的引发和发展是由麦克斯韦应力引起裂纹而造成的。

(2) 认为由于介质移动，使水进入绝缘体中，引起介质加热或焦耳加热而造成水树引发和发展。

(3) 认为由于电场作用，产生水凝集的热力学学说。

对水树引发和发展机理提出的各种设想，作为一个统一的理论还不成熟。水树的引发和发展不但非常缓慢，而且是微观现象，因此要使这些论点成为统一的理论还需要时间。

二、发生水树后电缆特性的变化

为了判断发生水树老化的电缆，必须先掌握在水树发生情况下，电缆显示出何种特性变化。

1. 介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 与水树的关系

图 5-2 所示为电缆内有半导体带和半导体层的 6kV 电压级交联聚乙烯电缆的水树长度与 $\tan\delta$ 的关系。由图 5-2 可见电缆绝缘 $\tan\delta$ 值随水树长度的增加而增大。例如当 $\tan\delta$ 为 1% 时，水树长度可能达到绝缘厚度的 50%。

图 5-3 所示为从线路上割下来的交联聚乙烯电缆中水树数量与 $\tan\delta$ 的关系，可见与水树长度关系一样，水树发生数增加，

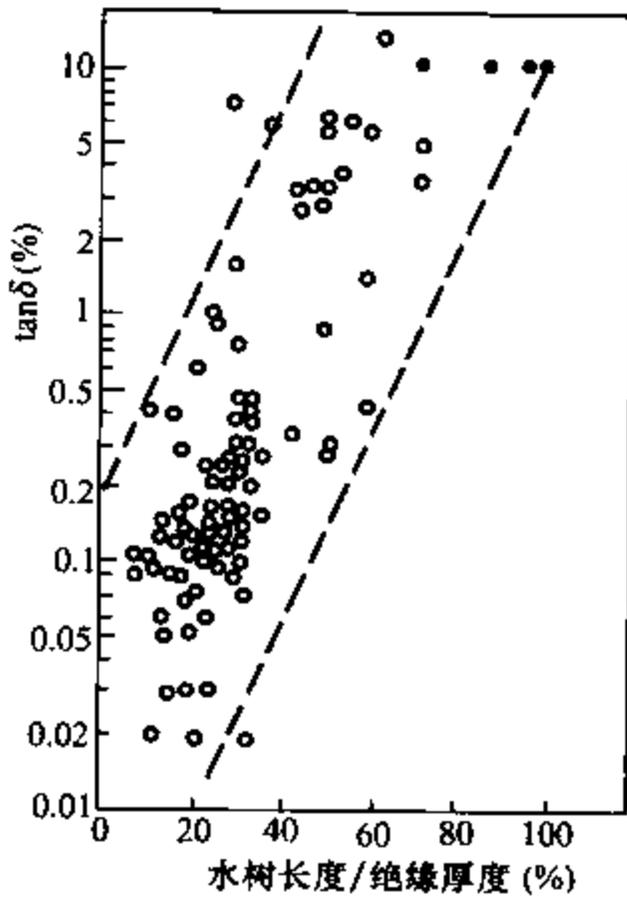


图 5-2 水树长度与 $\tan\delta$ 关系
(3.8kV 以下)

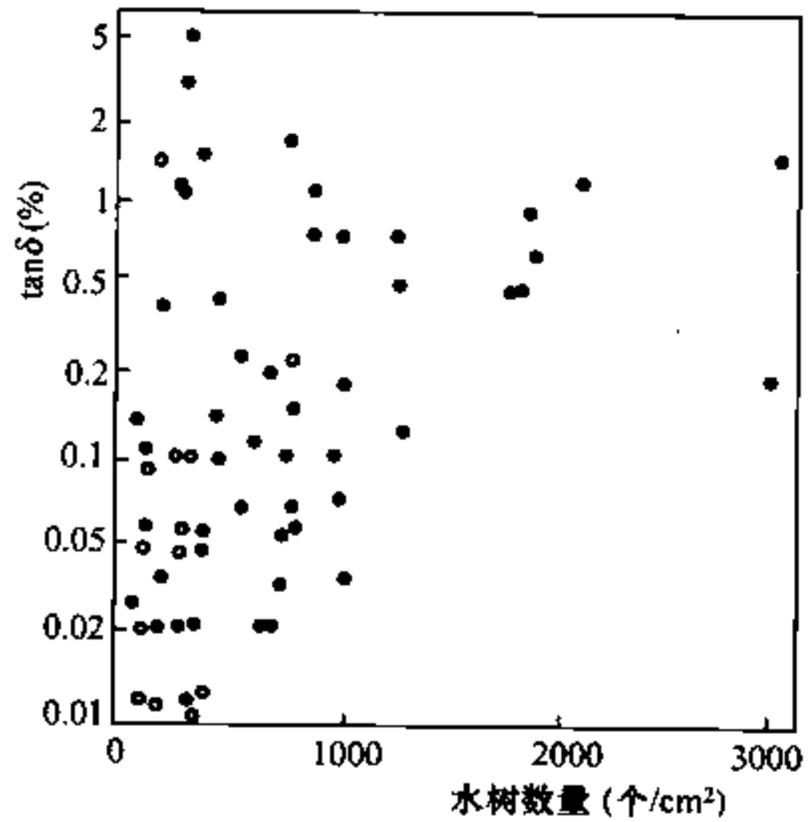


图 5-3 水树数量与 $\tan\delta$ 关系
(8.8kV 以下)

$\tan\delta$ 就增大。然而从图 5-3 中也可以看出，其数据是较分散的，这种分散性取决于水树发生部位的水量差、水树长度上的误差及电缆屏蔽层等因素。判断老化程度，必须考虑这种分散性。

2. 绝缘电阻与水树的关系

图 5-4 和图 5-5 所示为同种电缆的水树长度和绝缘电阻的关系。这里虽没有和 $\tan\delta$ 关系那样明显，但可以看出绝缘电阻与水树长度之间是相关的。

通常交联聚乙烯的体积电阻很大，不发生水树的交

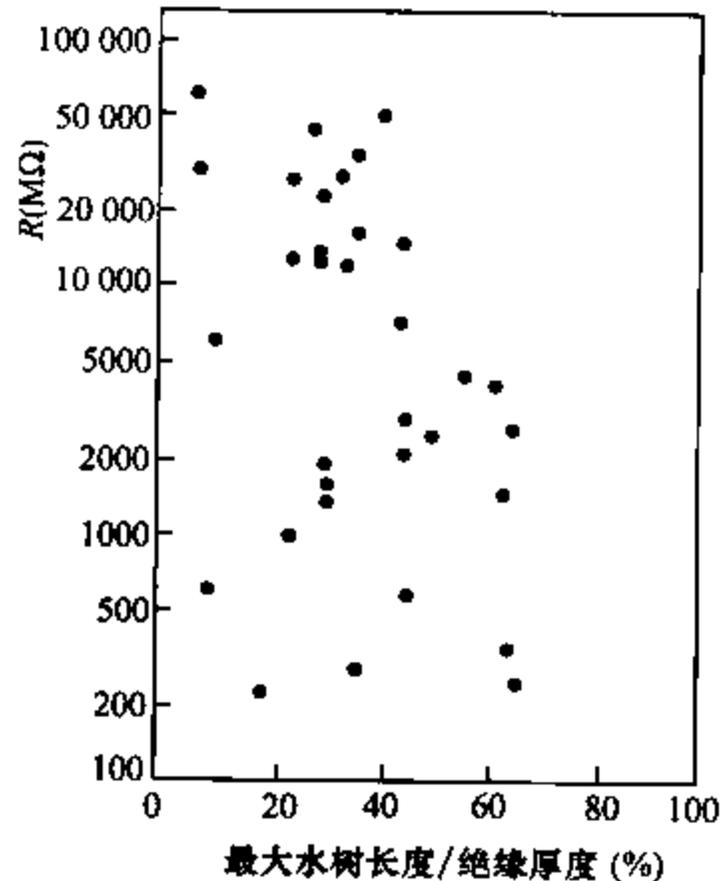


图 5-4 水树长度与绝缘电阻关系

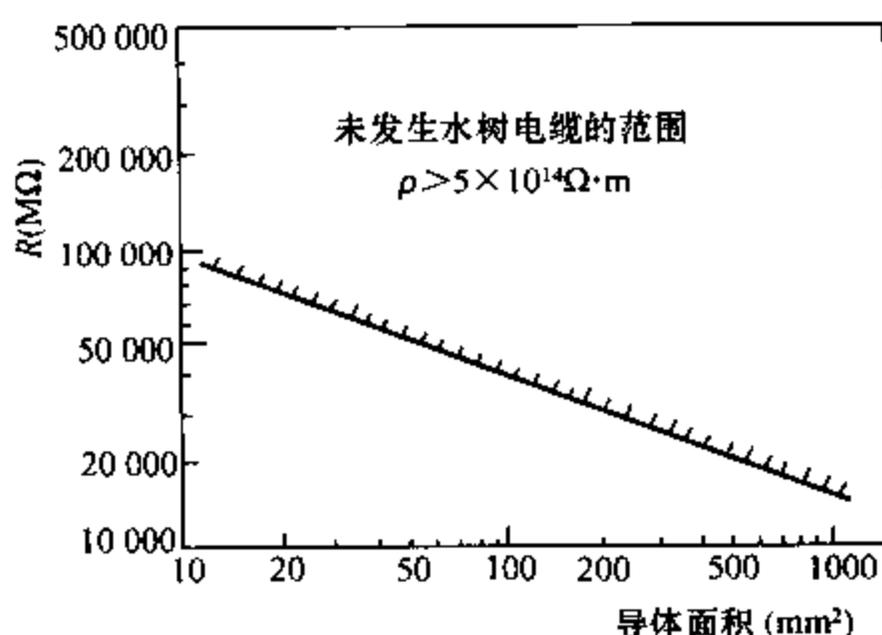


图 5-5 未发生水树的 3.6kV 电缆的绝缘电阻

联聚乙烯电缆绝缘电阻的范围如图 5-5 所示。而如图 5-4 所示那样绝缘电阻下降，可以认定是由水树引起的。

3. 击穿电压与水树的关系

图 5-6 所示为水树长度与交流电压击穿场强的关系。由图可见交流电压击穿场强随着水树长度增加而明显下降。图 5-7 所示为 $\tan\delta$ 与交流电压击穿场强的关系，如果 $\tan\delta$ 增大，击穿场强就显示出下降趋势。例如当 $\tan\delta$ 增加到 5% 时，交流电压击穿场强就下降到 2×10^6 V/m 左右。

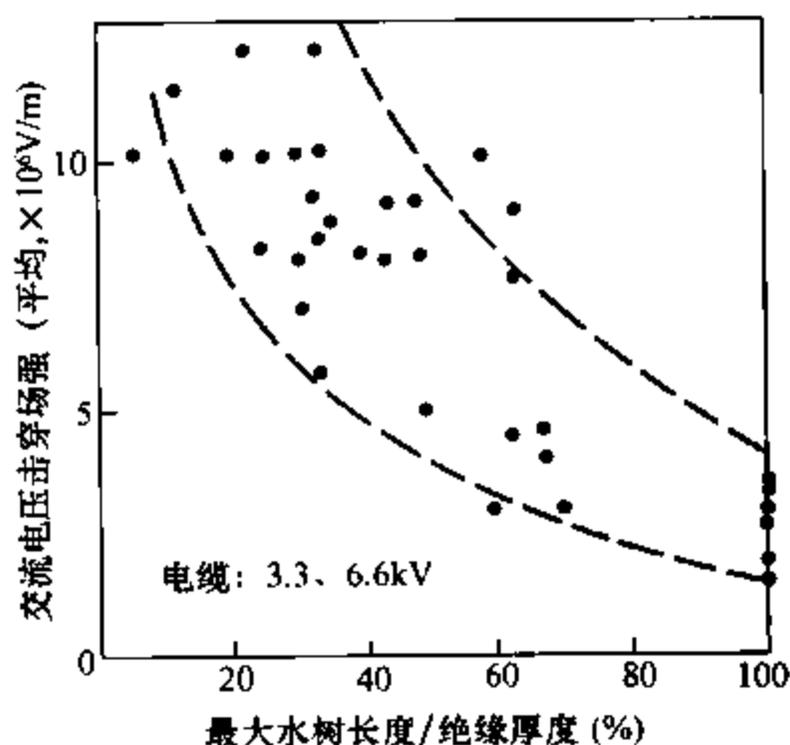
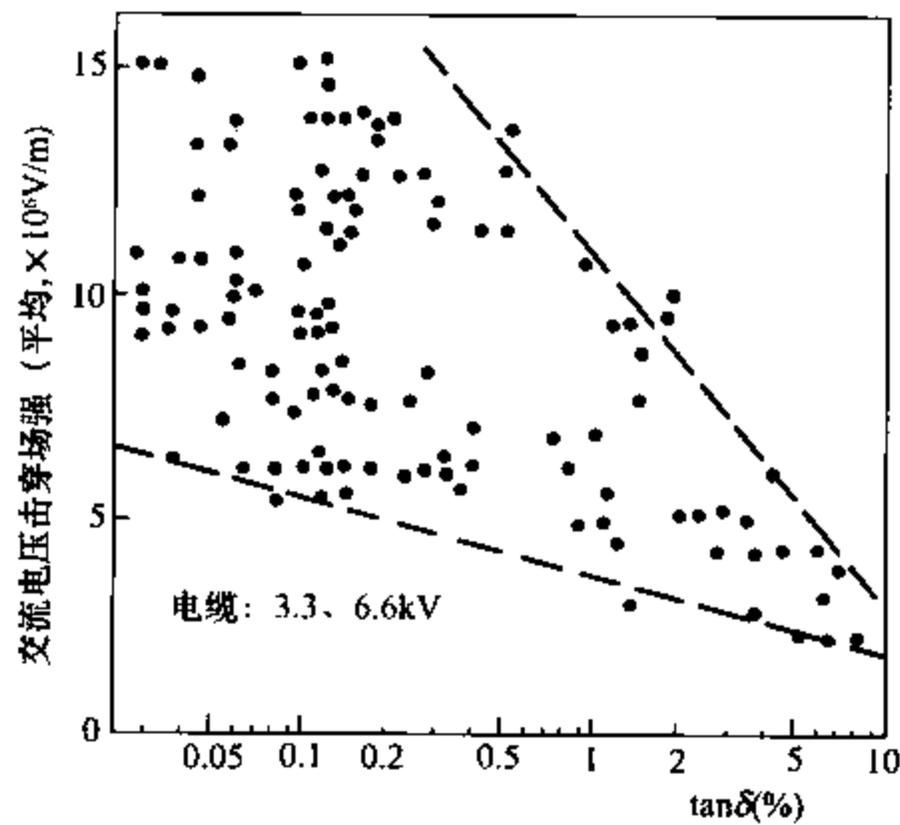


图 5-6 水树长度与交流电压击穿场强关系

图 5-7 $\tan\delta$ 值与交流电压击穿场强关系

三、国外交联聚乙烯电力电缆水树老化情况

以日本为例，该国在 1959 年开始采用 6kV 交联聚乙烯电缆，当时电缆制造采用湿式法交联工艺，1967 年就发生了水树老化问题。表 5-1 为关西电力公司 6kV 交联聚乙烯电力电缆历年来击穿相对应电缆缺陷的运行记录。

表 5-1 关西电力公司 6kV 交联聚乙烯电力电缆运行记录

电缆制造年份	缺陷或击穿年份	电缆击穿次数/电缆缺陷次数
1970~1974 (E-T 型电缆)	1985	10/181
	1986	7/73
	1987	4/32
1975 (E-E 绞合型电缆)	1985	16/65
	1986	12/46
	1987	9/43

从表 5-1 可以看出 E-E 型电缆（内外半导体层同时挤出）与 E-T 型电缆（仅内半导体层挤出）有区别，这表明 E-T 型电缆用外层半导体带的寿命比 E-E 型短，这是因为包带表面不光整所致。因此 6kV 级的交联聚乙烯电缆应用挤出外半导体层代替常规的半导体带。1987 年关西公司采用 E-E 型取代 E-T 型电缆。

此外,该公司还将 22kV 交联聚乙烯电缆割下来检查,发现很多由微孔和杂质导致的蝴蝶结状水树,很明显这些蝴蝶结状水树也会降低电缆寿命,见表 5-2。

表 5-2 22kV 交联聚乙烯电缆蝴蝶结状水树数量和长度

电缆规格	制造年份	割下年份	工频击穿电压(kV)	蝴蝶结状水树数量(个/cm)	蝴蝶结状水树最大长度(μm)
22kV 电缆 3 \times 400mm ²	1971	1987	50~100	2~3	1220
22kV 电缆 3 \times 100mm ²	1972	1987	40~80	4~10	1780

四、国内对交联聚乙烯电缆绝缘老化的研究

国内西安交通大学和武汉高压研究院对交联聚乙烯电缆树老化初步研究结果,也认定树老化是导致绝缘最后发生击穿的主要原因。通过大量人工加速老化试验表明,与国外研究结果基本相同,可将树枝分成 3 类。第一类称为电树枝,其特点是树枝放电是从材料不连续点或界面引发出来的,树枝管连续,内空而没有水分,管壁上有交联聚乙烯因放电而分解产生的碳粒痕迹,分枝少而清晰,如图 5-8 (a) 所示。第二类称为电化树枝,它的产生原因基本上与电树枝相同,只不过在空隙中渗进了其他化学溶液。当导体材料起化学反应,其生成物(如亚硫酸铜、硫化物溶液等)在电场作用下蔓延伸入绝缘层形成树枝状物,称为电化树枝。这种树枝呈棕褐色,它在比形成电树枝低得多的场强下即可产生,如图 5-8 (b) 所示。第三类称为水树枝,它是由水分侵入交联绝缘层中,在电场作用下形成的树枝状物。它的特点是引发树枝的空隙中有水分,也是在比引发电树枝低得多的电场强度下即可发生。树枝管有的大体不连续,内聚凝有水分,主干树枝较粗,分枝多而且密集,如图 5-8 (c) 所示。

上海电业局电缆工程处对早期制造的国产交联聚乙烯电缆进

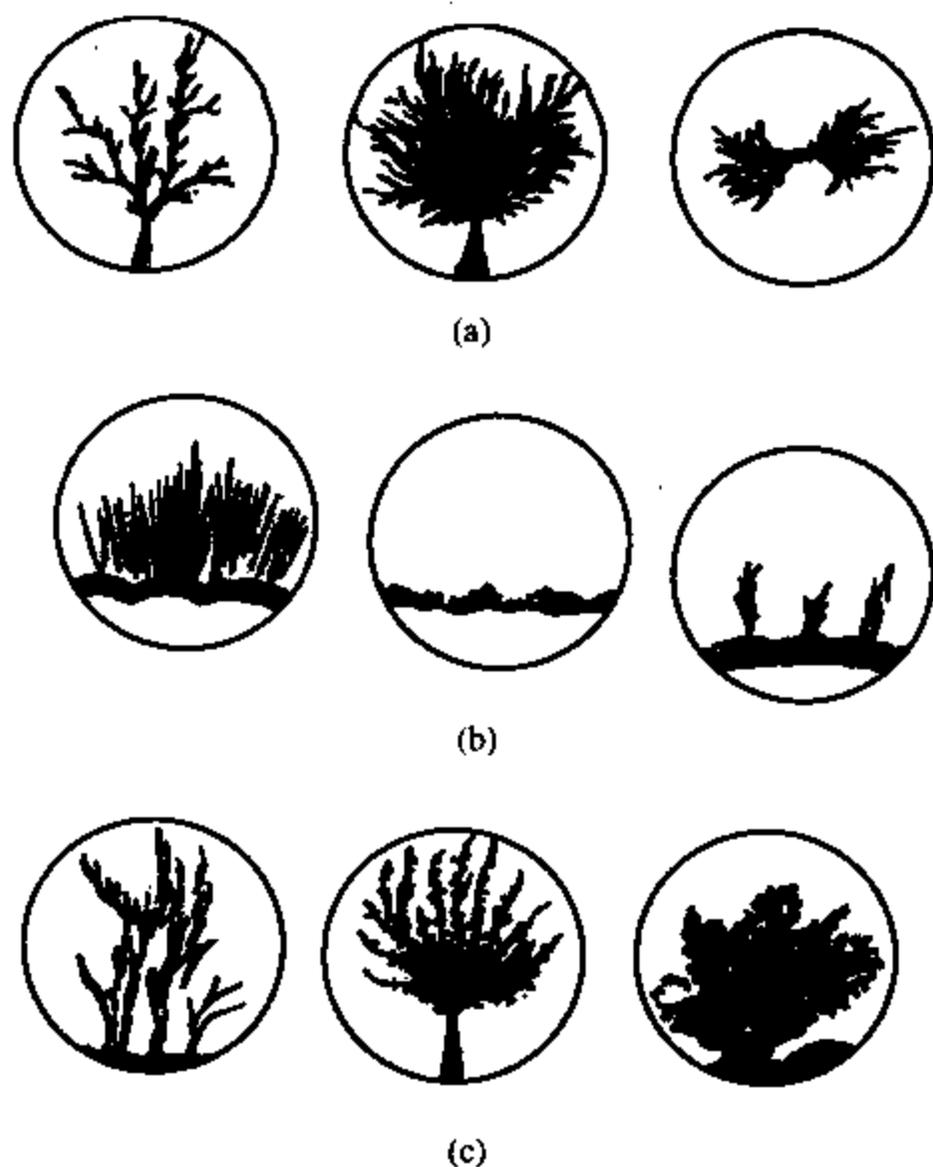


图 5-8 绝缘层中的各种树枝
(a) 电树枝；(b) 电化树枝；(c) 水树枝

行检测后发现，由于其绝大部分是直埋敷设，投入运行后极易产生水树枝。对故障电缆进行切片后用显微镜摄影检查，均发现不同程度的树枝。从国外引进的 110kV 交联聚乙烯电缆，由于投运时间不长，除电缆接头施工质量有缺陷造成击穿事故外，电缆本体因水树老化导致击穿事故的尚未发现。但这并不能说明无水树老化问题，因为水树老化有一个缓慢的发展过程，发展到何种程度才导致绝缘损坏和击穿，尚需进一步研究。

● 第三节 水树老化的判断方法和离线监测

一、水树老化的判断标准

可以通过测定敷设电缆的 $\tan\delta$ 和绝缘电阻值来判断电缆是

否产生水树老化,但对这些测定值要有一个合适的判断老化标准,而目前国内外尚无一个公认的标准。表 5-3 和表 5-4 仅是日本某些文献提出的标准,这些标准只适用于 3.6kV 电压等级电缆,对于 22kV 和 33kV 电压等级的电缆,由于其工作电场强度很高,可以预料标准将要求更加严格。为制定这些判断标准,必须收集更多的数据,以供深入研究。

表 5-3 水树老化判断标准

项目	等级	标准	判定
tanδ (%)	a	<0.2	正常
	b	0.2~0.5	发生水树
	c	>5	有大量水树,耐压显著下降
R ⁰ (MΩ)	a	>10 000	正常
	b	1000~10 000	存在贯穿性水树
	c	<1000 或电流波形异常	贯穿性水树大量增加,耐压显著下降
综合判定	A	全部是 a	正常
	B	ab、ba、bb	需要注意并增加测量次数
	C	全部是 c	不良,应尽快更换电缆

① R 值是指按 1km 长电缆测量的结果。

二、现场离线测定方法

(一) 电缆绝缘介质损耗角正切值 tanδ 的测定

测定电缆绝缘层的 tanδ 的基本电路如图 5-9 所示,试验接

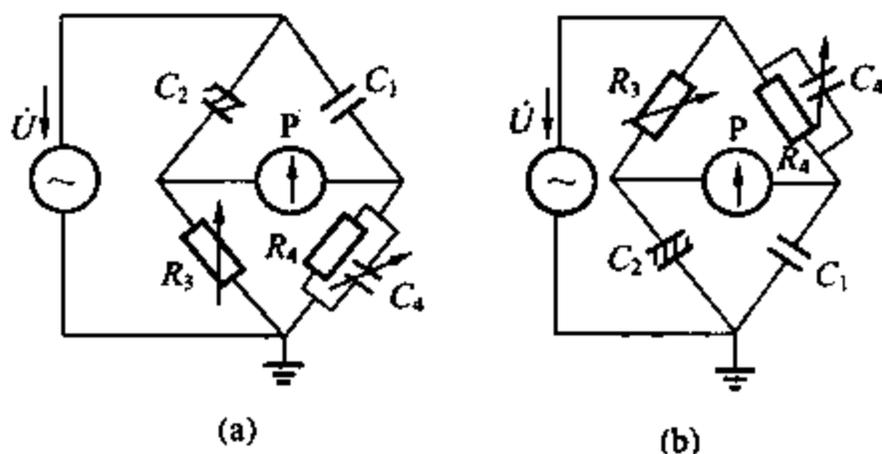


图 5-9 测定电缆 tanδ 的基本电路

(a) 正接线; (b) 反接线

线有高压交流电桥正接和反接两种。由图 5-9 可知，两种接线是有区别的。正接线必须将电缆垫起，此时电桥调节臂处于低电位，操作安全。但对于已敷设好的电缆，其金属护套已有一端接地，那么就需采用反接线。这时电桥的调节臂处于高电位，操作人员必须站在绝缘平台上。

此外，在现场测试时，还应注意防止外界电场的干扰。通常可采用下列方法。

1. 屏蔽法

在被试电缆高压终端头加屏蔽，并可将此屏蔽与电桥屏蔽相连，以消除电场干扰。

2. 采用移相电源

如图 5-10 所示，由于干扰电流 \dot{I}' 相位是不变的，所以调节电源电压 \dot{U} 的相位， \dot{I}_x 的相位便相应地变化，于是可以改变 \dot{I}' 和 \dot{I}_x 的夹角。当调节移相器使它们的夹角为零时，前述 δ' 即等于 δ ，如图 5-10 所示。设在开关 S 正、反两种不同位置下调节电桥平衡时所读得的数值分别为 C_4 、 R'_3 和 C_4 、 R''_3 ，则该电缆介质损耗角正切值为

$$\tan\delta = \omega C_4 R_4 \quad (5-1)$$

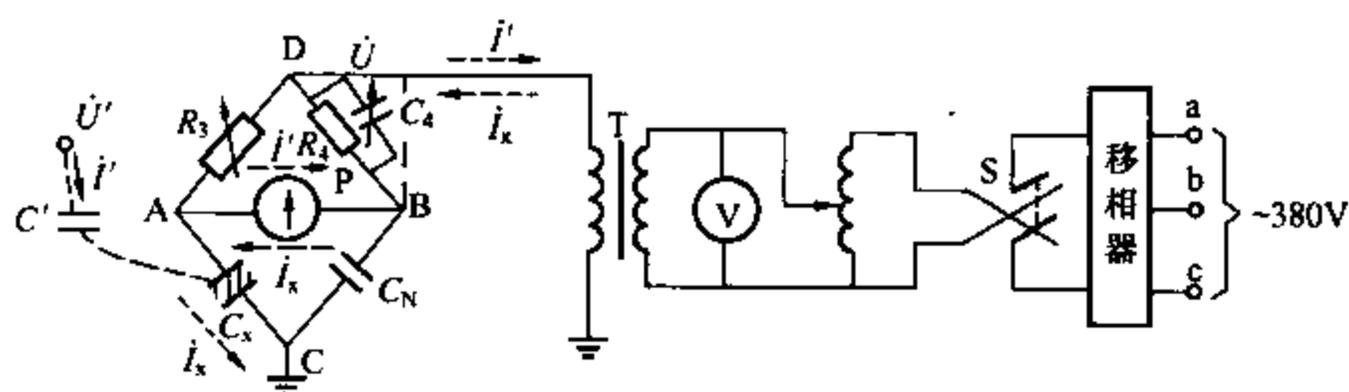


图 5-10 用移相电源消除干扰

电桥两次电容测量值为

$$C'_x = C_N \frac{R_4}{R'_3} \times \frac{1}{1 + (\tan\delta)^2} \approx C_N \frac{R_4}{R'_3}$$

$$C''_x = C_N \frac{R_4}{R''_3} \times \frac{1}{1 + (\tan\delta)^2} \approx C_N \frac{R_4}{R''_3}$$

电缆实际电容值为

$$C_x = \frac{C'_x + C''_x}{2} \approx \frac{C_N R_4}{2} \left(\frac{1}{R'_3} + \frac{1}{R''_3} \right) \quad (5-2)$$

找出相应于夹角为零的移相器位置方法如下：在图 5-10 中将 B 与 D 短接，并将 R_3 放在最大，此时干扰电流 \dot{I}' 和由电源供给的被试品电流 \dot{I}_x 均流过检流计 P，它们的路径如图 5-10 中虚线箭头所示。调节移相电源电压的初相角和幅值，使检流计指示为最小，此时夹角接近零。正式开始测量前，先退去电源电压，保持移相电源相位，拆除 BD 短路线，然后将电压升至所需电压值，若 S 在正、反位置下的 $\tan\delta$ 值相等，则说明移相效果良好。用移相电源消除干扰的相量图如 5-11 所示。

116

3. 换相倒相法

测量时将电源正、反接各测 1 次。由于干扰电流 \dot{I}' 的相位是不变的，分析时可认为电桥电源的相位不变，即 \dot{I}'_x 的相位不变，而 \dot{I}' 作 180° 的反相，如图 5-12 所示。由图可知，正、反两次测得的介质损耗角正切值各为

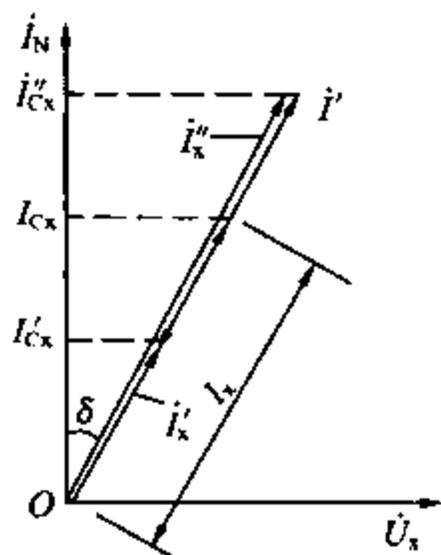


图 5-11 用移相电源消除干扰的相量图

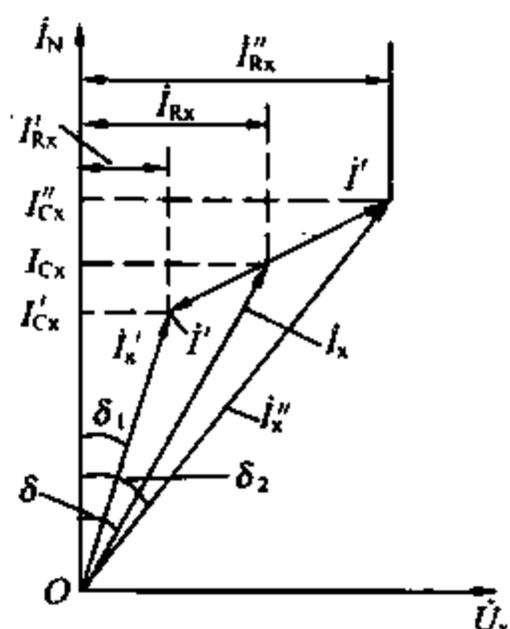


图 5-12 用倒相法消除干扰的相量图

$$\tan\delta_1 = \frac{I'_{Rx}}{I'_{Cx}}, \tan\delta_2 = \frac{I''_{Rx}}{I''_{Cx}}$$

实际电缆的 $\tan\delta$ 为

$$\begin{aligned} \tan\delta &= \frac{I_{Rx}}{I_{Cx}} = \frac{\frac{1}{2}(I'_{Rx} + I''_{Rx})}{\frac{1}{2}(I'_{Cx} + I''_{Cx})} \\ &= \frac{I'_{Cx}\tan\delta_1 + I''_{Cx}\tan\delta_2}{I'_{Cx} + I''_{Cx}} = \frac{C'_x\tan\delta_1 + C''_x\tan\delta_2}{C'_x + C''_x} \quad (5-3) \end{aligned}$$

两次测得的电缆电容值各为

$$\left. \begin{aligned} C'_x &= \frac{I'_{Cx}}{U_x\omega} = C_N \frac{R_4}{R'_3} \times \frac{1}{1 + (\tan\delta_1)^2} \\ C''_x &= \frac{I''_{Cx}}{U_x\omega} = C_N \frac{R_4}{R''_3} \times \frac{1}{1 + (\tan\delta_2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (5-4)$$

实际电缆的电容为

$$C_x = \frac{C'_x + C''_x}{2} \quad (5-5)$$

由式 (5-3) 可知, 当 C'_x 与 C''_x 相差不大或 $\tan\delta_1$ 与 $\tan\delta_2$ 相差不多时, 可得

$$\tan\delta \approx \frac{\tan\delta_1 + \tan\delta_2}{2} \quad (5-6)$$

需要指出的是, 当干扰比较强烈时, δ_1 会变为负角 (如图 5-13 所示)。在进行 $\tan\delta_1$ 测量时, 上述电桥线路将无法平衡。

原因是 \dot{U}_{DB} 无法调节到等于 \dot{U}_{DA} , 它们不在同一象限内。为了测

出负角 δ_1 , 可以把 C_4 由与 R_4 并联切换到与 R_3 并联, 如图 5-14 (a)

所示。这样调节 R_3 、 C_4 , 可使 \dot{U}_{DA} 沿顺时针方向转到 \dot{I}_N 轴, 从而使电桥达到平衡, 得到 R'_3 及 C'_4 。电桥平衡后的相量图如图 5-14(b) 所示, 由图可知

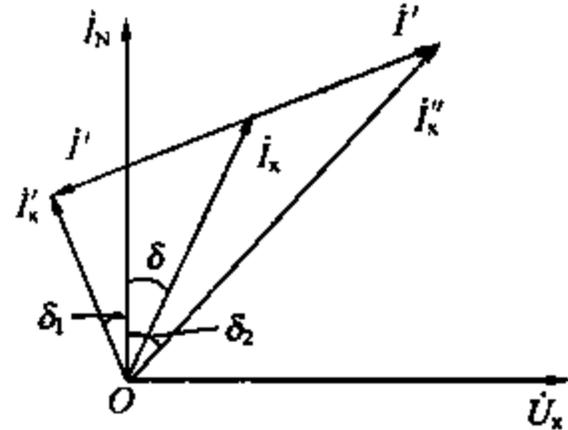


图 5-13 电场干扰比较强烈时的相量图

$$\tan\delta_1 = \frac{I'_{C4}}{I'_{R3}} = \omega C'_4 R'_3 \quad (5-7)$$

由于 $U_{DA} = U_{DB}$, 可得

$$I'_{R3} R'_3 = I_N R_4$$

因而
$$C_x = \frac{I'_{C_x}}{U_x \omega} = \frac{I'_{R3}}{U_x \omega} = \frac{I_N}{U_x \omega} \times \frac{R_4}{R'_3} = C_4 \frac{R_4}{R'_3}$$

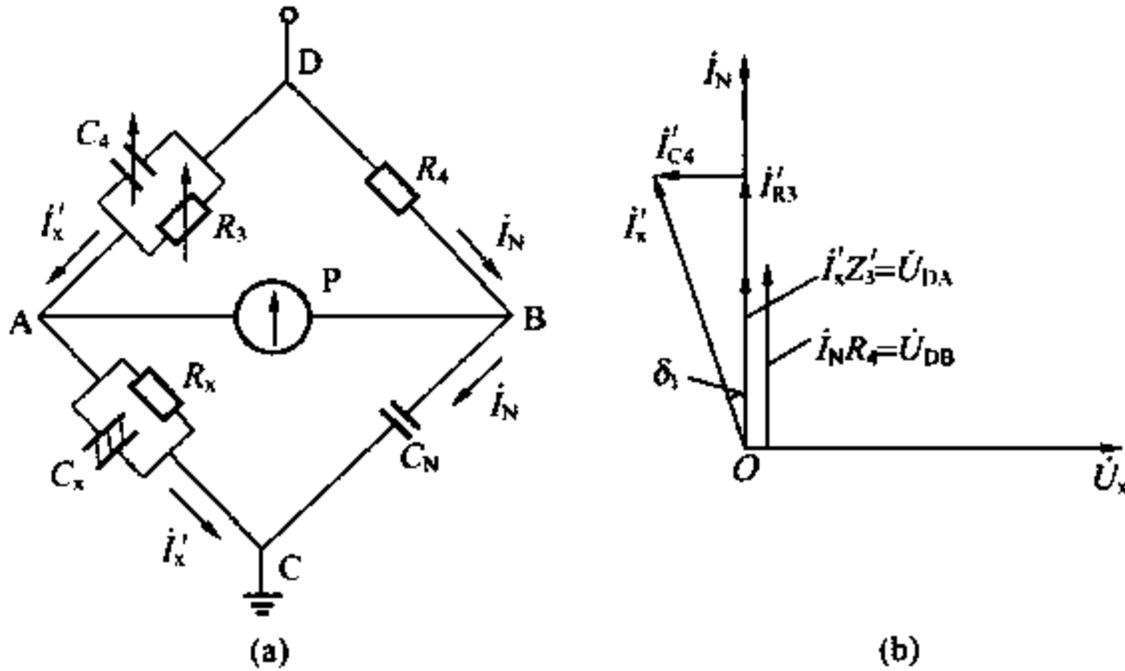


图 5-14 切换 C_4 与 R_3 并联调节电桥平衡
(a) 电路图; (b) 相量图

由图 5-13 可得实际的电缆介质损耗角正切值为

$$\tan\delta = \frac{(I''_{Rx} - I'_{Rx})/2}{(I'_{Cx} + I''_{Cx})/2} = \frac{C'_x \tan\delta_2 - C'_x \tan\delta_1}{C'_x + C''_x} \quad (5-8)$$

其中

$$C'_x = C_N \frac{R_4}{R'_3}, C''_x = C_N \frac{R_4}{R''_3}$$

实际电缆的电容值为

$$C_x = \frac{C'_x + C''_x}{2}$$

在利用倒相法测 $\tan\delta$ 时, 有时可更换试验电源所在相线, 使倒相前后测得的两个 $\tan\delta$ 值比较接近。

(二) 电缆绝缘电阻的测定

可以采用电动绝缘电阻表测定绝缘电阻 $R_{60''}$ 、 $R_{10''}$ 和 $R_{10'}$ 、

$R_{1'}$, 吸收比 $K = \frac{R_{60'}}{R_{10'}} > 1.3$, 或极化系数 $P_1 = \frac{R_{10'}}{R_{1'}} > 1.5$ 表示电缆绝缘合格。

● 第四节 交联聚乙烯电力电缆 绝缘在线监测

交联聚乙烯电力电缆在国外已使用 30 多年了, 但由于在绝缘中发生了水树而使其可靠性产生了问题, 这些问题需尽快解决。从电缆厂来说, 抑制水树引发的基本方法可归纳为如下 4 种:

- (1) 消除水的存在, 将蒸汽交联改为干式交联;
- (2) 消除局部集中电场, 将材料超净化处理;
- (3) 采用抑制水树的绝缘材料;
- (4) 同时挤出内、外半导体层, 减少绝缘中的微孔和杂质。

对运行部门来说, 应及时掌握电缆水树老化的状态, 定期监测电缆绝缘介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 和绝缘电阻, 但是这两种方法都不是全面的。例如绝缘电阻法不能检测出究竟有多少水树产生, 而介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 法则只是表明平均的老化。而且这两种方法都需停电后才能进行, 并需要将电缆与母线设备断开, 工作比较麻烦, 故需要采用在线监测。现介绍日本 66kV 及以下 XLPE 电缆中监测时使用的几种方法, 供国内运行部门参考选用。

一、叠加直流电压法

这种方法是在带电的高压电缆上加入一个约 50V 的直流电压, 通过读取流过电缆绝缘层的泄漏电流来测定电缆的绝缘电阻, 由此来判断电缆的老化情况。按叠加直流电压的方式不同, 又可分为以下 3 种。

1. 采用三相星形的电抗器

在高压配电母线上任意地点设置 1 组柱上电抗器, 如图 5-15 所示。通过附加的直流电源施加一直流电压 (25~50V) 到该电

抗器的中性点上,即可测出从电缆接地线上流出的微直流。本装置具有以下几个特点。

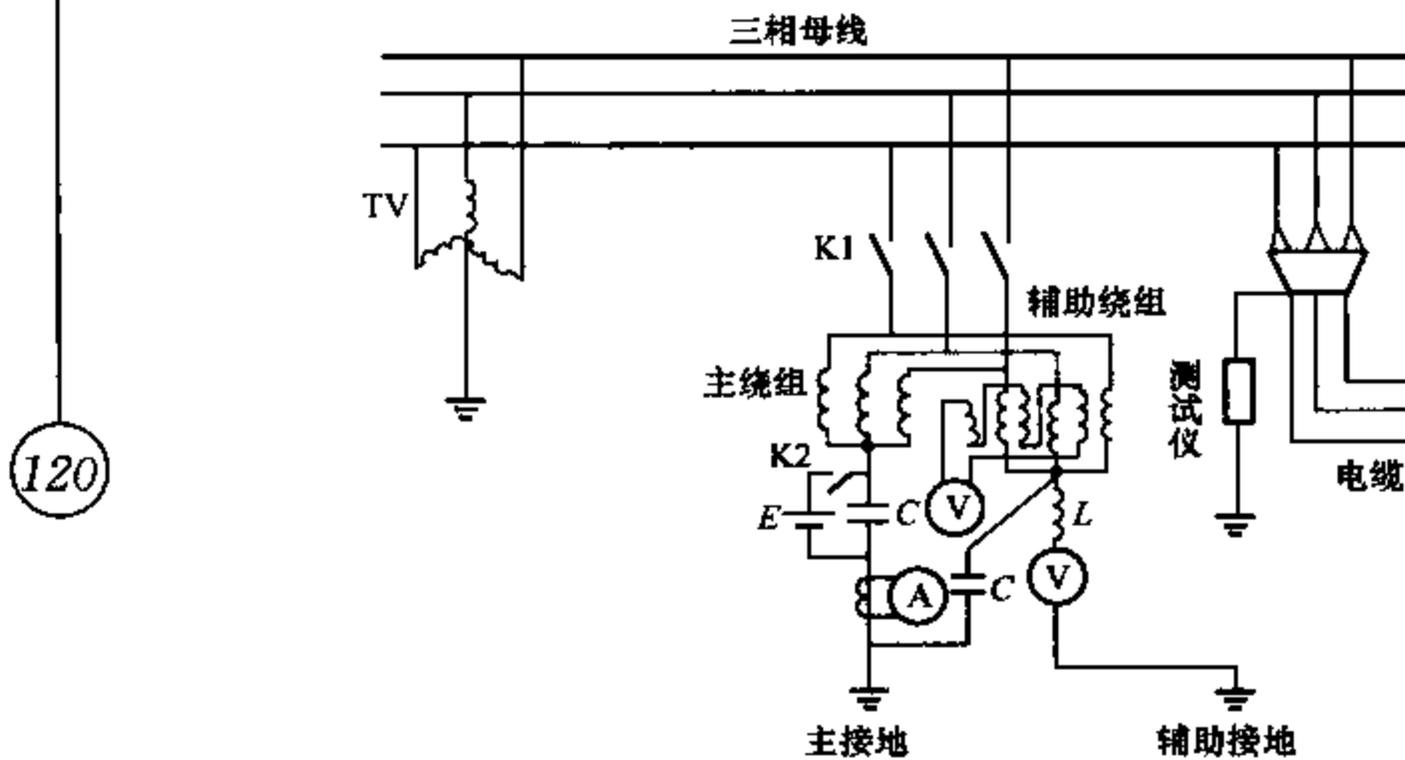


图 5-15 利用星形电抗器测量电缆绝缘电阻

(1) 采用三相星形的电抗器(对交流为高阻抗,对直流为低阻抗),并在电抗器的接地回路内串入一 LC 并联谐振回路,即该电路对工频交流的阻抗很高,而对直流的阻抗却很低,使电抗器对交流电压有很高的阻抗,而直流电压可容易地叠加进去。

(2) 对配电线路的继电保护装置可靠性没有影响。

(3) 本装置不仅能对电缆主绝缘进行高精度地测量,而且对护层绝缘也能进行监测。

具体测试方法如下:

(1) 将直流电源的输出电压(50V)通过电抗器加到高压配电线路的母线上。

(2) 在被测电缆屏蔽引出的电缆接地线与接地体之间接入绝缘电阻测试仪。

(3) 测试仪内有微直流放大器、 $4\frac{1}{2}$ 位显示器,能读取加入直流电压后通过电缆绝缘层的泄漏电流值。

(4) 如果电缆金属护套两端都接地,测试前也需将另一端接

地线拆除或改为经大电容 ($50\mu\text{F}$) 接地。

绝缘老化监测的判定基准及其对策见表 5-4。

表 5-4 绝缘老化监测的判定基准及其对策

项目	电缆主绝缘电阻 ($\text{M}\Omega$)	电缆护层绝缘电阻 ($\text{k}\Omega$)
判定基准	>1000 , 良 $100\sim 1000$, 轻注意 $10\sim 100$, 重注意 <10 , 不良	>1000 , 良 <1000 , 不良
对策	轻、重注意: 需继续进行定期检查监测 不良: 需更换电缆	

2. 利用变电站中的高压电压互感器

如图 5-16 所示, $6\sim 35\text{kV}$ 配电网一般都接有电磁式电压互感器 (TV) 作为接地故障检测用。其中 TV 的中性点 N1 是直接接地的, 此外电缆金属护套 N2 也是接地的。当利用本装置进行测量时, N1 和 N2 分别切换到通过电容 C_1 和 C_2 接地, 因 C_1 和 C_2 对直流来说为与大地绝缘, 而对交流来说为经低阻抗接地。当直流电压 E 在 N1 注入时, 在母线上流过泄漏电流 I_1 而在电

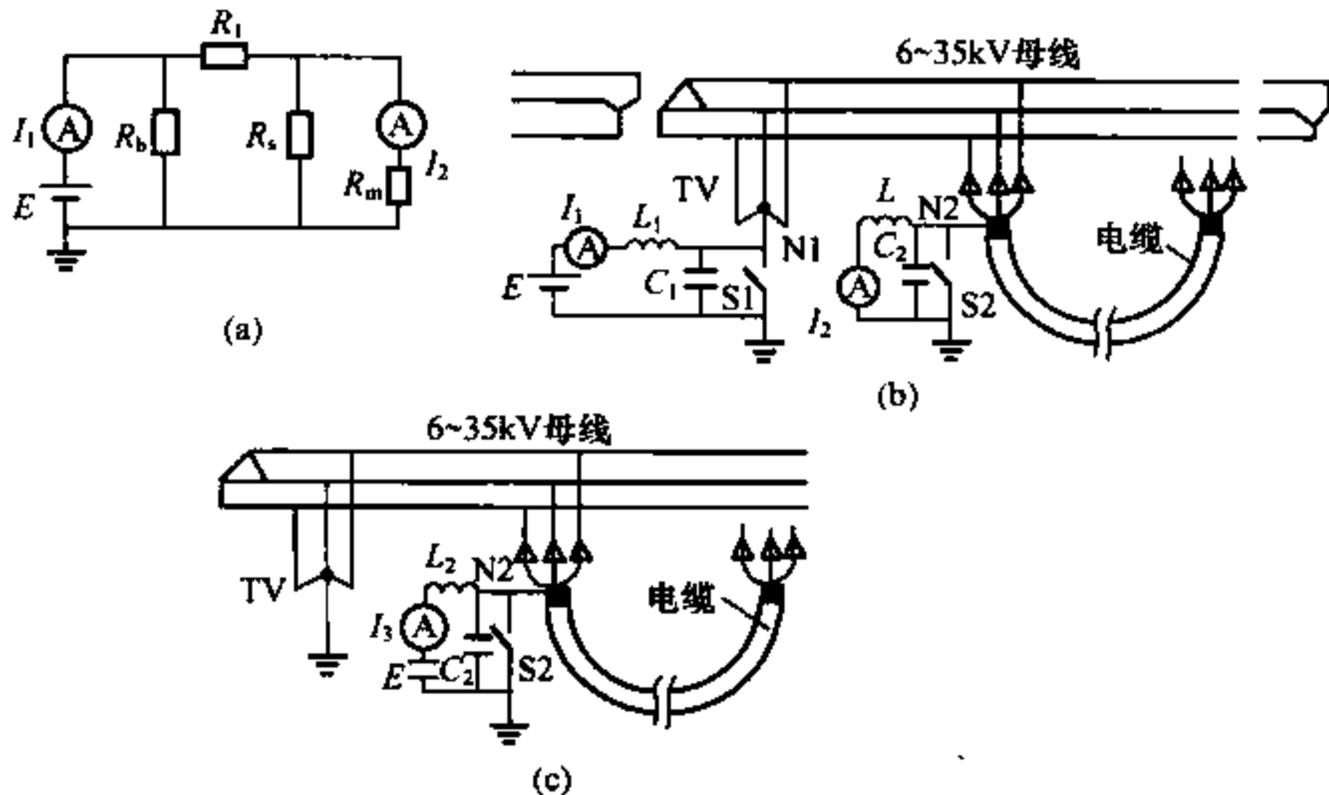


图 5-16 利用高压电压互感器监测电缆绝缘电阻

(a) 等值电路; (b) 主绝缘测量回路; (c) 护层绝缘测量回路

缆绝缘层上流过泄漏电流 I_2 ，可分别算出母线和电缆绝缘层的绝缘电阻，或采用单片机直接显示出绝缘电阻兆欧值。

用图 5-16 (c) 所示的电路测量护层绝缘电阻时，将电缆金属护套 N2 从直接接地切换到经电容器 C_2 接地，由于直流电压 E 的作用，在电缆护层上流过泄漏电流 I_3 ，即可求出护层绝缘电阻或直接显示出绝缘电阻值。

测量时由于 TV 中性点接入 1 个电阻和电容，使其接地阻抗增大，下面分析一下这样是否会对 TV 保护接地故障的灵敏度产生影响。

122

图 5-17 所示为系统发生单相接地故障时的系统接线图以及接入 R_0 、 C_0 前后的等值电路图。 \dot{U} 和 \dot{U}' 分别是接入前后 R' 上的电压 (R' 是 TV 二次回路的电阻换算到一次侧的值)，当忽略高压母线对地电容 C 和绝缘电阻 r 及故障点电阻 R_g 时， U 与 U' 两者关系为

$$\dot{U}' = \frac{\omega^2 C_0^2 R' (R' + R_0) + j\omega C_0 R' \dot{U}}{1 + \omega^2 C_0^2 (R' + R_0)^2} \dot{U} \quad (5-9)$$

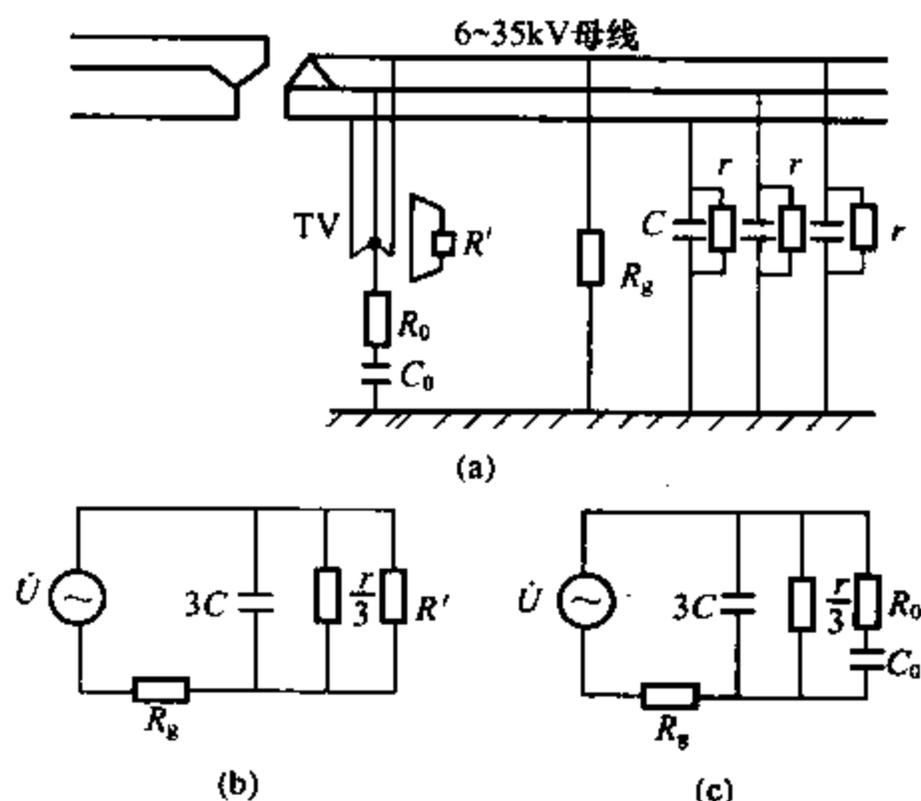


图 5-17 单相接地故障等值回路

(a) 系统示意图；(b) R_0 、 C_0 接入前的等值电路；

(c) R_0 、 C_0 接入后的等值电路

在使用转盘式继电器的情况下，这个电压值和 $\cos\varphi$ 所受到的影响可用 α 表示，即

$$\alpha = \frac{R'}{\sqrt{\frac{1}{\omega^2 C_0^2} + (R' + R_0)^2}} \cos \left(\tan^{-1} \frac{\frac{1}{\omega C_0}}{R' + R_0} \right) \quad (5-10)$$

从式 (5-10) 可看出，对实际系统而言 $\alpha > 0.95$ ，即影响程度小于 5%。

3. 在中性点经消弧线圈或小电阻接地系统中接入恒流源

对于 35kV 及以下中性点经消弧线圈或小电阻接地系统，不可能对电源变压器、发电机的中性点加入大电容对直流绝缘，原因是包含能量较大状态下发生串联谐振危险性极大。如加上抑制电阻，所需的接地电流就通不过去。因此采用如图 5-18 所示的接线方法。

接入低电阻以免接地电流降低，同时从恒流源输送出电流以便在低电阻两端产生所需的直流电压。例如

R_{L1} 为 5Ω ，当输送出 10A 直流电流时就等于对高压系统叠加了 50V 直流电压。因此合上 S1 后中性点 N 依然以低电阻连接到大地上，中性点也不会浮起，并且不会发生谐振。

二、带电测量电缆的微直流分量法

这是近几年来国外新开发的绝缘老化在线监测技术，其装置工作原理为（如图 5-19 所示）：从运行中的交联聚乙烯电缆的导体到屏蔽铜带间产生的感应信号电流，流进电缆接地回路中用低通滤波器和直流电流测定器组合成的装置，测量由电缆水树而产生的微直流成分，并确定其大小和极性关系。图 5-20 所示为电

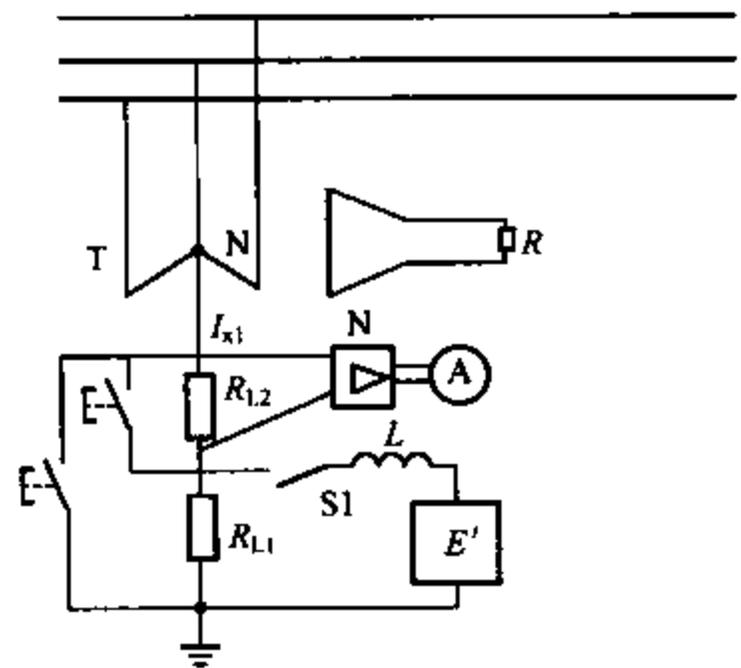


图 5-18 在中性点经小电阻接地系统上叠加直流电压

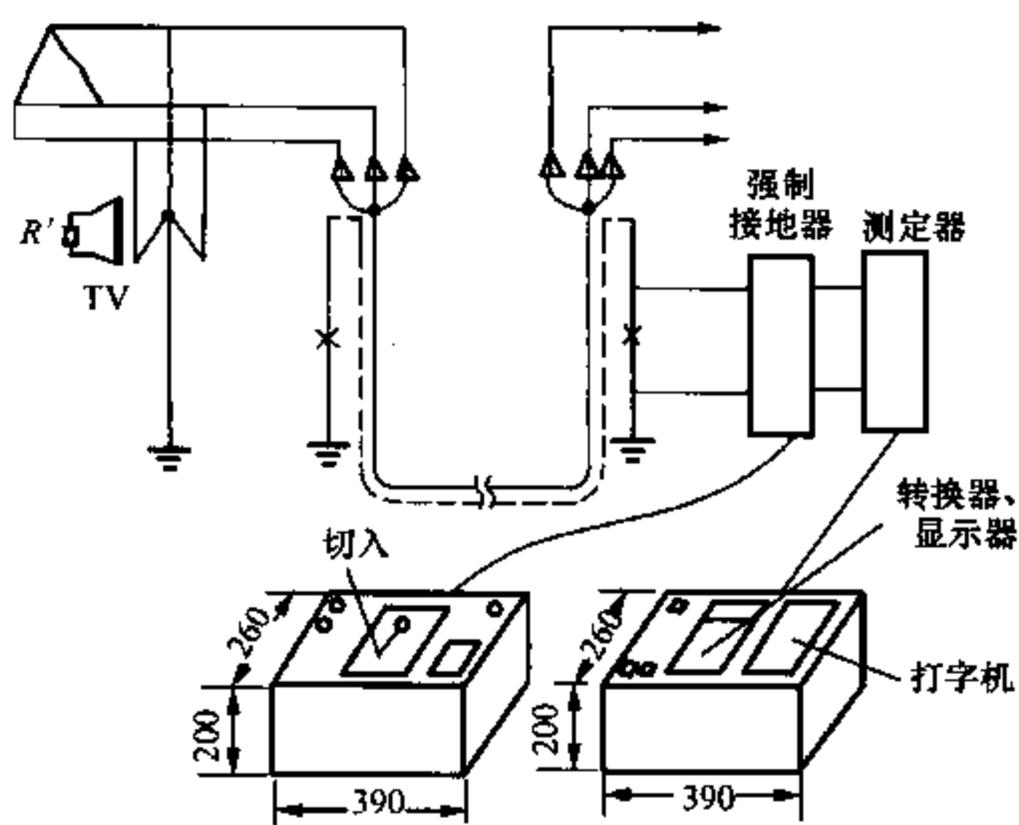


图 5-19 微直流分量法装置工作原理

缆的宏观模拟图形，它为针—平板电极结构，此结构一般有整流

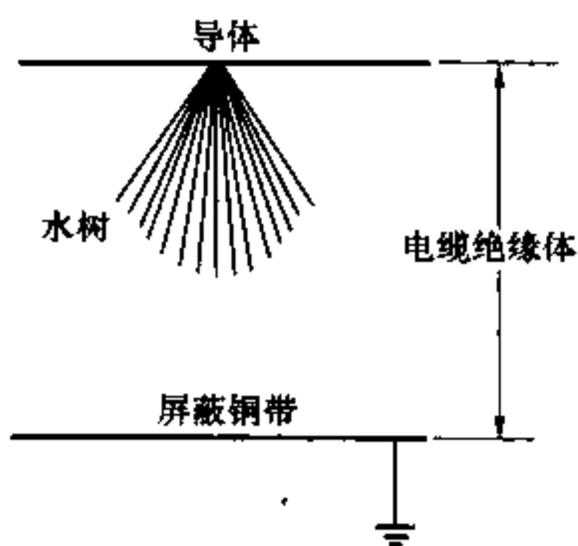


图 5-20 电缆宏观模拟图形

作用。如图 5-21 所示，从导体到屏蔽铜带的感应电流，用其发生直流成分的大小判明水树老化，另外通过极性来判断水树种类，见表 5-5。

上述微直流分量法的特点是：

- ①测试只是在屏蔽铜带和接地极之间进行，不触及高压；
- ②不需直流电源。但是要求电缆外护层绝缘电阻较高时才能测出此直流分量。

表 5-6 也列出了绝缘老化的判断标准。

表 5-5 直流成分与水树的关系

水 树 种 类	外 导 树	内 导 树
针电极侧	屏蔽铜带	导体
平板电极侧	导体	屏蔽铜带
直流成分	正极性	负极性

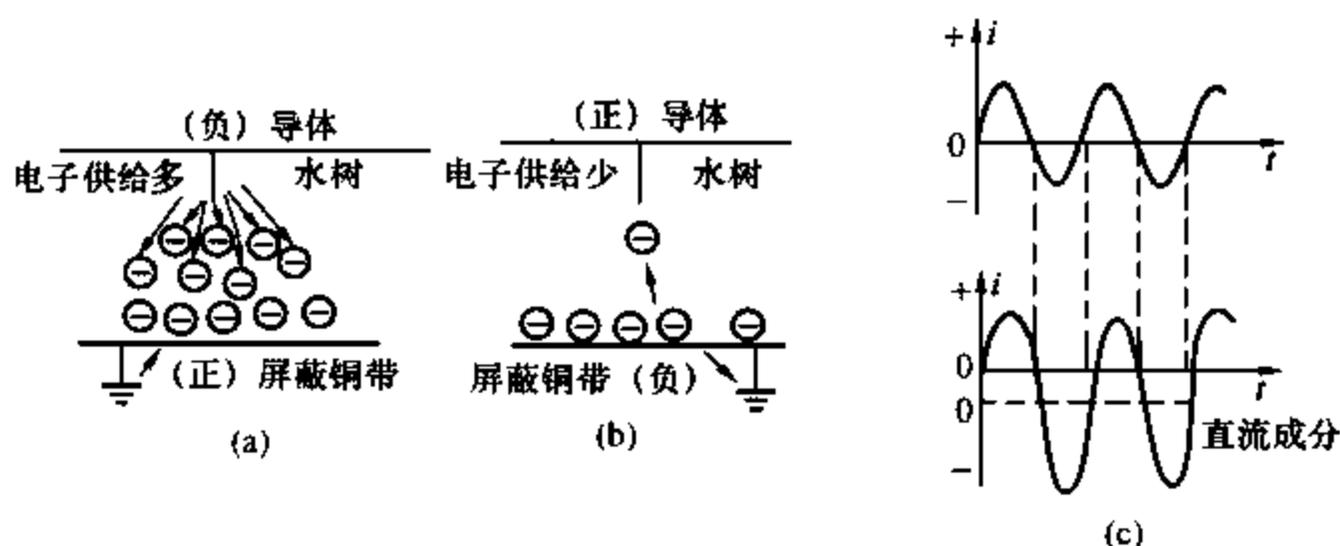


图 5-21 直流成分产生的分析

(a) 导体电位为负；(b) 导体电位为正；(c) 电流波形图

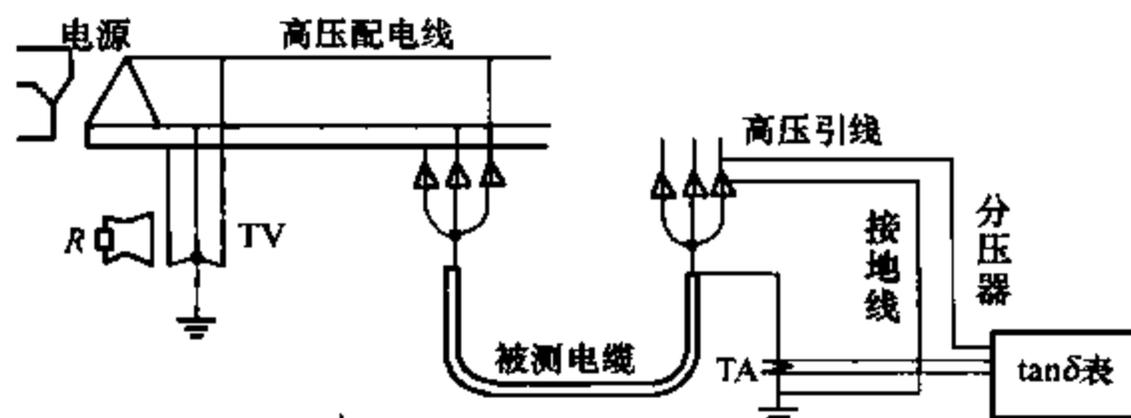
表 5-6 绝缘老化判断标准

直流成分 (nA)	判断
<1	良
1~100	要注意
>100 或正负变化	不良

实际经验表明，由于直流分量的数量为纳安级，因而测量的精度受到各种测试条件的影响较大，测试时要注意天气、时间和现场环境，并对测试结果进行必要的分析判断。

三、带电测量电缆介质损耗角正切值 $\tan\delta$

图 5-22 所示为带电测量 $\tan\delta$ 的回路接线，是在高压电缆的引线上接电阻分压器，取得信号后与从电流互感器得出的通过电缆绝缘层的电流相量进行相位比较。这种方法不需特制的高压试验设备，但事先要对电阻分压器测量时的角差等进行验证。

图 5-22 带电测量 $\tan\delta$ 的回路接线

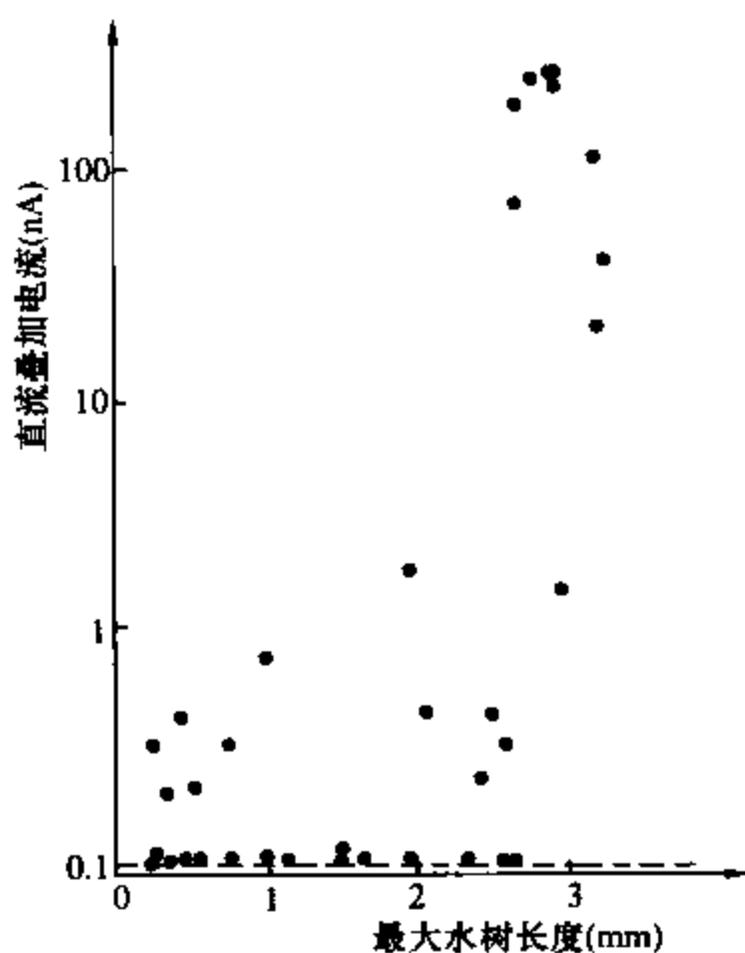


图 5-23 直流叠加电流及水树最大长度

近几年日本曾开发了将 3 种方法合一的综合仪，它吸取了直流叠加法、微直流分量法和带电测量 $\tan\delta$ 各自的优点，谋求测试老化精确度的进一步提高。仪器内有计算机将数据处理后输出打印出来，仪器体积较小，便于携带。日本曾在 50 条电缆线路上，先后用三合一仪器做带电测试，然后再待停电后，用常规仪

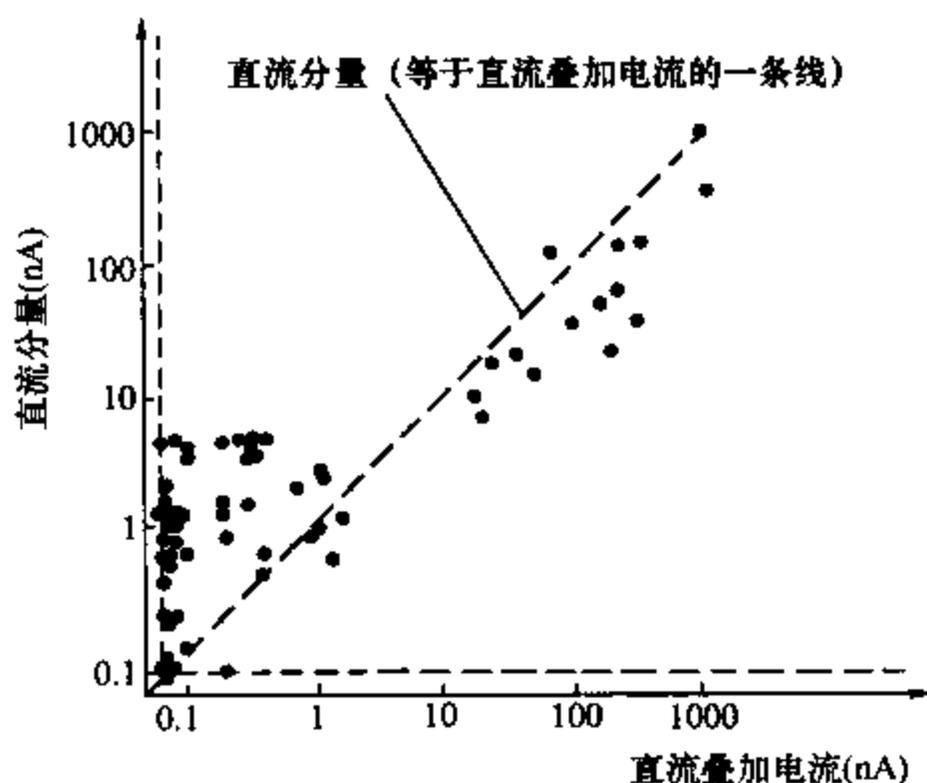


图 5-24 直流叠加电流及直流分量

器测试，并对其相关结果作了分析对比，其结果如图 5-23~图 5-32 所示。试验线路为 6.6kV 电压级别交联聚乙烯电缆。

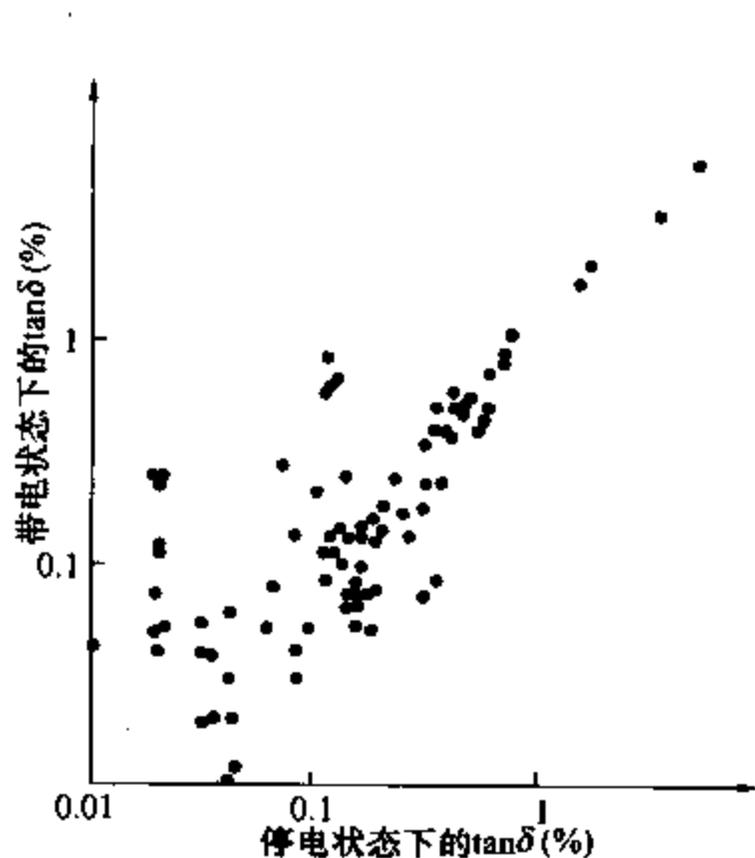


图 5-25 带电和停电所测 $\tan\delta$

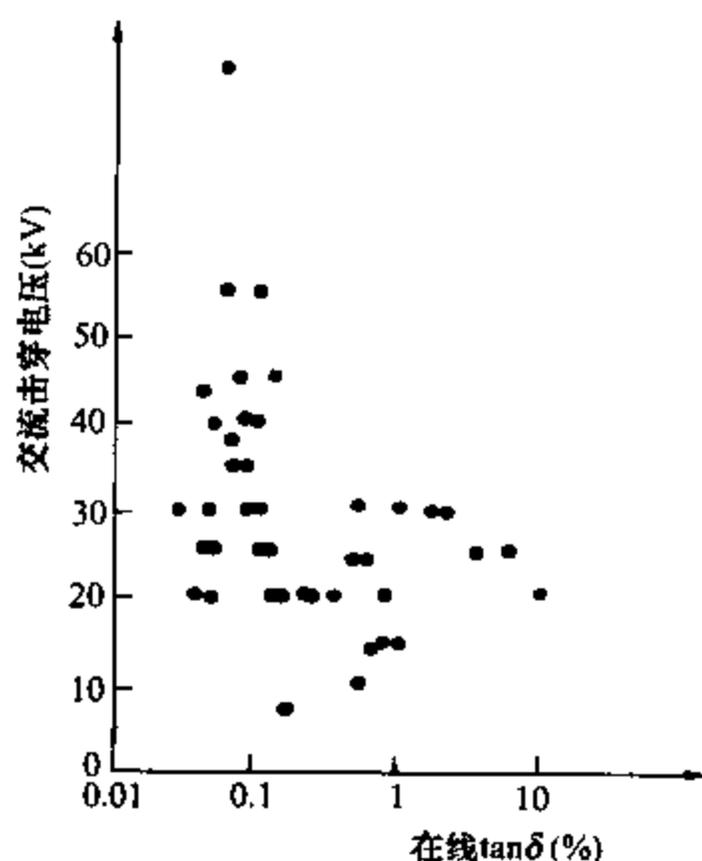


图 5-26 带电测 $\tan\delta$ 及工频击穿强度

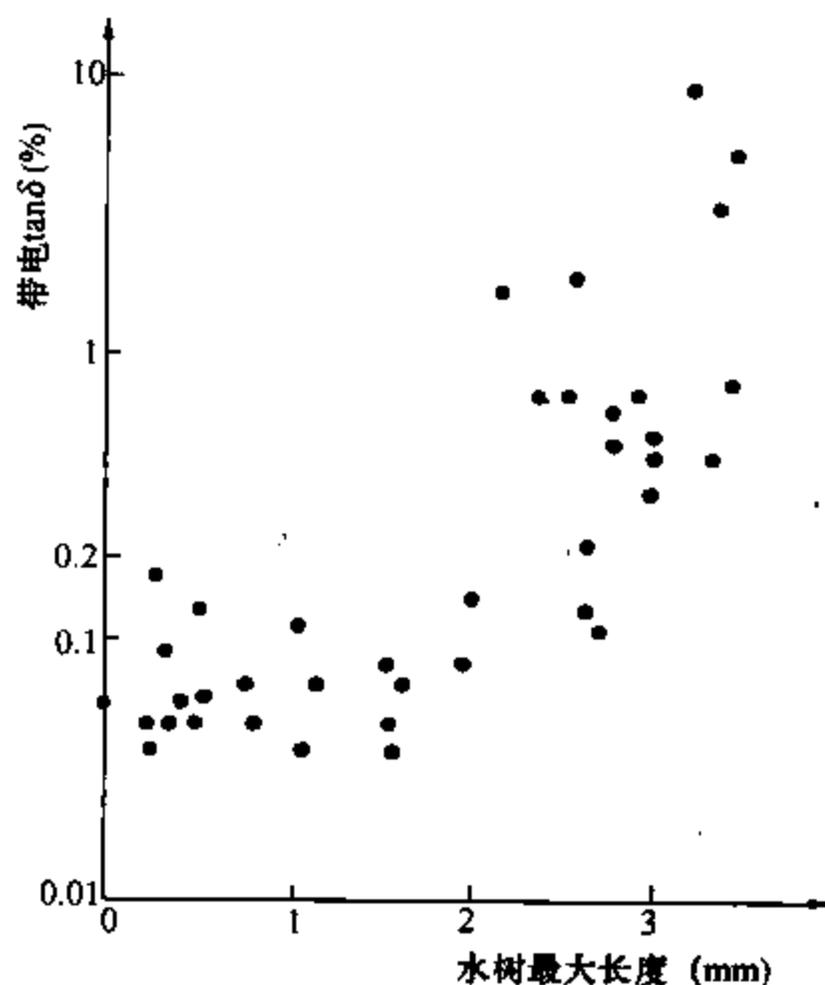


图 5-27 带电测 $\tan\delta$ 及水树最大长度

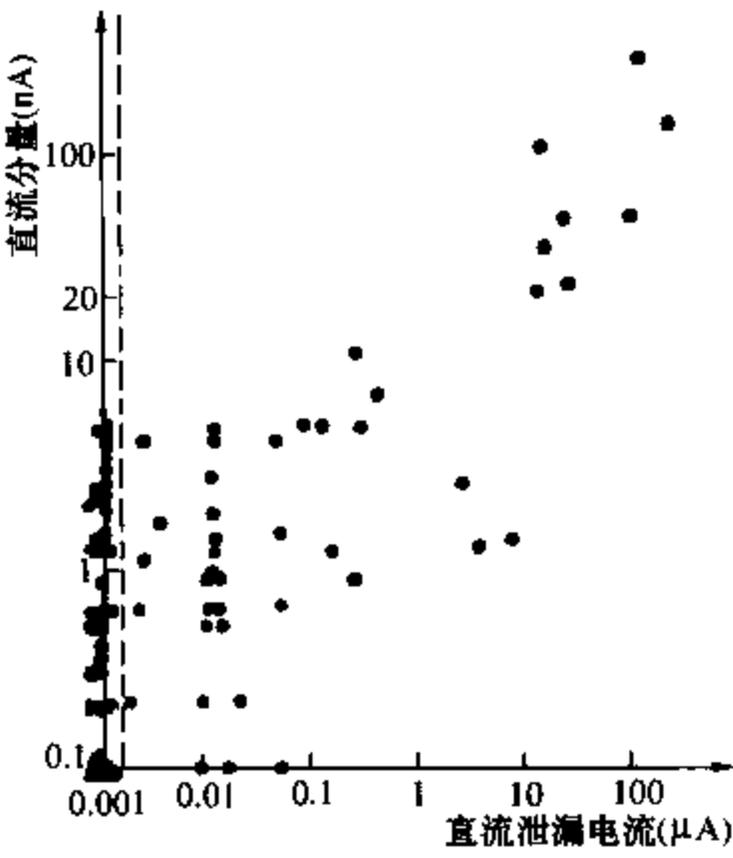


图 5-28 直流分量和直流泄漏电流

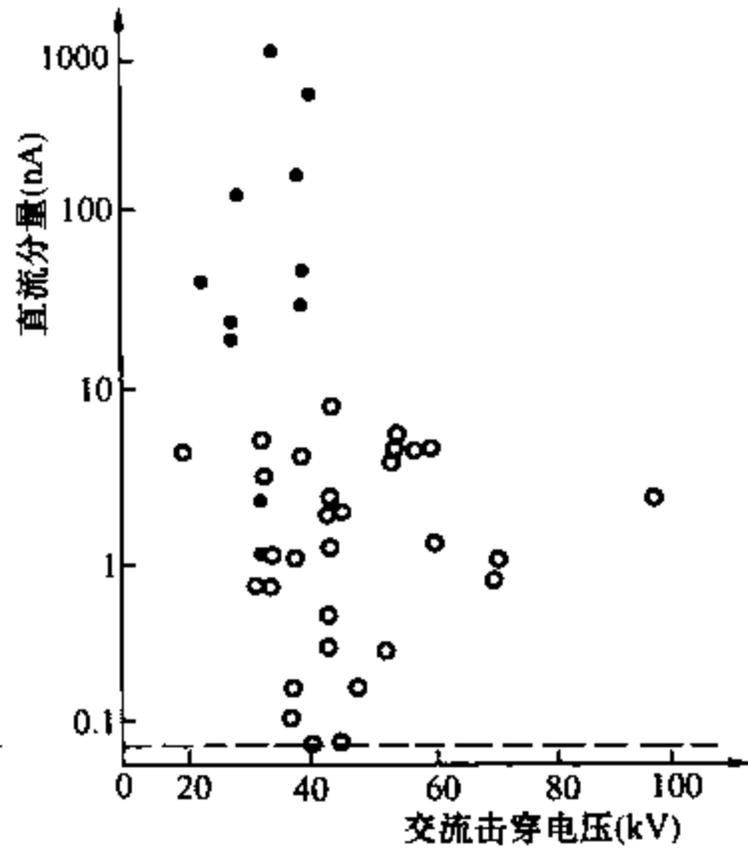


图 5-29 直流分量及交流击穿电压
 ●—相当于不小于 $1\mu\text{A}$ 直流泄漏电流;
 ○—相当于小于 $1\mu\text{A}$ 的直流泄漏电流

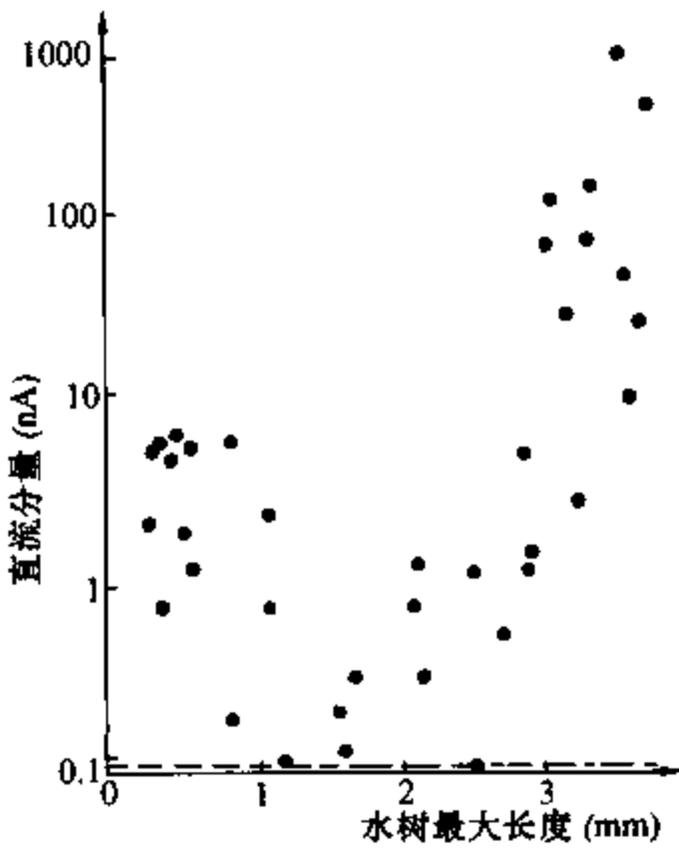


图 5-30 直流分量及水树最大长度

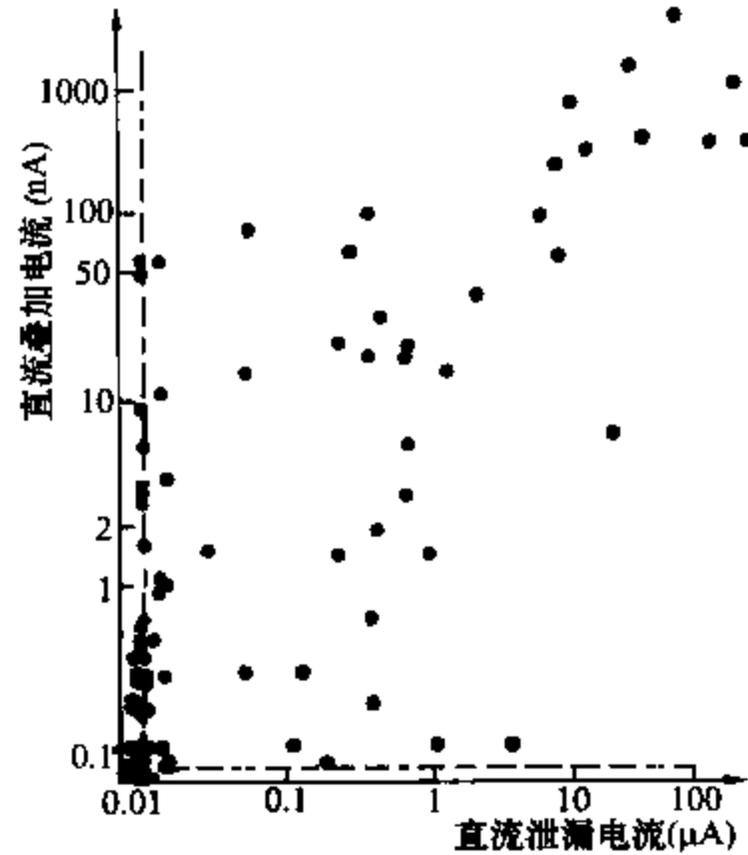


图 5-31 直流叠加电流及直流泄漏电流

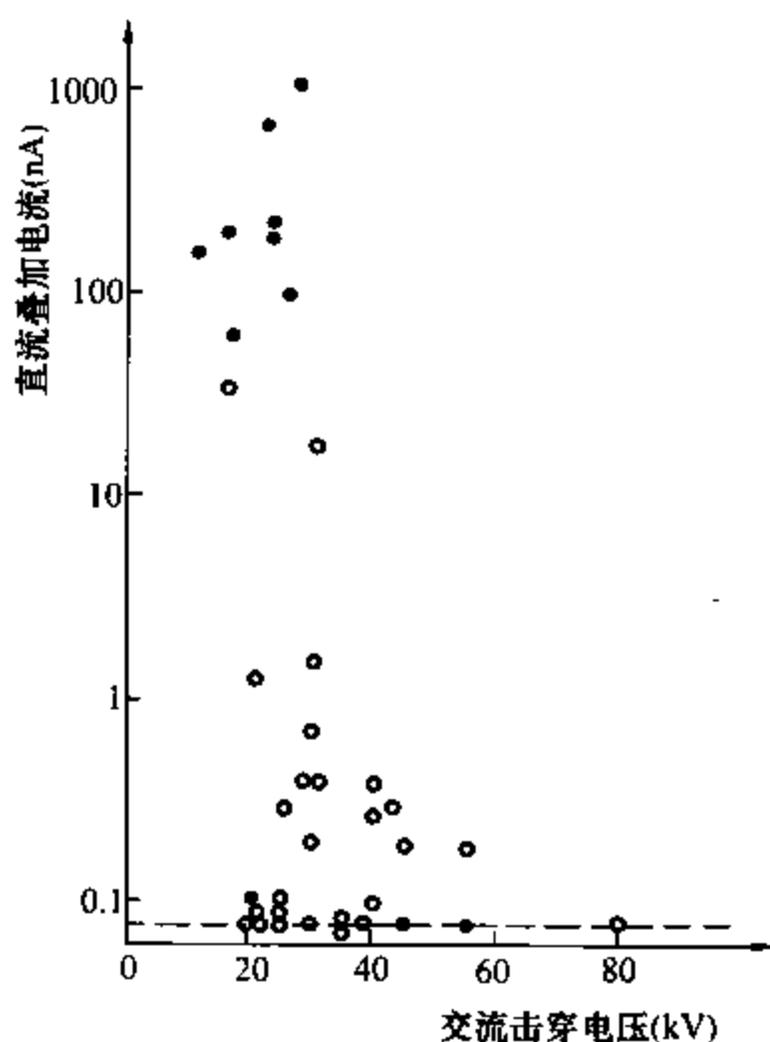


图 5-32 直流叠加电流及交流击穿电压

- 相当于直流泄漏电流不小于 $1\mu\text{A}$
- 相当于直流泄漏电流小于 $1\mu\text{A}$

第五节 110/220kV 交联聚乙烯 电力电缆在线监测法的评估

随着 XLPE 电力电缆的广泛应用,其运行状况在线监测技术也得到了发展,在国外已有较多的应用,如日本等。对 XLPE 电力电缆运行状况进行在线监测,主要是从电压、电流、局放量或运行温度、含水量等参数入手,对 XLPE 电力电缆的主绝缘及外护套运行状况进行监测。目前使用的主要方法有:接地线电流法,直流分量法,直流叠加法、低频叠加法,局部放电在线监测法,电缆温度在线监测法,水分在线监测法等,下面分别介绍。

一、对各种在线监测法的评估

1. 接地线电流法

110kV 及以上电压等级 XLPE 电力电缆金属护套接地是保证电缆安全运行的重要措施。为抑制金属护套内产生较大的环流, 110kV 及以上单芯电缆常采用一端接地或交叉互联两端接地方式。此时, 电缆接地线接地电流为零或者很小。

(1) 接地线电流法监测电缆外护套状况。如果外护套有破损, 造成金属护套多点接地, 即会在金属护套、接地线、接地系统间形成回路, 产生较大的接地线电流, 此电流可达到电缆芯线电流的 5%~10% 以上, 有时竟达到 50%~95%。由于此接地线电流较大, 可用电流互感器采样, 经过外围电路放大, A/D 转换和微机处理, 即可实现电缆外护套运行状况的在线监测。

此方法的优点是现场测量方便、准确, 通过对投运原始数据和实测数据的对比和对线路接地方式的分析, 能在线较准确判断外护套健康状况, 具有一定推广价值。

(2) 接地线电流法监测电缆主绝缘状况。如果电缆外护套采用单端接地方式, 即可采用此方法监测电缆主绝缘状况, 它又称为工频泄漏电流法。正常情况下, 金属护套单端接地时, 接地线电流包括容性电流和阻性电流, 而且主要为流经电缆主绝缘的容性电流。当电缆主绝缘逐渐劣化, 容性电流将会增大, 所测的接地线电流均值将随之上升。

由于接地线电流可达安培级, 比较容易测量, 因此可以通过接地线容性电流的测量, 从概率统计的角度, 进行历史数据趋势的分析, 由此对电缆主绝缘状况进行在线监测。如果发现接地线容性电流均值显著增长, 在排除其他运行故障的可能性后, 可以认为是电缆主绝缘的劣化所致。

此种方法易于实现, 但它仅适用于单端接地方式, 而且实际应用中尚缺乏接地线容性电流均值增长与主绝缘劣化程度的定量关系, 有时不易判断。

2. 直流分量法

1987年国外 K. Sona 等人通过大量试验,提出了在线检测直流电流来判断运行中电缆主绝缘老化的方法,即直流分量法。

当 XLPE 电缆有树枝状放电时,树枝与地电位之间有类似针—板电极的整流作用。在运行电压下,流经电缆主绝缘的电流中有微弱的直流分量(纳安级)。树枝发展的越长,密度越大,直流成分的电流越大。通过测量电缆接地线中的直流成分,可实现对电缆主绝缘状况的在线监测。

使用此种方法进行在线监测时,由于直流成分仅为纳安级,不能直接测量,而且电缆屏蔽接地的化学电动势和护层绝缘电阻对测量值均有影响,其次 110kV 及以上电压等级的电缆电晕放电也将对实际测量造成困难。但随着数学分析方法软硬件技术的发展,在测量中遇到的困难也可能得到解决。国内武汉高压研究院曾对这一方法开展过研究,取得了初步成果。

3. 直流叠加法和低频叠加法

直流叠加法是将低压直流电压(一般为 50V)叠加到电缆芯线上,再在电缆接地线处测量流过电缆主绝缘的直流电流。而低频叠加法是将低频电压(一般为 7.5Hz, 20V)叠加到电缆芯线上,再在电缆接地线处测量流过电缆主绝缘的低频电流。

这种方法对于中性点不接地的系统来说较易实现。但是对于 110kV 及以上电压等级系统,其中性点是直接接地的,电网中的零序电压分量强制为零,因此无法在电缆芯线上叠加直流电压或低频电压,这两种方法不适用。

4. 在线检测 $\tan\delta$ 法

研究表明,介质损耗 $\tan\delta$ 的大小,随着水树老化的增大而增加。测量线路电压与流经绝缘体的电流(由接地线中测出)的相位差,求出 $\tan\delta$ 的大小,从而判断电缆主绝缘的好坏。

典型的介质损耗 $\tan\delta$ 在线检测法是测量两个正弦波过零点的时间差,由频率和时间差来计算相位差的方法。国内对介质损耗测量的过零点电压比较法进行了大量研究,较好地解决了介质

损耗的在线测量问题。过零点电压比较法无需以零点为测量相位差的标准,而以过零点附近两个正弦波的平均电压差来评价两个正弦波的相位差。因此抗干扰力强,比较适用于现场在线检测。

由于 $\tan\delta$ 反映的是被测对象的普遍性缺陷,个别集中性缺陷不会引起 $\tan\delta$ 值的显著变化。因此 $\tan\delta$ 法对电缆全线整体老化监测有效,对局部老化则很难监测。此外,对于 110kV 及以上电压级 XLPE 电力电缆,由于其绝缘电阻和等值电容都很大,因此 $\tan\delta$ 很小,容易受到干扰,而无法准确测出。

5. 交流叠加法

交流叠加法是在电缆金属护套上叠加频率为 101Hz 的交流电压信号,通过测量 1Hz 的交流损失电流信号,来判断电缆绝缘的老化程度。试验分析表明,给老化电缆的屏蔽层上叠加不同频率的交流电压,当电压频率等于偶数倍工频频率 + Δf 时,检测到只含 Δf 频率成分的交流损耗电流,且当电压频率为 100Hz + Δf 时,交流损耗电流最大。进一步研究表明,此交流损耗电流只在老化的电缆中而不会在新安装的电缆中产生。

与直流叠加法相比,交流叠加法所需的电压的幅值较小,通常叠加 5V 的交流电压就可得到明显的特征电流,这使得交流叠加法能更容易检测出电缆老化信号。另外,交流叠加法所测得交流损耗电流的线性化程度比直流叠加法好得多,因而交流叠加法是在线检测电缆的一个较好的方法。

6. 谐波分量法

由水树引起老化的电缆会在损耗电流中产生谐波分量,研究表明谐波分量能很好地表征电缆老化程度。谐波分量是由于水树的非线性伏安特性而产生,随着电缆老化程度的增加,损耗电流波形畸变越大,这样,谐波分量本身包含了更多的水树老化信息。

由水树非线性特性可知:当水树上叠加 100Hz 的电压时,可产生 150Hz 和 200Hz 的谐波。此方法通过调制而产生偶次谐波,可以避免奇次谐波测量带来的误差问题,并且在很大程度上

不受杂散电流的影响,值得现场参考使用。

7. 局部放电在线检测法

局部放电是造成电缆绝缘被破坏的主要原因之一,所以国内外学者一致推荐局部放电试验为 XLPE 电缆绝缘状况的最佳评价方法。考虑到电缆故障大部分发生在电缆附件上,而且从电缆附件处进行局部放电测量容易实现,灵敏度高,因此一般电缆局部放电在线检测主要针对电缆附件。

目前,电缆局部放电在线检测方法主要有:差分法、方向耦合法、电磁耦合法、电容分压法、REDI 局部放电测量法、超高频电容法、超高频电感法等。虽然局部放电的在线检测方法很多,理论上也是可行的,但实际应用中,由于局放信号微弱,波形复杂,外界背景干扰噪声大等原因,因此实现局部放电在线检测的难度也很大。

局部放电在线检测技术的难点是抑制干扰、信号识别和数据处理,其出路在于完善的硬件技术和先进的数学方法相结合。目前,专家们试图通过硬件方法抑制干扰,主要方法有:差动平衡法、脉冲极性鉴别法、模拟通带滤波器、数字滤波技术和小波分析法等。

8. 电缆温度在线检测

任何电缆事故的发生、发展都有一个时间过程,而且都伴随有局部温度升高。温度已成为判断电缆运行是否正常的关键要素之一。许多物理特性的变化都直接反映在温度的升降上,因此温度监测的意义越来越大。

电缆温度在线监测按照测温点的分布情况可分为两大类:分布式在线温度监测和点散式在线温度监测。前者对电缆线路全线进行温度监测,后者只对电缆终端、中接头等故障多发部位进行温度监测。目前分布式在线温度监测系统是通过全线布置光纤,以光纤作为温度采集和数据传输的通道;点散式在线温度监测系统主要采用热电偶、热电阻、气体、红外线式温度计或者光纤、光栅等进行温度采集,采用 CAN 总线技术通过双绞线或者

光纤进行数据传输。

电缆温度在线监测法能比较准确的测量电缆线路各处的温度，对即将发生的电缆故障提前进行预警，能有效地避免电缆事故的发生，但它无法对电缆绝缘的老化过程进行有效监测。

9. 电缆水分在线监测法

对 XLPE 电缆，水分的危害最大，因此在电缆的设计制造过程中采取了多种技术抑制水分的入侵。但是，在长期运行过程中，水分的入侵不可避免，特别是对于电缆附近有较大的水源或者电缆长期浸泡在水中的地区更是如此。

电缆水分在线检测系统是在电缆结构（一般在金属护套与外屏蔽层之间）内设置一个分布式的水传感器，通过测量水传感器的直流电阻来判断水分的入侵情况。系统中水传感器的布置、电气特性至关重要。一方面，它要有与电缆金属护套一样的交叉互联方式，另外，它还要能承受各种冲击电压和冲击电流影响的能力。电缆水分在线监测法适于应用在电缆长期浸泡在水中的情况。

二、改进措施

由于现场实测干扰大，缺乏足够的实测数据和现场经验，以及 110kV 及以上电缆系统的特殊性等，目前国内外对其运行状况在线检测还没有一个比较完善和成熟的方案，需要进一步研究改进：

(1) 对 110kV 及以上 XLPE 电缆运行状况在线监测可以分成两个层次：一是实现电缆外护套状况、所带负荷情况、故障前预警等功能的在线检测；二是实现电缆主绝缘老化状况的定性、定量评估。

(2) 如被测量很小而干扰却很大时，有必要开展数学分析理论和小波理论的信号识别和数据处理技术研究，为监测技术奠定良好的基础。

(3) 进一步积累试验数据，为深入研究创造条件。

思考题

1. 交联聚乙烯电力电缆为什么会发生水树老化？水树有哪 3 种形态？
2. 交联聚乙烯电力电缆产生水树老化后，其特性有何变化？
3. 对电缆制造厂来说，抑制水树老化有哪些基本方法？
4. 如何实现电缆绝缘电阻和介质损耗 $\tan\delta$ 的在线监测？
5. 微直流分量法的原理是什么？
6. 110kV 及以上 XLPE 电缆在线监测技术实施有何困难？应采取哪些改进措施？

电力电缆线路的过电压保护

第一节 电力电缆绝缘冲击电压水平的选择

电力电缆绝缘冲击电压水平的选择分为雷电冲击和操作冲击两方面,分别用 U_{p1} 和 U_{p2} 表示。它们的值应比保护电缆主绝缘的避雷器残压高,具体数值要根据线路的绝缘水平、避雷器的保护特性、架空输电线路和电缆线路的波阻抗以及雷击点的远近等因素通过计算确定,见表 6-1 和表 6-2。

表 6-1 电力电缆的雷电冲击耐受电压值

额定电压 U_0/U	3.6/6	6/6, 6/10	8.7/10 8.7/15	12/20	21/35	26/35
雷电冲击耐 受电压 U_{p1}	60	75	95	125	200	250
额定电压 U_0/U	37/66	48/66	64/110	127/220	190/330	290/500
雷电冲击耐 受电压 U_{p1}	325	450	550	950 1050	1175 1300	1550 1675

表 6-2 电缆操作冲击耐受电压值

U_0/U (kV)	190/330	290/500
U_{p2} (kV)	850 950	1050 1240

需要说明的是:侵入电缆线路系统的雷电压幅值大小主要由

保护电缆的避雷器特性所决定，即用避雷器保护的电缆线路侵入波幅值约等于避雷器的保护水平 U_{gb} 。对于一定型式的避雷器，残压 U_c 和避雷器的灭弧电压 U_a 之比是一个常数，称为保护比 (U_c/U_a)。目前氧化锌避雷器保护比为 1.6~1.8，磁吹避雷器保护比为 2.7，普通阀型避雷器保护比为 3.4。为了保证线路在出现最高工频电压时避雷器能可靠灭弧，所以避雷器的灭弧电压一般取线路一相接地时健全相可能出现的过电压。对于中性点直接接地系统为 $80\%U_m$ ；对于中性点不接地系统为 $100\%U_m$ (U_m 为系统的最高工作电压)。则避雷器的保护水平为 $U_{gb} = \text{保护比} \times (80\% \sim 100\%) U_m$ 。而线路基本冲击绝缘水平为

$$U_{pl} = (140\% \sim 150\%) U_{gb}$$

例如，110kV 中性点直接接地系统的 U_{pl} 为

$$\begin{aligned} U_{pl} &= (140\% \sim 150\%) \times 3.4 \times (80\% \sim 100\%) \times 121 \\ &= 460 \sim 617(\text{kV}) \end{aligned}$$

这就是表 6-1 中对 $U_0/U=64/110\text{kV}$ 取 $U_{pl}=550\text{kV}$ 的依据。

对于 330~500kV 超高压系统，以操作过电压作为绝缘配合依据，操作过电压幅值主要由线路参数和开关特性来确定。一般来说，线路愈长，出现操作过电压的幅值也愈大，但 330~500kV 空气断路器和 SF₆ 断路器的断口均有并联电阻，操作过电压可以限制到相电压幅值的 2.0~2.6 倍以下。

基于上述情况，DL/T 401—2002《高压电缆选用导则》规定对 $U_0/U=190/330$ 、 $290/500\text{kV}$ 超高压电缆应考虑操作冲击绝缘水平， U_{p2} 应与同电压等级设备的操作冲击耐受电压相适应。表 6-2 列出了电缆操作冲击耐受电压值，供选择使用。

第二节 电力电缆线路的冲击特性长度和绝缘配合

一、雷电冲击波在电缆线路中的传播

设某电缆线路一端与架空线相连，如图 6-1 所示，当雷电冲

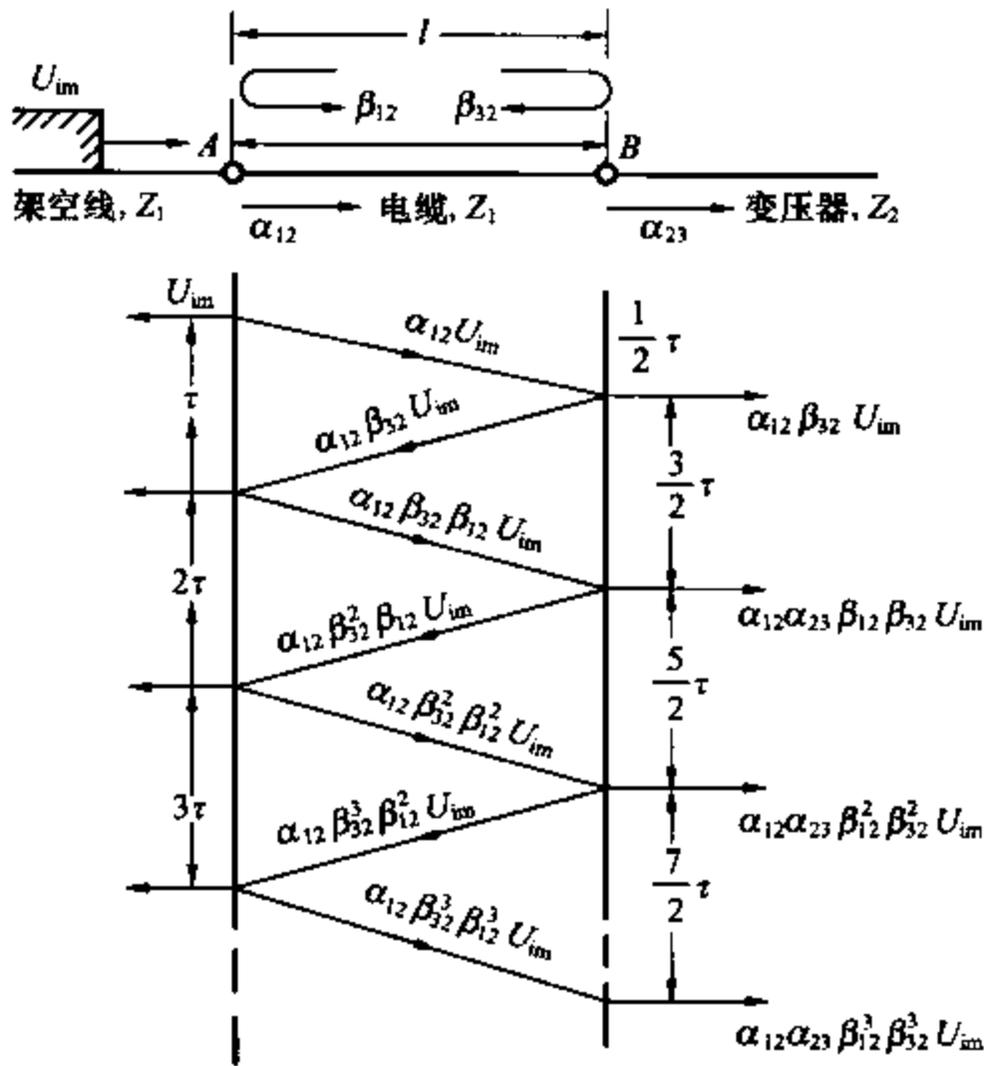


图 6-1 雷电冲击波在电缆线路的传播和折反射现象

击波在电缆线路中传播时，沿电缆长度方向各点电压值并不相等。由于架空线路的波阻抗比电缆大得多，应考虑 B 点的反射波。最高电压总是发生在电缆末端，设进入电缆的波为单指数衰减波，当电缆长度不大，且雷击点离电缆较远时，沿电缆脉冲波幅值的衰减可以忽略不计，且只考虑电缆连接点的反射，则 B 点的电压 $U_B(t)$ 为

$$\begin{aligned}
 U_B(t) = & U_{im} \left\{ \exp\left[-a\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right] \alpha_{12} \alpha_{23} \right. \\
 & \times [\alpha_{12} \alpha_{23} + \alpha_{12} \alpha_{23} \beta_{12} \beta_{32} \exp(a - \tau) \\
 & + \alpha_{12} \alpha_{23} \beta_{12}^2 \beta_{32}^2 \exp(2a\tau) + \dots \\
 & \left. + \alpha_{12} \alpha_{23} \beta_{12}^{n-1} \beta_{32}^{n-1} \exp(n-1)a\tau \right\}
 \end{aligned}$$

$$= U_{\text{im}} \alpha_{12} \alpha_{23} \left\{ \frac{1 - [\beta_{12} \beta_{32} \exp(a\tau)]^n}{1 - \beta_{12} \beta_{32} \exp(a\tau)} \right\} \times \exp\left[-a\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right] \quad (6-1)$$

其中

$$\alpha_{12} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_1}; \quad \alpha_{23} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1};$$

$$\beta_{12} = \frac{Z_1 - Z_1}{Z_1 + Z_1}; \quad \beta_{23} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \quad \tau = \frac{2l}{v}$$

式中 U_{im} ——雷电冲击波 $U = U_{\text{im}} e^{-a(t - \frac{x}{v})}$ 的幅值, kV;

t ——时间, μs ;

α_{12} 、 α_{23} ——电缆两端的折射系数;

β_{12} 、 β_{32} ——电缆两端的反射系数;

Z_1 ——架空线路的波阻抗, Ω ;

Z_2 ——变压器的波阻抗, Ω ;

Z_1 ——电缆线路的波阻抗, Ω ;

τ ——冲击波沿电缆线路长度往返一次所需时间, μs ;

l ——电缆线路长度, m;

v ——冲击波沿电缆线芯的传播速度, m/ μs ;

a ——冲击波陡度, kV/ μs ;

n ——折反射次数;

x ——冲击波沿电缆线芯传播某一距离, m。

t 应满足 $(n + \frac{1}{2})\tau > t \geq (n - \frac{1}{2})\tau$, 因为电缆线路进入波为

一衰减波, 所以只需分析 $t = (n - \frac{1}{2})\tau$ 时 B 点的电压就可确定电缆线路上可能发生的最大冲击电压为

$$U_{\text{Bm}} = U_{\text{im}} \alpha_{12} \alpha_{23} \left[\frac{(\beta_{12} \beta_{32})^n - \exp(-n a \tau)}{\beta_{12} \beta_{32} - \exp(-a \tau)} \right] \quad (6-2)$$

将式 (6-2) 对 n 微分, 并令 $\frac{dU_{\text{Bm}}}{dn} = 0$, 得

$$n = \frac{\ln\left(\frac{-a\tau}{\ln\beta_{12}\beta_{32}}\right)}{\ln(\beta_{12}\beta_{32}) + a\tau} \quad (6-3)$$

此时, B 点冲击电压有最大值。

从上述分析不难看出, 当冲击波从架空输电线进入电缆时, 其峰值大大降低。当进行波到达变压器时, 由于全反射而使波幅增加 1 倍, 但此时变压器受到的冲击波幅值只有架空线上冲击波的几分之一, 所以在架空输电线与变压器间接入电缆后降低了变压器所承受的过电压。但是, 如果考虑多次反射, 情况就比较复杂。实际上, 当反射波的波头到达架空输电线时, 反射波的一部分将叠加到尚在向变压器前进的波尾部分, 然后在电缆与架空输电线连接处冲击波又反射回变压器, 随后又在变压器处反射回架空线。这样重复往返, 每次均叠加在本身波尾上。如冲击波波头走过电缆全长所需的时间小于本身波尾时间, 在波尾通过电缆以前将有多次反射叠加, 因此电缆和变压器承受的过电压有可能达到很高的数值。反之, 如果电缆长度大于波尾长度 (波尾时间乘波速), 那么电缆和变压器承受的过电压将不会超过电缆入射波的 2 倍或架空线上入射波的几分之一。

二、电缆线路的冲击特性长度和绝缘配合

由式(6-2)可知, 当 $\frac{U_{Bm}}{U_{im}} = 1.0$ 时, 则

$$\alpha_{12}\alpha_{23} \left[\frac{(\beta_{12}\beta_{32})^n - \exp(-na\tau)}{\beta_{12}\beta_{32} - \exp(-a\tau)} \right] = 1.0 \quad (6-4)$$

且 $n = \frac{\ln\left(\frac{-a\tau}{\ln\beta_{12}\beta_{32}}\right)}{\ln(\beta_{12}\beta_{32}) + a\tau}$ 时, 电缆中受到的冲击电压不会超过架空

线上的人射波幅值。因为 $\tau = \frac{2l}{v}$, 联解式 (6-3) 和式 (6-4), 则可得电缆长度 l_0 。换言之, 当电缆长度 l 等于 l_0 时, 电缆中受到最大的冲击电压等于架空线上的人射波幅值 U_{im} , 这个长度 l_0 称为电缆线路的冲击特性长度。

电缆中可能受到的最大冲击电压 U_{Bm} 和 U_{im} 比值与电缆长度的关系可根据式 (6-2) 和式 (6-3) 计算, 所得结果如表 6-3 和图 6-2 所列的数值。这些数值是根据 110kV 电缆波阻抗 $Z_1 = 25\Omega$, 架空线波阻抗 $Z_1 = 500\Omega$ 和变压器波阻抗 $Z_2 = \infty$ 计算出来的, 此时 $l_0 = 380\text{m}$ 。同理可计算出 220kV 电缆波阻抗 $Z_1 = 25\Omega$, 架空线波阻抗 $Z_1 = 350\Omega$, 变压器波阻抗 $Z_2 = \infty$ 时, 电缆线路冲击特性长度 $l_0 = 430\text{m}$; 500kV 电缆波阻抗 $Z_1 = 30\Omega$, 架空线波阻抗 $Z_1 = 280\Omega$ 和变压器波阻抗 $Z_2 = \infty$ 时, 电缆线路冲击特性长度 $l_0 = 554\text{m}$ 。

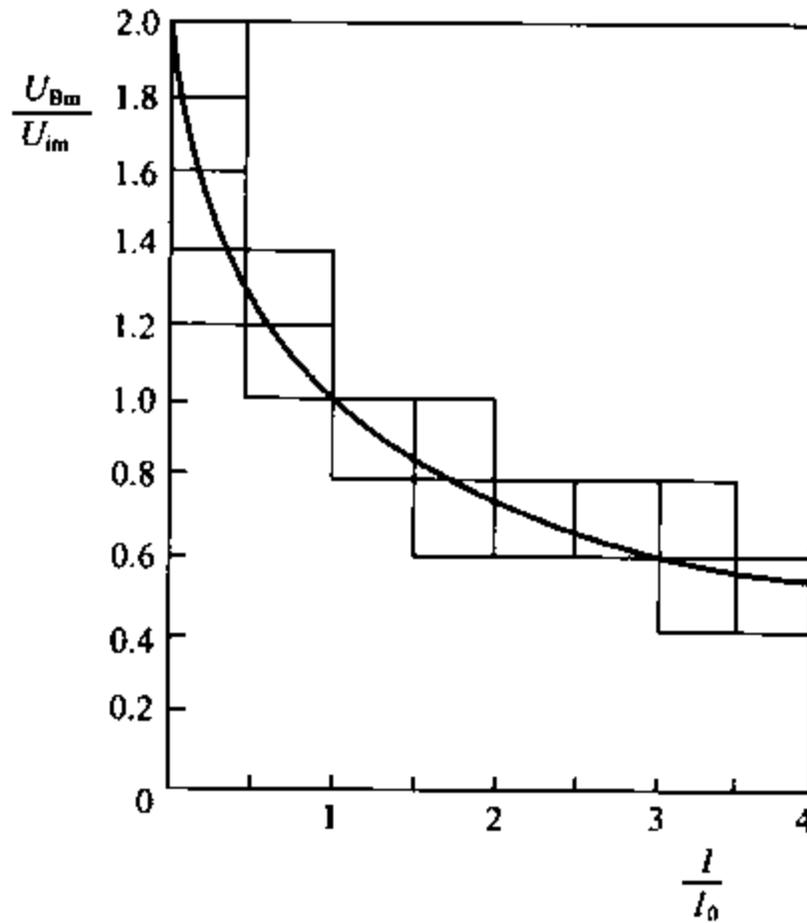


图 6-2 电缆线路实际长度与其特性长度之比 l/l_0 和 U_{Bm}/U_{im} 比值关系

由图 6-2 可见绝缘配合原则是:

(1) 当电缆线路实际长度小于冲击特性长度时, 电缆的冲击绝缘水平必须取比系统绝缘高的值, 或对电缆线路另加保护措施, 如在电缆线路末端再加装一组避雷器保护。

(2) 当电缆线路实际长度等于冲击特性长度时, 电缆冲击绝缘水平可与系统绝缘取相同值。

(3) 当电缆线路实际长度大于冲击特性长度时, 电缆的冲击绝缘水平可取比系统绝缘低的值, 但选择时要慎重。

编者认为, 如有计算条件, 应尽可能通过具体计算来确定电缆线路避雷器保护的配置, 因为电缆的冲击特性长度与线路的波阻抗和变压器特征阻抗有关, 见表 6-4 所示。

表 6-3 110kV 电缆上 U_{Bm}/U_{im} 比值与电缆长度的关系

电缆线路长度 l (m)	100	200	300	400	500	750	1000	1500
U_{Bm}/U_{im}	1.45	1.25	1.10	0.99	0.89	0.77	0.66	0.56
到达 U_{Bm} 时间 t (μ s)	22.5	35	42	51	57.5	72	79	90

表 6-4 各电压级电缆的冲击特性长度

		U (kV)	35	66	110	220	330	500
		Z_1 (Ω)	500	450	400	350	300	280
l_0 (m)	20	230 (226)	257 (254)	292 (288)	337 (333)	399 (395)	431 (427)	
	25	292 (287)	327 (322)	372 (367)	431 (426)	513 (508)	555 (550)	
	30	355 (350)	399 (393)	455 (449)	529 (523)	633 (627)	688 (681)	
	35	421 (414)	474 (467)	542 (535)	633 (626)	762 (755)	830 (822)	
	40	489 (481)	552 (544)	633 (625)	734 (735)	901 (892)	985 (975)	

- 注 1. 表中 Z_1 、 Z_1 分别表示架空线和电缆的波阻抗。
 2. 表中无括号的数据是当变压器波阻抗 $Z_2 = \infty$ 的计算结果。
 3. 括号中的数据是取变压器的波阻抗 Z_2 为 $50k\Omega$ 时的计算结果。

三、计算实例

图 6-3 所示为某 110kV GIS 变电站—电缆系统。

(一) 问题的提出

带有高压电缆进(出)线的 GIS 变电站, 在过电压保护方面有新的特点, 其中有两个特点对过电压保护是十分有利的。

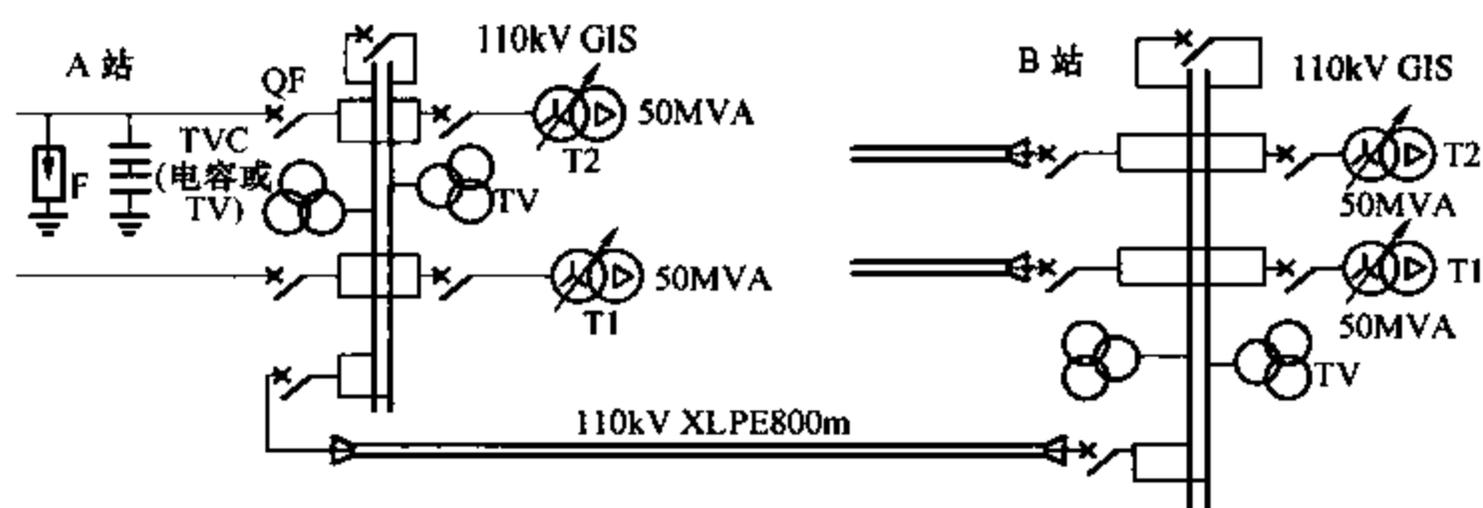


图 6-3 两个 110kV GIS 变电站通过电缆连接

(1) GIS 和电缆的波阻抗远较架空线路波阻抗小, 则折射系数 $\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$ 小, 经电缆再进入 GIS 的侵入波就更小。

(2) GIS 变电站结构紧凑, 设备间的电气距离短, 保护范围容易满足要求。

基于上述两点, 国内外不少文献指出, 只要不是很长的母线, 一般用一组避雷器就能保护变电站的全部设备。然而对于图 6-3 所示的系统, 当电缆线路长达 800m 时, 如果只在 A 站架空线入口处装设一组磁吹避雷器 (FCZ-110J) 或氧化锌避雷器 (XAP-C 120/260), 是否也能保护电缆线路末端和 B 站, 需要进一步论证。

(二) 过电压保护计算结果及分析

1. 计算条件

(1) 计算运行方式。选取 A 站 (一线一变) $\xrightarrow{\text{电缆}}$ B 站 (一线一变) 作为计算运行方式。

(2) 波阻抗及波速。110kV 架空线波阻抗 $Z_0 = 450\Omega$, 波速 $v_0 = 300\text{m}/\mu\text{s}$; 110kV GIS 母线 (三相) 波阻抗 $Z_1 = 100\Omega$, 波速 $v_1 = 250\text{m}/\mu\text{s}$; 110kV XLPE 电缆波阻抗 $Z_2 = 18\Omega$, $v_2 = 150\text{m}/\mu\text{s}$ 。

(3) 避雷器的伏安特性。磁吹避雷器和氧化锌避雷器的伏安特性分别见表 6-5 和表 6-6。

表 6-5 磁吹避雷器伏安特性

I (kA)	0~1	1~3	3~14
α	0.37	0.20	0.15
C	191.5	191.5	202.3
U (kV)	0~191.5	191.5~238.6	238.5~300.6

表 6-6 氧化锌避雷器伏安特性

I (kA)	1	2	3	5	10	20	40
U (kV)	233	241	247	260	276	300	331

1) FCZ-110J, $U=CI^{\alpha}$, $U_{5kA}=260kV$; $U_{10kA}=285kV$ 。

2) XAP-C-120/260, $U_{5kA}=260kV$; $U_{10kA}=276kV$ 。

(4) 侵入波参数。各参数如下:

1) 波形为平顶斜角波。

2) 波幅 $U_0=600kV$, 波头 $\tau=2.67\mu s$, 系模拟 2km 以外来波 [根据过电压规程, 可取波头陡度 $a'=0.75kV/m$, 此时 $a=a'v=0.75\times 300=225(kV/\mu s)$, $\tau=\frac{U_0}{a}=\frac{600}{225}=2.67(\mu s)$]。

(5) 设备的等值电容及计算电路。变电站主要电气设备的等值电容如下:

1) 电容式电压互感器 TVC 为 6000pF;

2) SF₆ 组合电器内断路器 QF 为 500pF;

3) 电磁式电压互感器 TV 为 120pF;

4) 50MVA 变压器 T 为 3000pF。

为简化计算程序, 架空线路和 GIS 母线均用波阻抗表示:

1) 110kV 架空线 $Z_0=450\Omega$;

2) 110kV GIS 母线 $Z_1=100\Omega$;

3) 110kV XLPE 电缆 $Z_2=18\Omega$ 。

根据上述数据和图 6-3 所示系统连接方式可作出过电压保护计算电路, 如图 6-4 所示。

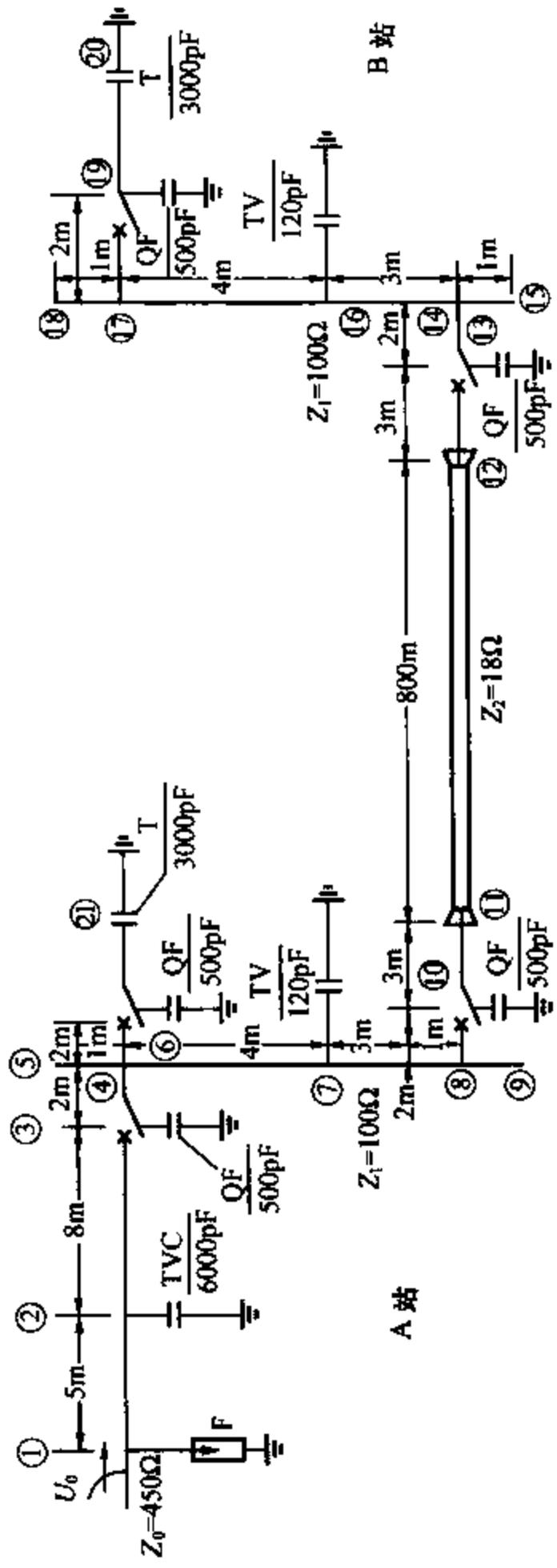


图 6-4 过电压保护计算电路

2. 计算结果及分析

利用电磁暂态程序 (EMTP) 计算, 其结果见表 6-7, 从表中数据可知:

(1) 由于 GIS 和电缆对地电容很大, 虽经多次折反射, 但系统中各点电压值仍较低, 基本接近甚至低于避雷器的残压水平, 所以用一组避雷器能保护电缆线路末端和 B 站的全部设备 (但 B 站必须无架空出线)。

表 6-7 行波保护计算结果

主要节点计算值			A 站 T2	电缆 首端	电缆 末端	B 站 T2	避雷器 F
FCZ-110J 一组	$U_0=600\text{kV}$ $\tau=2.67\mu\text{s}$	U (kV)	197.6	197.3	183.2	189.3	197.4
		I_b (kA)					0.81
		t (μs)	25	25	20.5	20.5	25
XAP-C -120/260 一组	$U_0=600\text{kV}$ $\tau=2.67\mu\text{s}$	U (kV)	197.5	197.3	183.2	189.3	197
		I_b (kA)					0.76
		t (μs)	25	25	20.5	20.5	25.3

注 110kV 电缆和变压器雷电冲击绝缘水平为 550kV。

(2) 根据前面所述, 对于一定电压等级的电缆线路, 具有一定的冲击特性长度, 当电缆实际长度比冲击特性长度大时, 则电缆末端过电压值比首端低。表中计算结果也可以证明这一点。以本系统为例, 对于 110kV 电缆, 冲击特性长度为 400m, 而电缆实际长度为 800m, 所以电缆末端电压 (183.2kV) 比首端电压 (197.3kV) 低。

(3) 由计算结果可知各设备上的电压值均低于该设备雷电冲击绝缘水平 550kV, 故采用一组避雷器即可满足要求。

第三节 电缆—GIS 系统避雷器保护范围的计算

一、简单线路的防雷保护计算

从防雷角度来看，一线一变是最严重的运行方式。图 6-5 所示为用来分析避雷器保护范围的原理图，当 $Z_1 = Z_2$ 、 $U_1 = U_2$ 时，可近似用下式计算避雷器的最大保护范围，并作出定性的分析

$$l \leq \frac{U_{Tm} - U_s}{2a_0 K} \quad (6-5)$$

式中 l ——避雷器的最大保护距离，m；

U_{Tm} ——变压器上的最大允许电压，kV；

U_s ——避雷器残压，kV；

a_0 ——来波陡度， $a_0 = \frac{a}{v}$ (a 为陡度，kV/ μ s； v 为波速，m/ μ s)，kV/m；

K ——系数， $K = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{C_T}{C_0 l}}$ (C_T 为变压器入口电容，pF； C_0 为引线单位长度电容，pF/m)。

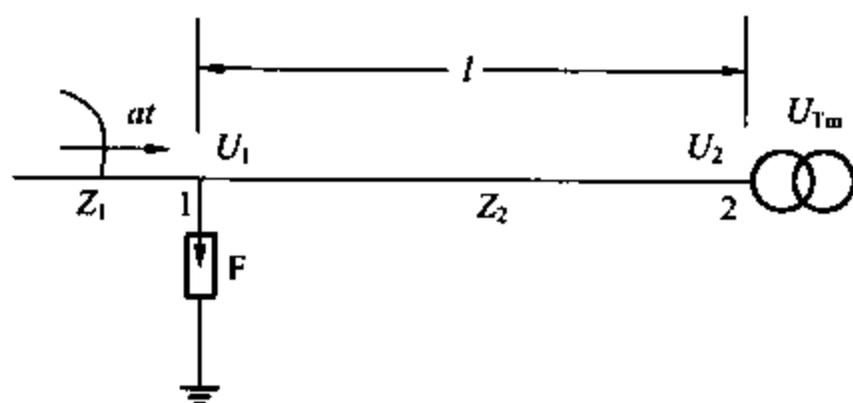


图 6-5 分析避雷器保护范围的原理图

二、没有电缆进线的 GIS 变电站保护

图 6-6 所示为 220kV 架空线路，入侵波电压幅值 $U_0 = 1220$ kV， $a_0 = 3$ kV/m，GIS 长度 $l = 90$ m 时计算结果：变压器上电压 $U_{Tm} = 878$ kV，为 FZ-220J 5kA 残压 664kV 的 1.32 倍，如在变压器端再装一组相同的 FZ-220J 避雷器，则能把过电压限制

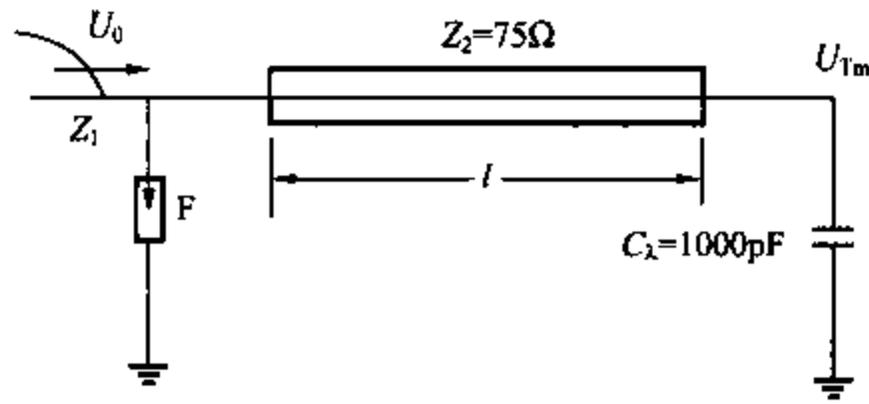


图 6-6 没有电缆进线的 GIS 变电站

在比较低的水平，如图 6-7 (a) 所示。如采用 FCZ 型或 MOA 型避雷器，则过电压值会更低。

在 GIS 入口接 1 组 FZ 型避雷器时，变压器电压和 GIS 长度的关系如图 6-8 所示。对于 220kV 电压等级，实线和虚线分别表

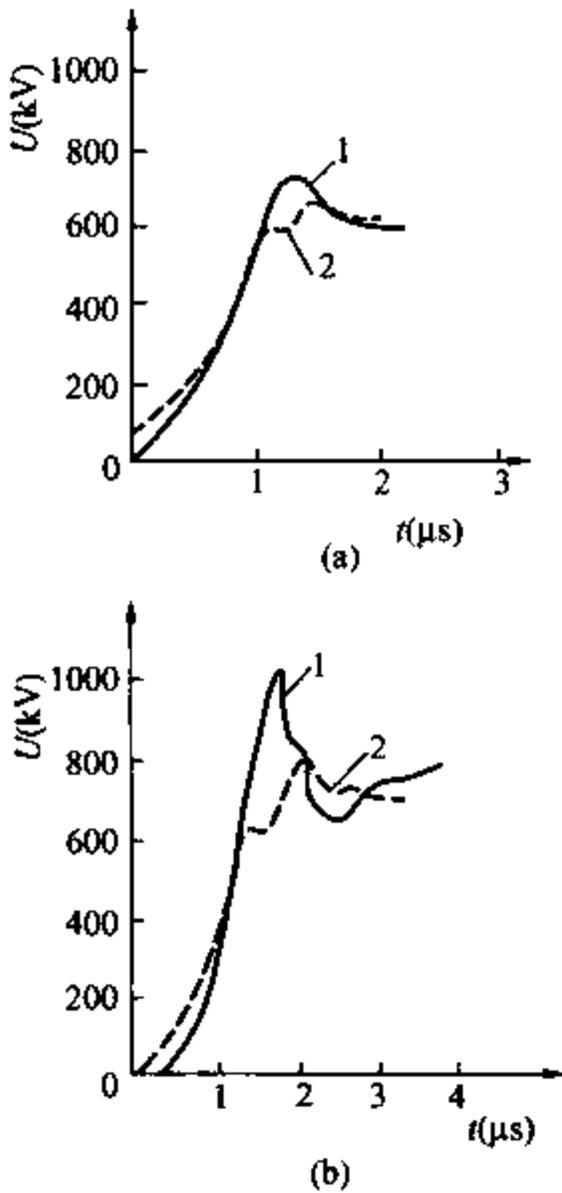


图 6-7 电压波形图
(a) 避雷器残压波形；
(b) 变压器电压波形

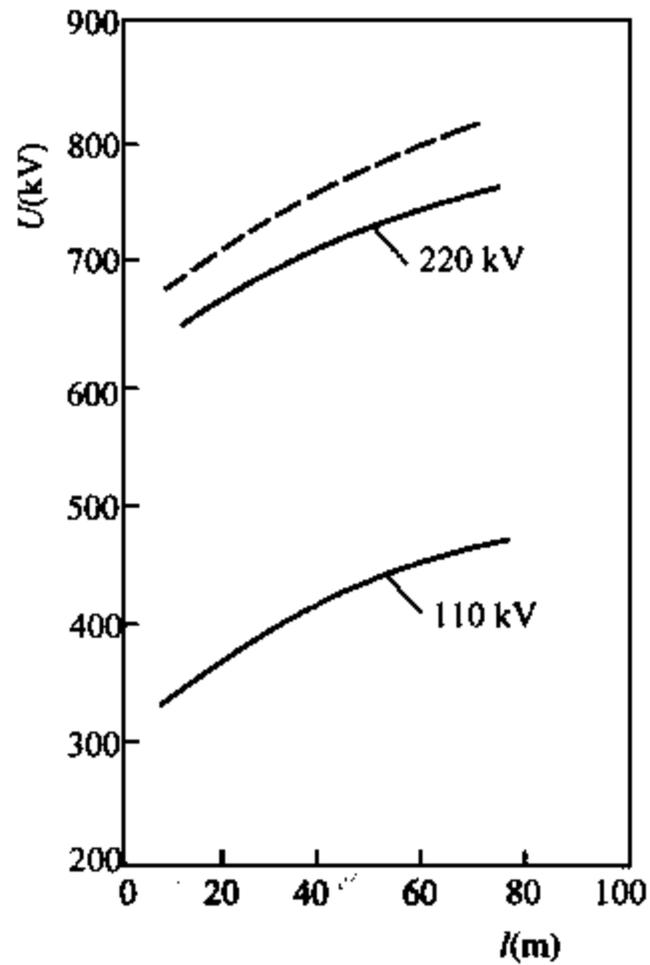


图 6-8 变压器电压与 GIS 长度的关系

示侵入波陡度取 1.5kV/m 和 3kV/m 时的计算结果。显然，来波陡度增加使过电压幅值大大增加。由于变压器入口电容的存在以及电压波在线路两端的多次折反射，一般计算变压器和避雷器之间电压差值的公式 $\Delta U=2al$ 并不适用。

三、有电缆段的 GIS 变电站保护

如图 6-9 所示，设电缆长度 l_1 为 $160\sim 320\text{m}$ ，改变 GIS 长度 l_2 ，分别对节点的电压波形进行计算。图 6-10 所示为典型 220kV 系统 ($U_0=220\text{kV}$, $a=1.5\text{kV/m}$) 的计算波形图，实线表示只在电缆入口节点 1 接 1 组 FZ 型避雷器时，节点 2、3 的电压波形。当在节点 2 接有第 2 组避雷器时，变压器上的电压波形如图 6-10 中曲线 1' 所示。显然接有 2 组避雷器时，整个变电站的过电压水平都下降了。

149

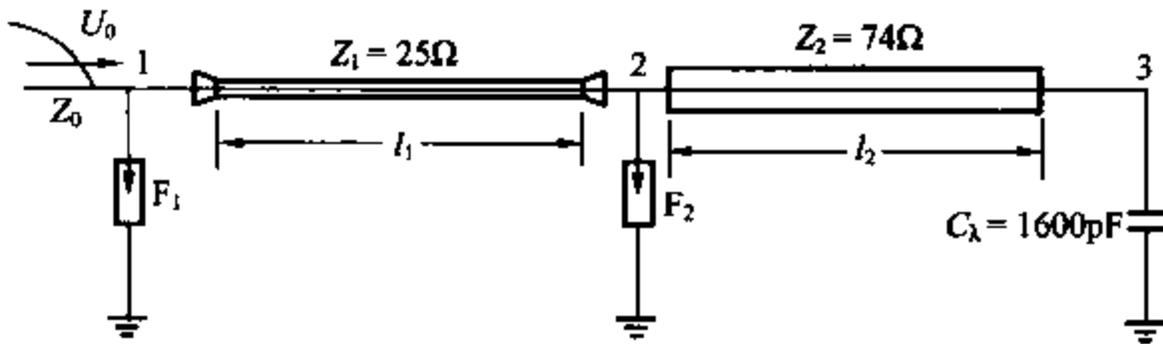


图 6-9 具有电缆段的 GIS 变电站

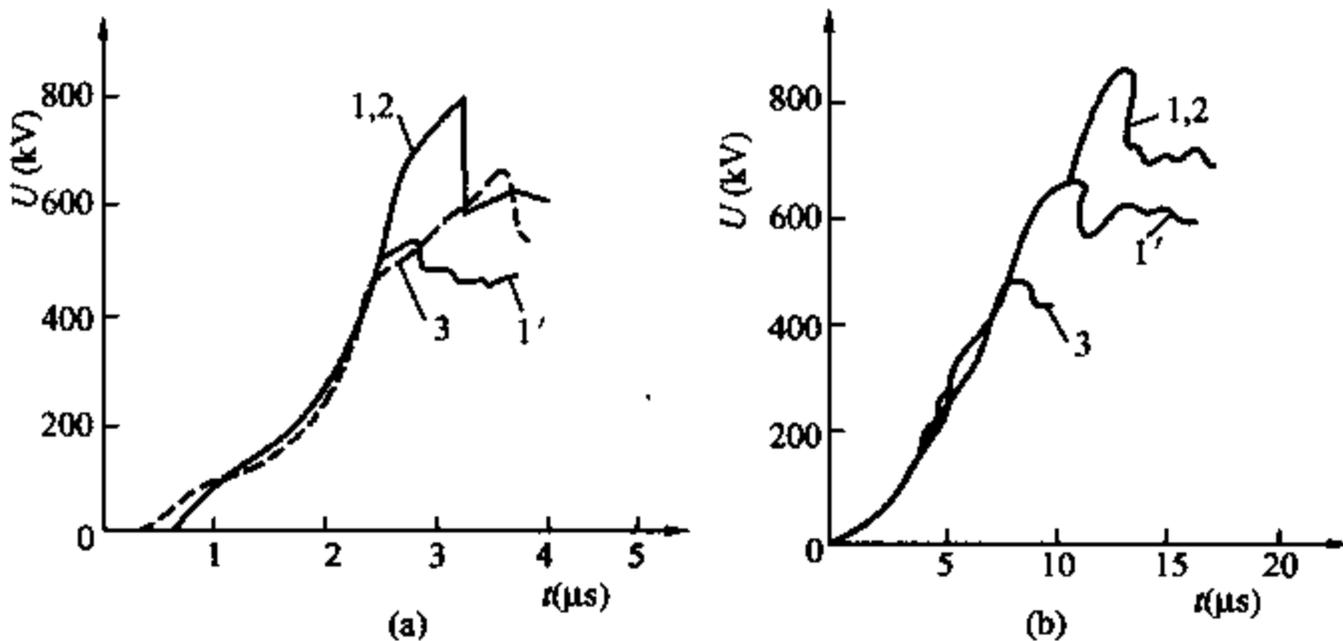


图 6-10 变压器电压波形

(a) $l_1=64\text{m}$, $l_2=32\text{m}$; (b) $l_1=320\text{m}$, $l_2=32\text{m}$

图 6-11 给出当只装 1 组避雷器 FZ, 电缆长度 l_1 分别为 160m 和 320m 时变压器电压值和 GIS 长度 l_2 的关系。计算时对 110kV 和 220kV 侵入波陡度分别为 1.5kV/m 和 3kV/m, 陡度对过电压影响不大, 原因是 GIS 对地电容较大。

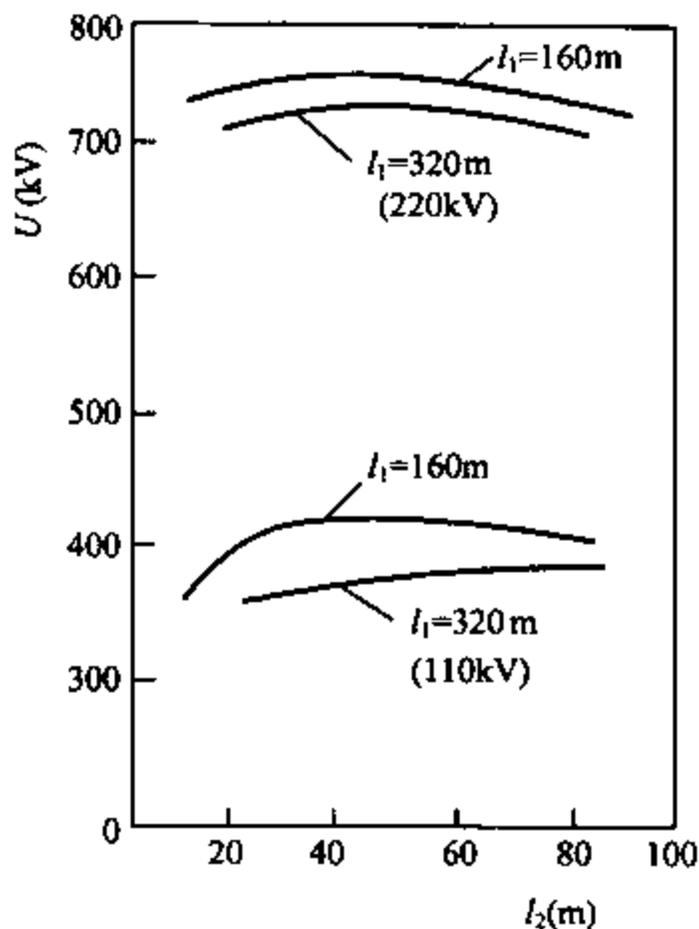


图6-11 变压器电压和 GIS l_2 长度的关系

通过上述计算结果表明, 对于具有电缆段的 GIS, 一般来说装 1 组避雷器也能达到保护的目, 但在电缆长度为 100~500m 时, 若采用 FZ 型避雷器, 则其保护裕度不大。

四、典型工程计算实例分析

某 220kV GIS 变电站, 如图 6-12 所示。设在 2km 进线段不同地点发生雷击塔顶、绝缘子串闪络、雷电波侵入变电站, 现分别计算不同陡度的斜角平顶波作用下各设备处的电压值和出现最大值相应的时刻。

1. 波阻抗及波速

元件	波阻抗	波速
架空线路	356~400Ω	$v_0 = 300\text{m}/\mu\text{s}$

XLPE 电缆	25Ω	$v_1 = 160\text{m}/\mu\text{s}$
单相 GIS 母线	72Ω	$v_2 = 200\text{m}/\mu\text{s}$
三相 GIS 母线	$96\sim 109\Omega$	$v_3 = 250\text{m}/\mu\text{s}$

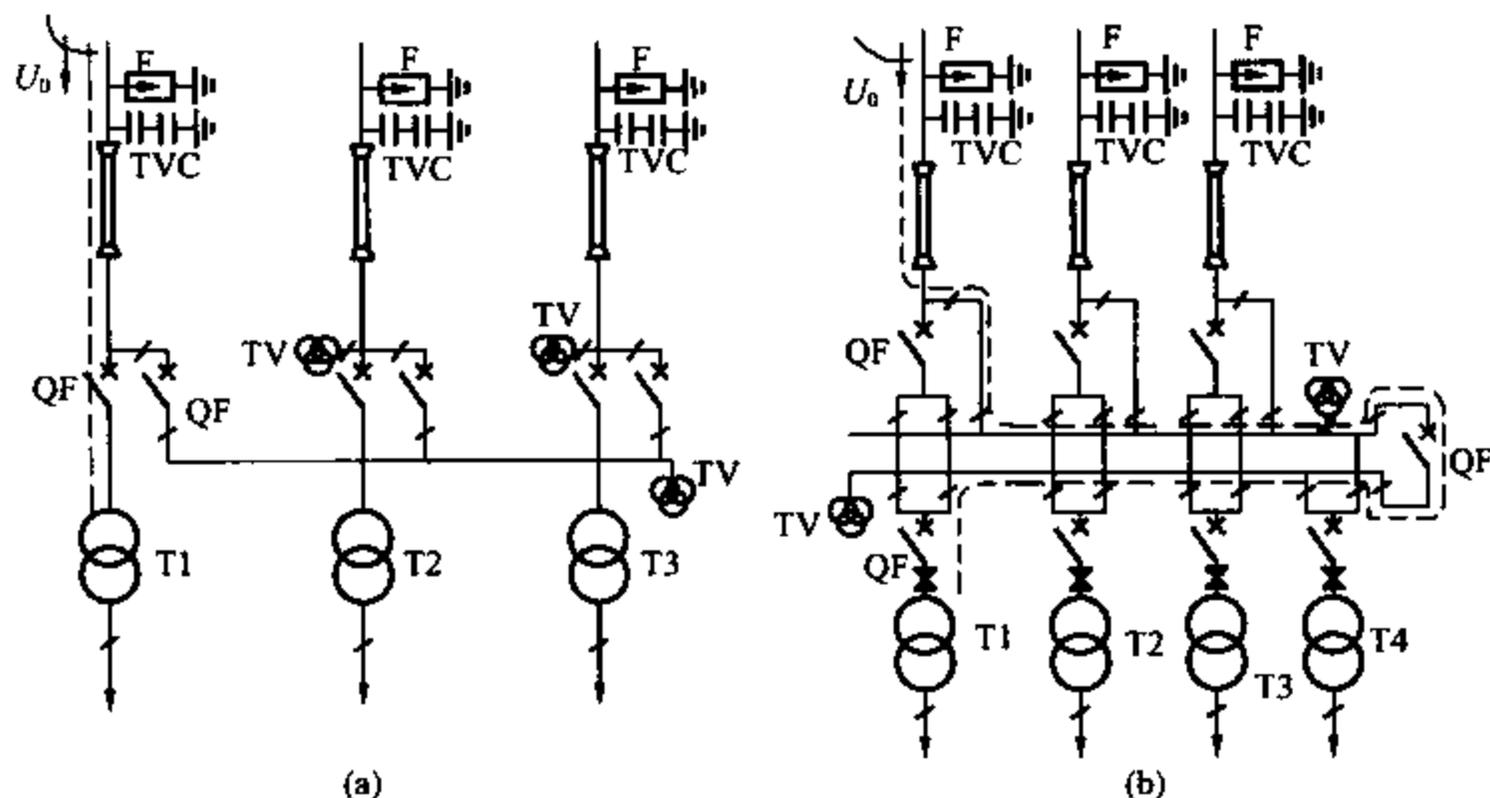


图 6-12 220kV 混合接线 GIS 变电站主接线图

(a) 单母线; (b) 双母线

线路和母线侧氧化锌避雷器均选用我国 $Y_{10}W_5-200/496$ 型或瑞典 XAP-198C 型, 其伏安特性参数如表 6-8 所示。设备的等值电容及计算电路如图 6-13 所示。

表 6-8 避雷器伏安特性参数

I (kA)		1	2	3	5	10	20	40
		U (kV)	$Y_{10}W_5-200/496$ 型	408	422	433	457	483
XAP-198C 型	385		398	408	431	456	495	546

2. 计算结果

计算结果如表 6-9 和表 6-10 所示。表 6-9 避雷器采用西瓷所 $Y_{10}W_5-200/496$ 型, 表 6-10 避雷器采用瑞典 XAP-198C 型。

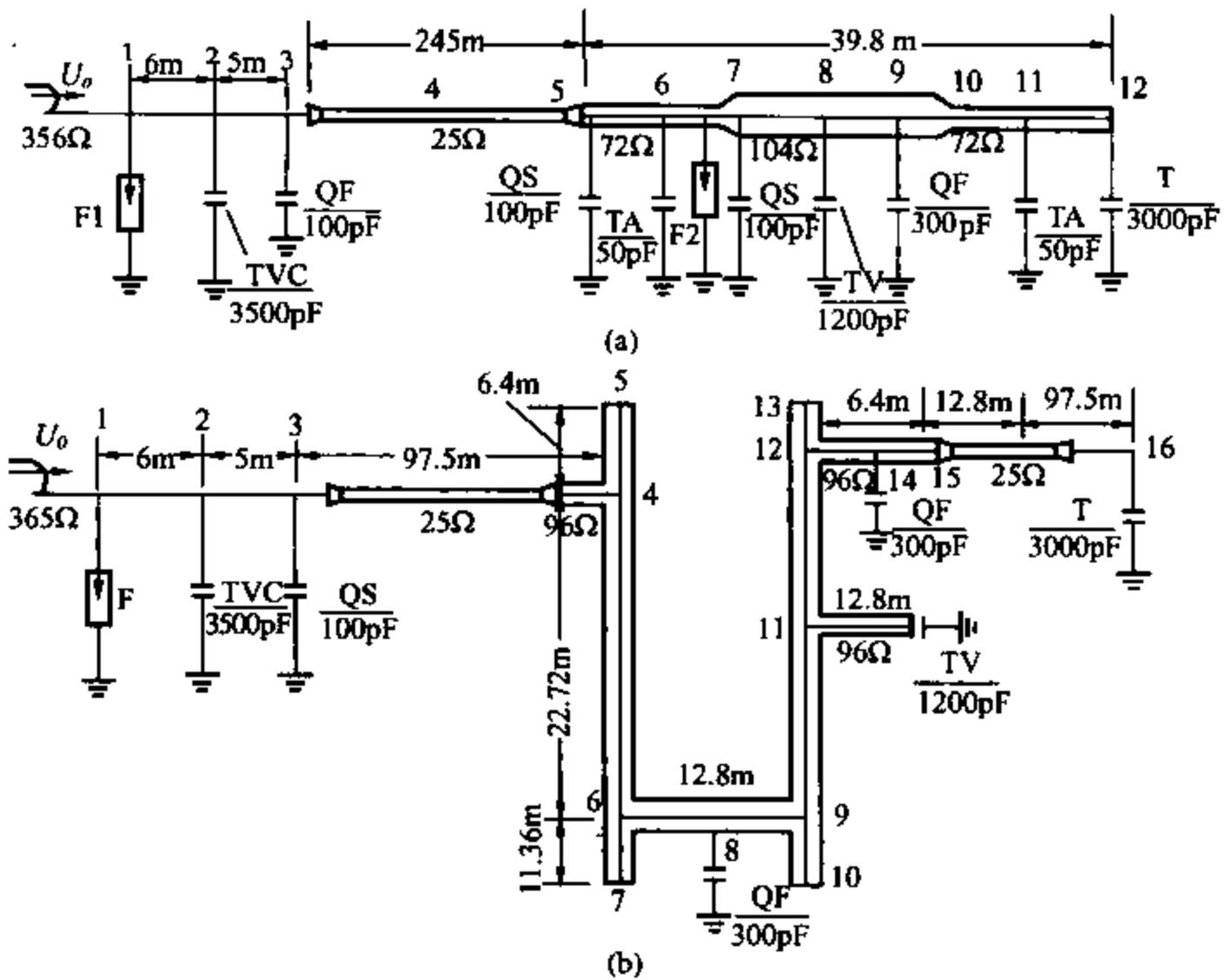


图 6-13 设备的等值电容及计算电路

(a) 单线—单母线—单变压器运行方式; (b) 单线—双母线—单变压器运行方式

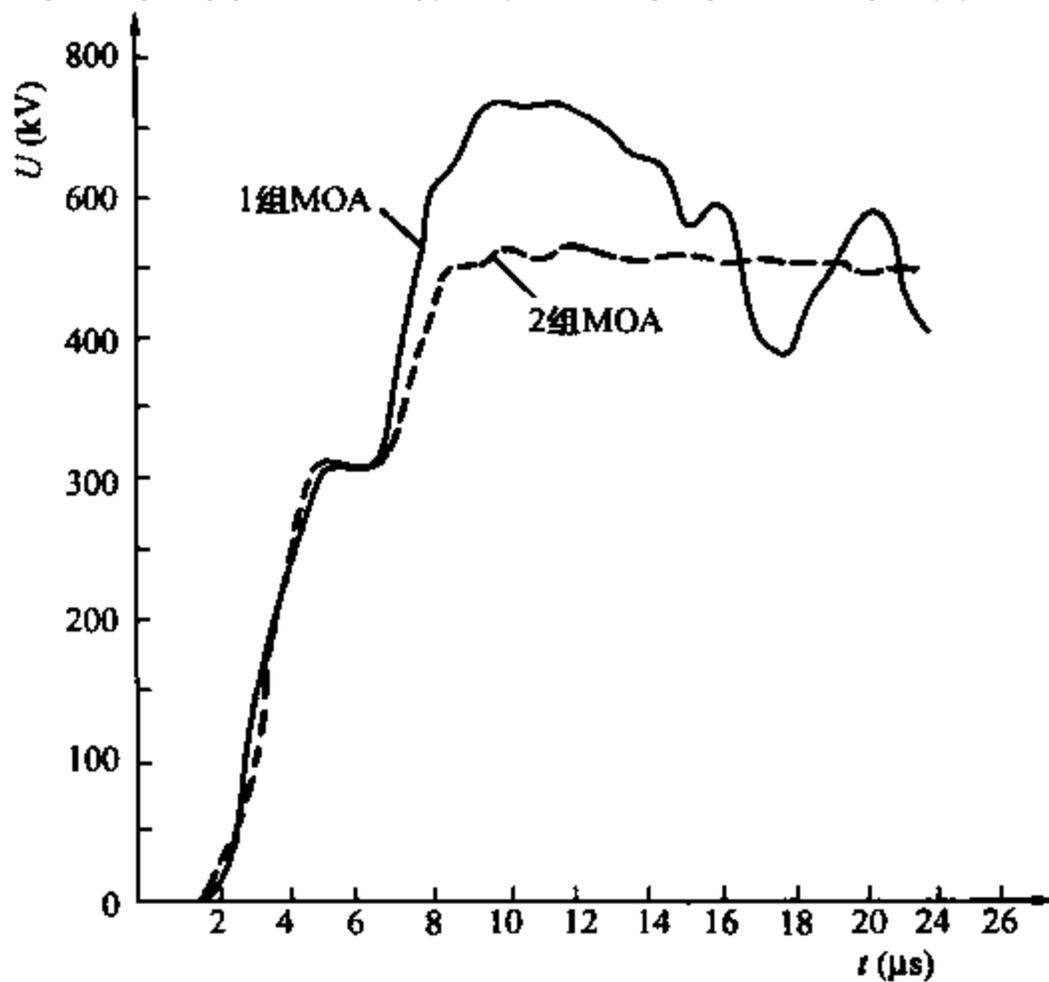


图 6-14 变压器各时刻电压值 [图 6-13 (a)]

表 6-9 图 6-13(a)中各节点电压最大值及出现时刻

节点编号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12*	
有 TVC 及 1 组 MOA	$\tau=2.8\mu\text{s}$ $U_0=1220\text{kV}$	$U(\text{kV})$	488.8	538.5	556.9	575.9	574.8	579.1	579.3	579.3	579.7	582	586	
		$I_b(\text{kA})$	7.9	11.3	9.2	10.6	10.7	10.7	10.73	10.74	10.75	10.8	10.82	10.9
		$t(\mu\text{s})$	13.3											
无 TVC 有 1 组 MOA	$\tau=2.8\mu\text{s}$ $U_0=1220\text{kV}$	$U(\text{kV})$	489.4	539.2	557.4	576.1	575.3	579.1	579.6	579.6	581.7	583.2	589	
		$I_b(\text{kA})$	7.96	11.9	11.8	10.7	10.6	10.5	10.52	10.53	10.3	10.2	10.22	10.26
		$t(\mu\text{s})$	13.6											
有 TVC 及 2 组 MOA	$\tau=2.8\mu\text{s}$ $U_0=1220\text{kV}$	$U(\text{kV})$	443	467.7	469.5	462.3	462.3	461.9	462	462.1	462.1	462.1	465.1	
		$I_b(\text{kA})$	2.59	8.63	8.76	10.3	10.31	10.33	5.74	10.34	10.36	10.38	10.38	10.4
		$t(\mu\text{s})$	15.5											

* 12 点为变压器电压最大值,该点各时刻电压值如图 6-14 所示。

表 6-10 图 6-13(b) 中各节点电压最大值及出现时刻

节点编号		1	2	3	4	5	6	7	8	
有 TVC 及 1 组 MOA	$\tau=2.8\mu\text{s}$ $U_0=1220\text{kV}$	$U(\text{kV})$	443.8	455.7	471.47	498.18	498.72	500.49	500.73	500.05
		$I_b(\text{kA})$ $t(\mu\text{s})$	7.43 11.74	10.75	7.60	7.56	7.56	7.58	7.56	7.60
无 TVC 有 1 组 MOA	$\tau=2.8\mu\text{s}$ $U_0=1220\text{kV}$	$U(\text{kV})$	444.9	456.9	477.6	505.38	506.67	509.98	510.17	510.56
		$I_b(\text{kA})$ $t(\mu\text{s})$	7.62 11.25	10.84	7.38	7.22	7.24	7.22	7.22	7.26
节点编号		9	10	11	12	13	14	15	16	
有 TVC 及 1 组 MOA	$\tau=2.8\mu\text{s}$ $U_0=1220\text{kV}$	$U(\text{kV})$	499.68	499.86	500.37	504.52	602.93	505.34	510.79	526.49
		$I_b(\text{kA})$ $t(\mu\text{s})$	7.60	7.60	9.34	9.36	9.30	9.26	9.16	8.72
无 TVC 有 1 组 MOA	$\tau=2.8\mu\text{s}$ $U_0=1220\text{kV}$	$U(\text{kV})$	510.19	510.64	507.7	509.38	512.06	515.7	523.36	540.29
		$I_b(\text{kA})$ $t(\mu\text{s})$	7.24	7.22	8.84	7.54	8.84	8.82	8.72	8.36

第四节 电力电缆线路上的限流电抗器及过电压保护

随着城市电力网的发展，10kV 变电站经限流电抗器电缆出线的送电方式越来越多地被采用。但是当系统发生短路时常出现电抗器匝间击穿和对地闪络事故，造成十分严重的经济损失，国内多处发生过此类事故，应引起重视。本节通过对经限流电抗器电缆出线的变电站进行理论分析和数值计算，提出了电缆单相短路发展为两相短路时产生过电压的机理，并推荐采用新的保护措施。

155

一、单相短路过电压产生的机理

图 6-15 所示为电缆单相短路时过电压产生机理。电缆用分布参数线路来等值，考虑到电缆比较短，波的折反射产生的过电压等值频率较高，因此限流电抗器到电缆之间 3~10m 的连线也必须用分布参数线路来研究其波过程。对于限流电抗器则用 1 个高波阻抗及很短的分布参数线段来等值。

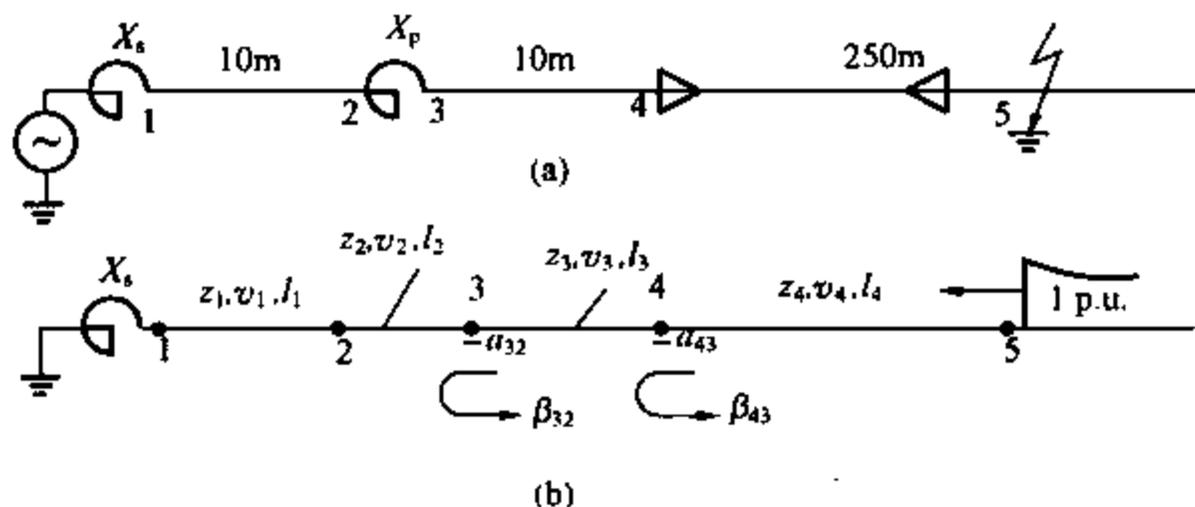


图 6-15 电缆单相短路时过电压产生机理

(a) 系统单线图；(b) 短路故障瞬间电压波的传播

图 6-15 中线段波阻抗 $Z_1 = Z_3 = 400\Omega$ ，波速 $v_1 = v_3 = 300\text{m}/\mu\text{s}$ ，线段长度 $l_1 = l_3 = 10\text{m}$ ；电抗器波阻抗 $Z_2 = 100\text{k}\Omega$ ， $\tau_2 = 154.35\mu\text{s}$ ；电缆波阻抗 $Z_4 = 10\Omega$ ，长度 $l_4 = 250\text{m}$ ，波速 $v_4 =$

150m/ μ s。

当电缆发生单相接地时，接地点的电压突然变为零，根据叠加原理，相当于在接地点施加了一个冲击波。该冲击波的幅值为接地瞬间该点的电压幅值，波头接近于直角波，由电缆进入连线，再传播到电抗器。根据图 6-15 (a)，由波的折反射理论，设幅值为 1p. u. 的电压波由短路点入射，经电缆到达点 4 时，因为 $Z_5 \ll Z_4$ ，在点 4 几乎产生全反射；当此折射波到达点 3 时，同理在点 3 再次几乎产生全反射。也就是说，电缆上单位幅值的入射波经连线到达电抗器时，作用在限流电抗器上的电压幅值约为来波幅值的 4 倍。由于限流电抗器是一个串联在分布参数回路中的电抗器，它能改变通过它的折射波的陡度，但不能降低折射波的幅值。当波通过电抗器到达点 2 时，其幅值由与点 2 相连的元件的性质决定。综上所述，电缆短路时产生的过电压，其最大值出现在串联电感元件端部。

此外还需注意：由单相短路发展为两相短路，也会出现过电压。众所周知，由于 10kV 电网一般采用中性点绝缘的接地方式，单相接地允许持续运行 0.5~2h。单相接地时，正常相的电压就会升至线电压。若在相间电压达最大值附近时刻再发生相间短路，即相当于施加一个线电压幅值的波，则略去各种影响因素作定性分析，可认为在限流电抗器上会产生约 4 倍线电压幅值的过电压，这就会对限流电抗器构成威胁。但实际回路是三相的，考虑到相间的相互影响，单相短路暂态过程等影响因素，相间短路后作用在电抗器上的过电压不宜用解析的方法来分析，而必须用数值计算的方法来研究。

二、计算实例

1. 计算条件及原始参数

计算时仅考虑一回出线，且按无损线处理，短路距离取 250m。计算采用原始参数如下。

电源等值电抗： $X_s = 0.084\Omega$ ；限流电抗器在工频下的等值电抗： $X_p = 0.4849\Omega$ ；电缆参数： $Z_1 = 14\Omega$ ， $Z_0 = 21\Omega$ ， $v_1 =$

168m/ μ s, $v_0 = 112$ m/ μ s; 母线及连线参数: $Z_1 = 400\Omega$, $Z_0 = 870\Omega$, $v_1 = 290$ m/ μ s, $v_0 = 193$ m/ μ s; 氧化锌避雷器 MOA: 采用分段线性化模型, $u = 21 \times 10^6 i$ ($0 \leq i \leq 1$ mA), $u = 21 \times 10^6 + 46i$ (1 mA $\leq i \leq 5$ kA); 变压器: $R_k = 0.0165\Omega$, $X_k = 0.3553\Omega$, $R_m = 3096.9\Omega$, $X_m = 375.4\Omega$; 耦合元件: $X_s = 333$ k Ω , $X_m = 333$ k Ω 。

2. MOA 位于母线时的计算结果及分析

原有的过电压防护措施是将 MOA 装于母线上, 为说明母线 MOA 限制此类过电压的问题, 取等值回路如图 6-16 所示。计算结果见表 6-11, 典型的过电压形如图 6-17 所示, 其中电源相电压最大值为

$$E_m = 10.5 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 8.57(\text{kV})$$

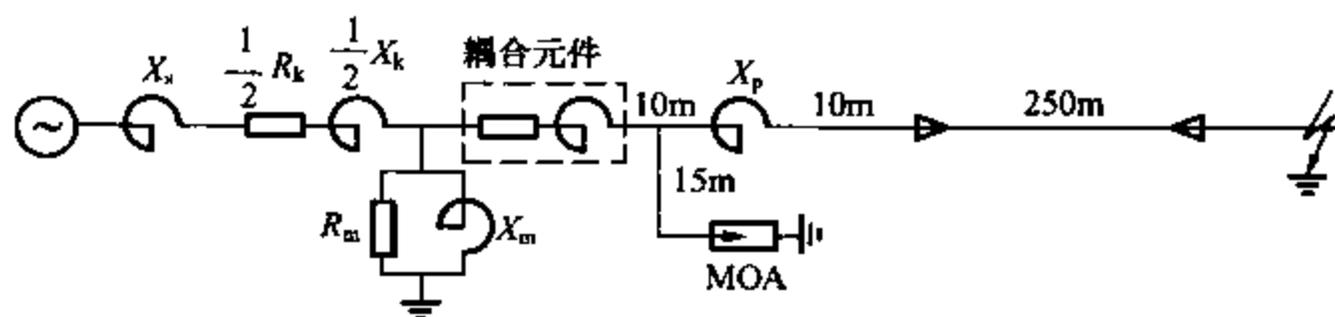


图 6-16 MOA 装于母线时的等值回路

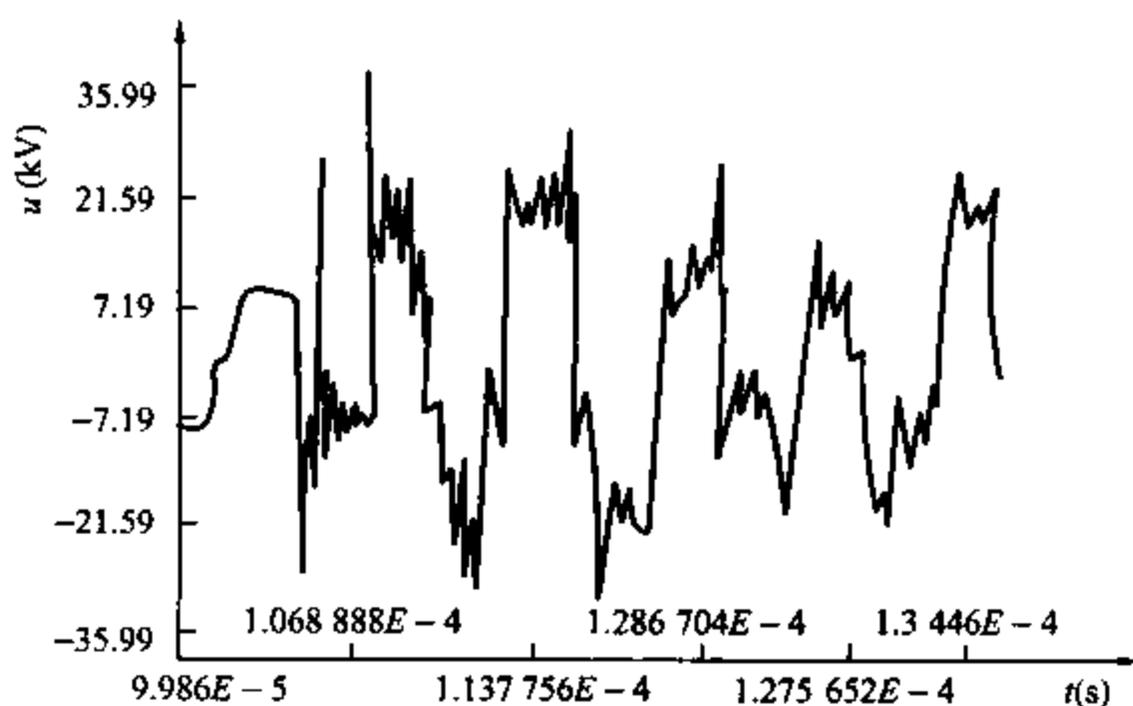


图 6-17 过电压波形图

表 6-11 MOA 装于母线时的计算结果

条 件	电抗器母 线侧对地 电压 (kV)	电抗器电 缆侧对地 电压 (kV)	电 缆 头 对地电位 (kV)	电抗器上 的电压 (kV)	短路点 的相间 电 压 (kV)	MOA 上 的电流 (A)	MOA 上 的电压 (kV)
单相短路	28.39	24.44	24.38	18.65	23.00	—	—
两相短路, 母线无 MOA	37.80	46.55	38.16	48.15	27.88	—	—
两相短路, 母线有 MOA	29.10	46.62	29.07	51.16	27.13	7.02	28.18

158

由图 6-17 可知, 过电压波形为方波叠加高频振荡, 方波重复频率约为 136kHz, 高频分量频率约为 7300kHz。

由表 6-11 可知, 两相短路比单相短路产生的过电压高, 且当母线上有 MOA 时, 电抗器两端电位差仍达 51.16kV。电抗器电缆侧对地电压为 46.42kV, 而作用于 MOA 上的过电压仅为 28.18kV。其原因是过电压陡度 a 大, 从而使电抗器上的过电压与 MOA 残压之差很大。此时流过 MOA 的最大电流值仅为 7.015A, 因此在电抗器事故中 MOA 无动作记录。可见母线 MOA 对此类过电压是无能为力的。

3. MOA 紧靠电抗器时的计算结果及分析

为探讨此类过电压的防护措施, 将 MOA 与电抗器并联或紧靠电抗器对地安装的情况进行了计算。考虑到电网轻载时母线电压会升高, 电源相电动势取为 $E_{\phi} = 1.15 \times 10.5 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 9.86$ (kV)。由于电抗器上的过电压比母线 MOA 上的过电压出现早, 计算中没有考虑母线 MOA。取等值回路如图 6-18 所示, 计算结果见表 6-12。

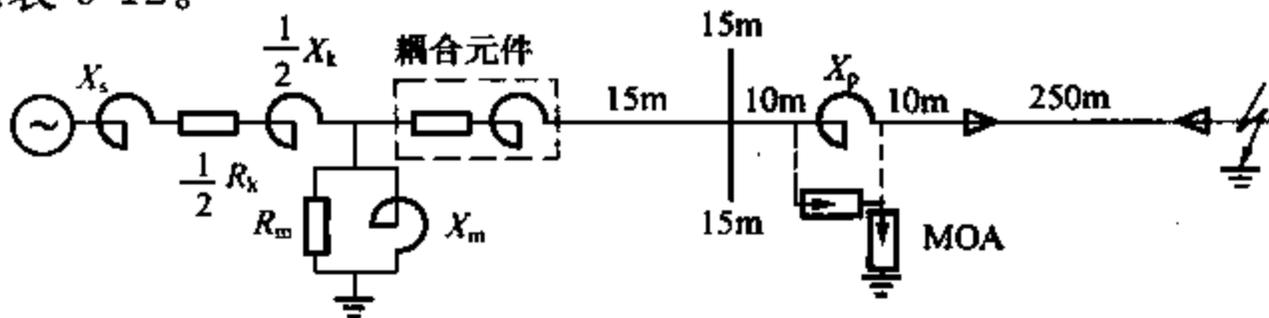


图 6-18 MOA 紧靠电抗器的等值回路

表 6-12 MOA 紧靠电抗器的计算结果

MOA 位置	无 MOA			MOA 位于电抗器电缆侧				MOA 与电抗器并联			
	0.103 77	0.105 81	0.106 85	0.103 77	0.105 81	0.106 85	0.103 77	0.105 81	0.106 85		
相间短路 Φ (ms)											
电抗器母线侧对地电压(kV)	48.07	33.78	48.95	30.39	30.39	30.39	30.39	30.65	30.39		30.39
电抗器电缆侧对地电压(kV)	55.31	46.82	59.20	28.48	28.49	28.48	28.48	28.42	28.48		28.48
电缆头对地电压(kV)	33.55	31.82	38.45	28.45	28.45	28.45	28.45	28.49	28.45		28.45
电抗器上电压(kV)	70.15	55.75	53.41	37.89	39.69	43.44	34.89 ^①	39.89	39.38		39.38
短路点相间电压(kV)	31.81	34.47	30.33	27.12	27.12	27.12	27.12	37.12	27.12		27.12

① 令单相接地时刻为相电压过峰值时刻,相间短路时刻为相间发生短路的时刻。

由表 6-12 可知：无 MOA 保护时，两相短路时刻不同，在电网上所产生的过电压幅值不同，其原因是随着相间短路时刻的变化，相间电压幅值也在变化。根据波的折反射原理，短路时刻电压幅值越高，短路后产生的过电压也就越高。

无 MOA 保护时，作用在电抗器上的最大过电压达 70.15kV，约为额定相电压的 8.2 倍。又由于其等值频率很高，在电抗器上的电压分布不均匀，因此短路所产生的过电压足以使电抗器匝间击穿；再考虑到电抗器支柱绝缘子下脚法兰的螺钉一般都凸出，形成强电场点，有可能形成电抗器对地闪络。当电抗器对地闪络时，反过来又会产生幅值较高的截波，也会导致电抗器匝间击穿。

当 MOA 紧靠电抗器电缆侧对地安装或与电抗器并联时，可使电抗器及其附近对地的过电压大大降低，其原因是：由于 MOA 紧靠电抗器，作用在电抗器上的过电压与 MOA 上的电压基本相同，当 MOA 安装位置的过电压大于 21kV（MOA 在 1mA 下的压降）时，MOA 将起作用。又由于此类过电压作用时间很短，故 MOA 的通流能力是足够的。因此，利用 MOA 限制此类过电压是很有效的。MOA 与电抗器并联或紧靠电抗器电缆侧对地安装，这两种位置的保护效果接近。

第五节 220kV 长电缆线路过电压保护计算实例

某地区 220kV 变电站，分别由两回线路供电：一回 A 线 220kV 架空线（3.8km）和电缆线路（10.48km）一变压器；另一回 B 线 220kV 架空线（3.81km）和电缆线路（9km）一变压器。在实用的电缆长度范围内，对由架空线路直接供电的电缆和 GIS 变电站，一般只需要装设线路入口避雷器，即可满足要求，除非经过计算论证不能保护全部时，才有必要考虑在电缆终端或 GIS 处加装 1 组避雷器保护，特别是对于采用封闭式避雷器，因造价很高，从节省投资方面考虑更应校核。

一、计算条件

1. 运行方式

如图 6-19 所示, 该系统初步设计 220kV 侧采用线路变压器供电方式, 该主变压器容量为 120MVA, 电压为 220/121/10.5kV, 三绕组变压器容量比为 100/100/100。今要求确定长电缆末端或主变压器前是否要加装 1 组避雷器。计算时可将该系统主接线图简化为图 6-20 所示等值电路。

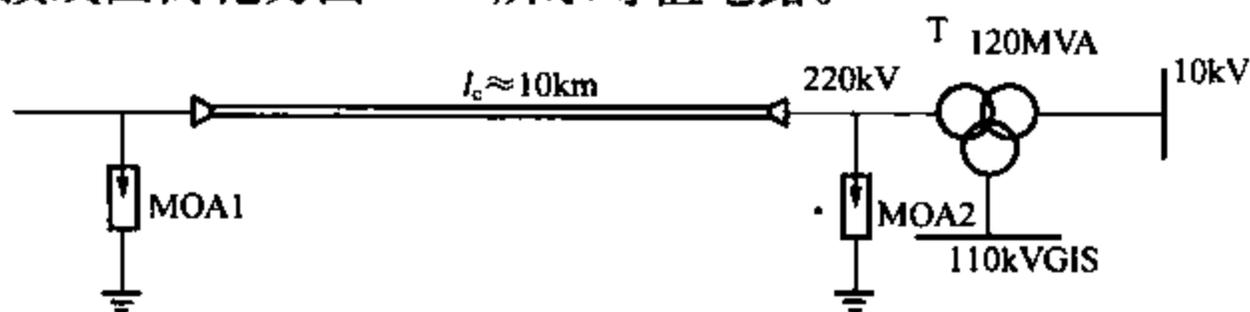


图 6-19 某 220kV 变电站主接线简图

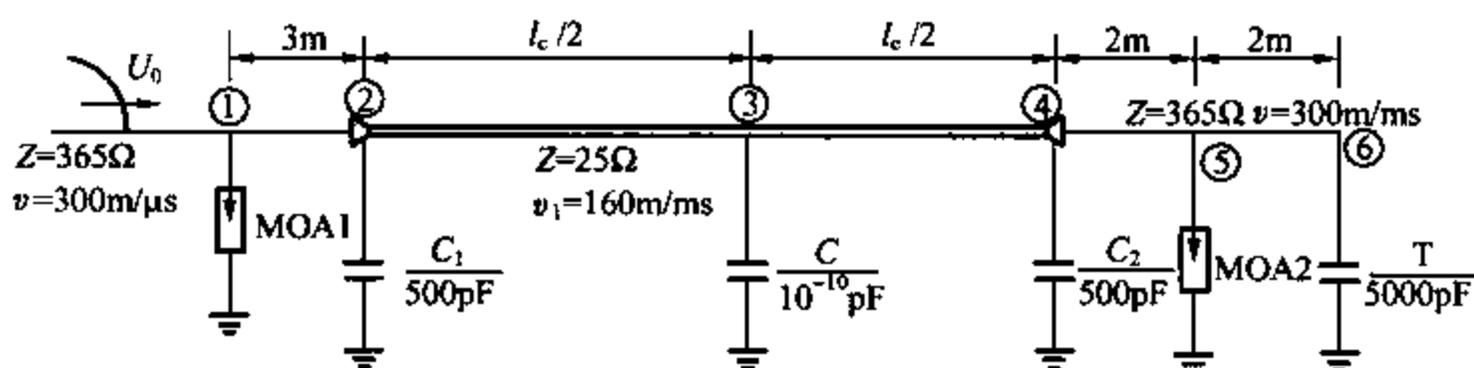


图 6-20 计算等值电路

2. 元件参数

(1) 架空线路。波阻抗 $Z=365\Omega$, 波速 $v=300\text{m}/\mu\text{s}$ 。

(2) 电缆线路。选取两种电缆：①自容式充油电缆波阻抗 $Z_1=25\Omega$, 波速 $v=160\text{m}/\mu\text{s}$ ；②XLPE 电缆波阻抗 $Z_1=30\Omega$, 波速 $v_1=170\text{m}/\mu\text{s}$ 。

(3) 避雷器。选用我国西瓷所和瑞典产品, 其伏安特性参数见表 6-13。

表 6-13 避雷器伏安特性参数

I (kA)		1	2	3	5	10	20	40
U (kV)	西瓷所	408	422	433	457	488	525	580
	瑞典	385	398	408	431	456	495	546

二、计算结果

以 A 线为例, 计算结果见表 6-14 和表 6-15。

表 6-14 A 线 (10km) 充油电缆来波各节点电压 (电流)
最大值及出现时刻

节 点		被求量	1	2	3	4	5	6	
2 组 MOA	$\tau=0.5\mu\text{s}$ $U_0=1400\text{kV}$	U (kV)	431.868	451.911	452.164	440.342	461.349	465.205	
		I (kA)	2.948	4.585					
		τ (μs)	126.307	188.606	126.112	157.259	188.442	188.603	
	$\tau=2.8\mu\text{s}$ $U_0=1200\text{kV}$	U (kV)	287.013	431.488	387.045	384.109	432.196	432.570	
		I (kA)	0.949	2.917					
		τ (μs)	128.328	190.894	128.311	159.533	190.646	190.874	
1 组 MOA	$\tau=0.5\mu\text{s}$ $U_0=1400\text{kV}$	U (kV)	445.598	—	471.009	463.772	544.701	591.559	
		I (kA)	4.069	—					
		τ (μs)	126.317	—	126.095	155.223	188.903	188.686	
	$\tau=2.8\mu\text{s}$ $U_0=1200\text{kV}$	U (kV)	411.270	—	414.300	412.047	532.316	528.198	
		I (kA)	1.267	—					
		τ (μs)	128.413	—	128.225	159.382	191.072	190.824	

表 6-15 A 线 (10km) XLPE 电缆来波各节点电压 (电流)
最大值及出现时刻

节 点		被求量	1	2	3	4	5	6
2 组 MOA	$\tau=0.5\mu\text{s}$ $U_0=1400\text{kV}$	U (kV)	448.94	450.07	475.54	479.17	469.76	464.28
		I (kA)	4.342	4.434				
		τ (μs)	118.97	177.49	118.72	148.02	177.37	177.60
	$\tau=2.8\mu\text{s}$ $U_0=1200\text{kV}$	U (kV)	418.21	439.77	423.00	425.83	441.43	441.68
		I (kA)	1.834	3.593				
		τ (μs)	121.07	179.51	120.80	150.04	179.38	179.59
1 组 MOA	$\tau=0.5\mu\text{s}$ $U_0=1400\text{kV}$	U (kV)	461.04	—	495.71	509.19	543.74	604.26
		I (kA)	5.777	—				
		τ (μs)	118.99	—	118.72	147.99	177.81	177.60
	$\tau=2.8\mu\text{s}$ $U_0=1200\text{kV}$	U (kV)	431.85	—	437.12	449.96	542.71	551.83
		I (kA)	2.947	—				
		τ (μs)	121.08	—	120.80	149.65	179.42	179.26

三、计算结果分析

为了判断设备上的雷电过电压是否在允许范围之内, 应先确

定设备的保证冲击绝缘强度，再与设备上出现的过电压值进行比较。综合考虑绝缘的累积效应与避雷器的老化因素，应按如下方法进行计算。

(1) 220kV 变压器全波冲击试验电压为 950kV，为了保证绝缘强度，应考虑一个保险系数 $k=1.15$ ，则变压器保证冲击绝缘强度为

$$U_p = U_{BL} / k = 950 / 1.15 = 826 \text{ (kV)}$$

(2) 220kV 电容式电压互感器的全波冲击试验电压为 950kV，取 $k=1.15$ ，则电压互感器保证冲击绝缘强度， $U_p = 826\text{kV}$ 。

(3) 220kV 户外敞开式隔离开关 GW 的全波冲击试验电压为 950kV， $k=1.05$ ，则隔离开关保证冲击绝缘强度 $U_p = 913\text{kV}$ 。

(4) 220kV 电力电缆全波冲击试验电压为 1050kV， $k=1.15$ ，则电力电缆保证冲击绝缘强度 $U_p = 913\text{kV}$ 。

(5) 220kV 全封闭组合电器 GIS 全波冲击试验电压为 1050kV， $k=1.15$ 则组合电器保证冲击绝缘强度 $U_p = 913\text{kV}$ 。

电气设备的保护裕度应按下式进行计算

$$K_p = (U_p - U_m) / U_p \times 100\%$$

式中 K_p ——过电压保护裕度，对电缆和 GIS 要求 $K_p = 18\% \sim 20\%$ ；

U_m ——设备上过电压最大值。

上述计算结果表明设备的保护裕度较大，都能满足要求，具体计算结果见表 6-16。

表 6-16 过电压保护裕度

		$\tau=0.5\mu\text{s}, U_0=1400\text{kV}$		$\tau=2.8\mu\text{s}, U_0=1200\text{kV}$	
		1组 MOA	2组 MOA	1组 MOA	2组 MOA
A 线	变压器	28.6%	43.7%	36%	47.5%
	电缆	40.3%	49.5%	41.7%	52.6%

四、避雷器保护方案确定

根据国内外有关文献介绍,在电缆实用长度范围内,对于电缆—GIS系统,一般只在架空线与电缆连接处装设1组避雷器就能保护全变电站,本实例计算结果也证实这一点。故该工程初步设计只采用1组避雷器保护方案。但后来在施工设计中,为适应今后电网发展的需要,大多数人建议在电缆—变压器组中,变压器前加装一台断路器,即最终采用2组避雷器保护方案。

思考题

1. 不同电压等级的电力电缆其冲击绝缘水平是如何确定的?它与哪些因素有关?
2. 什么叫电力电缆冲击特性长度?它与系统的绝缘配合有什么关系?
3. 具有电缆段的GIS变电站,其过电压保护有何特点?
4. 为什么当10kV电缆发生短路时,常会引起限流电抗器匝间击穿或对地闪络?
5. 10kV带电抗器的电缆出线,若采用MOA作为过电压保护元件时,应如何安装才合理?
6. 长电缆线路过电压保护有什么特点?

高压单芯电缆护层过电压 保护及金属护套环流计算

电力安全规程规定,电气设备非带电的金属外壳都要接地,因此电缆的铝包或金属屏蔽层都要接地。通常 35kV 及以下电压级的电缆都采用两端接地方式,这是因为这些电缆大多数是三芯的。在正常运行中,流过 3 个线芯的电流总和为零,在铝包或金属屏蔽层外基本上没有磁链,这样在铝包或金属屏蔽层两端就基本上没有感应电压,所以两端接地后不会有感应电流流过铝包或金属屏蔽层。但是当电压超过 35kV 时,大多数采用单芯电缆,当单芯电缆线芯通过电流时,就会有磁力线交链铝包或金属屏蔽层,使它的两端出现感应电压。此时,如果仍将铝包或金属屏蔽层两端三相互联接地(见图 7-1),则铝包或金属屏蔽层将会出现很大的环流,其值可达线芯电流的 50%~95%,形成损耗,使铝包或金属屏蔽层发热,这不仅浪费了大量电能,而且降低了电缆的载流量,并加速了电缆绝缘老化,因此单芯电缆不应两端接地。个别情况下(如短电缆或轻载运行时)也可将铝包或金属屏蔽层两端三相互联接地。

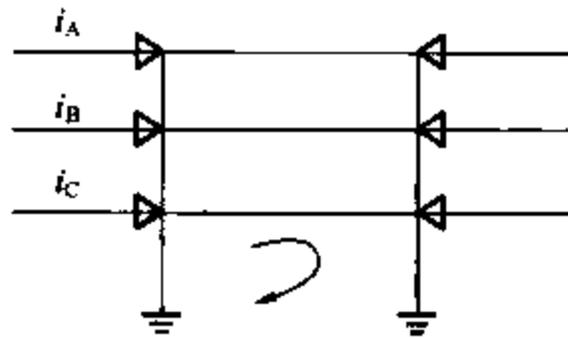


图 7-1 两端三相互联接地

但是,当铝包或金属屏蔽层有一端不接地后,接着带来的问题是,当雷电波或内过电压波沿线芯流动时,电缆铝包或金属屏蔽层不接地端会出现很高的冲击电压;在系统发生短路,短路电流流经线芯时,电缆铝包或金属屏蔽层不接地端也会出现较高的工频感应电压。当电缆外护层绝缘不能承受这种过电压的作用而

损坏时,就会出现多点接地,形成环流。因此,在采用一端互联络接地时,必须采取措施限制护层上的过电压。

第一节 冲击电压作用下的护层过电压

一、过电压的产生机理

沿电缆线芯流动的冲击电压波为什么会使铝包或金属屏蔽层不接地端产生很高的过电压呢?下面用图 7-2 进行分析。

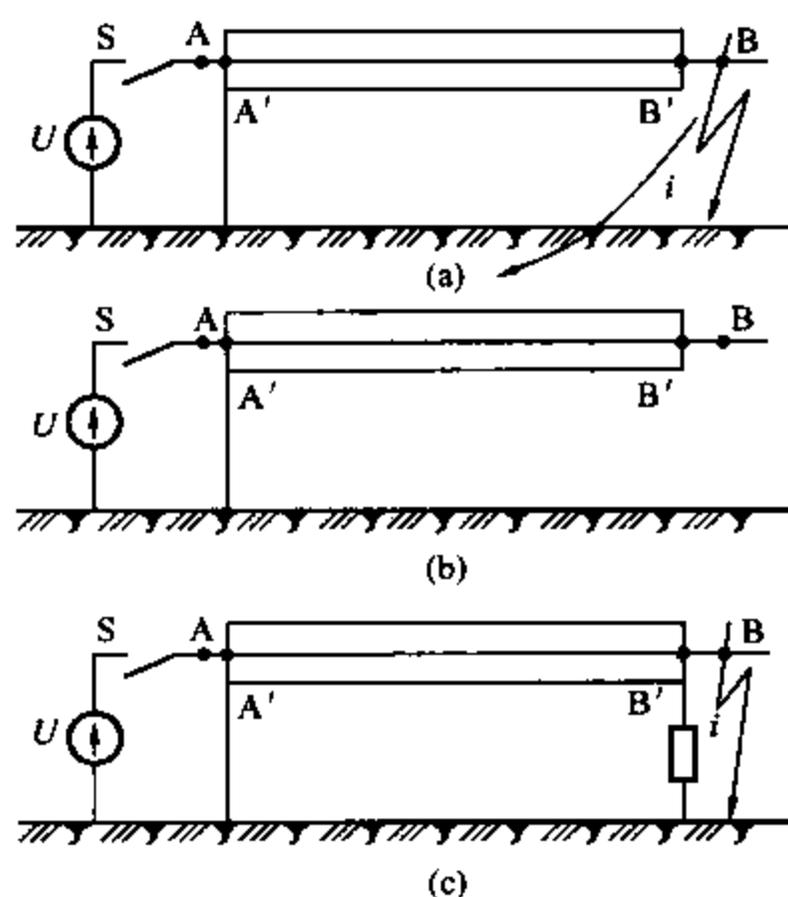


图 7-2 冲击波通过电缆的 3 种情况

(a) 末端短路(护套不接地); (b) 末端开路(护套不接地);

(c) 末端短路(护套不接地端经保护器接地)

图 7-2 中所示的电缆为首端三相互联络接地,作用在电缆线芯的冲击电压为 U , 由于铝包或金属屏蔽层首端接地, 加在电缆首端的冲击电压 U 必然会全部作用在铝包或金属屏蔽层和线芯间。也就是说, 将有幅值为 U 的冲击电压波在线芯上流动, 那么线芯和金属护套也将随之流过电流 i , 其值由电缆的波阻抗 Z_1 决定, 即

$$i = \frac{U}{Z_1} \quad (7-1)$$

由于线芯电流与铝包或金属屏蔽层电流方向相反而大小相等，在铝包或金属屏蔽层外面就没有磁力线作用，因此不会出现护层过电压。但是当冲击电压波到达电缆末端时，情况就不同了，下面来分析两种极端情况：

(1) 电缆线芯末端短路 [见图 7-2 (a)]。

(2) 电缆线芯末端开路 [见图 7-2 (b)]。

流经线芯的冲击电压到达开路的末端后会全反射。全反射的结果使线芯和铝包或金属屏蔽层上的电流为零，因此在电缆护层上的电压不会升高。实测表明，铝包或金属屏蔽层上的电压仅为线芯电压的 5% 左右。可见，最严重的情况发生在电缆末端线芯出现接地故障时，铝包或金属屏蔽层会出现很高的感应电压值。显然，如果电缆末端线芯经过某一电阻接地，则感应电压将比线芯短路的情况要低些。

为了限制这一过电压，显然要让电缆铝包或金属屏蔽层末端在冲击下接地，使冲击电流能以铝包或金属屏蔽层为回路，则电缆护层上就不会有过电压了。为此，可在电缆铝包或金属屏蔽层和大地间接一过电压保护器（由氧化锌阀片组成），给冲击电流以通路。显然，接有保护器后，在冲击电压的作用下，冲击电流将经保护器回到铝包或金属屏蔽层 [见图 7-2 (c)]，而作用在电缆护层上的冲击电压将等于保护器的残压。根据彼得逊法则不难求出，当电缆末端接地时，流经保护器的电流为

$i_b = \frac{2U}{Z_1}$ ，而当电缆末端经某一电阻 R 接地时，流经保护器的电

流 $i_b = \frac{2U}{Z_1 + R}$ ，这一电流最大可能达到 10kA，保护器在这一冲

击电流作用下不应损坏，同时要求保护器的残压应低于电缆护层绝缘的冲击耐压值。关于保护器的选择方法，本章第四节将另行详细介绍。

二、护层过电压的计算

(一) 电缆金属护套^①一点接地时护层过电压的计算

1. 不接地端不装设保护器时护层所受的冲击电压

此时，不接地端护层所受的冲击电压可按图 7-3 (b) 所示的等值电路进行估算。图中 Z_1 为电缆线芯和金属护套间的波阻抗， Z_2 为电缆金属护套和大地间的波阻抗， Z_0 为架空输电线的波阻抗， U_0 为沿架空线路袭来的雷电压进行波幅值。

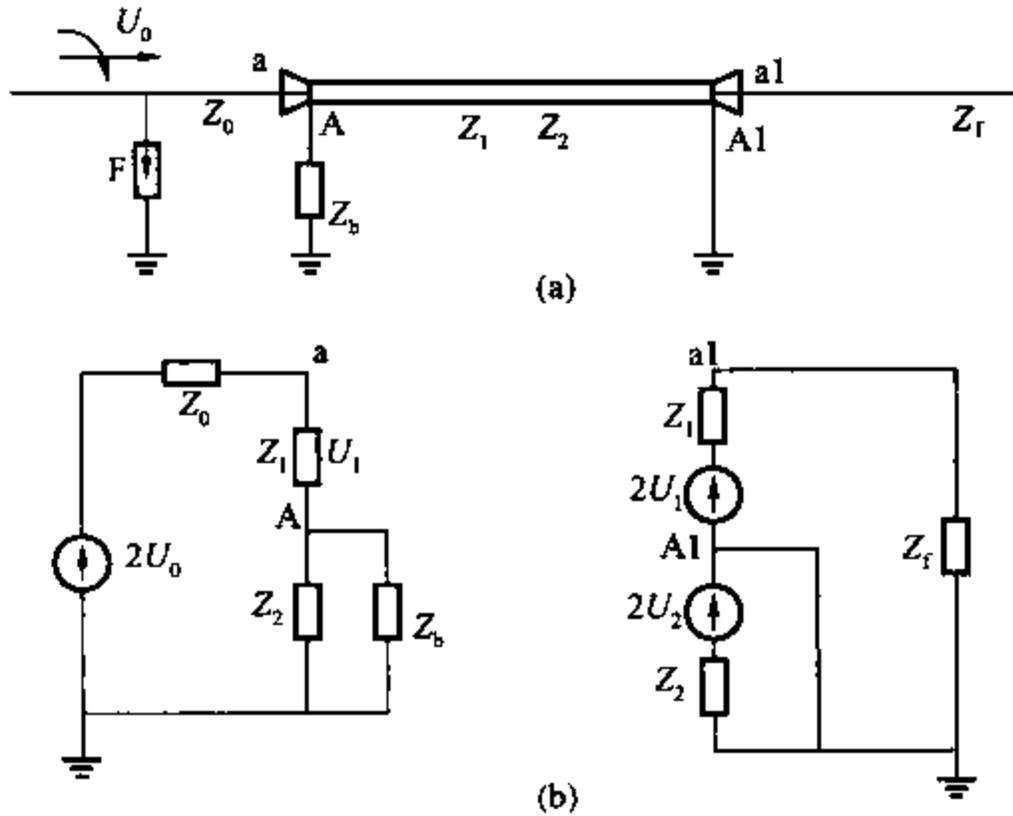


图 7-3 护层过电压计算电路 (一)

(a) 原理接线; (b) 等值电路

从等值电路可知，此时金属护套不接地端护层所受的电压为

$$U_A = U_2 = 2U_0 \frac{Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (7-2)$$

其中

$$Z_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon}} \ln \frac{r_s}{r_1}$$

$$Z_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon}} \ln \frac{D}{r_s}$$

① 金属护套就是指铝包或金属屏蔽层。

式中 r_1 ——电缆线芯半径；

r_s ——电缆金属护套半径；

D ——地中电流穿透深度， $D=660\sqrt{\rho/f}$ 。

一般 Z_1 可以根据电缆几何尺寸进行计算或实测， Z_2 由于地中电流分布复杂，也可通过实测确定（具体测试方法见附录 B）。

对于 110kV 电缆线路系统，当 $U_0 = U_{50\%} = 700\text{kV}$ ， $Z_0 = 500\Omega$ ， $Z_1 = 17.8\Omega$ ， $Z_2 = 100\Omega$ （缆沟式敷设）时，代入式（7-2）可得无避雷器时 A 点电压为

$$U_A = 2 \times 700 \times \frac{100}{500 + 17.8 + 100} = 226.5(\text{kV})$$

当电缆首端与架空输电线连接处装有 FZ-110J(或 Y10W)型避雷器并动作时， $U_0 = U_5 = 332\text{kV}$ (Y10W 为 260kV)，则 $U_A = 107.4\text{kV}$ (Y10W 为 84.5kV)。对于直埋式电缆， $Z_2 = 15\Omega$ 。同理也可以算出 $U_A = 39.4\text{kV}$ (无避雷器)和 $U_A = 18.9\text{kV}$ (有避雷器，Y10W 为 2.8kV)。

不设保护器时，若金属护套首端接地，则不接地端护层所受冲击电压可按图 7-4 (b) 所示等值电路进行估算，此时金属护

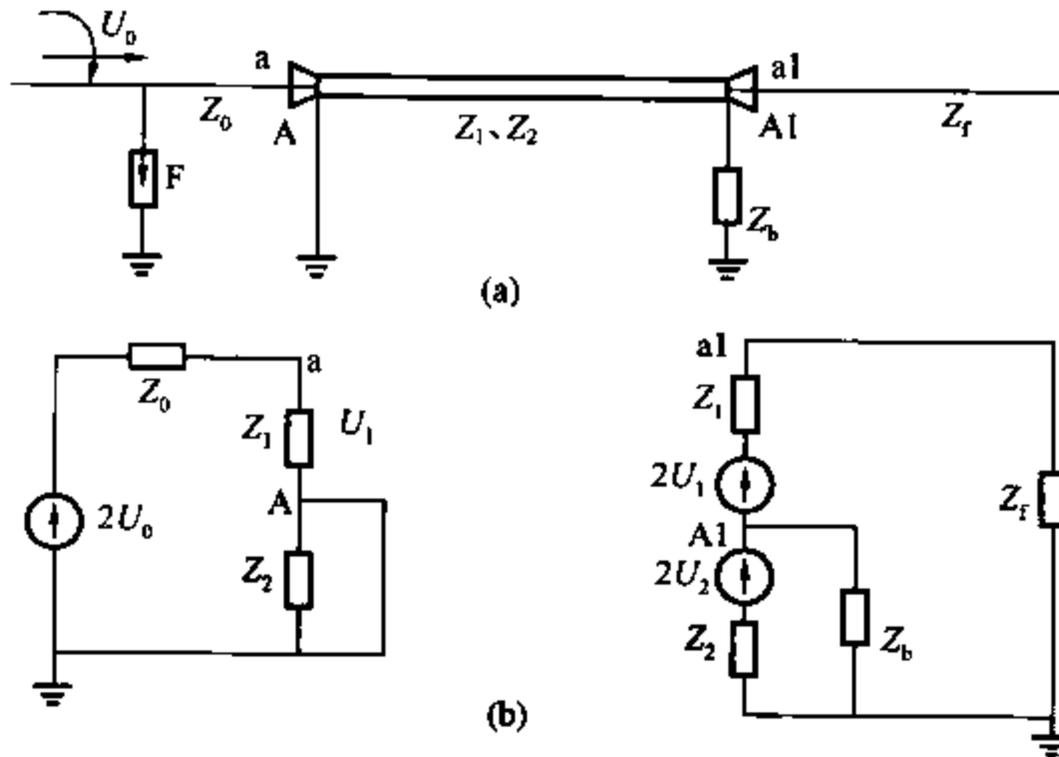


图 7-4 护层过电压计算电路 (二)

(a) 原理接线；(b) 等值电路

套不接地端护层所受冲击电压将为

$$U_{A1} = -4U_0 \frac{Z_1}{Z_0 + Z_1} \times \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (7-3)$$

显然 U_{A1} 与电缆末端所接负载波阻抗 Z_f 有关。当电缆末端不接负载 (a1 处开路) 时, U_{A1} 将为零值; 然而当电缆末端接有大电容或末端主绝缘对地击穿 (如终端头闪络) 相当于 a1 点接地时, U_{A1} 可上升为

$$\begin{aligned} U_{A1} &= -4 \times 700 \times \frac{17.8}{500 + 17.8} \times \frac{100}{17.8 + 100} \\ &= -81.7(\text{kV}) \end{aligned}$$

当电缆与架空线连接处设有 FZ-110J (或 Y10W) 型避雷器并动作时, 则 $U_0 = 332\text{kV}$ (Y10W 为 260kV), 此时有

$$\begin{aligned} U_{A1} &= -4 \times 332 \times \frac{17.8}{500 + 17.8} \times \frac{100}{17.8 + 100} \\ &= -38.4(\text{kV}) \end{aligned}$$

同理对于直埋电缆 $Z_2 = 15\Omega$, 可计算出 $U_{A1} = 44\text{kV}$ (无避雷器) 和 $U_{A1} = 20.2\text{kV}$ (有避雷器, 对 Y10W 为 5.8kV)。

综上所述, 虽然厂家给出 110kV 电缆的外护层冲击绝缘强度为 37.5kV , 但运行多年后其绝缘强度会下降, 因此无论电缆线路金属护套是首端还是末端接地, 其不接地端一般均需加装保护器。

2. 流经保护器的冲击电流计算

当金属护套的不接地端加装保护器后, 雷电波将通过保护器接通, 起到降低护层过电压的作用。金属护套末端接地时, 流经保护器的电流可按图 7-5 所示的等值电路进行估算。考虑到保护器在大冲击电流下所呈现的等值电阻 Z_b 很小, 一般为 1Ω 以下, 远小于电缆的波阻抗, 因此在计算时可以忽略保护器的电阻, 而把等值电路简化为图 7-5 (c) 所示电路。

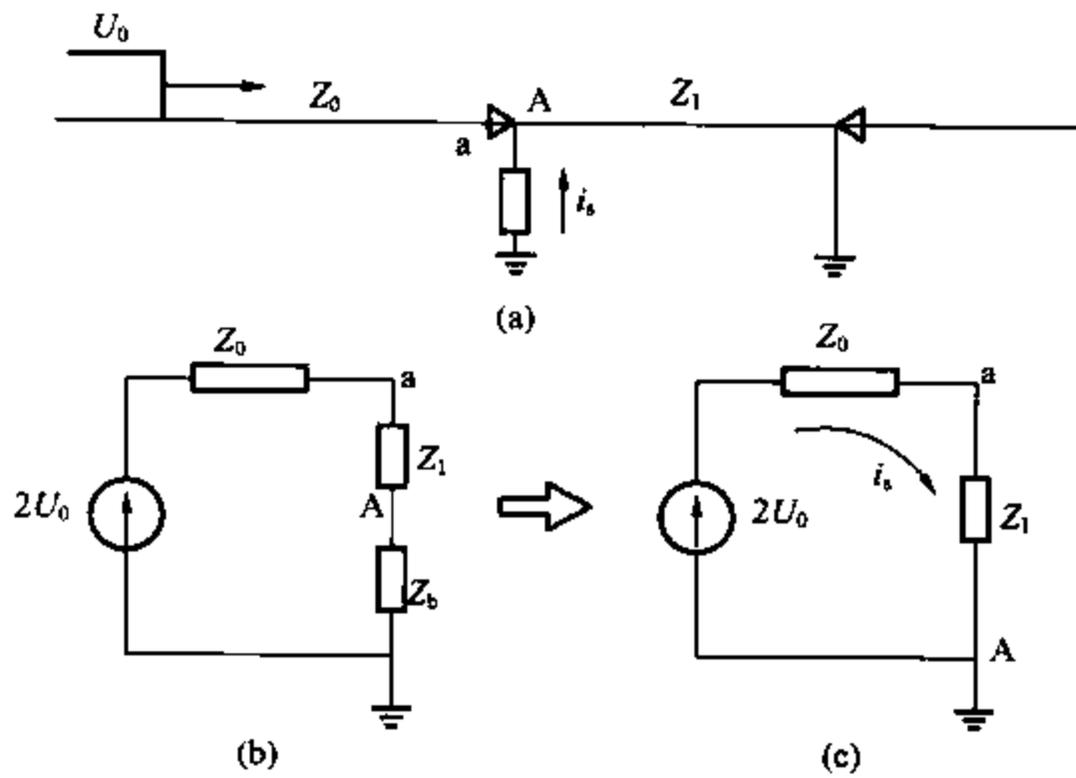


图 7-5 末端接地，首端接保护器

(a) 原理接线；(b) 等值电路；(c) 忽略 Z_b 时的等值电路

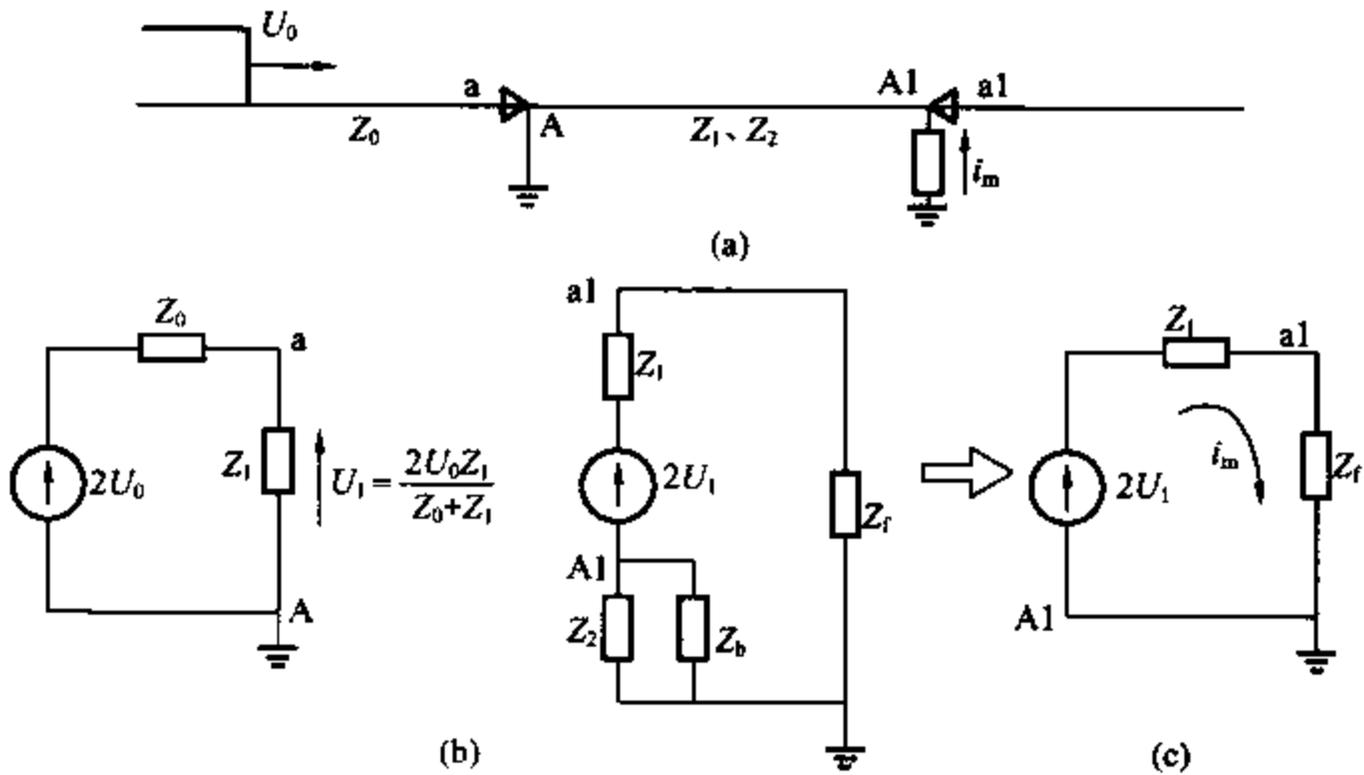


图 7-6 首端接地，末端接保护器

(a) 原理接线；(b) 等值电路；(c) 忽略 Z_b 时的等值电路

图 7-6 所示为金属护套首端接地时估算流经末端保护器冲击电流的等值电路。由此可得到流经首端保护器的电流如下。当 $Z_b=0$ ，则

$$i_s = \frac{2U_0}{Z_0 + Z_1 + Z_b} = \frac{2U_0}{Z_0 + Z_1} \quad (7-4)$$

$$= \frac{2 \times 700}{500 + 17.8} = 2.7(\text{kA})$$

流经末端保护器的电流为

$$i_m = \frac{2U_1}{Z_1 + Z_f + \frac{Z_b Z_2}{Z_b + Z_2}} = \frac{2U_0}{Z_1 + Z_f}$$

$$= \frac{4U_0 Z_1}{(Z_0 + Z_1)(Z_1 + Z_f)} \quad (7-5)$$

当电缆末端接有大电容或主绝缘击穿 ($Z_f=0$) 时, 则

$$i_m = \frac{4U_0}{Z_0 + Z_1} = \frac{4 \times 700}{500 + 17.8} = 5.4(\text{kA})$$

对于不同电压等级的电缆, 在雷电冲击电压作用下, 流经保护器的通流容量可参考表 7-1 所列的数值确定。

表 7-1 标准波作用下保护器的通流容量

U (kV)	标准波形 I_m (kA)	8/20 μ s		20/40 μ s	
		保护器 在首端	保护器 在末端	保护器 在首端	保护器 在末端
110		5.1	0.28	3	0.1
220		10	0.44	5	0.3
330		15	1.25	8	1.0
500		20	3.10	12	1.8

(二) 交叉互联不加保护器时电缆护层过电压的计算

随着我国城市电力网的发展, 近十几年来出现了不少长达 1km 以上的 110~220kV 交联聚乙烯电缆线路。如前所述, 高压单芯电缆的应用, 使得有必要将金属护套采用特殊的连接, 以消除或减少金属护套中的感应电流, 否则这个电流将会限制电缆的负荷电流。对于短电缆 (如 300~500m), 三相金属护套可在变

电站内或架空输电线连接处互联后接地，全线只有一个接地点。对于长电缆线路（1km 及以上），一般采用金属护套交叉互联的形式，即将电缆分成 3 倍数等长的基本部分，三相金属护套的中间点交叉连接，而两端互联后再接地。由于金属护套在两交叉连接处循环换位，就可以大大减少金属护套中的感应电流，如图 7-7 所示。

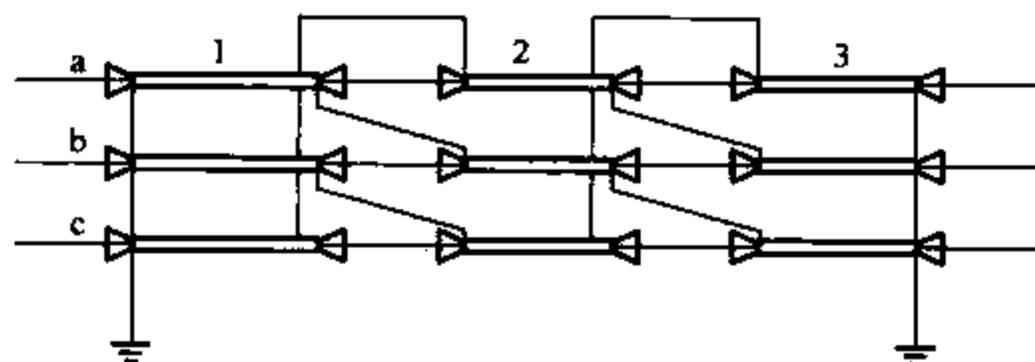


图 7-7 金属护套交叉互联接地

然而这样连接的缺点是：扰乱了电缆内部导体和金属护套标准的同轴位置，当由于雷击、断路器操作引起的过电压波通过金属护套接合处对应的线芯时会产生波的反射和折射，将导致金属护套中断部分和金属护套对地处出现过电压。

在无保护器的交叉互联线路中，护层所受冲击电压将达到很大的数值。根据国内外实测，此护层过电压可达到首端电压的 30%~65%，所以也应设置保护器来加以限制。金属护套交叉互联后，过电压产生机理和计算方法可以说明如下。

由图 7-8 (a) 可见，交叉互联后虽然金属护套没有完全断开，但是当冲击电压波由 a1 点侵入到 a2 点后，并不能直接从 A2 点回到 A 相第一段 A1 点，而是经过很多波阻抗，例如 A2 \rightarrow C1 $\xrightarrow{Z_1}$ c1 \rightarrow c2 $\xrightarrow{Z_1}$ C2 \rightarrow B1 $\xrightarrow{Z_1}$ b1 $\xrightarrow{Z_1}$ b2 \rightarrow B2 \rightarrow A1 的途径，则大部分冲击电压波将以大地为回路，从而造成 A1 点电压升高。

图 7-8 (b) 所示为交叉互联不加保护器时护层所受过电压的计算等值电路。等值电路图上 A1 和 A2 点间的电位差即为护层所受的过电压。上述等值电路计算结果仅考虑了波的一次折反

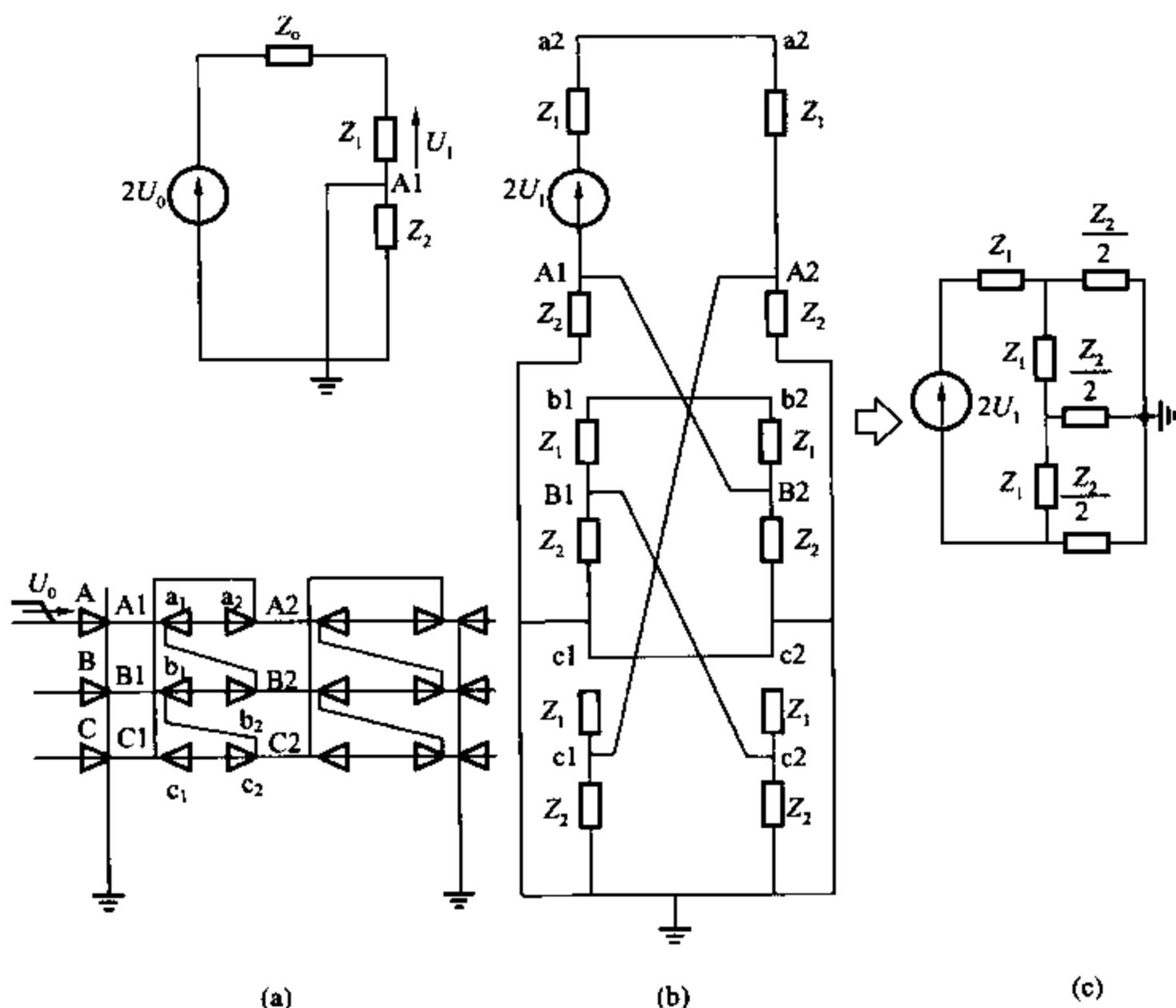


图 7-8 交叉互联 A 相进波时的接线图及等值电路
(a) 交叉互联原理接线; (b) 等值电路; (c) 简化等值电路

射。实际电缆线路不是无限长，会产生多次折反射，电压可以升到很高的数值。例如：7 次折反射后护套不接地端所受的电压为首端电压的 64%；17 次后为 65%。对于交叉互联电缆，此时金属护套断连处 A1 和 A2 的冲击电压将分别为

$$\left. \begin{aligned} U_{A1} &= -2U_0 \frac{Z_1}{Z_0 + Z_1} \times \frac{Z_2}{2Z_1 + \frac{3}{2}Z_2} \\ U_{A2} &= 2U_0 \frac{Z_1}{Z_0 + Z_1} \times \frac{Z_2}{2Z_1 + \frac{3}{2}Z_2} \end{aligned} \right\} (7-6)$$

而加在电缆绝缘接头上的冲击电压为

$$U_{A1A2} = -4U_0 \frac{Z_1}{Z_0 + Z_1} \times \frac{Z_2}{2Z_1 + \frac{3}{2}Z_2} \quad (7-7)$$

式中 U_0 ——沿架空输电线袭来的雷电压幅值, kV;

Z_0 ——架空输电线路波阻抗, Ω ;

Z_1 ——电缆线芯对金属护套波阻抗, Ω ;

Z_2 ——电缆金属护套对大地波阻抗, Ω 。

现以我国某 110kV 和 220kV 电缆线路为例, 将护层过电压计算结果列于表 7-2 内。

表 7-2 110~220kV 电缆线路护层过电压计算结果

U (kV)	U_0 (kV)	Z_1 (Ω)	Z_2 (Ω)	$U_{A1}=U_{A2}$ (kV)	U_{A1A2} (kV)	附 注
110	700	17.8	100	26	52	武钢 0t 工程电缆长 1.4km, 敷设于电缆沟内, 故 Z_2 按 100 Ω 计算
220	1400	25	20	41.1	82.2	广州黄棠线长 3.2km, 直埋敷设, 故 Z_2 按 20 Ω 计算

三、内过电压下电缆护层过电压和保护器的通流容量

(一) 护层过电压

1978 年我国机械工业部编制的《电线电缆》一书, 曾推荐用下式计算在内过电压下电缆护层的过电压值, 即

$$U_s = 0.153KU_{km} \quad (7-8)$$

式中 KU_{km} ——电缆线芯对地过电压值, 它取决于线路断路器和避雷器的特性;

K ——过电压倍数;

U_{km} ——系统最大相电压幅值。

编者 1984 年在湖南凤滩水电站 220kV 电缆线路进行实测, 采用方波响应来模拟切合空线, 电缆护层过电压为

$$U_s = (0.125 \sim 0.25)KU_{km}$$

国外也曾对 138kV、长 8.7km 的电缆进行实测得到内过电压时电缆护层电压为

$$U_s = (0.19 \sim 0.284)KU_{km} \quad (7-9)$$

(二) 护层保护器的通流容量

根据研究结果,在内过电压下电缆护层保护器通流容量可参照表 7-3 确定。在内过电压作用下,流经保护器的电流有两个阶段,即换算到 8/20 μ s 波形的 I'_m 和持续 2~3ms 的方波电流 I_c ,保护器应具有释放内过电压能量的通流能力。

表 7-3 电缆在内过电压下保护器的通流容量

U (kV) 保护器电流	110		220		330		500	
	I'_m (kA)	I_c (A)	I'_m (kA)	I_c (A)	I'_m (kA)	I_c (A)	I'_m (kA)	I_c (A)
2	6.9	1.7	8.6	3.3	9.1	5.6	10.7	23.0
3	8.9	2.3	11.3	4.5	12	7.6	15.5	31.3
4	9.9	2.7	12.6	5.5	13.4	8.7	18.0	35.5
5	10.5	2.9	13.4	5.7	14.3	9.3	19.6	37.7
6	10.9	3.0	13.9	5.8	14.9	9.7	20.4	39.7
7	11.1	3.2	14.3	6.0	15.3	10	21.6	40.8

比较雷电冲击作用下保护器的通流容量 I_m (表 7-2) 和内过电压作用下保护器的通流容量 I'_m (表 7-3), 应取最大值作为保护器冲击通流容量的设计值。

第二节 金属护套工频感应电压的计算

保护器的采用解决了护层绝缘冲击过电压的保护问题,但是必须注意接有保护器后,当系统发生工频短路时都会有工频电压作用在电缆护层的保护器上。在工频电压作用下,保护器就会有

工频电流流过。不难理解，通过保护器工频电流的大小除和加在保护器上的工频电压有关外，还和保护器在工频电压下呈现的电阻有关，即和保护器的残压和非线性特性有关。显然，保护器在通过这一工频电流时不应损坏，下面分别对正常工作和短路故障时的情况进行分析。

一、平衡负载条件下，电缆金属护套中感应电压的计算

电缆的金属护套可以看成一薄壁圆柱体，同心地套在线芯周围。线芯回路产生的一部分磁通不仅与线芯回路相链，同时也与金属护套相链，这部分磁通使金属护套具有电感，在它上面产生感应电动势，其大小由线芯电流来决定。下面通过一个实例计算来说明。

【例 7-1】 一条 110kV 交联聚乙烯电力电缆，已知其线芯截面为 400mm^2 ，电缆应用于三相平衡线路，负荷电流 I 为 350A，其中心轴间距离 S 为 220mm，金属护套外径 D_s 60mm，试分别计算按不同的方式敷设时电缆金属护套中的感应电压。

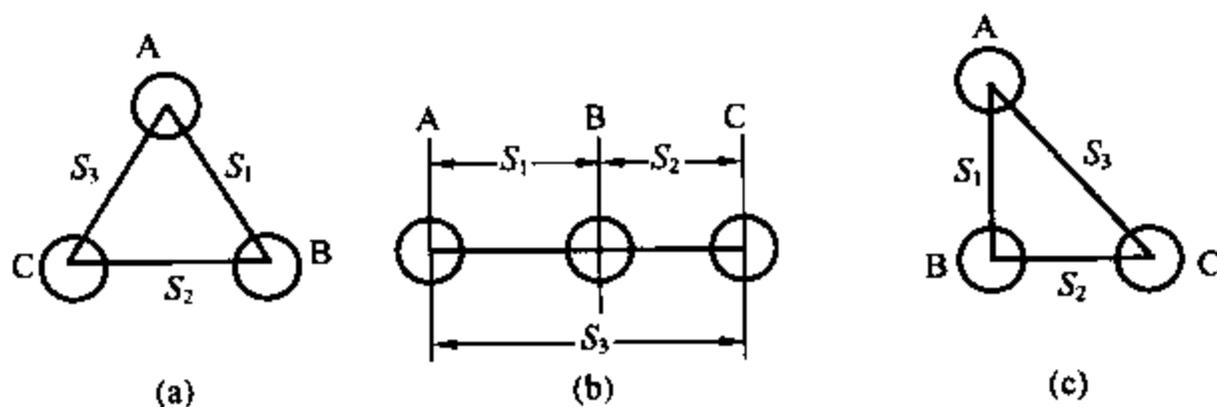


图 7-9 三相电缆的排列敷设方式

(a) 等边三角形；(b) 水平排列；(c) 直角三角形

解 (1) 三相电缆敷设在等边三角形顶点上 [见图 7-9 (a)]

$$\begin{aligned} x_1 &= x_2 = x_3 = x_s \\ &= 2\omega \ln \frac{2S}{D_s} \times 10^{-7} \quad (\Omega/\text{m}) \end{aligned} \quad (7-10)$$

$$U_{s1} = U_{s2} = U_{s3} = Ix_s \quad (7-11)$$

其中

$$x_s = 2 \times 314 \ln \frac{2 \times 220}{60} \times 10^{-7}$$

$$= 1.25 \times 10^{-4} \quad (\Omega/\text{m})$$

$$U_s = 350 \times 1.25 \times 10^{-4}$$

$$= 4.37 \times 10^{-2} \quad (\text{V}/\text{m})$$

即 1km 长电缆感应电压为 43.7V。

(2) 三相电缆敷设在一直线上。如图 7-9 (b) 所示, 电缆中心轴间距离为 S , 此时 $S_1 = S_2 = S$, $S_3 = 2S$, 则感应电压分别为

$$U_{S1} = U_{S2} = I \sqrt{x_s^2 + x_s x_m + x_m^2} \quad (\text{V}/\text{m}) \quad (7-12)$$

$$U_{S2} = I x_s \quad (\text{V}/\text{m}) \quad (7-13)$$

其中 $x_1 = x_3 = x_s = 2\omega \ln \frac{2S}{D_s} \times 10^{-7} \quad (\Omega/\text{m})$

$$x_m = 2\omega \ln 2 \times 10^{-7} \quad (\Omega/\text{m})$$

代入已知数值得

$$x_s = 1.25 \times 10^{-4} \quad (\Omega/\text{m});$$

$$x_m = 0.435 \times 10^{-4} \quad (\Omega/\text{m})。$$

所以 $U_{S1} = U_{S3} = 350$

$$\times \sqrt{(1.25^2 + 1.25 \times 0.435 + 0.435^2)} \times 10^{-8}$$

$$= 350 \times 0.015 \times 10^{-2} = 5.28 \times 10^{-2} \quad (\text{V}/\text{m})$$

即 1km 长的边相电缆感应电压为 52.8V, 同理可求得中相金属护套中的感应电压为

$$U_{S2} = I x_s = 350 \times 1.25 \times 10^{-4}$$

$$= 4.37 \times 10^{-2} \quad (\text{V}/\text{m})$$

即 1km 长的电缆其感应电压为 43.7V。

(3) 三相电缆敷设在一直角等边三角形顶点上 [见图 7-9 (c)]

$$U_{S1} = U_{S3}$$

$$= I \sqrt{x_s^2 + \frac{1}{2} x_s x_m + \left(\frac{x_m}{2}\right)^2} \quad (\text{V/m}) \quad (7-14)$$

$$U_{S2} = I x_s \quad (\text{V/m}) \quad (7-15)$$

将具体数值代入得

$$U_{S1} = U_{S3}$$

$$= 350 \times \sqrt{\left[1.25^2 + \frac{1}{2} \times 1.25 \times 0.435 + \left(\frac{0.435}{2}\right)^2\right]} \times 10^{-8}$$

$$= 4.85 \times 10^{-2} \quad (\text{V/m})$$

即 1km 长的电缆感应电压为 48.5V。

由上述 3 种情况下的计算可知，在电缆长度和工作电流较大的情况下，感应电压可能达到很大的数值，因此，必须采取措施将其限制到安全值 50V 的范围内。对于长电缆线路，可将金属护套分段，同时为了减少接地点，宜采用换位连接法。这种连接法，如电缆是对称敷设且每段长度相等，在平衡负载条件下，金属护套中两接地间的感应电动势等于零，因此不会产生环流。

表 7-4 所列为我国两个典型工程电缆金属护套三相互联接地和交叉换位两端互联接地后的感应电压和电流的计算值。

表 7-4 电缆金属护套的感应电压和电流计算值

U (kV)	I (A)	l (m)	U_s (V)	I_s (A)	ΔP (kW)	ΔA ($\times 10^4$ kWh)
武钢 0t 工程 110kV 电缆	600	3×470 $= 1410$	139 (14)	144 (14.7)	$3 \times 22 = 66$ ($3 \times 2.3 = 6.9$)	52.8 (5.22)
广州黄棠线 220kV 电缆	700	$3 \times 310 + 3$ $\times 730 = 3100$	324 (75.8)	206 (48.5)	$3 \times 72 = 216$ ($3 \times 18 = 54$)	162.8 (48.2)

注 括号内值为金属护套交叉换位的数值。

从表 7-4 可见, 采用交叉换位互联接地方式能大大减少功率和电能损耗。

(4) 平衡负载下双回路电缆金属护套感应电压的计算方法

基于上述验证和分析, 对于双回路平列排列的电缆金属护套感应电压计算方法, 可参照日本文献所介绍的公式进行计算。其计算公式及结果见表 7-5。

表 7-5 双回路电缆金属护套感应电压计算公式及结果

电缆排列方式		平列(I)	平列(II)
感应电压 $U_s(\text{V/m})$	A	$\frac{I}{2} \sqrt{3Y^2 + \left(X_s - \frac{b}{2}\right)^2}$	$\frac{I}{2} \sqrt{3Y^2 + \left(X_s - \frac{b}{2}\right)^2}$
	C	$= 350 \times 3.8 \times 10^{-4}$ $= 13.30 \times 10^{-2}$	$= 350 \times 2.06 \times 10^{-4}$ $= 7.2 \times 10^{-2}$
	B	$I \left(X_s + \frac{a}{2}\right) = 10.33 \times 10^{-2}$	$I \left(X_s + \frac{a}{2}\right) = 10.33 \times 10^{-2}$
Y(Ω)		$X_s + a + \frac{b}{2} = 2.18 \times 10^{-4}$	$X_s + a + \frac{b}{2} = 1.18 \times 10^{-4}$
附注		$a = 2\omega \ln 2 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}, b = 2\omega \ln 5 \times 10^{-4}$, 其他符号意义见表 D-1	

上述计算结果说明虽然都是采用平列方式排列, 但当第二回电缆与第一回电缆相序排列不相同, 由于互感作用不同, 其感应电压会大大降低, 故在工程施工时为了减少护套感应电压, 常采用平列(II)方式布置。

交流系统单芯电缆金属护套正常感应电压的计算式可参考附录 D 表 D-1。

二、工频短路时电缆金属护套中感应电压的计算

(一) 电缆金属护套一端接地

首先分析单相接地时护套的感应电压，并分别假设：

- (1) 接地电流全部以大地为回路。
- (2) 接地电流全部以回流线或电缆金属护套为回路。
- (3) 接地电流一部分以大地为回路，另一部分以回流线或电缆金属护套为回路。

众所周知，护套感应电压应该是以护套纵向感应电动势为主，但也要计及地电位升高的电压，下面分别进行详细介绍。

1. 接地电流全部以大地为回路

如图 7-10 所示，当电缆外架空输电线路发生一相接地时，

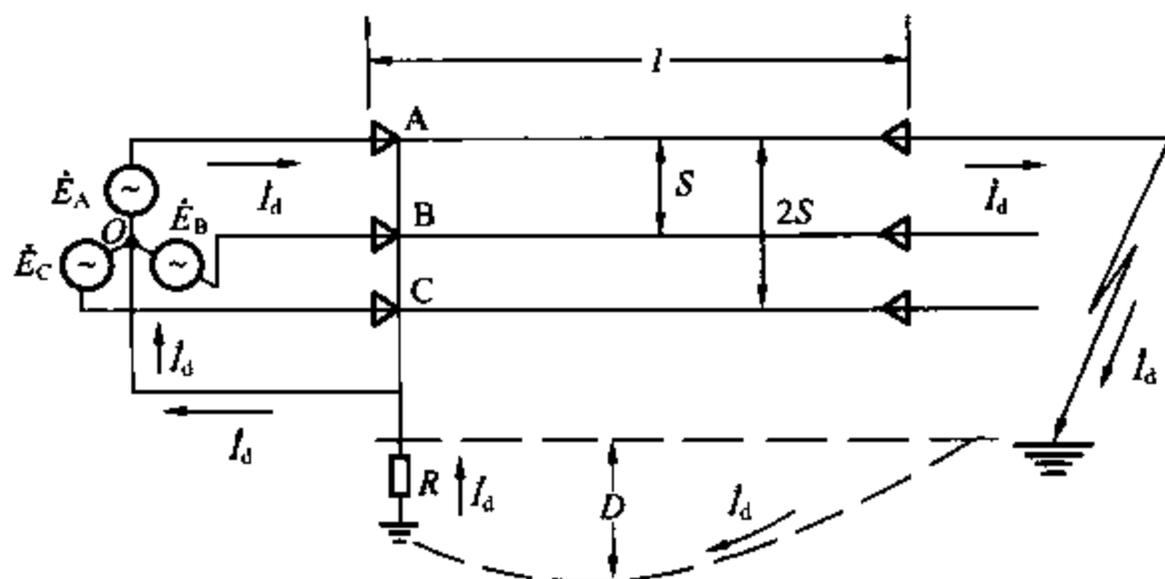


图 7-10 金属护套一端接地时单相接地故障电流回路

该相的护套电压为

$$U_{SA} = \left[R + \left(R_g + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D}{r_s} \right) l \right] I_d \quad (7-16)$$

式中 R ——接地电阻， Ω ；

R_g ——大地电阻， $R_g = \pi^2 f \times 10^{-4}$ ， Ω/km ；

r_s ——电缆金属护套半径， m ；

l ——电缆护套长度， km ；

D ——地中电流穿透深度， $D = 660\sqrt{\rho/f}$ ， m ；

I_d ——单相接地故障电流， A ；

ρ ——土壤电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

f ——电流频率, Hz。

式中虚数项为电缆金属护套纵向感应电动势, R 上压降为地电位升高部分。从式(7-16)可知, 如 R 较大, 则地电位升高占有护套电压的很大部分。距接地故障的 A 相距离为 S 的 B 相护套上的感应电压和距 A 相距离为 $2S$ 的 C 相护套上的感应电压计算式与式(7-16)相似, 可写成

$$U_{SB} = \left[R + \left(R_g + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D}{S} \right) l \right] I_d \quad (7-17)$$

$$U_{SC} = \left[R + \left(R_g + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D}{2S} \right) l \right] I_d \quad (7-18)$$

由式(7-16)~式(7-18)可看出, U_{SA} 的纵向感应电压最高, 而与 A 相平行的导线上, 其感应电压随离 A 距离的增大而减少。

【例 7-2】 如图 7-10 所示的电缆线路, 已知 $I_d = 7.5\text{kA}$, $l = 0.4\text{km}$, $R = 0.15\Omega$, $r_s = 44.14\text{mm}$, $D = 510\text{mm}$, $S = 220\text{mm}$, 求护套的感应电压。

解 根据式(7-16)~式(7-18)得

$$\begin{aligned} U_{SA} &= \left[0.15 + \left(0.0493 + j2\omega \times 10^{-4} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \ln \frac{510 \times 10^3}{44.04} \right) \times 0.4 \right] \times 7.5 \times 10^3 \\ &= 1273 + j1764 = 2.175(\text{kV}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{SB} &= \left[0.15 + \left(0.0493 + j2\omega \times 10^{-4} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \ln \frac{510 \times 10^3}{220} \right) \times 0.4 \right] \times 7.5 \times 10^3 \\ &= 1273 + j1460.5 = 1.9375(\text{kV}) \end{aligned}$$

$$U_{SC} = \left[0.15 + \left(0.0493 + j2\omega \times 10^{-4} \right. \right.$$

$$\begin{aligned} & \times \ln \frac{510 \times 10^3}{2 \times 220} \times 0.4 \times 7.5 \times 10^3 \\ & = 1273 + j1330 = 1.841(\text{kV}) \end{aligned}$$

从[例 7-2]可看出，地电位的升高(实部)接近于护套纵向感应电压(虚部)。

2. 接地电流以回流线或金属护套为回路

金属护套一点互联接地的电缆线路中，为了降低电缆金属护套的感应电压，通常可在电缆线路近旁平行敷设一根回流线(该线采用钢芯铝线或铜绞线均可，但两端要接地)。当电缆出线端发生单相接地时，由于接地点正处于回流线连接地网中，此时接地故障电流绝大部分通过回流线，入地部分故障电流可以忽略不计，如图 7-11 所示。当接地电流全部通过回流线时，电缆金属护套对回流线的感应电压为

$$\begin{aligned} U_{SA} = & \left[\left(R_P + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D_A}{r_P} \right) \right. \\ & \left. + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D_A}{r_S} \right] I_d \end{aligned} \quad (7-19)$$

- 式中 D_A ——回流线至发生接地故障相(A相)间的距离，mm；
 R_P ——回流线单位长度的电阻， Ω ；
 r_S ——电缆金属护套的半径，mm；
 r_P ——回流线的几何平均半径，mm。

式(7-19)中的圆括号部分是接地电流在回流线上的压降，可

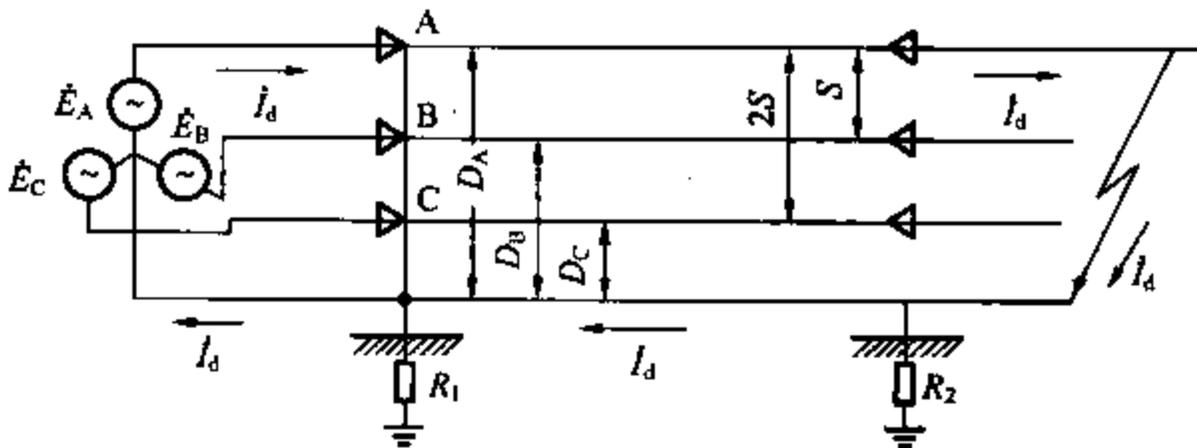


图 7-11 有回流线时单相接地故障电流回路

将式(7-19)简化为

$$U_{SA} = \left(R_P + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D_A^2}{r_P r_S} \right) l I_d$$

如回流线至 B、C 相的间距为 D_B 、 D_C ，则 B、C 相的金属护套对回流线的感应电压为

$$U_{SB} = \left(R_P + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D_A D_B}{r_P S} \right) l I_d \quad (7-20)$$

$$U_{SC} = \left(R_P + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D_A D_C}{r_P 2S} \right) l I_d \quad (7-21)$$

【例 7-3】 如图 7-11 所示，已知回流线离 A 相间距为 220mm，电阻为 $0.0767\Omega/\text{km}$ ， $r_P = 10.4\text{mm}$ ，试计算各相电缆的金属护套对回流线的感应电压。

解 根据式(7-19)~式(7-21)可得

$$\begin{aligned} U_{SA} &= \left(0.0767 + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{220^2}{10.4 \times 44.04} \right) \\ &\quad \times 0.4 \times 7.5 \times 10^3 \\ &= 230 + j878 = 0.9075(\text{kV}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{SB} &= \left(0.0767 + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{220 \times 440}{10.4 \times 220} \right) \\ &\quad \times 0.4 \times 7.5 \times 10^3 \\ &= 230 + j705.5 = 0.742(\text{kV}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{SC} &= \left(0.0767 + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{220 \times 660}{10.4 \times 2 \times 220} \right) \\ &\quad \times 0.4 \times 7.5 \times 10^3 \\ &= 230 + j651 = 0.6905(\text{kV}) \end{aligned}$$

从[例 7-2]和[例 7-3]可以看出，装设回流线后可以降低电缆金属护套感应电压。

3. 接地电流一部分以大地为回路，另一部分以回流线或电缆金属护套为回路

如图 7-12 所示，其中 I_0 为通过回流线直接返回的接地电

流, 又称回流线的电导电流; I_P 为回流线上感应电压所形成的以大地为回路的循环电流。因此电缆金属护套的纵向感应电压可看成 3 个电流(I_d 、 I_0 和 I_P)的合成感应电压, 于是 A 相金属护套的纵向感应电动势为

$$U_{SA} = I_d Z_{AA} - (I_0 + I_P) Z_{PA} \quad (7-22)$$

式中 Z_{AA} ——A 相护套和发生接地故障的线芯以大地为回路的

$$\text{互阻抗, } Z_{AA} = \left(R_g + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D}{r_s} \right), \Omega/\text{km};$$

Z_{PA} ——回流线和 A 相护套以大地为回路的互阻抗,

$$Z_{PA} = \left(R_g + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D}{D_A} \right), \Omega/\text{km}。$$

同理, B、C 相护套的纵向感应电压为

$$U_{SB} = I_d Z_{BA} - (I_0 + I_P) Z_{PB} \quad (7-23)$$

$$U_{SC} = I_d Z_{CA} - (I_0 + I_P) Z_{PC} \quad (7-24)$$

式中 Z_{BA} 、 Z_{CA} ——分别为 B、C 相护套和接地 A 相线芯以大地为回路的互阻抗, $Z_{BA} = R_g + j2\omega \times$

$$10^{-4} \ln \frac{D}{D_B}, \Omega/\text{km}, Z_{CA} = R_g + j2\omega \times 10^{-4}$$

$$\ln \frac{D}{D_C}, \Omega/\text{km};$$

Z_{PB} 、 Z_{PC} ——分别为回流线和 B、C 相护套以大地为回路

$$\text{的互阻抗, } Z_{PB} = R_g + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D}{D_B},$$

$$\Omega/\text{km}, Z_{PC} = R_g + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D}{D_C}, \Omega/\text{km}。$$

如护套电位是对大地而言, 则应分别加上地电位部分; 如护套电位是对回流线而言, 则应分别加上回流线上的压降($I_0 + I_P$) Z_{PP} , Z_{PP} 为回流线以大地为回路的自阻抗, 其单位为 Ω/km , 即

$$Z_{PP} = R_P + R_g + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D}{r_P}$$

从图 7-12(a)可列出下列方程

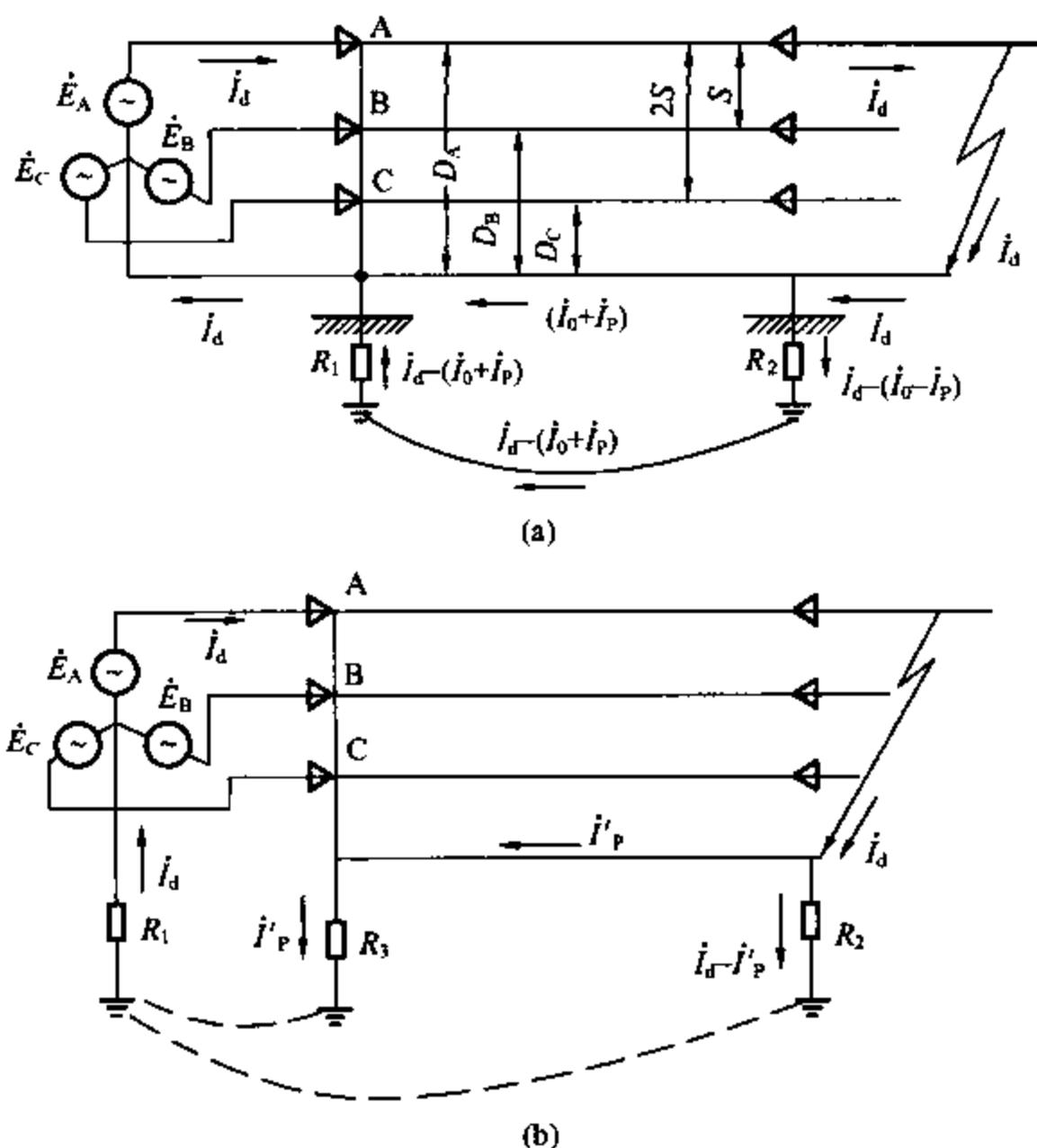


图 7-12 部分接地故障电流以大地为回路
(a)回流线有导通电流; (b)回流线无导通电流

$$[I_d - (I_0 + I_P)]R_1 - (I_0 + I_P)Z_{PP} + [I_d - (I_0 + I_P)]R_2 + I_d Z_{PA} = 0$$

即
$$I_0 + I_P = \frac{R_1 + R_2 + Z_{PA}}{R_1 + R_2 + Z_{PP}} I_D \quad (7-25)$$

从图 7-12(b)中可以列出方程

$$-I_P' R_3 - I_P' Z_{PP} + (I_d - I_P')R_2 + I_d Z_{PA} = 0$$

即
$$I_P' = \frac{R_2 + Z_{PA}}{R_2 + R_3 + Z_{PP}} I_d \quad (7-26)$$

设 $R_3 = R_1$, 则 $I_P' = I_P$, 再将式(7-26)代入式(7-25)后可得

$$I_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + Z_{PP}} I_d$$

从图 7-12 (a) 可知, 将回流线引至电源的接地极后, 回流线中除了感应循环电流外, 又增加了电导电流, 有助于降低护套感应电压。从式 (7-22) 也可知, Z_{PA} 增大, 也可降低感应电压, 但必须减少 D_A 值, 换言之, 回流线应尽可能靠近电缆线路, 不宜安装在过远的位置。从式 (7-25) 中又知, 若 Z_{PP} 小一些, 也可降低感应电压, 即要求回流线的电阻要小, 即其直径宜大。

【例 7-4】 如图 7-12 所示的两种线路, 设各接地电极电阻均为 0.15Ω , $I_d = 7.5\text{kA}$, 电缆线路长 0.4km , 其他参数同 [例 7-3], 试计算各相护套的感应电压。

解 (1) 在图 7-12 (a) 中

$$\begin{aligned} Z_{AA} &= \left(0.0493 + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{510 \times 10^3}{44.04} \right) \times 0.4 \\ &= 0.0197 + j0.2350(\Omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{BA} &= \left(0.0493 + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{510 \times 10^3}{220} \right) \times 0.4 \\ &= 0.0197 + j0.1946(\Omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{CA} &= \left(0.0493 + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{510 \times 10^3}{440} \right) \times 0.4 \\ &= 0.0197 + j0.1772(\Omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{PA} &= \left(0.0493 + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{510 \times 10^3}{220} \right) \times 0.4 \\ &= 0.0197 + j0.1946(\Omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{PP} &= \left(0.0767 + 0.0493 + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{510 \times 10^3}{10.7} \right) \times 0.4 \\ &= 0.0504 + j0.2713(\Omega) \end{aligned}$$

由式 (7-25) 得

$$\begin{aligned} I_0 + I_P &= \frac{0.15 + 0.15 + 0.0197 + j0.1946}{0.15 + 0.15 + 0.0504 + j0.2713} I_d \\ &= (0.8391 - j0.0944) I_d \end{aligned}$$

将 Z_{AA} 、 Z_{BA} 、 Z_{CA} 、 Z_{PA} 、 Z_{PP} 、 $I_0 + I_P$ 和 I_d 之值代入式 (7-22) ~ 式 (7-26), 则

$$U_{SA} = -114 + j552 = 0.5635(\text{kV})$$

$$U_{SB} = -102 + j368.5 = 0.3725(\text{kV})$$

$$U_{SC} = -94.5 + j292 = 0.307(\text{kV})$$

(2) 在图 7-12 (b) 中, 由式 (7-26) 得

$$\begin{aligned} I'_P = I_P &= \frac{0.15 + 0.0197 + j0.1946}{0.15 + 0.15 + 0.0504 + j0.2713} I_d \\ &= (0.5718 + j0.1125) I_d \end{aligned}$$

将 Z_{AA} 、 Z_{BA} 、 Z_{CA} 、 Z_{PA} 、 Z_{PP} 、 I_P 和 I_d 之值代入式 (7-22) ~ 式 (7-26), 则

$$U_{SA} = 227.5 + j911.5 = 0.9395(\text{kV})$$

$$U_{SB} = 213 + j683.5 = 0.716(\text{kV})$$

$$U_{SC} = 204 + j596.5 = 0.6305(\text{kV})$$

从 [例 7-4] 可以看出, 回流线引至电源时要比不引至电源时护套纵向感应电压可降低一半。

(二) 金属护套交叉互联接地

对于电缆金属护套交叉互联接地系统, 在正常情况下, 由于线芯的负荷电流一般只有几百安, 所以感应电压是不大。但在事故情况下, 由于短路电流可达几千安到几十千安, 在金属护套的两端或接头对地仍会出现很高的感应电压, 所以必须进行此项计算。在计算之前, 先将要用到的各符号的意义说明如下:

1) 电缆金属护套的自感阻抗为

$$Z_s = R_s + jx_s = R_s + j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D}{r_s} \quad (\Omega/\text{km})$$

2) 中相和边相金属护套的互感阻抗为

$$Z_{01} = j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D}{S} \quad (\Omega/\text{km})$$

3) 边相和边相金属护套的互感阻抗为

$$Z_{00} = j2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D}{2S} \quad (\Omega/\text{km})$$

4) 交叉互联三相电缆的等值阻抗为

$$Z_a = Z_s + Z_{01} + Z_{00} \quad (\Omega/\text{km})$$

以上各式中 r_s 、 D 、 S 符号意义同前。

1. 单相接地短路

由于交叉互联的 3 段金属护套是相串联的，而且两端又互联络地，所以单相短路时，将有故障电流流过金属护套，也就是说铝包或金属屏蔽层将起到回流线的作用。此时护套所承受的感应电压不仅和线芯电流有关，而且也和流过护套的电流 I_1 有关。考虑到流经 OA 段（如图 7-13 所示）金属护套的感应电压将为

$$\dot{U}_{OA} = \dot{I}x_s - \frac{\dot{I}_1}{3}Z_{00} - \frac{\dot{I}_1}{3}Z_s - \frac{\dot{I}_1}{3}Z_{01} \quad (7-27)$$

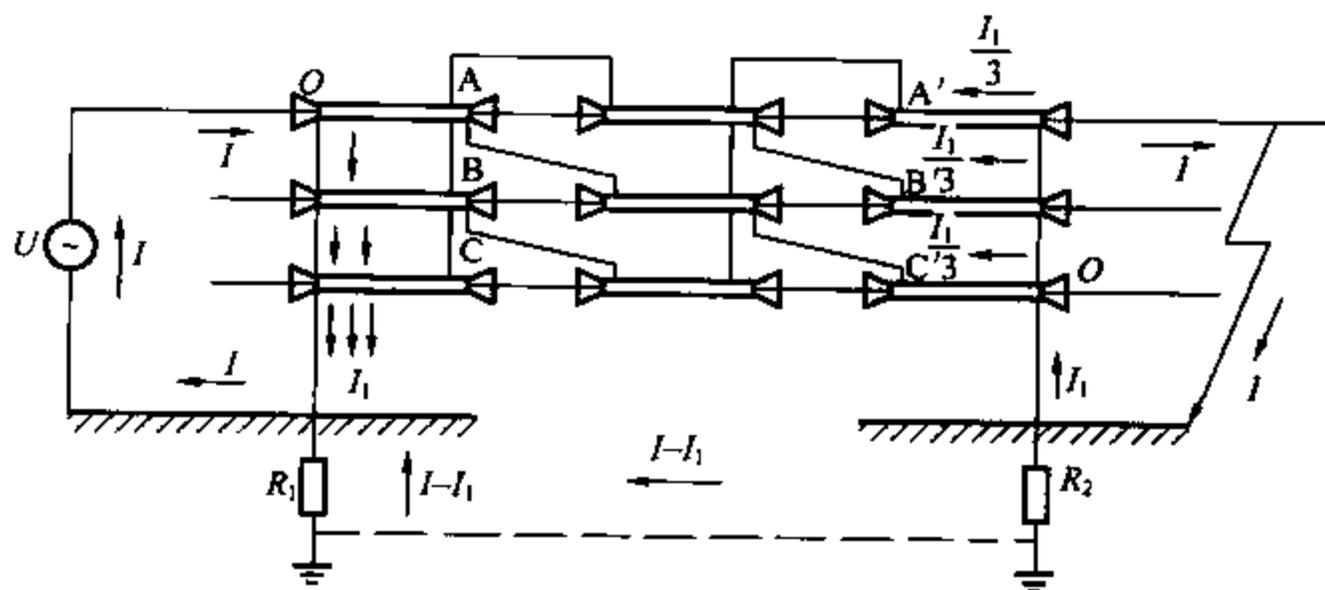


图 7-13 单电源网内短路电流的走向

AB 段护套的感应电压为

$$\dot{U}_{AB} = \dot{I}Z_{01} - \frac{\dot{I}_1}{3}Z_{00} - \frac{\dot{I}_1}{3}Z_s - \frac{\dot{I}_1}{3}Z_{01} \quad (7-28)$$

OC' 段护套的感应电压为

$$\dot{U}_{OC'} = \dot{I}Z_{00} - \frac{\dot{I}_1}{3}Z_{00} - \frac{\dot{I}_1}{3}Z_s - \frac{\dot{I}_1}{3}Z_{01}$$

由于 $Z_{01} \approx Z_{00}$ ，所以 3 段金属护套感应电压之和可求得为

$$U_s = I(x_s + Z_{01} + Z_{00}) - 3 \frac{I_1}{3}(Z_s + Z_{01} + Z_{00}) \quad (7-29)$$

令 $Z_s + Z_{01} + Z_{00} = Z_a = R_s + jx_a = R_s + j(x_s + Z_{01} + Z_{00})$ ，可得

$$U_s = Ix_a - I_1Z_a$$

因此在计算中有时可用一段阻抗为 Z_a 的单相电缆来等值取代交叉互联的三相电缆。单相短路时，护套所受到的感应电压和

接地电阻及流经接地电阻的电流有关,而流经接地电阻的电流的大小又和电源的数目及接地点的远近有关,下面分3种情况进行讨论。

(1) 单电源网内短路。首先求流经金属护套的电流 I_1 , 由图 7-13 按电路第二定律可得

$$Ix_s - I_1 Z_a + (I - I_1)R_2 + (I - I_1)R_1 = 0$$

求得 I_1 后, 就不难求出护层所受的工频电压。例如 A 点的电压为

$$U_A = (I - I_1)R_2 + Ix_s - \frac{I_1}{3}Z_a \quad (7-30)$$

同理可求出其他点的电压值。

(2) 单电源网外短路。由图 7-13 列出回路方程为

$$Ix_s - I_1 Z_a = I_1 R_2 - (I - I_1)R_1 \quad (7-31)$$

则 A 点护层所受电压为

$$U_A = (I - I_1)R_1 + Ix_s - \frac{I_1}{3}Z_a \quad (7-32)$$

(3) 多电源网内短路。由图 7-14 列出回路方程为

$$Ix_s - I_1 Z_a = I_1 R_2 + (I' - I)R_1$$

则 A 点护层所受电压为

$$U_A = Ix_s - (I' - I)R_1 - \frac{I_1}{3}Z_a \quad (7-33)$$

用类似方法不难求出 B、C、A'、B'和 C'各点的电压值, 应

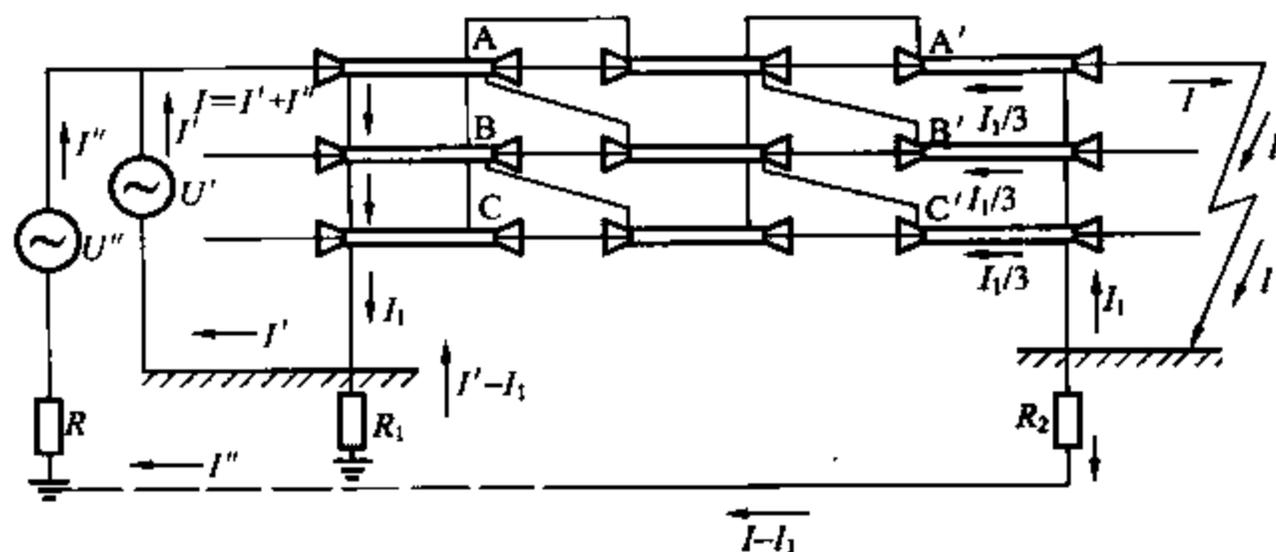


图 7-14 多电源网内短路电流走向

当指出, 当 R_2 较大或流经 R_2 的电流较大时, 护层所受的最大电压可能出现在第 3 段金属护套上。

2. 三相短路和两相短路

这两种情况因没有电流流经金属护套和地网, 其护套感应电压可计算如下。

(1) 三相短路

$$U_A = -I \left[-\frac{1}{2}(x_s + Z_{00} - 2Z_{01}) - j\frac{\sqrt{3}}{2}(x_s - Z_{00}) \right] \quad (7-34)$$

191

(2) 两相短路

$$U_A = -I(x_s - Z_{00}) \quad (7-35)$$

由以上分析可见, 由于三相和两相短路电流不以大地为回路, 而回路的路程较近, 短路电流在金属护套上的感应电压较小。而且采用金属护套不接地端的对地电压也不受地网接地电阻的影响, 因此它的工作条件就比单相接地短路时宽松。也就是说, 护层和保护器所受最高电压一般出现在电网发生单相接地时, 特别是当短路电流大或地网接地电阻大时, 此值可达极高的数值, 保护器在这一电压作用下往往因为流过工频电流太大而致损坏。因此, 为了降低单相接地时护层所受的电压, 也必须设法降低金属护套的感应电压, 并消除地网电位 IR 的影响。

● 第三节 电缆护层保护的接线方式

一、交叉互联加 Y 接保护器的接线

图 7-15 所示为电缆金属护套交叉互联加 Y 接保护器的接线图。采用这种接线方式, 保护器只需跨接在断连的金属护套两端, 不必接在金属护套和地之间, 也就是说, 保护器只需采用与三角形接法等值的 Y 接法。因为只要金属护套被绝缘接头断开的两侧能在冲击电压下使保护器接通, 则线芯的冲击电流自然继续以金属护套为回路, 这时金属护套的电位就会大大降低。

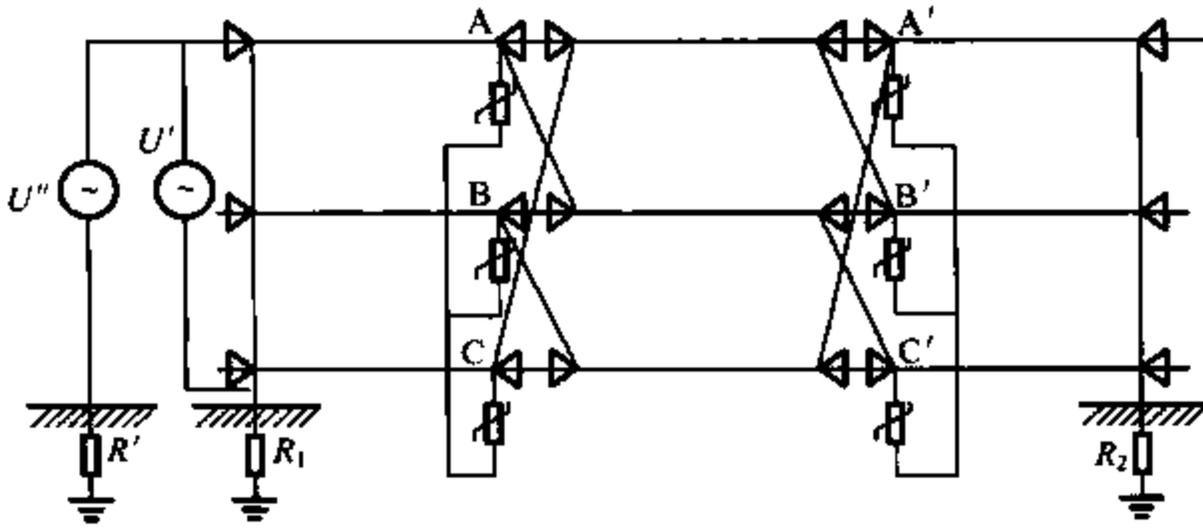


图 7-15 电缆金属护套交叉互联加 Y 接保护器接线

Y 接保护器所受的工频电压 U_Y 在发生各种故障时的计算方法如下。

(1) 单相 (A 相) 接地短路

$$\dot{U}_Y = -\frac{1}{2} I(x_s - Z_{00}) \quad (7-36)$$

(2) 两边相 (A、C 相) 短路

$$\begin{aligned} \dot{U}_Y &= -\frac{1}{2} [I(x_s + Z_{00}) - (-I)(x_s - Z_{00})] \\ &= -I(x_s - Z_{00}) \end{aligned} \quad (7-37)$$

(3) 三相短路

$$\dot{U}_Y = -\frac{1}{2} I\sqrt{3}(x_s - Z_{00}) \quad (7-38)$$

这种接线的特点是：

(1) 由于保护器采用了 Y 接线，故单相接地故障时，保护器所受工频电压和接地电阻以及流经接地电阻的电流无关，其值仅为两相短路时的一半，保护器所受工频电压由两相短路决定。

(2) 保护器所受工频电压比 YN 接法低得多，所以护层所受冲击电压比 YN 接法也要小。

二、交叉互联加 YN 接保护器的接线

如图 7-16 所示，保护器采用国外流行的 YN 接法，即在 A' 与地之间接有保护器，则此保护器所受的工频电压 \dot{U}_{YN} 显然为

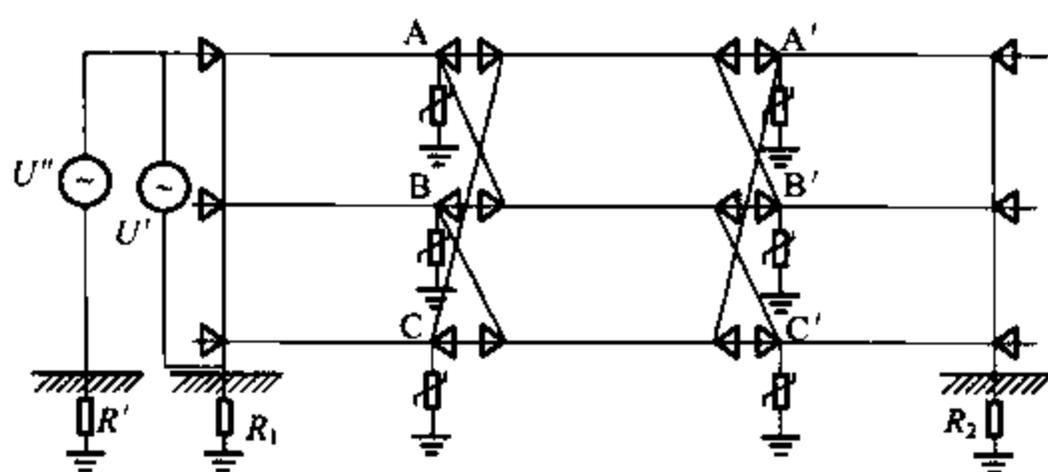


图 7-16 电缆金属护套交叉互联加 YN 接保护器接线

$$U_{YN} = IR + \dot{U}_{A'A} \quad (7-39)$$

193

因为 IR 和 $\dot{U}_{A'A}$ 的值都很大，其相位差约为 90° ，所以保护器所受电压 \dot{U}_{YN} 的值很大。YN 接保护器所受的工频电压在发生各种故障时的计算方法如下。

1. 单相 (A 相) 接地

由于金属护套电压和地网电压部分抵消，因此 A 相接地时，C 相护层和保护器所受的工频电压要比 A 相高。

(1) 地网外短路

$$\begin{aligned} \dot{U}_C &= -IZ_{00} + \frac{1}{Z_a + R_1 + R_2} \\ &\quad \times \left[x_s \left(R_1 + \frac{Z_a}{3} \right) I - R_1 \left(R_2 + \frac{2}{3} Z_a \right) I_2 \right] \\ \dot{U}'_C &= IZ_{00} - \frac{Ix_s + I_2 R_1}{Z_a + R_2 + R_1} \left(R_2 + \frac{Z_a}{3} \right) \end{aligned} \quad (7-40)$$

(2) 地网内短路

$$\begin{aligned} \dot{U}_C &= -IZ_{00} + \frac{1}{Z_a + R_2 + R_1} \\ &\quad \times \left[(x_s + R_2) \left(R_1 + \frac{Z_a}{3} \right) I - R_1 \left(R_2 + \frac{2}{3} Z_a \right) I_2 \right] \\ \dot{U}'_C &= IZ_{00} + \left[R_2 - \frac{(x_s + R_2) \left(R_2 + \frac{Z_a}{3} \right)}{Z_a + R_2 + R_1} \right] I \end{aligned}$$

$$-\frac{R_1 \left(R_2 + \frac{2}{3} Z_a \right)}{Z_a + R_2 + R_1} I_2 \quad (7-41)$$

2. 两相 (A、C 相) 短路

$$\dot{U}_C = -I(x_s - Z_{00}) \quad (7-42)$$

3. 三相短路

$$\begin{aligned} \dot{U}_C = -I \left[-\frac{1}{2} (x_s + Z_{00} - 2Z_{01}) \right. \\ \left. - j \frac{\sqrt{3}}{2} (x_s - Z_{00}) \right] \quad (7-43) \end{aligned}$$

第四节 电缆护层保护器的技术要求及其设计

一、对保护器的要求

目前国内外普遍采用氧化锌保护器。该保护器在正常工作条件下呈现很大的电阻,以保证电缆护套在单点互联接地状态下工作。当雷电波和内过电压波进入电缆线芯,不接地端的护套出现较高电压时,保护器却呈现较小的电阻,使电流较容易经保护器泄入大地,此时保护器不应损坏。当然还要求保护器的残压应小于电缆护层冲击绝缘水平,这样保护器才能起到保护电缆护层绝缘的作用。

应该注意,在工频短路时金属护套的不接地端或绝缘接头的两端也会出现较高的工频电压。当接有保护器时,这一工频过电压也将作用在保护器上,工频过电压存在的时间很短,通常按线路后备保护动作时间考虑,这样就要求保护器在这段时间内能承受这一工频电压而不损坏。保护器耐受工频过电压的能力用规定时间下的耐压值(例如 2s 或 4s 工频耐压值)表示。

保护器的保护性能通常用残工比 K 表示。

$$\text{残工比 } K = \frac{\text{保护器在 } 10\text{kA 冲击电流下的残压 (幅值)}}{\text{保护器的 } 2\text{s 工频耐压 (有效值)}}$$

保护器的残工比 K 越小，其性能越好。早期保护器采用碳化硅阀片，它的残工比约为 4.5 左右。1985 年后改用氧化锌阀片，它的残工比为 2.75，显然比前者优异得多。表 7-6 列出了氧化锌阀片的特性参数。

表 7-6 氧化锌阀片的特性参数 (MY31 型)

参 数	数 值
尺寸 (mm)	直径 80, 厚 8
直流 1mA 时的电压 (V)	1000
2s 工频耐压 (有效值) (V)	1200
8/20 μ S、10kA 残压 (幅值) (kV)	3.3
残工比	2.75

二、保护器的选择

(1) 保护器通过最大冲击电流时的残压乘 1.4 后，应低于电缆护层绝缘的冲击耐压值。

(2) 保护器应能承受最大工频电压 5s 而不损坏。

(3) 保护器应能通过最大冲击电流累计 20 次而不损坏。

(4) 保护器阀片数由护层所受工频过电压确定，保护器阀片数为

$$m = \frac{U_s}{U'} \quad (7-44)$$

式中 m ——保护器阀片数；

U_s ——护层工频过电压值，kV；

U' ——一片阀片所能承受的工频电压值，kV。

三、电缆金属护套与保护器连接的要求

(1) 连接线应尽量短，宜采用同轴电缆。

(2) 连接线截面应满足热稳定要求。

(3) 连接线的绝缘水平应与电缆护层绝缘水平相同。

(4) 保护器应配有动作记录器。

四、电缆护层保护器的参数设计

电缆护层保护器是由非线性限流元件、金属电极和硅橡胶外

绝缘构成的。其绝缘水平、保护效果取决于电气参数设计和优化选取。如前所述,国内外标准中已对其参数选取作出了一般规定。优化设计电力电缆金属护层保护器技术参数,可为电力电缆线路设计时科学地、合理地选取护层保护器提供理论依据。现分述如下:

1. 额定电压 U_r 和起始动作电压 U_{1mA}

系统短路时,工频短路电流流过电缆芯线,电缆金属护套不接地端会产生较高的工频感应电压。兼顾护层保护器的工频过电压耐受能力和起始动作电压 U_{1mA} ($U_{1mA} = \sqrt{2}U_r$),护层保护器额定电压 $U_r = U_p / K$,式中 U_p 为短路事故中电缆出现的工频电压最大值; K 为保护器工频电压耦合系数。

保护器额定电压的选取直接关系到其保护特性和可靠性;保护器的额定电压越高,其工频电压耐受时间特性越好,动作次数越少,使用寿命越长。根据电缆护套绝缘耐受能力和保护器动作情况的不同, K 值可取 1.1~1.3。 K 值越大,保护水平越低,对电缆外护套过电压的保护越有利。一旦电缆金属套出现较高的过电压,护层保护器会牺牲自己以达到保护电缆外护套的目的。

当电缆金属套上感应过电压幅值可能超过电缆外护套的绝缘水平时,电缆的护层保护器应可靠动作。针对电缆外护套绝缘水平逐渐下降的实际情况,选取电缆护层保护器的起始动作电压应低于运行中电缆外护套的工频耐受电压。但当护层保护器的额定电压和起始动作电压取值偏小时,保护器会因工频耐受能力较差、动作频繁而大幅度缩短其正常使用寿命。因此,应同时考虑短路时电缆金属套上的工频过电压与电缆外护套的绝缘耐受水平,而短路时电缆金属套上的工频过电压又与电缆外护套的保护方式有关。

2. 残压

护层保护器通过最大冲击电流时的残压乘以 1.4 后,应低于电缆护层绝缘的冲击耐压值。保护器的残压越低,限制的电位越低,对保护电缆外护套绝缘不受过电压破坏越有利。实际积累的

电缆运行经验和现场试验结果表明：电缆投运后，由于环境的影响电缆外护套的绝缘水平快速下降，护层保护器应参考电缆外护套的实际冲击耐受电压来选择残压，尽量选择较低残压。但较低残压容易导致护层保护器工频耐压水平较低，从而发生击穿。

保护器的额定电压、起始动作电压是相互关联、相互制约的关系。不考虑压比时，保护器的额定电压越高，残压也越高。

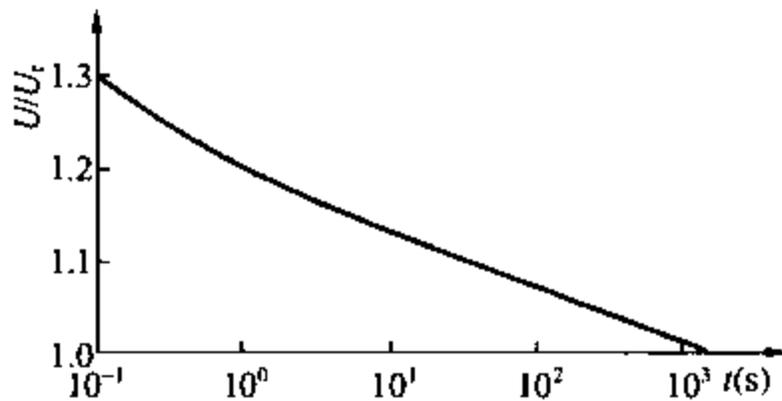


图 7-17 额定电压下无间隙氧化锌避雷器的工频电压耐受时间特性曲线

3. 保护器工频耐受电压 U_p 和通流容量 I_m

额定电压下无间隙氧化锌避雷器的工频电压耐受时间特性曲线如图 7-17 所示。其中 U 为避雷器工频耐受电压， U_r 为额定电压。由于护层保护器采用

氧化锌电阻作为非线性限流元件，基本上可选取护层保护器工频耐受电压 U_g 作用下能承受 5s 而不损坏。

在雷电冲击电压作用下，电缆金属护套一端接地另一端接保护器时，该保护器的通流容量 I_m 参照表 7-7 选取；在操作过电压作用下，保护器通流容量 I'_m 可参照表 7-8 选取。在操作过电压作用下，流经保护器的电流有 2 个阶段，即换算到 8/20 μ s 的波形 I_m 和持续 2~3ms 的方波电流 I_c 。保护器具有释放内部过电压能量的通流能力。

表 7-7 保护器标准冲击电流波的通流容量 I_m kA

系统标称电压 (kV)	8/20 μ s		20/40 μ s	
	保护器在 电缆首端	保护器在 电缆末端	保护器在 电缆首端	保护器在 电缆末端
110	5.1	0.28	3.0	0.1
220	10.0	0.44	6.0	0.3
330	15.0	1.25	8.0	1.0
500	20.0	3.10	12.0	1.8

表 7-8 保护器的操作波通流容量 I'_m 和 I_c

电缆回路数	110kV		220kV		330kV		500kV	
	I'_m (kA)	I_c (A)	I'_m (kA)	I_c (A)	I'_m (kA)	I_c (A)	I'_m (kA)	I_c (A)
2	6.9	1.7	8.6	3.3	9.1	5.6	10.7	23
3	8.9	2.3	11.3	4.5	12.0	7.6	15.5	31.3
4	9.9	2.7	12.6	5.5	13.4	8.7	18.0	35.5
5	10.5	2.9	13.4	5.7	14.3	9.3	19.6	37.7
6	10.9	3.0	13.9	5.8	14.9	9.7	20.4	39.7
7	11.1	3.2	14.3	6.0	15.3	10.0	21.6	40.8

198

I_m 和 I'_m 二者中较大值为保护器的通流容量设计值, 以确保通过最大冲击电流累计 20 次而不损坏。

4. 试验验证

基于 $8/20\mu s$ 标称放电电流 10kA 设计的护层保护器适用于额定电压 220kV 的电力电缆线路金属护套过电压保护。其雷电冲击电压 U_c 试验结果如图 7-18 所示, 50kV 冲击电压, 正负极

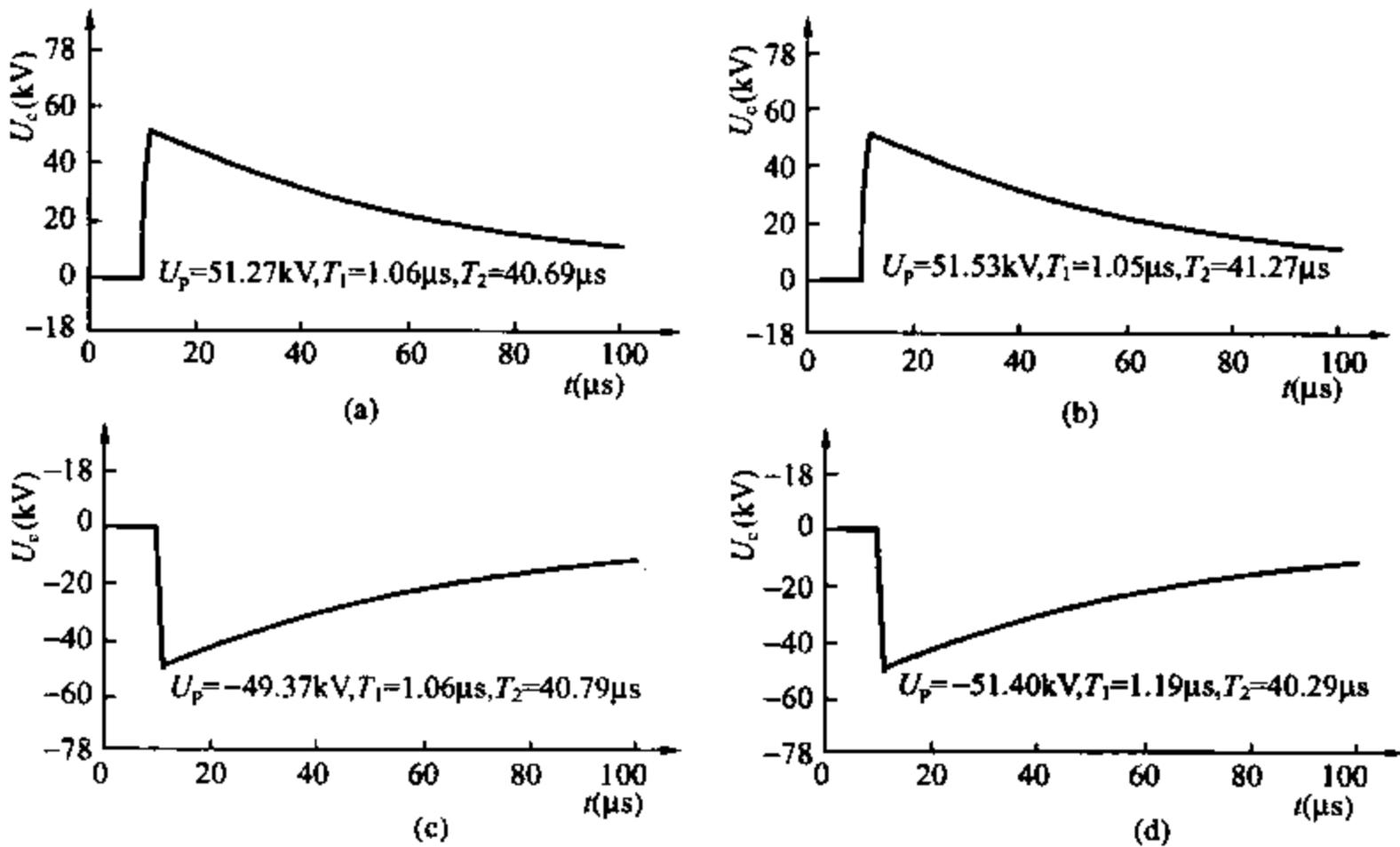


图 7-18 冲击电压波形图

- (a) 第 1 次正极性; (b) 第 10 次正极性;
- (c) 第 1 次负极性; (d) 第 10 次负极性

性各 10 次，护层保护器应不击穿，不闪络；大电流冲击试验波形如图 7-19 所示。电缆金属护层保护器主要技术参数见表 7-9，供读者参考。

表 7-9 电缆护层保护器主要技术参数

产品型号	适用电缆系统电压 (kV)	额定电压 (kV)	持续运行电压 (kV)	8/20 μ s 标称放电电流 (kA)	直流参考电压 U_{1mA} (kV)
BHQ-7/200	35	2.8	2.24	5	≥ 4.0
BHQ-7/400	110、220	2.8	2.24	10	≥ 4.0
BHQ-7/600	110、220	2.8	2.24	10	≥ 4.0
BHQ-10/400	110、220	3.6	2.64	10	≥ 5.8
BHQ-10/600	110、220	4.0	3.2	10	≥ 5.8

产品型号	0.75 U_{1mA} 下的泄漏电流 (μ A)	标称放电电流下的残压 (kV)	2000 μ s 方波电流 (A)	4/10 μ s 冲击耐受 (kA)	1.05 U_c 下局放量 (pC)
BHQ-7/200	≤ 30	≤ 7	200	65	≤ 14
BHQ-7/400	≤ 30	≤ 7	400	100	≤ 14
BHQ-7/600	≤ 30	≤ 7	600	100	≤ 14
BHQ-10/400	≤ 30	≤ 10	400	100	≤ 14
BHQ-10/600	≤ 30	≤ 10	600	100	≤ 14

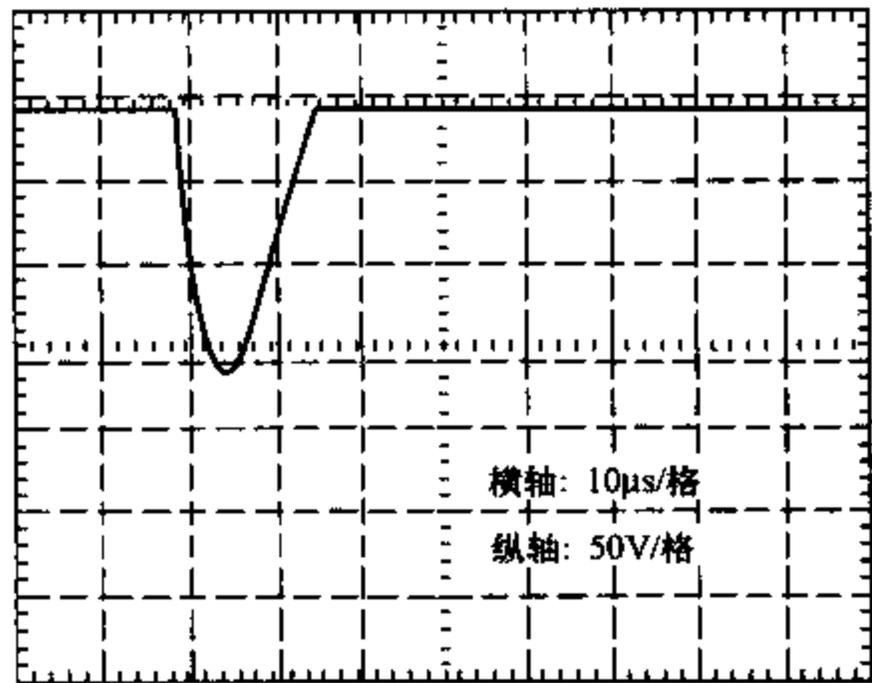


图 7-19 大电流冲击试验波形

上述验证试验结果表明,电缆金属护层保护器电气性能参数设计符合相关标准的技术要求,能够满足单芯电力电缆金属护套过电压保护和保护接地持续安全可靠运行的实际需要。

综上所述,电缆护层保护器参数设计时必须根据电缆外护套绝缘水平逐渐下降的实际情况,综合计算额定电压、动作电压、残压以及工频耐受电压、通流容量等关键技术参数,充分考虑参数之间的相互制约因素优化选取。

第五节 电缆金属护套环流分析及计算实例

一、电缆金属护套环流问题分析

高压单芯电缆的外护套是电缆线路的重要组成部分,其绝缘状态差或金属护套接地方式不正确,都会引起护套环流异常现象,它直接影响电缆线路的载流量,因此对高压单芯电缆护套环流问题进行分析与监测具有十分重要的意义。

1. 金属护套环流异常的危害

(1) 金属护套环流出现异常,直接影响到电缆线路的载流量。金属护套环流异常对载流量的影响可达 $30\% \sim 40\%$ 。当金属护套环流异常时,电缆线路允许最大负荷不能超过额定载流量的 60% 。

(2) 金属护套环流出现异常,造成电缆损耗发热,导致绝缘局部高温,加速绝缘老化,降低电缆使用寿命。

(3) 金属护套环流出现异常,很可能使电缆外护套破损,出现许多点接地现象。外护套破损,金属护套被腐蚀,既增加了主绝缘水树老化的几率,又易诱发局部放电和电树枝,对电缆线路的安全运行造成很大的威胁。

2. 金属护套环流判断标准

目前,国内尚没有制定判断电缆金属护套环流是否正常的定量判断标准。鉴于电缆金属护套环流的重要性,国内已有些单位制定了相应的企业标准。电缆金属护套环流与电缆运行负荷电流

有关。杭州电力公司和佛山电力公司都规定了金属护套环流不应超过负荷电流的5%。上海电缆输变电公司规定金属护套环流不应超过10A,且三相环流要基本保持平衡。北京地区与其他地区的电缆敷设环境有所不同,所以金属护套环流的判断标准、也不一样。例如敷设于隧道内时,同路径的电缆多,相互影响大,金属护套环流不宜超过负荷电流的10%,且与投运初期相比不应有明显的变化。

3. 金属护套环流异常原因

(1) 电缆排列、接地方式对金属护套环流的影响。

1) 品字形排列。当高压单芯电缆采用交叉互联正三角形品字形排列,交叉互联段长度相等时,各段金属护套感应电压幅值相等,相位相差 120° ,其向量和为零。即电缆金属护套在一个完整交叉互联段上感应电压、相互抵消,护套环流为零。但实际上由于设计或现场原因,使电缆三相排列不对称或非正三角形排列,电缆每段长度不完全相等,使金属护套上存在一定感应电压而产生环流。

2) 水平排列。当三相电缆采用交叉互联水平排列敷设,交叉互联段长度相等时,从理论计算可知,中间相感应电压幅值低于两边相感应电压幅值,其向量和不为零,所以产生护套环流。

3) 单端接地。如果电缆外护套绝缘没有损坏、接地的情况发生,此时金属护套不构成回路,护套环流为零。

4) 两端直接接地。此时电缆金属护套环流将很大,最高能达到电缆线路负荷电流的50%以上。

(2) 施工或运行中接地系统故障。

1) 交叉互联换位出现错误。一组完整的交叉互联段内交叉互联换位次序应该前后一致,即同时为“A→B→C→A”或“A→C→B→A”,如果连接出现错误,此时环流将很大。

2) 单端接地系统的不接地端意外接地。单端接地系统的不接地端与地之间通常安装有连接片或软接地编织带连接的护层保

护器。有时候由于安装疏忽,使得护层保护器被短接,造成单端接地系统的不接地端意外接地,系统的接地方式也由单端接地变成了两端直接接地。

3) 护层保护器被击穿。在正常情况下,接地系统内护层保护器是绝缘的。但在运行过程中,若系统遭受雷电过电压或操作过电压的冲击,护层保护器可能被击穿,并形成通路,使系统接地方式发生改变。

(3) 外护套绝缘水平降低。

1) 外护套老化。由于外护套老化,绝缘水平降低,出现了实际的多点接地。

2) 外护套破损。电缆在运行过程中产生热蠕动或其他原因使电缆外护套存在局部损伤缺陷。

(4) 同路径其他电缆的影响。同路径敷设的其他电缆与三相电缆之间存在互感,在三相电缆上引起的感应电压不同,由此带来了金属护套环流异常。电缆线路空载时,分析邻近带电线路的互感在电缆金属护套上产生的感应电压大小,来判断邻近带电线路对金属护套环流的影响程度。

(5) 电缆线路改造的影响。由于电网建设需要使电缆改变,或者由于电缆线路可能与其他地下管线发生冲突需对电缆局部改迁,使得原来平衡的交叉互联系统被破坏。

(6) 隧道内积水或接地系统被人为破坏。部分隧道内长年积水,防水的交叉互联箱可能逐渐进水,导致接地系统被破坏。此外,隧道内接地箱、互联箱及接地线、互联线等接地系统设施也可能遭受到人为破坏。

4. 金属护套环流异常对策

(1) 工程设计时,充分考虑电缆线路采用段长相等的交叉互联正三角形排列,或者采用交叉互联与单端接地相结合的方式。

(2) 制定线路改迁技术规定,以尽量不破坏原有接地系统为原则,将线路交叉互联段段长的不平衡系数控制在 20%

以内。

(3) 电缆线路施工过程中, 严格按照施工工艺要求操作, 保证施工质量。同时, 严格按照竣工试验标准进行验收试验。

(4) 加强线路巡视, 严格线路蛇行敷设和卡具固定要求。对于可能存在硌伤电缆隐患的地方, 通过加装垫铁、支架加长套袖等方式控制。定期进行线路外护套试验。

(5) 对于部分电缆外护套老化、绝缘水平降低的情况, 应尽快编制可行方案, 按计划逐批予以更换。

(6) 通过隧道整治改善电缆运行环境, 更换老电缆, 而且要采用防水的交叉互联箱, 确保电缆安全运行。

(7) 线路投运后, 要分别记录电缆线空载运行与带负荷两种情况下的环流值并进行比较。

5. 改进的建议

(1) 需尽快制定电缆金属护套环流异常的控制标准, 以便进行治理。

(2) 电缆线路设计时, 要充分考虑线路的排列方式和接地方式, 尽量避免邻近带电线路对金属护套环流的影响。

(3) 电缆线路改造和建设时, 尽可能不采用交叉互联加、“T”接分支线的接线方式, 因为这样会导致交叉互联段线路负荷严重不相等, 使环流值增加。

(4) 可参照日本经验, 在交叉互联段线路上加装补偿电感(电抗器), 具体接线如图 7-20 所示。

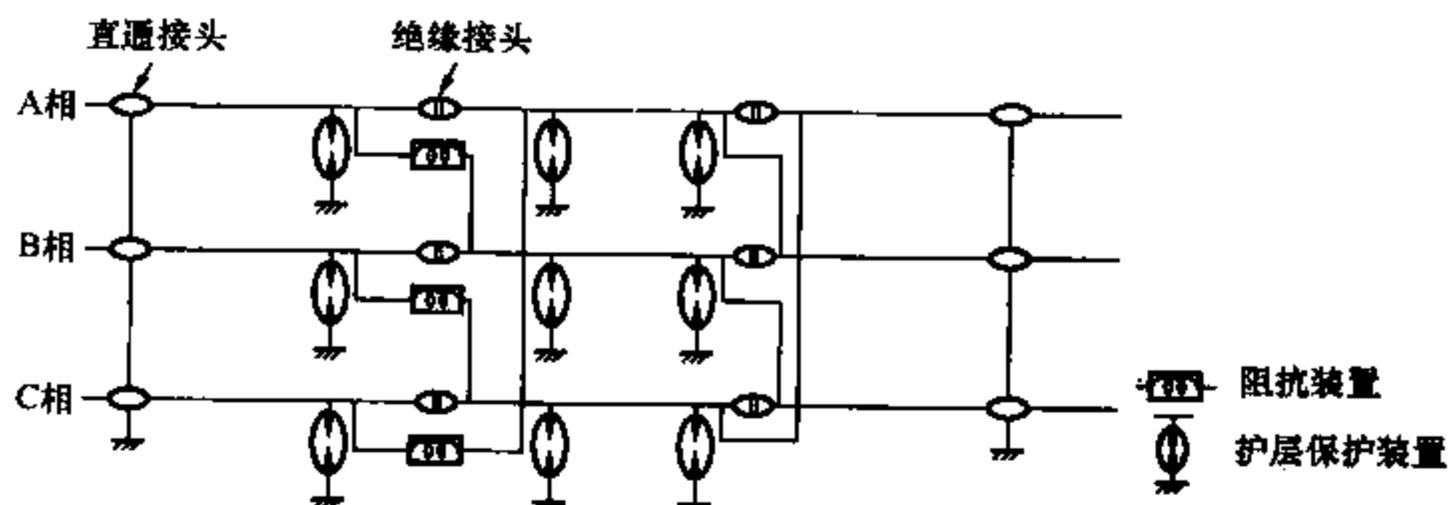


图 7-20 抑制金属护套环流用阻抗器连接方式

当采用图 7-20 所示连接方式受到工程条件限制时,可改为采用图 7-21 所示交叉互联与阻抗接地并用方式,以减少正常运行中的环流。

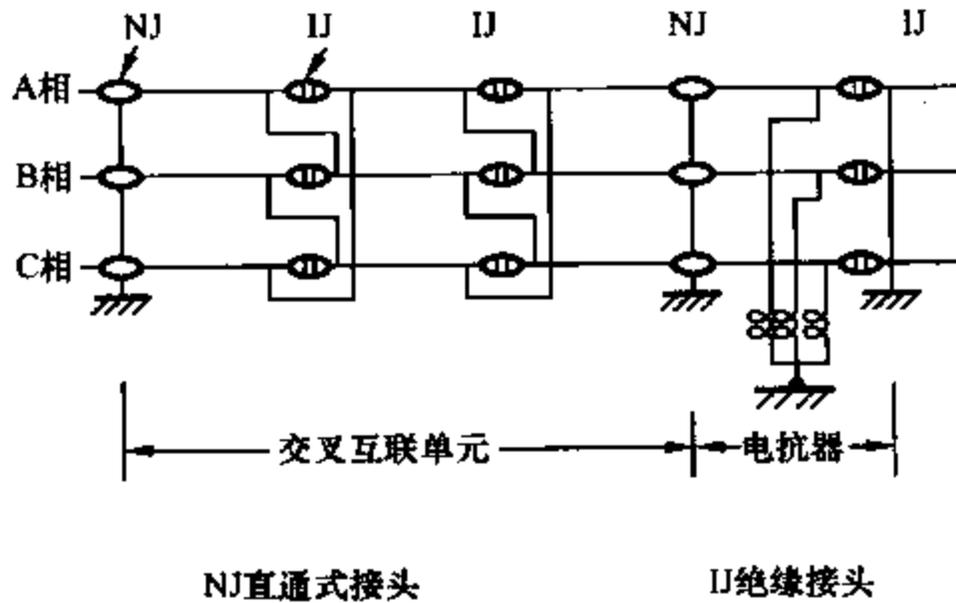


图 7-21 交叉互联与阻抗接地并用方式

电抗器特性参数如下:

(a) 电压、电流特性。

- a) 30A 内非饱和电抗值 $U/I=1.0\Omega\pm 10\%$;
 - b) 饱和的最大端子电压 30V;
 - c) 400A 以上饱和程度 $\Delta U/\Delta I=0.01\Omega$ 以下;
 - d) 通过 400A 电流时最大端子电压不大于 40V;
- (b) 耐受短路电流 25kA (有效值) 0.1s 3 次。

二、110kV XLPE 电缆金属护套的感应电压和环流计算实例

1. 基本情况

某110kV 输电线是连接 220kV 变电站和 110kV 变电站的线路,该线路由 3km 的架空线和 450m 入站电缆组成。现计划将架空线一段改为电缆,这样工程完成后将新增电缆 1680m。高压电缆线路运行时,在金属护套上产生感应电压,按规程规定该感应电压一般不得大于 50V,采取安全措施后允许在 100V 以内。考虑新增加电缆和原来电缆在接线方式上如何配合才能满足上述要求,现提出两个设计方案进行比较,两个方案如图 7-22 所示。

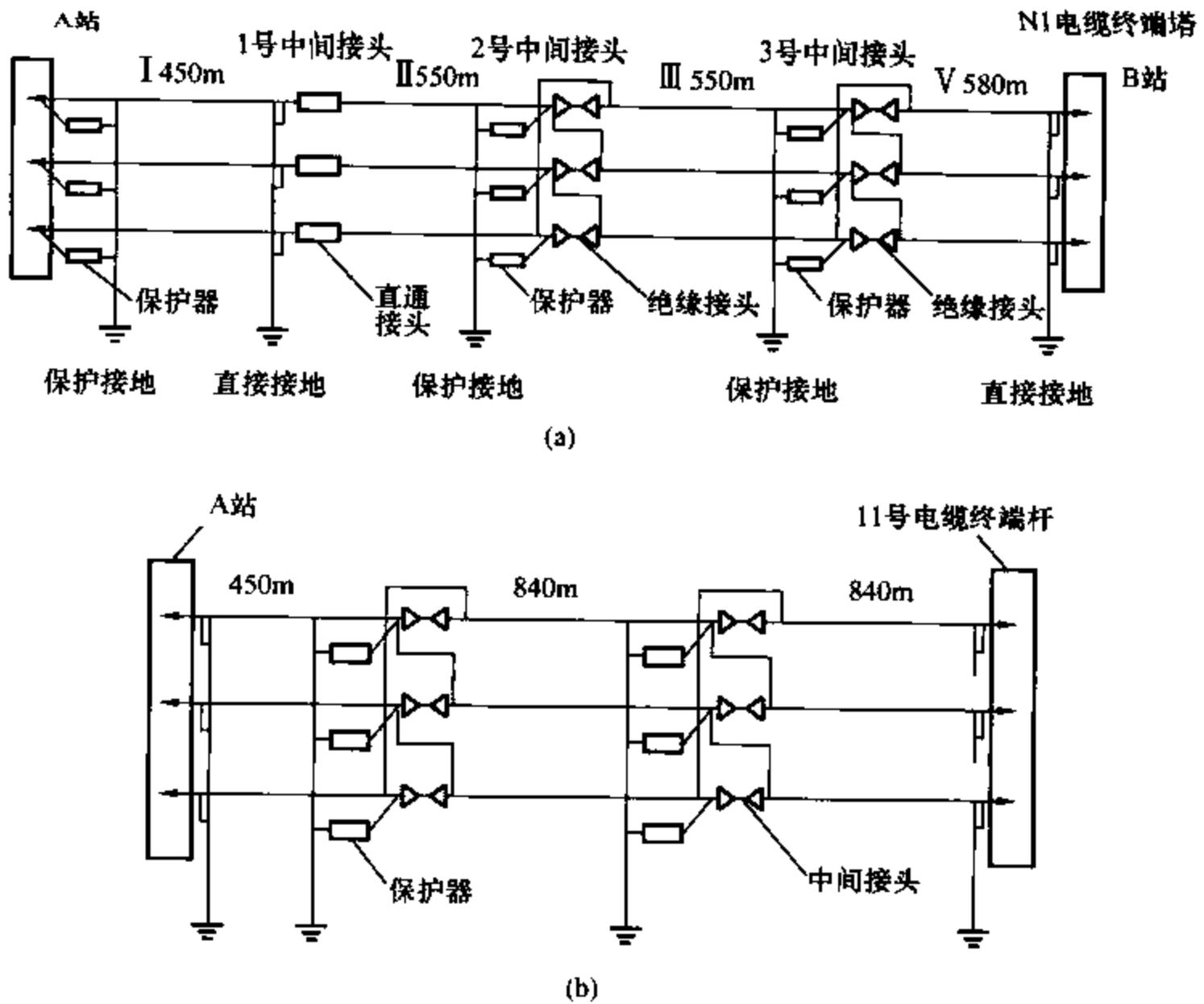


图 7-22 改造方案

(a) 方案 I；(b) 方案 II

方案 I 是将新增的电缆段作为一组交叉互联形式，在单元内平均分配电缆段的长度，使其均匀布置，减少运行环流。但由于施工条件限制，3 个隔离分段长度不能完全相等，所以护套链中会产生不平衡电压，设计计算时还需要分析由此产生的环流是否影响电缆芯线的负荷能力。

该方案还有以下缺点：

- 1) 需要更改 A 站到 B 站电缆段原有的接地形式。
- 2) 接头数目多，中间接头故障几率较大，对运行可靠性不利。

方案 II 是将新增电缆段与原电缆段共同组成一组外护套接地形式，此方案的特点是：

- 1) 不需改变原有电缆线路的接地形式。
- 2) 采用三段交叉互联只需两个中间接头。
- 3) 交叉互联 3 段长度不同, 容易产生环流。

由上述分析可见两种方案各有利弊, 在对两种方案进行选择时还需要计算环流值, 要求该环流值不大于电缆线路负荷电流的 5%。

2. 电缆护套工频感应电压与环流计算

(1) 工频感应电压。长度为 l 时的三相单芯电缆中流过工频电流时, 各相电缆护套两端感应电压为

$$\dot{U}_{1A} = -\dot{I}_A Z_A; \dot{U}_{1B} = -\dot{I}_B Z_B; \dot{U}_{1C} = -\dot{I}_C Z_C;$$

其中

$$Z_A = j2 \times 10^{-7} \omega l \ln(\sqrt{2}d/r) - j(\sqrt{3}/2 \ln 2)$$

$$Z_B = j2 \times 10^{-7} \omega l \ln(d/r)$$

$$Z_C = j2 \times 10^{-7} \omega l \ln(\sqrt{2}d/r) + j(\sqrt{3}/2 \ln 2)$$

其中: Z_A 、 Z_B 、 Z_C 分别为芯线与护套间的电磁互感阻抗, Ω ; $d=0.23\text{m}$ 为边相与中相电缆中心线间距离; $r=0.03635\text{m}$ 为电缆护套平均半径; \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 分别为 A、B、C 三相电缆芯线中的电流, A; 电缆段长度 $l_A=580\text{m}$, $l_B=550\text{m}$, $l_C=550\text{m}$ 。如图 7-19 所示。

将 A 相第 1 段, B 相第 2 段 C 相第 3 段; B 相第 1 段, C 相第 2 段, A 相第 3 段; C 相第 1 段, A 相第 2 段, B 相第 3 段护套交叉互联形式“护套链”。通过计算可得:

1) A、B、C 三相第 1 段与第 2、3 段护套和芯线间正、负序互感阻抗值分别为:

$$Z_{A1} = 0.0219 + j0.0799 = 0.0828 \angle 74.68^\circ (\Omega)$$

$$Z_{B1} = 0 + j0.0672 = 0.0672 \angle 90^\circ (\Omega)$$

$$Z_{C1} = -0.0219 + j0.0799 = 0.0828 \angle 105.32^\circ (\Omega)$$

$$Z_{A2} = Z_{A3} = 0.0207 + j0.0757$$

$$= 0.0785 \angle 74.68^\circ (\Omega)$$

$$Z_{E2} = Z_{E3} = 0 + j0.0638 = 0.0638 \angle 90^\circ (\Omega)$$

$$Z_{C2} = Z_{C3} = -0.0207 + j0.0757 = 0.0785 \angle 105.32^\circ (\Omega)$$

2) 护套链的正、负序阻抗为

$$Z_A = 0.011 + j0.2193 = 0.2193 \angle 89.70^\circ (\Omega)$$

$$Z_B = 0 + j0.2187 = 0.2187 \angle 90^\circ (\Omega)$$

$$Z_C = -0.011 + j0.2193 = 0.2193 \angle 90.29^\circ (\Omega)$$

最大运行方式时, 线路中电缆芯线电流为 600A, 即

$$\dot{I}_A = 600 \angle 0^\circ (\text{A})$$

$$\dot{I}_B = 600 \angle 120^\circ (\text{A})$$

$$\dot{I}_C = 600 \angle 240^\circ (\text{A})$$

则各段工频感应电压为

$$\dot{U}_{A1} = -13.1255 - j47.9173 = 49.6824 \angle 105.32^\circ (\text{V})$$

$$\dot{U}_{B1} = -34.9349 + j20.1697 = 40.3393 \angle -210^\circ (\text{V})$$

$$\dot{U}_{C1} = 34.9349 + j35.3256 = 49.6824 \angle -314.68^\circ (\text{V})$$

$$\dot{U}_{A2} = \dot{U}_{A3} = -12.4466 - j43.4388 = 47.1126 \angle 103.32^\circ (\text{V})$$

$$\dot{U}_{B2} = \dot{U}_{B3} = -33.1278 + j19.1264 = 38.2527 \angle -210^\circ (\text{V})$$

$$\dot{U}_{C2} = \dot{U}_{C3} = 33.1278 + j33.4984 = 47.1126 \angle 314.68^\circ (\text{V})$$

从上面的计算结果可以看出, 交叉互联的每个分隔段最高感应电压均小于 50V, 可满足设计规范的要求。

(2) 交叉互联单元内的环流计算。I、II、III段护套链回路不平衡电压为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_I &= \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{C3} = -13.1255 + j4.7075 \\ &= 13.9441 \angle 160.27^\circ (\text{V}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{II} &= \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{A3} = 14.2535 + j8.2292 \\ &= 16.4585 \angle 150^\circ (\text{V}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{III} &= \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{B3} = 10.6396 + j9.0132 \\ &= 13.9441 \angle 139.73^\circ (\text{V}) \end{aligned}$$

最大负荷时, 环流计算

1) 各序电压

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_I \\ \Delta \dot{U}_{II} \\ \Delta \dot{U}_{III} \end{bmatrix}$$

$$\dot{U}_1 = 2.3478 \angle 90^\circ (\text{V})$$

$$\dot{U}_2 = 0.5266 \angle -150^\circ (\text{V})$$

$$\dot{U}_0 = 14.6333 \angle 150^\circ (\text{V})$$

2) 各序阻抗

$$Z_1 = 0.2193 \angle 89.70^\circ (\Omega)$$

$$Z_2 = 0.2193 \angle 89.70^\circ (\Omega)$$

$$Z_0 = 3.5457 \angle 57.79^\circ (\Omega)$$

3) 各序电流

$$\dot{I}_1 = 10.7035 \angle 0.2955^\circ (\text{A})$$

$$\dot{I}_2 = 2.3825 \angle 120.29^\circ (\text{A})$$

$$\dot{I}_0 = 4.1271 \angle 92.21^\circ (\text{A})$$

护套链各序电流用对称分量法合成计算

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_I \\ \Delta \dot{U}_{II} \\ \Delta \dot{U}_{III} \end{bmatrix}$$

$\Delta \dot{I}_I = 11.2325 \angle 33.72^\circ \text{A}$, 相当于电缆芯线电流的 1.87%;

$\Delta \dot{I}_{II} = 9.8281 \angle 47.47^\circ \text{A}$, 相当于电缆芯线电流的 1.63%;

$\Delta \dot{I}_{III} = 13.7499 \angle -76.64^\circ \text{A}$, 相当于电缆芯线电流的 2.29%。

同理可求得方案 II 的环流值为

$\Delta \dot{I}_I = 84.612 \angle 15.55^\circ \text{A}$, 相当于电缆芯线电流的 14.1%;

$\Delta \dot{I}_{\text{II}} = 139.807 \angle 58.18^\circ \text{A}$ ，相当于电缆芯线电流的 23.3%；

$\Delta \dot{I}_{\text{III}} = 80.743 \angle -84.89^\circ \text{A}$ ，相当于电缆芯线电流的 13.4%。

由上述计算结果可知，方案 I 能满足环流小于负荷电流 5% 的要求而方案 II 计算出环流则大大超过规定值，故应选取方案 I 作为设计依据。

思考题

1. 为什么高压单芯电缆金属护套一般不能两端接地，而三芯电缆却允许？
2. 什么叫沿电缆线芯流动的冲击电压波？为什么金属护套不接地端会出现过电压？应采用什么保护措施？
3. 为什么当电缆金属护套采取交叉换位两端互联接地后，仍不能解决过电压问题？
4. 当电缆金属护套采取换位两端互联接地时，保护器接成 YN 与 Y 方式各有何优缺点？
5. 什么叫回流线？为什么它能降低金属护套工频感应电压？
6. 电缆护层保护器通常由什么组成？它的冲击通流容量是如何确定的？
7. 电缆金属护套和接地线产生较大环流的原因是什么？应如何限制？

交联聚乙烯电力电缆线路的 防火与阻燃措施

第一节 国内外电缆火灾事故分析

一、国内电缆火灾事故概况

20世纪70年代以来我国电缆着火延燃事故频繁发生,损失很大。随着我国电力工业的发展,大机组日益增多,自动化水平不断提高,控制和动力电缆大量增加,如1台30万kW机组的各类电缆长达300km之多。电缆为易燃物,特别是近十几年来大量采用塑料电缆,加上电缆为集中敷设,极易着火,一旦着火,火势凶猛,延燃迅速,往往造成全厂性的火灾事故,并且在着火后会产生大量氯化氢毒气,很难扑救。着火后不但烧坏大量电缆和其他设备,而且停电恢复时间较长,严重影响工农业生产用电。总之,电缆火灾是电力系统中的恶性事故之一,它给国民经济和人民群众带来巨大的损失,故万万不可对其掉以轻心,麻痹大意。

据不完全统计,1960—1990年,全国因电缆着火后蔓延燃烧酿成的重大火灾事故约有62次,都造成了重大损失,其中特别严重的有:

(1) 1973年9月秦岭发电厂1号机(12.5万kW)油系统漏油着火,大火沿着汽机平台下面的电缆迅速向集控室蔓延,约12min,集控室内充满烟雾。由于火势猛烈,不到半小时,整个集控室被烧毁,汽机厂房架烧塌,直接经济损失达150万元,修复时间长达1年,损失电量5.8亿kWh。

(2) 1977年1月,丹河电厂由于高温油箱喷油起火,火焰随油流入电缆隧道,引燃电缆,而电缆火势迅速延燃扩大,把2

台 10 万 kW 机组的电缆夹层、热控室、继电室、集控室全部烧毁，直接经济损失 130 万元，修复时间 1 个月，损失电量 2800 万 kWh。

(3) 1975 年 1 月，洛阳电厂磨煤机防爆门爆破，喷出火焰，烧着了右侧 2.9m 处的电缆架层，很快延燃，烧毁了 5 号、6 号炉全部电缆，中断了给粉机的电源，造成全厂停电。

(4) 1984 年 10 月 13 日，姚孟电厂由于备用电缆终端头爆炸起火，大火沿着电缆沟竖井迅速蔓延，将 2 台 30 万 kW 机组的厂用交直流电源电缆全部烧毁，造成全厂停电，烧毁大量电缆、盘柜以及高压电抗器和备用变压器，并波及机组轴瓦，使其损坏。全厂人员奋力抢救，经 28 天才恢复 1 台机组运行，另 1 台机组被迫转入大修，损失电量约 3 亿 kWh。

(5) 1984 年 11 月 10 日，金竹山电厂由 3 号炉结焦，焦块红灰从人孔门掉落在施工开挖的水沟内，产生大量水蒸气夹带红灰冲至电缆架上，首先引起塑料控制电缆着火，继而将架子上的动力电缆以及其他电缆全部烧毁，并继续延燃，烧毁电缆 10000 余米和许多柜盘，并波及机组轴瓦和高压厂用变压器，使其损坏，造成 3 台 12.5 万 kW 机组停运。

在 62 次电缆火灾事故中，由电缆本身故障起火延燃的有 15 次，占总次数的 24.2%，而由于外界火源引起电缆着火延燃的有 47 次，占总次数的 75.8%。由电缆本身故障引起的 15 次电缆火灾事故中，有 7 次是因电缆本身绝缘下降、老化造成的，约占这类事故的一半。特别是有许多电缆长期浸泡在水中，外皮腐烂，绝缘严重受潮，造成击穿短路，占的比例很大。电缆隧道、沟道积水问题普遍存在，如不设法予以解决，势必会造成更多的事故。其次是电缆终端头爆炸，主要是因其制作工艺粗糙，剥开的绝缘在空气中暴露时间太长，使绝缘受潮，致使其在运行中击穿。总之，我们要从这些事故中吸取教训。

二、国外电缆火灾事故概况

世界上许多国家都发生过电力电缆火灾事故，下面列举

1975年以来国外发生的几次较严重的电缆火灾事故。

(1) 1968年,美国纽约市110层楼、411m高的世界贸易中心大厦,深夜时第11层突然起火,烧着电缆,火势沿贯穿竖井(孔洞未封堵)的电缆扩大至9~11层,造成巨大损失。

(2) 1976年,美国田纳西流域管理局的一个330MW核电厂发生电缆着火,沿电缆延燃波及8回沟道、26条托架共1600根电缆,7h后才扑灭,损失惨重。

(3) 1981年8月,在日本北海道地区的奈井江火电厂,因附近河水浸入控制楼底层的制冷装置,引起母线的弧光短路,把位于其上侧架空托架的控制电缆烧着,火势经由未封堵的竖井沿电缆线路一直蔓延到3层的控制室,使全部控制盘等装置设施都烧毁。

(4) 1984年2月20日,巴基斯坦卡拉奇国际机场发生电缆短路着火延燃,造成主体建筑被烧成废墟,损失达数百万卢比。

国内外电缆火灾事故表明,现应用的各种型式电缆(包括油纸绝缘、塑料绝缘和橡胶绝缘电缆)都无一例外发生过着火和延燃事故。此外,电缆火灾事故无论是受外界火源引起还是由电缆自身故障造成,都具有火势猛、蔓延快、抢救难、损失严重等特点。电缆着火原因多种多样,又难以从根本上避免,因此必须高度重视采取阻燃和防止着火的措施。

第二节 电缆防火阻燃措施现状及存在问题

我国原水电部自1973年秦岭电厂电缆火灾事故现场会议以来,曾多次提出防止电缆着火延燃的基本措施,随后又结合火灾事例不断强调反事故措施的重要性。已有许多单位重视和认真贯彻了这些措施。但要彻底杜绝这类事故,还必须在设计、施工、运行等方面解决一系列问题。例如:

(1) 电缆的隧道、沟道内积水比较普遍,有许多电缆经常被

水浸泡。此外在电缆布置上，有许多电缆过于靠近高温管道又缺乏有效隔热措施。某些电厂运行不足 10 年，塑料电缆已老化，这些都可能损坏电缆绝缘，易导致故障。

(2) 有些锅炉房架空敷设的电缆没有保护，在漏粉环境中运行，煤粉堆积在电缆上的现象较普遍。有的单位定期清扫并增加吹灰用配气管，但多数电厂不够重视。对于电缆通道布置在靠近并朝向防爆门或出渣孔的地方，有的电厂做了防爆门改向或隔离措施，然而多数未采取防护措施。不少电厂在运行中，漏油、漏汽以及蒸汽管道保温层剥落现象较为普遍，且不重视及时消除，对于其邻近布置的电缆也没有采取妥善防火阻燃措施。而引进工程中的宝钢电厂则基本消除了这类现象。

(3) 一般对柜盘的电缆穿孔处封堵已较重视，但对于集控或主控室的进出电缆群孔洞的封堵，仍有不少单位未实现或没有经常保持封堵完好。再者封堵方式还存在一些问题，如封堵不严实，明显可见光线透过缝隙；有的耐火层太薄且不坚固；不少厂用易燃木板承托密封填料；有些厂扩建阶段对运行设备的电缆孔洞长期不予封堵。其次，电缆贯穿通道中设置的阻火隔墙普遍是用砖块之类的硬性材料构成，竖井孔洞多用钢丝网与水泥、石棉泥之类牢实凝固，在增添新电缆时拆除后不易恢复。因此，这项措施有待改进。

(4) 在施工中，不够重视电缆敷设质量，如敷设不整齐，任意交叉，不充分留出巡视通道，制作电缆终端头和中间接头时不注意工艺要求，不按规定设置电缆卡具或用铅丝扎绑塑料电缆等，不仅给运行管理带来困难，而且往往遗留下了故障隐患。

(5) 许多运行单位对于维持、提高电缆本身的安全性缺乏有效的管理措施。调查中有时会发现电缆或接头漏油、电缆外护层鼓胀或破损等缺陷。有的单位对于危及电缆安全的外部影响因素也缺乏应有的重视。除上述油、汽、煤粉的泄漏外，还有在集控室电缆夹层内杂有蒸汽管、油管或动力电缆的中间接头盒，甚至

还布置有可能着火的设备装置。

(6) 过去设计的大容量或主力电厂,对按单元机组划分各自独立的电缆通道注意不够,重要公用回路的电缆往往合用一条通道,消防水泵、事故照明、直流回路等电缆普遍没有考虑耐火处理,加之在消防水泵容量、水压等选择上也存在不尽妥善的考虑,一旦电缆着火后就难以避免波及多台机组或导致全厂停电,以致影响消防手段的可能。

(7) 国外设计的引进工程中,宝钢自备电厂电缆采用架空敷设并大量采用各种防护手段(如穿钢管,桥架上装置盖板和底板),这种办法有利于防火,值得借鉴。此外,在架空敷设时,有的引进工程(如宝钢、陡河)对电缆通道规划较合理,层数较紧凑,这也有利于防火。

(8) 应在电缆隧道附近配置火灾自动报警装置,以便迅速启动灭火设备,减少事故损失。但目前大多数电厂尚未安装,应尽快装设。

● 第三节 防止电缆着火延燃的措施

针对电缆着火事故情况,以及当前在防火延燃方面存在的问题,下面参照引进电厂的经验,从设计、安装、运行三方面提出改进措施,提出防范电缆火灾事故的对策,供运行单位参考。

1. 积极创造条件,改变大型机组的电缆设计

对20万kW及以上机组,要积极采用架空敷设,且动力、操作电缆分开敷设,并部分用穿钢管或耐火槽盒封闭的方法予以防护。采用这种方法后,基本上可以避免外界火源引起电缆着火以及电缆浸泡水问题。若按前述事故统计分析的规律来看,约有80%的事故可以避免。而且根据论证,架空敷设在经济上并不比地下构筑物增加投资,只是在设计和施工上要增加一些工作量,因此应积极推广。

2. 针对当前设计中存在问题需采取的改进措施

(1) 为了限制电缆着火延燃范围,减少事故损失,在进行主厂房电缆敷设设计时,每条电缆隧道、电缆沟,或电缆架空吊架上所通过的电缆,应符合下列原则:

- 1) 发电机容量为 20 万 kW 以上时,为 1 台机的电缆;
- 2) 发电机容量为 12.5 万 kW 以上时,为 1~2 台机的电缆;
- 3) 发电机容量为 10 万 kW 以下时,为 2~3 台机的电缆。

在一个通道内敷设 2 台以上机组的电缆时,可采用耐火隔板或加盖耐火槽盒,实现同一通道中不同机组或公用回路电缆的相互分隔。

(2) 对于隧道、沟道的土建设施的布置,要注意地下水位条件,考虑工业水流排水坡度(不小于 0.5%)、设置排水浅沟(隧道情况)和适当的集水井,必要时安设具有自动起停控制的机力抽水装置,以便排水畅通。

对处于地下水位较高或厂区低于附近河流、湖泊水位的电厂,应采取架空敷设。对于户外电缆沟的盖板,应按质量轻、强度高的目标来设计(如角钢边框式钢丝混凝土板),以便在长期运行中保持盖板的完好。

(3) 主厂房架空电缆与机务设备、管路布置应统一考虑。电缆与蒸汽管净距应不小于 500mm(控制电缆)和 1000mm(动力电缆),与油管路的净距也宜尽可能增大。制粉系统防爆门的朝向应避免直接朝向明敷电缆,否则应添加隔热、防火措施,如在桥架上设置盖板、套板或侧板,或采用封闭式槽盒,或把电缆穿入钢管中。

(4) 架空敷设电缆的干道应设置人行通道。对 6kV、380V 厂用系统和集控室电缆密集的地方,采用电缆夹层电缆厅(室),以便封堵隔离。

(5) 在密集敷设电缆的集控或主控室夹层、隧道内,不得布置热管、油管以及其他可能引起着火的管道和设备,并在高、宽

空间尺寸及支吊架选择上使电缆布置能实现整齐清晰,留出足够的巡视通道。

(6) 在长期经受高温作用的场所,不宜选用普通塑料电缆。

(7) 消防系统、消防水泵、事故照明及直流电源的供配电线路应尽可能具有一定的难燃、耐火性,例如采用单独穿管敷设方式或采用其他阻燃措施等。

3. 合理应用各种防火阻燃手段,以防止电缆着火或阻止延燃

(1) 通向主控或集控室电缆夹层的孔洞及柜、盘的电缆孔,应采取有效阻燃的封堵处理。

(2) 主厂房易受外部着火影响区段,可在电缆上添加阻燃材料(如覆盖一定厚度的防火涂料或包带等),或对电缆予以防护(如采用罩盖、封闭式槽盒、穿钢管等)。

(3) 多台机组的厂用配电装置下部隧道中,应按机炉厂用母线段划分,设置适当数量的防火隔墙。

(4) 动力电缆中间接头盒的两侧及其邻近区段,宜采取增加防火包带等防止着蔓火措施。

(5) 室外高压电流互感器、电压互感器安置处近旁的电缆沟盖板应予以密封处理。

4. 高压电缆线路设计应充分考虑防火阻燃措施

(1) 埋砂敷设电缆具有最佳防火效能,国内外曾广泛应用于高压电缆线路。但埋砂敷设方式比空气中明敷方式的载流能力要降低30%左右,且其不便于运行中寻找或处理电缆缺陷故障,将影响修复时间,使停电损失较大。

(2) 封闭式槽盒内敷设电缆,这种方法的特点是选用耐火或难燃材料构成槽盒,可防止或减轻外部火灾影响,同时由于密封关系,盒内电缆自身着火因缺乏氧气的充分补充,可实现阻熄的目的,又免除了埋砂敷设带来的寻找或处理电缆缺陷、故障困难的问题。至于对电缆载流量的影响,显然介于裸露明敷与埋砂敷

设两种方式之间。日本在高压电缆线路中，采用混凝土或玻璃纤维增强塑料构成的封闭式槽盒，不仅用于充油电缆，也广泛用于高压交联聚乙烯电缆工程。

(3) 在明敷电缆线路上的适当地段添加防火材料覆盖层。国外从 20 世纪 70 年代开始，陆续研制出适用于电缆防火阻燃用的涂料、包带、罩布、管材等新型阻燃材料，其共同的主要特点是：材料本身具有难燃性，覆盖在电缆上的包层在燃烧过程中能发挥隔热效果，由于覆盖物成分在火势高温作用下将起不同的化学反应，从而抑制延燃，主要有创造减少或阻隔氧气的条件（如采用含磷化合物构成的涂料，在高温火势下，分解形成聚磷酸，使材料表面形成薄膜），增加燃烧过程的冷却作用（如采用含有氢氧化铝、氢氧化镁成分的材料，其分子中含有结晶水，高温时蒸发要吸热；又如利用化学反应本身也可以产生吸热效果）等。显然此方法比过去使用单纯耐火隔热材料来覆盖的方法具有更优越的防火阻燃效果，因此在先进工业国家都已广泛应用。

在 20 世纪 70 年代后期，我国上海金山石化总厂供电所首先将防火涂料用于电缆上。随后公安部四川消防科研究所研制了适合电缆用的新型防火涂料。四川电缆厂研制出防火包带，已在较大范围内得到广泛应用。

防火涂料的主要特点是，能以较薄的覆盖层起到较好的防火阻燃效果，几乎不影响电缆的载流能力。防火包带的主要特点：弥补涂料的缺点，适用于大截面高压电缆上，兼具有加强机械性保护的作用；施工上较涂料简便，尤适用于高空作业部位，又由于能准确地把握缠绕厚度，比涂料的施工质量容易检验；再者它不像某些涂料含有对于人体健康有害的气味，在封闭性狭窄隧道中使用时较受施工人员欢迎。防火包带的缺点是：绕于电缆上需有一定的活动空间，在密集的电架架上施工时可能不方便；一般防火包带不具有膨胀性能，故膨胀防火涂料的覆盖层较厚，电缆正常运行载流能力要稍许降低些。

在防火包带基础上,国外还派生发展出防火罩布,它可用于多根电缆整体缠绕,而对电缆之间的缝隙,则在该缠绕段两端用防堵料(油泥状)予以填充,综合构成防火阻燃区段。

日本为了解决防火包带在施工作业上的空间要求与实际工程中狭窄条件的矛盾,又研制出防火管材。它是一种开口形的硬性管材,按电缆外径大致划分系列规格,可方便地直接嵌在电缆上以实现覆盖,达到防火阻燃的效果。

国内有不少电厂,由于不了解上述方法或缺乏这些新材料,采用石棉外缠或石棉泥包覆形成阻火层,虽有防火阻燃效果,但使电缆热阻过分增大,从而使缆芯温度升高,加速绝缘老化,应引起注意。

5. 研制难燃、耐火型电缆

(1) 挤塑类难燃型电缆使电缆难燃化,至今主要在挤塑电缆上得到实现。它的构成方式主要是在护层材料中加入阻燃剂,也有在低压电缆的绝缘材料中加入阻燃剂的。在加入阻燃剂后,要使材料的电气、机械等性能不变坏,在技术上还需作一番努力。

国外在研制开发这类产品方面做的工作主要有:

1) 日本在塑料、橡胶类电缆方面都相继研究出难燃、高难燃的中、低压电缆产品,近年又推出 154kV 交联聚乙烯绝缘的难燃型品种。为估价电缆的难燃性,可用构成电缆绝缘护层材料的氧指数来衡量。一般认为,当平均氧指数大于 28%~33%时才具有难燃性。所谓平均氧指数是指取绝缘与护层的横断面及其相应的氧指数依比例的加权平均值。

2) 瑞典从提高难燃度的角度开发出一些新产品,以适应不同的需要。例如,把氧指数提高到 35%以上,可满足比标准试验的喷嘴火力强度大 5 倍的苛刻考核。又如日本划分难燃与高难燃品种时,昭和公司的电缆护层氧指数分别为 31%和 41%,古河公司的电缆聚氯乙烯护层氧指数分别为 36%和 50%。

我国制造厂研制开发难燃型电缆的起步较晚,当前还缺乏统

一的试验标准,研究工作有待深入开展。

(2) 研制开发耐火型电缆。由无机材料构成的耐火电缆(简称 MI 型)国外早已应用,国内有些单位也已研制成功,但由于造价高和敷设方式的限制要求,尚未得到广泛应用。

● 第四节 电缆防火材料的选择和应用

应用防火材料组成的各种防火阻燃措施是防止电缆着火延燃的主要方法。防火材料的选择应用和性能已成为人们关心的问题,本节将对我国近年来各厂家提供的新型系列防火产品及其应用方法进行介绍,供读者参考。

1. ZS 型电缆轻型封闭式槽盒

槽盒按型式分直线型、弯型(90°、120°、150°)、三通型、四通型、高(差)弯型等;按基材和使用要求分难燃型、不燃型两种。难燃型氧指数 ≥ 42 ,难燃等级为 1 级,抗拉强度 $\geq 145\text{MPa}$,抗弯强度 $\geq 100\text{MPa}$,耐腐蚀,适用于防火要求较高易着火的场所。如临近锅炉防爆门、油管道或电焊等火源部位的高压充油电缆。不燃型槽盒耐腐蚀,遇火 1000℃ 不燃,强度较高,适用于耐酸要求较高的化工、冶炼作业及电器电缆的防火。电缆置于槽盒内,着火时由于槽盒内空气不流通,而使火焰缺氧熄灭。

2. EF 型电缆耐火隔板

耐火隔板分 A 型、B 型、C 型 3 种,按基材不同分难燃型、不燃型两种。为防止电缆群中因部分电缆着火波及邻近电缆而设置分隔措施,以缩小着火范围和减缓燃烧程度,电缆层间设置耐火隔板。

A 型隔板能承受重力,适用于大孔洞的封堵(如电缆竖井上端);B 型适用于小孔洞的封堵,也可用作电缆层间分隔;C 型则主要用于电缆层的分隔和防火罩盖的制作。3 种耐火隔板的主要性能参数见表 8-1。

表 8-1 3 种耐火隔板的主要性能参数

性 能 项 目	型 号	A 型板	B 型板	C 型板	附 注
氧 指 数		>40	100	>40	不燃型隔板氧指数均 为 100
耐火时间 (min)		>30	>30	>40	
厚 度 (mm)		14	15	3	
承 重 (kg/m ²)		80	—	—	

220

3. 防火堵料

防火堵料广泛用作电力、冶金、化工、建筑等行业中电缆贯穿孔洞的封堵材料，它能有效地抑制火势穿透孔洞向邻室蔓延，且不影响电缆载流能力。

(1) DFD-Ⅱ型有机防火堵料。它主要由具有绝热作用的无机物和具有阻火效能的有机抑制剂组成，在达到火焰温度时能迅速硬化，形成致密坚固的绝热碳化层，并在表面形成一层对火焰热量有良好反射性能的灰白色表层，同时释出的抑制剂抑制火焰而且有熄灭作用。DFD-Ⅱ型有机堵料呈油灰状，具有长期柔软性、施工方便、可重复使用的优点，因此它特别适用于电缆密集区域中的一些小孔洞的封堵、缝隙堵塞及配合 SFD-Ⅱ型堵料于电缆周围。

(2) SFD-Ⅱ型速固无机防火堵料。它由耐高温无机材料混合而成，呈粉末状，形似水泥，氧指数为 100，属于不燃烧材料。将其加水搅拌成糊状后，10min 左右即凝固干燥，似砂浆水泥板块，较疏松，易敲落，具有施工方便、凝固迅速、耐火性能好等优点，对新、老电缆孔洞都适用。速固型无机防火堵料和可塑性的有机防火堵料相辅相成，是目前较理想的防火封堵材料。

(3) PFB 型防火包。防火包外形似枕头，外包装由编织紧密、耐用的玻璃纤维表面处理而制成，内部充以无机物纤维、不燃物质、不溶于水的扩张物质及特殊耐热添加剂，但不含石棉及

其他有害物质。

防火包主要用于电缆或管道穿越墙体或贯穿楼板孔洞时的封堵，以阻止电缆着火后向邻室蔓延。用防火包构成的封墙层，其耐火极限可达 3h 以上。

防火包的阻火机理是：防火包遇热膨胀，先封住防火包间的小空隙，再封住墙体与电缆构架间的缝隙，膨胀作用会使封墙的密度增强。防火包有多种规格供选择，防火包耐潮湿，在任何天气、气温环境条件下都能保持其性能不变，安装和拆除方便，并可供重复使用。

(4) FBQJ 系列玻璃钢配线桥架。复合玻璃钢配线桥架的式样基本与钢配线桥架相同，是高层建筑、工厂、矿山敷设电线电缆的理想装置。复合玻璃钢配线桥架的基材具有有机材料与无机材料的双重优点，与钢架桥相比，有下列优点：

- 1) 能阻燃，不易导热，能防火隔热。
- 2) 耐腐蚀，不易老化，适用于酸、碱、盐等具有腐蚀性气体的环境中。

- 3) 质量轻，为钢质量的 1/5，便于安装。

(5) 防火网。防火网以钢丝为基材，表面涂有柔性和附着力强的防火涂料。它平时能通风，遇明火后 1min 内其上的涂料即能自动膨胀，封闭网孔，从而阻止火焰的窜透和蔓延，与封闭式槽盒配套可制成通风型槽盒，克服了封闭型槽盒对电缆载流量的影响。还可以防火网为主材，制成各种防火门，适用于既要通风、又要防火的地方。

(6) G60-3 过氯乙烯防火涂料。防火涂料能防火阻燃，是目前应用最广泛的防火材料之一。把防火材料涂在电缆表层之后，遇火就难以引燃，加热或遇明火时涂膜的部分物质分解出二氧化碳和水蒸汽，使软化的涂层薄膜慢慢鼓起，形成均匀致密的碳化泡沫隔热层，阻止了热量传递，推迟了电缆着火时间。

防火涂料的涂层厚度根据不同场所、环境（包括敷设环境）、电缆数量及其重要性而异，最小为 0.7mm，最大为 1.2mm，一

一般为 1mm。几种国产防火涂料的性能见表 8-2。

总之,上述防火阻燃材料的性能反映了我国电缆防火工作的水平。正确选择与使用电缆防火阻燃材料与生产安全关系重大。国内许多电力、冶金、化工企业中使用防火阻燃材料以来,经历了严重火灾事故的考验。在发生重大电气火灾事故时,由于应用防火阻燃产品,避免了特大事故的发生。实践证明,应用防火阻燃材料组成各种防火阻燃措施,是防止电缆线路着火延燃的一种安全、经济、实用的手段。

222

表 8-2 几种国产防火涂料的性能

性能项目		涂料品种		
		G60-3 膨胀型 过氯乙烯防火涂料	A60-1 酸性氨基 膨胀型防火涂料	B60-2 各色丙烯 酸防火涂料
耐燃时间 (min)		27	43	32
火焰传播值		6	10	8.6
阻火性	失重 (g)	2.5	2.2	2.2
	碳化体积 (cm ³)	2.0	9.8	7.2
附着力		1 级	2 级	2 级
柔韧性 (mm)		≤2	≤2	—
耐击强度 (N·m)		5	2	5
电缆阻燃性试验		通过 IEC 332-3	通过 IEEE— 383—1974 《1E 级电缆型式试验; 核电站的现场拼 接和连接》和 JCS 366	—
耐久性		实际应用 10 年 基本无变化	实际应用 9 年, 不适应潮湿环境, 干燥环境亦有龟 裂现象	实际应用 5 年, 发现有疏松脱落 现象

第五节 配网隧道电缆的防火

一、配网隧道电缆火灾的原因

根据对多年来国内电缆火灾事故的分析，其原因可分为两类：①由于外界火源引起的电缆着火延燃，据统计这类火灾只占总火灾事故的5%；②由于电缆本身故障引起的火灾事故，这类火灾占总火灾事故的95%。出现这种情况的原因是：首先是电缆本体的绝缘降低、介质老化导致短路而造成的火灾事故。特别是隧道中积水长期存在，如不及时处理，将有许多电缆因长期浸泡水中，导致外护层破损、腐烂，绝缘严重受潮，造成击穿短路而发生更多的火灾事故。其次，电缆的热击穿引起的火灾事故。一方面是长时间的过负荷以及周围环境散热条件恶化引起的热击穿；另一方面是电缆中间接头的制作工艺粗糙，质量不良，压接头不紧，接触电阻过大，剥开的绝缘在空气中暴露时间太长，使绝缘受潮，在长期运行中，电缆中间接头温度慢慢升高，直到过热烧穿绝缘，最后导致电缆爆炸发生火灾事故。

总之，不论哪一种原因，都是故障点的温度由低到高的变化，也就是说故障点的温度决不会突变，应有一个很长的过程。此外，由于我国供配电系统中大多采用中性点不接地方式，当单相接地故障时电缆还可运行数小时，也就是说如果电缆发生火点，值班人员不能及时发现，更不可能及时切断电源，火焰无限蔓延，从而导致大面积火灾事故的发生。

二、配网隧道电缆防火措施

参照国内某些地区的经验，可以采用如下防火措施。

(1) 要保持电缆有一个良好的运行环境。隧道中通风要良好，排水要畅通，防止隧道中积水，避免电缆受潮而损坏绝缘。

(2) 加强对电缆的运行管理。如定期巡视，对中间接头测温，清除隧道内易燃物等。电缆中间接头往往是电缆绝缘的薄弱

环节,所以加强对电缆中间接头的监视和管理是电缆防火的重要一环。如发现电缆中间接头有不正常温升时,应加强监视,分析原因,必要时退出运行,防止运行中的电缆中间接头着火。

(3) 及时进行预防性试验。每年电缆的预防性试验必须按照 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》的要求进行,不能只根据试验数据判断是否合格,应对数据进行比较和分析,如有异常还应和本条电缆的历史数据相比较,以探求试验数据的变化规律,来判定电缆能否安全运行。

224 (4) 电缆本体涂刷防火涂料,用防火砂袋堆砌防火墙。防火涂料本身具有阻燃性,覆盖在电缆上,在火焰高温作用下,由于其化学成分,或在高温膨胀发泡下能隔绝空气,或在高温下利用化学反应来吸收热量抑制火焰,从而起到防火阻燃效果。

缝制 200mm×300mm 防火袋若干个,填注细砂,在隧道中每隔 50m 处由下至上堆砌防火墙,以防止火灾发生后火焰无限蔓延。

(5) 在电缆中间接头上加装金属槽盒(两端口不封闭),将电缆中间接头置于其中,并在金属槽盒两端 2m 段半塔接包绕两层防火带,以防止电缆中间接头爆炸损坏相邻电缆。

(6) 对电缆穿越的孔洞用防火堵料进行封堵。在电缆穿墙或其他孔洞处使用专用的防火堵料紧密封堵,一旦发生火灾,防火堵料在高温下凝固变硬,从而阻止火焰、有害气体和浓烟沿电缆线路蔓延,防止发生火灾后火焰蔓延至高压控制室、开关柜等场所。

(7) 在隧道各排风口处放置适量的干粉式灭火器。

三、配网隧道防火措施存在问题

上述防火措施对抑制电缆隧道的火灾起到了一定的作用,但也存在以下问题:

(1) 只靠运行人员定期巡视排除隧道中积水有时还不能及时排除,致使电缆泡在水中,绝缘受潮。

(2) 有些电缆在经过预防性试验合格后,运行一段时间后电

缆中间接头严重过热引起爆炸着火。

(3) 防火涂料、防火墙、金属槽盒、防火带等虽然起到了一定隔离电弧的作用，但却改变了电缆周围的散热环境，不利于电缆的散热。此外，防火涂料有效寿命短，金属槽盒本身吸收热量，使运行中电缆的温度及周围空气的温度比没有安装防火措施之前有所提高。一旦电缆中间接头爆炸后故障点火苗不宜自灭，造成火势向电缆两侧蔓延燃烧。由于热量不能散失，将进一步提高电缆周围空气的温度，加之着火电缆的烘烤，邻近的电缆也被烤燃，温度升高，绝缘老化放炮，如一条电缆着火就会引发同一处多层电缆放炮，造成大火。

(4) 由于电缆散热较差，影响电缆载流量约 5%~10%，传输一定容量时，电缆芯线截面相对要增加，一次投资要增大。

(5) 灭火器只能在火灾的萌芽状态时使用，火势大了，就无法扑灭。

四、解决方法

1. 在电缆选型上优先选用隔氧层阻燃电缆或耐火电缆

阻燃电缆是保持普通电缆的电气性和理化性能的同时，具有自熄性，即不易燃烧的电，或当电缆故障自身着火，或者外火源引燃着火时，在着火熄灭后不再继续燃烧，或燃烧时间很短。

耐火电缆在火灾发生时能持续工作（输送电流或信号），国家标准把耐火电缆分为 B 类和 A 类两个等级，B 类耐火温度为 750~800℃，A 类耐火温度为 950~1000℃，时间均为 1.5h。凡是环境温度为常态而发生火灾时又需要维持工作的线路，选用此类电缆较为合适。

2. 对于已投运的电缆必须结合现场实际情况进行防火设计

用封、堵、隔的办法保证单根电缆不延燃到多根电缆，可在每个电缆中间接头处上、下部位及一侧各安置一块防火板，两端安装防火枕袋，使电缆中间接头有足够的空间，有利于散热。同时根据现场实际情况设置防火门，可以把火灾限制在最小的范围内。

3. 采用新一代电缆监控灭火系统

该系统参照电缆的设计规范,利用电子技术、通信技术和现代控制技术,使电缆在高性能控制计算机的协调下,对其进行24h实时监控,通过图文显示、声光报警等方式提示故障隐患性质和具体位置,以便电缆维护人员及时采取措施,防患于未然。即使报警后没有及时处理导致电缆放炮,在自动灭火分系统的配合下,整个系统也会自动扑灭火焰,把损失降到最低。而故障监测分系统将会显示出电缆放炮的具体位置。该系统彻底克服了因电缆温度过高引起的火灾事故,保障安全生产,提高生产效率。

该系统具有以下功能和特点:

(1) 运行可显示隧道平面图、传感装置的示意位置,直观方便。

(2) 实时监控隧道中易进水的地方,并可做到自动排水,保证运行环境良好。

(3) 实时监测隧道环境温度、电缆本体温度、中间接头温度、烟气等,并能适应各种恶劣环境。

(4) 实时监测电缆运行状态。具有自动数据存储功能,以便查阅历史记录。

(5) 具有故障在线检测功能,可对运行中的电缆故障进行准确判断和定位。

(6) 系统报警或自身故障时,屏幕自动提示相对图文信息。

(7) 具有自动喷淋灭火装置(对缺乏水源的封闭场所,可装CO₂灭火系统)。

总之,只要电缆防火工作做好了,电缆火灾就可以避免,即使发生了火灾,也能将损失降到最低限度。

思考题

1. 为什么电力电缆容易引燃发生火灾事故?从过去国内几次电缆火灾事故中应吸取哪些教训?

2. 高压电缆线路应采取哪些防火阻燃措施?
3. 在挤塑型电缆中如何实现难燃与阻燃性? 目前国内外在这方面的研究有何进展?
4. 您认为我国目前有哪些防火材料比较适用于电缆线路现场使用, 而且效果较好?
5. 配网隧道电缆防火灭火系统有何特点?

电力系统中的控制 电缆和导引电缆

第一节 1kV 及以下全塑电缆的正确使用

聚氯乙烯绝缘聚乙烯护套电缆通常简称为全塑电缆,由于其具有材料来源丰富、化学性能稳定、绝缘性能优异、耐水、耐油、耐腐蚀等优点,近 20 多年来发展很快,逐渐取代了橡皮绝缘铅(铝)包电缆,在 1kV 及以下配电系统中得到广泛采用。全塑电缆的使用面广量大,而近年来电缆行业中新产品又不断涌现出来,因此全面了解全塑电缆的基本性能和功能,对正确选用全塑电缆将有一定的帮助。本节结合国内实际情况,对全塑电缆的选用提出了一些建议。

一、全塑电缆型号、结构特点和使用要求

(一) 控制电缆

固定敷设,用在交流额定电压 450/750V (600/1000V) 及以下,直流额定电压 1000V 及以下的控制、监控回路及保护回路。标称截面 $0.75 \sim 10\text{mm}^2$; 芯数 2~61 芯; 敷设温度应不低于零度。弯曲半径: ①非铠装型,应不小于电缆外径的 6 倍; ②铠装或铜带屏蔽型,应不小于电缆外径的 12 倍; ③屏蔽型、软电缆,应不小于电缆外径的 6 倍。其余结构控制电缆的弯曲半径均应不小于电缆外径的 10 倍。以下介绍控制电缆分类的方法。

1. 按导体结构分

(1) 硬结构。①单根导体; ②7 股绞合导体, 型号: KVV。

(2) 软结构。7 股以上的绞合导体, 型号: KVVR。用于室内移动, 弯曲半径较小, 要求柔软的场所。

2. 按使用要求和工作温度分

(1) 耐热型。常用于环境温度较高的场合。例如，锅炉的水位控制回路。型号：KVV-90，KVV-105。

(2) 铠装型。①钢带铠装，用于需要承受较大机械外力的固定场合，型号：KVV 22（旧型号 KVV 29）；②钢丝铠装，用于需要承受较大机械拉力的固定场合，型号：KVV 32（旧型号：KVV 29）。

(3) 屏蔽型。①铜丝编织屏蔽，用于屏蔽要求一般场合，型号：KVVP，KVVRP。②铝箔屏蔽，该电缆芯线为绞对式，同一层中相邻线对的绞对节距不同，因此屏蔽性能好。如果每个线对单独屏蔽后再进行统屏，不仅可以避免线对间的耦合干扰，还可有效地抑制外界干扰以及线对中的高频信号对外界产生的影响，故常用于对信号传输要求较高的场合。型号 KVVP3，标称截面 1.0mm^2 、 1.5mm^2 ，芯线对数 2~24 对（如 KVVP3-4×2×1.5，芯线 4 对， 1.5mm^2 ）。③铜带屏蔽，对于相同外径和长度的屏蔽电缆，3 种屏蔽方式以铜带屏蔽层的直流电阻为最小，屏蔽效果为最佳。

随着我国电力工业的发展，高速度、高灵敏的晶体管测量和控制装置（如继电保护、集控计算机、自动装置等）已被广泛采用，因此对二次回路的暂态过电压必须加以限制，防止引起装置误动或损坏晶体管、集成电路等弱电元件而导致电网事故。

在超高压变电站内，有因操作、雷击和短路所引起的暂态过电压干扰以及通过大地这一公共回路耦合所产生的干扰（传导干扰），这两种干扰源的电压或电流通过静电感应、电磁感应和公共电路等方式耦合到敷设在干扰源附近的控制电缆上，在电缆线芯中有时会产生高达数千伏的暂态过电压。由于普通全塑控制电缆不具备铅（铝）包电缆所特有的屏蔽性能，因此国内又研制出发电厂、变电站用的全塑屏蔽控制电缆，其抑制暂态过电压的能力见表 9-1。

表 9-1 全塑屏蔽控制电缆抑制暂态过电压的能力

型 号	结 构 特 点	屏蔽抑制系数
KVVP1	铜丝环绕屏蔽	0.3
KVV 22-1	钢带铠装屏蔽	0.05
KVVP2	铜带屏蔽	0.03
KVVP2/22	铜带屏蔽、钢带铠装	0.01
KVVP2/22-1	铜带—钢带铠装双屏蔽	0.005

注 屏蔽抑制系数 $K \leq \frac{U_k}{U_0}$ ，在暂态过电压源为同一过电压值下，屏蔽电缆线芯上所耦合的暂态过电压值为 U_k ，而无屏蔽电缆线芯上所耦合的暂态过电值为 U_0 。

(4) 阻燃型。阻燃型电缆特点是着火点较高，不易燃烧。即使着火燃烧亦限定在一定的范围内，而且残焰会在一定时间内自行熄灭，因此常用于要求电缆在发生火灾时能延缓燃烧速度、并具有较好自熄作用的特殊场合。氧指数越大，其阻燃性能越好。标准规定氧指数值应大于 30。根据 IEC 332-3 的规定，要求阻燃电缆的阻燃特性分为 A、B、C 3 类，其中 A 类最佳，C 类最差。各种电缆均可制成阻燃型电缆。型号表示为在原电缆型号前加“ZR”，如 ZRKVV、ZRKVVP2/22 等。

(5) 耐火型。这类型电缆能在 750℃ 的火焰温度中直接连续燃烧 3h 而不中断供电，因此常用于供电可靠性要求极高的场所，是应急电源、消防泵、通信、信号系统等的理想电缆。试验标准为 IEC 331；型号为 NHKW、NHKVV 22；额定电压为交流 450/750V；芯数为 2~61 芯；标称截面为 2.5~10mm²。

(二) 起重用扁型软电缆

这种电缆外形呈扁平状，主要用于交流额定电压 380/500V 及以下起重、运输机械及其他移动电器设备的电力和控制回路，也可以用于室内装饰，明敷或暗敷在墙壁上。型号为 QRVVB；芯数为 4~12 芯；标称截面为 1.5~35mm²；工作温度为普通型。

(三) 电力电缆

固定敷设，用在交流 50Hz，额定电压 0.6/1.0kV 及以下的输配电线路中。标称截面为 $1.5\sim 800\text{mm}^2$ ；芯数为 1~5 芯；导体长期允许工作温度应不超过 $+70^\circ\text{C}$ ；短路时持续时间不超过 5s，电缆导体的最高温度应不超过 $+160^\circ\text{C}$ ；敷设环境温度应不低于 0°C ；最小弯曲半径不小于电缆外径的 15 倍；电缆高差不受限制。以下介绍低压电力电缆分类方法。

1. 按导体种类分

(1) 铜芯。型号：VV。

(2) 铝芯。型号：VLV。

2. 按导体截面分

分 1~5 芯等截面和 4~5 芯不等截面两种。4 芯(3+1)芯和 5 芯(4+1)芯不等截面电缆中，3 芯(或 4 芯)截面相等，第 4(或第 5)芯截面为其他截面的 30%~50%。

4 芯等截面电缆主要用于单相负荷较大的场所，如居民住宅区。

5 芯等截面和不等截面电缆主要用于对用电安全可靠要求较高的场所。它将工作中性线和保护中性线分开使用，再辅之以保护中性线的重复接地。

3. 按使用要求和工作温度分

(1) 耐热型。常用于环境温度较高的场合，型号：VV-90、VLV-90、VV-105、VLV-105。

(2) 铠装型。①钢带铠装，能承受机械外力作用，但不能承受较大的拉力，型号：VV 22、VLV 22（旧型号：VV 29、VLV 29）；②细钢丝铠装，能承受相当大的拉力，型号：VV 32、VLV 32（旧型号：VV 39、VLV 39）；③粗钢丝铠装，能承受较大的拉力，型号 VV 42、VLV 42（旧型号：VV 59、VLV 59）。

(3) 屏蔽型。电缆的主线芯与中性线线芯成同轴形状排列，即中性线线芯为同心式导体。它可作中性线用并兼有屏蔽功

能,与普通电力电缆相比有下列优点:①提高线路的电磁抗干扰性能,包括线路中的零序和高次谐波电流分量对外界产生的电磁干扰;②相线、中性线由绞合式变成同心式,大大减少了相线、中性线回路的阻抗值,降低了不对称运行时的线路压降,提高了线路末端单相短路保护的灵敏度;③提高了电缆耐雷水平。

因此,屏蔽型电力电缆常用于高层建筑、居民住宅区、城市低压电网的供电系统。型号有 VVP₀、VLVP₀、VVP₀/22、VLVP₀/22;芯数为 2~5 芯;标称截面为 4~300mm²。

(4) 阻燃型。常用于要求电缆在发生火灾时能延缓燃烧速度,并具有较好的自熄作用的特殊场合,型号:ZRVV、ZRVLV、ZRVV 22、ZRVLV 22。

(5) 耐火型。使用在供电可靠性要求极高的场所。载流量与非耐火型电缆相同。型号有 NHVV、NHVV 22 两种;芯数为 1~4 芯;标称截面为 2.5~300mm²。

二、选用全塑电缆的一般原则和注意事项

1. 一般原则

(1) 电源种类和频率。实际使用的电源种类和频率要与电缆的额定参数相符合。

(2) 额定电压。必须大于或等于实际使用电压。

(3) 额定电流。根据环境温度和敷设方式修正后的数值必须大于实际的最大负荷电流。

(4) 最大负荷电流时的电压降必须符合要求。直接启动方式的电动机馈电线启动压降也必须符合要求。

(5) 短路时的热稳定。必须满足要求。

(6) 必须满足使用环境和条件的特殊要求。

2. 注意事项

(1) 全塑电缆的耐候性能较差,故不宜明敷在室外,因长期受日光中紫外线照射会加速其外护层的老化,缩短使用寿命。

(2) 不要在环境温度低于 0℃ 下施工,以免损坏电缆。

(3) 铠装电缆的钢带应两端接地，防止当电缆回路中发生操作过电压时感应出危险电压。

(4) 为减少传导干扰的影响，发电厂、变电站用屏蔽全塑控制电缆的铜带只允许在靠近弱电设备处一点接地（一般在控制屏附近），但是钢带必须在两端可靠接地。

第二节 电力电缆对同沟敷设导引 电缆的影响及防护措施

为保证电力系统安全和经济运行，需要有一个灵活可靠的通信和继电保护系统，城市电网中 110、220kV 电力电缆线路常沿马路旁或人行道敷设。通信方面采用导引电缆与电力电缆同沟敷设，可以与电力电缆同时施工，对节省投资和保证工程按期投运十分有利。但是当电力电缆线路发生单相接地故障时，导引电缆会产生感应电压，同时变电站地电位也会升高，是否会导致导引电缆击穿需要进一步分析研究。

一、感应电压的计算

当电力电缆发生单相接地短路时，在导引电缆芯线上引起的感应电压可按下式计算

$$E = Z_M I_d K_1 K_2 \quad (\text{V}) \quad (9-1)$$

式中 Z_M ——电力电缆与导引电缆的互感抗， Ω/km ；

l ——电力电缆与导引电缆的平行长度， km ；

I_d ——单相短路电流， A ；

K_1 ——电力电缆金属外护套的屏蔽系数；

K_2 ——城市屏蔽系数。

1. 电力电缆金属外护套的屏蔽系数 K_1

当发生单相接地故障时，绝大部分短路电流不经接地网而是沿着电力电缆的金属护套流回电源，其大小与接地电阻和电力电缆外护套的材料有关。在两端接地网的接地电阻较小（如 0.5Ω

或以下)时, XLPE 铝外护套电缆返回电流一般可达 95% 以上。由于返回电流与线芯的短路电流方向几乎相反, 因此在单相短路时, 电力电缆的外磁场对导引电缆及邻近市话电缆线路的电磁感应影响远比架空送电线路小, 这是 110、220kV 电力电缆能够深入市区而不致危害市内电话线路和其他金属管道的根本原因。

电力电缆金属外护套的屏蔽系数可按下式计算

$$K_1 = \frac{lR_s + 3[(1-\alpha)R_1 + (K_A\beta + K_B)R_2]}{lZ_{s0} + 3(R_1 + R_2)} \quad (9-2)$$

234

式中 l ——电力电缆长度, km;

R_s ——电力电缆金属外护套的电阻, Ω/km ;

R_1 ——非故障侧的接地电阻, Ω ;

R_2 ——故障侧的接地电阻, Ω ;

α ——非故障侧站内送出的故障电流占流过电缆故障电流的比值;

β ——对于外部故障为故障侧站内送出的故障电流占流过电缆故障电流的比值;

K_A ——系数, 外部故障为 +1, 内部故障为 -1;

K_B ——系数, 外部故障为 +1, 内部故障为 0;

Z_{s0} ——电力电缆金属护套的零序阻抗, Ω/km 。

通过几个工程计算结果得知, 电力电缆金属护套的材料和接地电阻对 K_1 的影响较大, 而地区大地导电率对 K_1 的影响不大。对于铝波纹外护套的 110kV XLPE 截面为 $500 \sim 700\text{mm}^2$ 的单芯电缆, K_1 约为 0.05, 而国产铅护套 110kV、截面为 $500 \sim 700\text{mm}^2$ 单芯充油电缆的 K_1 为 0.2~0.15。

2. 城市屏蔽系数 K_2

由于电力电缆敷设在市区内, 而市区内的地下金属管线很多, 还有高层建筑物的钢筋混凝土基础和基桩等都有良好的磁屏蔽作用, 在计算感应电压时应当考虑。但地下管线分布情况复杂, K_2 难以算出, 通常是根据地区的情况来估算。大城市市区

K_2 一般为 0.4, 而繁华地段及工厂集中的地方 K_2 约为 0.2。

城市屏蔽系数及电缆屏蔽系数都较低, 且市区内 110、220kV 变电站较多, 供电半径较短。例如广州市区内 110kV 电缆长度一般为 3~6km, 平行接近长度较短, 所以感应电压较低。表 9-2 列出了几个工程的感应电压计算结果。

表 9-2 感应电压的计算结果

工 程 编 号	电缆长度 (km)	短路电流 (kA)	感应电压 (V)	地电位升 高电压 (V)	危险电压 (V)
1	2.4	10.173	265	254	367
2	2.6	5.42	153	136	205
3	2.4	5.488	143	137	198
4	4.2	12.466	589	312	649
5	1.5	11.072	180	277	330

注 1. 地电位升高时, 未计及地下管线的影响。

2. 危险电压为感应电压与地电位升高电压的平方和后再开平方。

3. 地电位升高电压的计算

导引电缆的两个终端是与电力电缆一起引入变电站内的, 无论哪一侧变电站发生单相接地故障, 线芯及金属外护套都会受到该站地电位升高电压的危害, 这一电压可按下式计算

$$U = I_d R \quad (9-3)$$

式中 U ——接地装置电位, 即地电位升高电压, V;

I_d ——计算用入地短路电流, A;

R ——接地装置的接地电阻, Ω 。

计算用入地短路电流 I_d 按下式计算

$$I_d = (I_{\max \cdot d} - I_{Zd})(1 - K_f) \quad (9-4)$$

式中 $I_{\max \cdot d}$ ——接地故障时的最大接地短路电流, A;

I_{zd} ——流经变电站接地中性点的最大接地短路电流, A;

K_{fi} ——分流系数。

$I_{\max \cdot d}$ 和 I_{zd} 在工程设计中计算短路电流时就已算出, 因而是已知的。而 K_{fi} 的值事实上就是前面提及的电缆金属外护套屏蔽系数 K_1 的数值, 即 $K_{fi} = (1 - K_1)$ 。铝外护套 XLPE 电缆的金属外护套屏蔽系数约为 0.05, 则分流系数 K_{fi} 约为 0.95; 铝外护套的充油电缆的金属外护套屏蔽系数为 0.25~0.2, 则分流系数约为 0.75~0.8。综上所述, 电力电缆接地短路时有 75%~80% 的短路电流经电缆金属外护套流回电源点, 而经变压器接地装置的人地电流只占 25%~20%。

由于电力电缆分流系数较大, 因此对于全部采用电力电缆作为进出线的 110、220kV 城区变电站来说, 地电位升高较低。此外, 为保证供电可靠性, 城区变电站至少有 2~3 回 110kV 或 220kV 电缆进出线, 非故障回路以及众多的 10kV 电缆馈线的金属外护套也就成为良好的分流回路, 这些都会使变电站地电位明显下降。

由于上述原因, 城区变电站的地电位升高电压往往只有数十几至百余伏。但是, 如果变电站既有电力电缆又有架空线, 当架空线路发生单相接地故障时, 变电站的地电位升高有时会高达数千余伏。此时就必须注意选择导引电缆的耐压水平和终端保护设备。

二、保护措施

设计时应按危险电压的大小选择导引电缆的耐压水平。当出现电磁感应、地电位升高及雷电过电压时, 对导引电缆本身来说虽没有威胁, 但对连接在电缆两端的设备则必须加以保护。按线芯的不同使用目的, 采取如下保护措施。

(1) 导引电缆两端的金属外护套要可靠接地, 并采用高压端子箱, 其耐压水平按 15kV 设计。设计时将高压端子箱和放电管箱合并在一起, 因放电管是与线对并联的, 对于一些不采用放电

管保护的线对，只需将放电管取下即可。

(2) 通信、远动、数据等通道一律采用 3TF-250G 型三极陶瓷放电管保护。

(3) 对于继电保护、远方跳闸通道，由于这些设备本身已采用了隔离变压器或其他高压隔离措施，故不另加保护。

此外，还需注意：

(1) 与电力电缆同沟敷设的导引电缆，由于接入变电站的情况不同，在系统故障时其感应电压和地电位升高电压差别很大，可分别采用 10~15kV 和 5kV 以下两种耐压等级电缆。与 110、220kV 架空出线变电站相连的，可采用高耐压导引电缆；与全电缆进出线变电站相连的，可采用低耐压导引电缆。其目的是合理使用、降低导引电缆成本。

(2) 对于单独架设或直埋的导引电缆，为防止外力损坏，可采用有钢线铠装的电缆，与电力电缆同沟敷设。因有槽盒保护，且其金属外护套的分流（屏蔽）作用并不显著，因此在制造上建议取消钢线或铝线铠装，改用铝箔加小铜丝作屏蔽层。

(3) 为防止危险电压对终端设备的危害，必须在两端加装保护设备和采用高压端子箱。

● 第三节 控制电缆的使用条件、 线芯数及截面选择

一、控制电缆使用条件

用于发电厂和变电站的控制电缆的使用电压，交流回路为 500V 以下，直流回路为 1000V 以下。芯线的长期允许工作温度不超过 +65℃。施工放线弯曲半径不小于 10 倍电缆的外径，敷设时的环境温度，对于 KYVD、KXVD 及 KXF 等电缆不应低于 -20℃；对于 KXV 和 KXV 29 等不应低于 -15℃；对于 KYV 和 KVV、KYV 29 和 KVV 29 等不应低于 -10℃。各种控制电缆型号及使用范围见表 9-3。

表 9-3 各种控制电缆型号及使用范围

型 号	名 称	适 用 条 件
KYV	铜芯聚乙烯绝缘聚乙烯护套控制电缆	敷设在室内、电缆沟中、管道内及地下
KVV	铜芯聚氯乙烯绝缘聚乙烯护套控制电缆	
KXV	铜芯橡皮绝缘聚乙烯护套控制电缆	
KXF	铜芯橡皮绝缘氯丁护套控制电缆	
KYVD	铜芯聚乙烯绝缘耐基塑料护套控制电缆	
KXVD	铜芯橡皮绝缘耐寒塑料护套控制电缆	
KXHF	铜芯橡皮绝缘非燃性橡皮套控制电缆	
KYV 29	铜芯聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套内钢带铠装控制电缆	敷设在室内、电缆沟中、管道内及地下,能承受较大的机械外力作用
KVV 29	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套内钢带铠装控制电缆	
KXV 29	铜芯橡皮绝缘聚氯乙烯护套内钢带铠装控制电缆	

注 除 KXF 型控制电缆外,其他控制电缆均能生产铝芯的。铝芯控制电缆的用途与铜芯控制电缆的用途相同,但截面为 2.5、4、6、10mm²。

二、控制电缆芯线数选择

我国《电力工业标准汇编电气卷(五)》中规定,在单台变压器容量为 4000kVA 及以上的变电站中,应采用铜芯控制电缆,按机械强度要求连接于强电端子排的铜芯电缆和绝缘导线的截面应大于 1.5mm²

控制电缆应选用多芯电缆,尽量减少根数,当铜芯截面为 1.2~2.5mm² 时,电缆芯数不宜超过 24 芯;当芯线截面为 4~6mm² 时,电缆芯数不宜超过 10 芯。控制电缆应适当留有备用芯线,并结合电缆的芯线截面、长度及敷设条件等因素来

考虑。

(1) 电流互感器二次电缆及芯线在 7 芯及以下的控制电缆不留备用芯线。

(2) 芯线截面在 4mm^2 及以上的电缆不留备用芯线。

(3) 敷设条件较好的场所例如控制室内部、机房屏蔽间可考虑不留备用芯线或少留备用芯线。

(4) 备用芯数一般不应多于相邻电缆额定芯数之差, 例如满 10 芯的电缆其备用芯不应多于 4 芯, 即选用额定芯数为 14 芯的控制电缆。

在设计端子排时应避免一根电缆同时接至屏上两侧的端子排。当芯数在 5 芯及以上时, 应采用单独的电缆; 4 芯及以下时两侧间采用绝缘导线转接。在同一安装单位内截面相同的交、直流回路必要时可合用一根电缆, 但在一根电缆内不宜有两个安装单位的芯线。

三、控制电缆的截面选择

1. 测量表计用电流回路的电缆选择

计算测量表计回路的电缆芯线截面 S 时, 应按电流互感器在某一准确级下的额定二次负荷值进行选择, 其截面 S 为

$$S = \frac{\rho K_{jx1} l}{Z_{12} - K_{jx2} Z_{cj} - Z_c} \quad (9-5)$$

式中 l ——控制电缆长度, m;

Z_{12} ——电流互感器在某一准确级下的额定二次负荷, Ω ;

Z_{cj} ——测量表计的负荷, Ω ;

Z_c ——接触电阻, 一般为 0.05Ω ;

ρ ——电阻系数, 铜为 $0.0184\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

K_{jx1} 、 K_{jx2} ——接线系数, 查《电力工程电气设计手册》。

计算结果为当 $S < 2.5\text{mm}^2$ 时, 仍应选用 2.5mm^2 电缆。当接线系数 K_{jx1} 及截面 S 确定后, 电缆的最大允许长度可按下式

计算

$$l = K(Z_2 - K_{jx2}Z_{cj} - Z_c) \quad (9-6)$$

式中 K ——系数, 1.1~1.2。

2. 保护用电流回路的电缆选择

按 10% 倍数曲线确定二次负荷 Z_{xu} 后, 即可按下式计算电缆芯线截面 S , 即

$$S = \frac{\rho K_{jx1} l}{Z_{xu} - K_{jx2} Z_j - Z_c} \quad (9-7)$$

式中 Z_{xu} ——按 10% 倍数曲线确定的二次负荷, Ω ;

K_{jx1} 、 K_{jx2} ——接线系数, 查《电力工程电气设计手册》;

Z_j ——继电器负荷阻抗, Ω ;

Z_c ——接触电阻, 取 0.05Ω 。

当电流互感器的接线方式确定后, 应根据可能发生的短路方式选取最大的接线系数 K_{jx1} 、 K_{jx2} 值, 如 S 的值小于 2.5mm^2 时, 也应选用截面为 2.5mm^2 的电缆。

3. 电压回路的电缆选择

电压回路的电缆截面 S 按允许电压降计算, 即

$$S = \sqrt{3} K_{jx} \frac{P}{U} \times \frac{l}{\Delta u} \quad (9-8)$$

式中 P ——电压互感器每相负荷, VA;

l ——电缆的长度, m;

U ——线电压, V;

ρ ——电阻系数, 铜为 $0.0184\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

K_{jx} ——接线系数, 三相星形 $K_{jx} = 1$, 三相 V 形 $K_{jx} = \sqrt{3}$, 单相接线 $K_{jx} = 2$;

Δu ——电缆芯线允许电压降, V。

4. 控制回路的电缆选择

选择控制回路的电缆芯线截面时, 应按正常最大负荷下控制母线至各设备间的电压降不超过 10% 额定电压考虑。电缆允许

长度 l_{xu} 可按下式计算, 即

$$l_{xu} = \frac{\Delta u_{xu} \% U_1 S}{2 \times 100 I_{q \cdot \max} \rho} \quad (9-9)$$

式中 $\Delta u_{xu} \%$ ——元件正常工作时允许的电压降的百分值, 一般取 10%;

U_1 ——直流额定电压, V;

$I_{q \cdot \max}$ ——流过控制线圈的最大电流, A;

ρ ——电阻系数, 铜为 $0.0184 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

S ——电缆芯线截面, mm^2 。

第四节 控制电缆的事故分析及保护措施

一、控制电缆的事故分析

(一) 地电位升高对控制电缆的影响

1. 稳态电位

当系统发生单相接地短路时, 对于中性点直接接地系统, 变电站接地网的稳态电位等于入地短路电流和接地电阻的乘积, 即

$$U = I_d R \quad (\text{V}) \quad (9-10)$$

式中 I_d ——单相接地短路电流周期分量有效值, A;

R ——接地网的接地电阻, Ω 。

对于中性点直接接地系统, 要求

$$I_d R \leq 2000 \text{V} \quad (9-11)$$

也就是说, 在故障时, 地网的稳态电位可能达到 2000V, 如果接地网接地电阻不合格, 则稳态电位还要高。

2. 暂态电位

若计入短路电流的非周期分量的影响, 则接地网故障时, 接地网的工频暂态电位升高为

$$U = \sqrt{2}K_{ch}I_dR \quad (9-12)$$

式中 K_{ch} ——短路电流的冲击系数，一般取 1.8。

若工频稳态电位升高为 2000V，则暂态电位升高可达 5040V，当然它的持续时间很短。

3. 地电位升高对控制电缆的影响

由试验可知，一般控制电缆的击穿电压约为 20~30kV，所以，接地短路时地网的稳态电位升高 2kV 不会导致击穿，但暂态电位升高为 5kV 时，由于局部火花的累积效应，会将控制电缆烧坏。

(二) 设备接地引下线烧断时对控制电缆的影响

随着电力系统的容量增大，接地故障电流也增大。例如华中电力网某 220kV 变电站，单相接地短路电流 $I_d = 21\text{kA}$ ，按主保护动作时间进行热稳定校核计算，引下线截面应不小于 105mm^2 ，而站内的 TV、TA 等设备接地引下线只有 30mm^2 ，当事故发生时引下线迅速被烧断，从而使事故扩大。

接地引下线烧断对控制电缆的影响极其严重，这里以 TV 和端子箱引下线的烧断对控制电缆的影响进行分析。

1. TV 接地引下线烧断 (如图 9-1 所示)

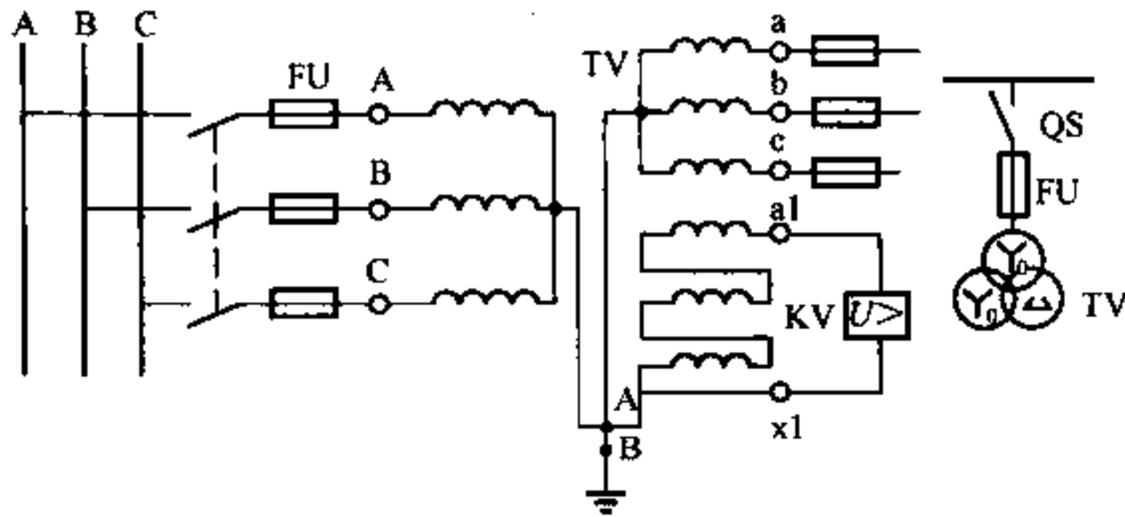


图 9-1 TV 接地引下线烧断

当 TV 接地引下线烧断时，地电位变化也不大，因为短路电流在引下线烧断前后变化不大，但 U_A 却变得很高（因为 R_{AB} 很大）。 U_A 可由下式计算

$$U_A = IR + IR_{AB} \quad (9-13)$$

由于 U_A 的电位升高, 使 a、b、c 3 点电位同样升高, 这样高电压便沿控制电缆芯线直接进入二次系统, 造成事故。

2. 端子箱接地引下线烧断

如图 9-2 所示, 如端子箱接地引下线烧断, 可知 U_A 的电位此时也很高, 即端子箱外壳电位很高, 间隙出现很大电弧, 迅速将控制电缆烧坏, 高电压窜入二次系统。

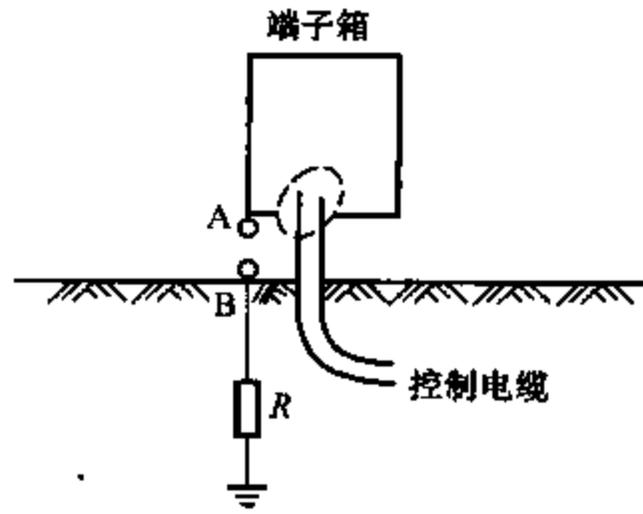


图 9-2 端子箱接地引下线烧断

(三) 地网电位不等对控制电缆的影响

在过去的接地网设计中, 较多的是从人身安全角度考虑均压措施, 注重控制接触电动势和跨步电动势是否符合规定值, 而对地网内的远离点, 尤其是主控室与易发生事故的变电设备之间的电位均衡问题没有充分考虑和重视。实际上由于地网内电流密度分布不同、土壤电阻率不均匀等原因, 使地网存在着局部电位差。由某变电站实测可知, 当引流点流入电流为 20A 时, 地网内相距 500m 的两点电位差为 0.35V, 如果短路电流为 21kA, 则稳态电位差为 367.5V, 而暂态电位差为 919V。这么高的电位差也可能直接对二次回路构成威胁。

(四) 地网的接地线锈腐断开

运行经验表明, 地网接地体每年腐蚀为 0.1~0.3mm, 地基内扁钢每年腐蚀为 0.15~0.35mm, 接地线圆钢每年腐蚀为 0.2~0.35mm, 电缆沟内扁钢每年腐蚀为 0.15~0.25mm, 所以投运 10~15 年后的变电站地网腐蚀将相当严重。如果引下线在地面下锈断, 当发生短路时, 则 A 点的电位也很高, 它可能将电缆沟中的电缆烧坏。

二、反事故措施

从上述事故原因分析可知, 要防止这类事故的发生, 关键在

于防止高电压窜入二次系统，有如下几点建议。

1. 关于地网材料的选择

由于电力系统的容量不断增大，短路电流高达十几至几十千安，如果地网各连接线通过巨大的电流，由于电动力和发热的影响，导体会遭受损坏，甚至被烧熔。众所周知，钢的电阻率为铜的电阻率的 8 倍，这样在流过相同的电流时，钢的发热量为铜的发热量的 8 倍，虽然钢的熔点（1550℃）比铜的熔点（1083℃）高，但也无济于事。因此从运行观点看，用铜做接地引下线比钢好。但铜比钢贵，所以在设计上可以做一下技术经济比较来确定。

2. 关于接地网导体截面的选择

选择截面的方法：一般可根据热稳定性要求选择导体的最小截面，然后再根据对地网运行寿命的要求以及实测得到导体在土壤中的腐蚀速度计算出导体的截面，将两者比较，选取较大的截面。一般来说导体截面越大，散流效果越好，考虑地网散流的不均匀性，建议接地引下线截面与地网中导体截面之比为 10 : 7。

3. 沿电缆沟敷设接地线

为了减少控制电缆芯线和金属护套和接地网之间的工频电位差，和为了将金属护套中流过的电流限制在允许范围内，需沿电缆沟敷设接地线，如图 9-3 所示。

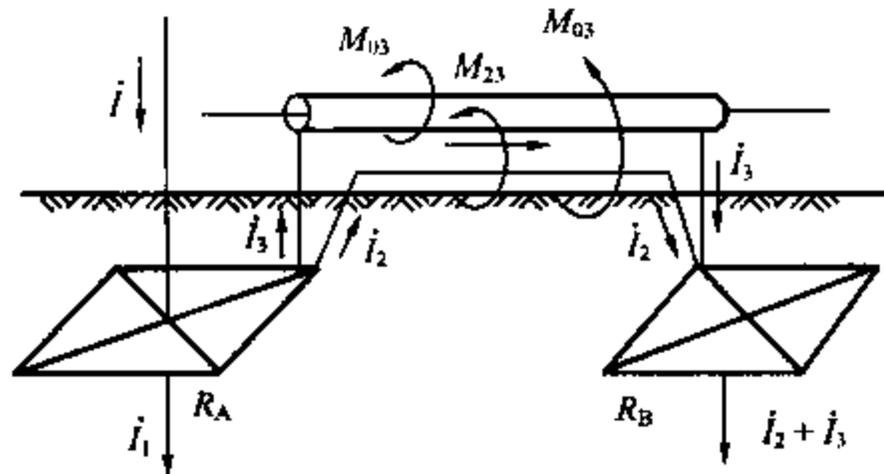


图 9-3 沿电缆沟敷设接地线

设电缆沟两端接地电阻分别为 R_A 和 R_B ，流经接地网入地的短路电流为 I ，另设电缆沟内仅有一根全塑电缆和一根两端与接

地网连接的接地线。可以写出如下方程式

$$\dot{I}_1 R_A = \dot{I}_2 (R_B + Z_2) \quad (9-14)$$

式中 $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$ ，为接地线阻抗。

由于 $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ ，得 $\dot{I}_2 = \frac{\dot{I} R_A}{Z_2 + R_B + R_A}$ ，所以接地线上电压降为

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_2 = \frac{\dot{I} R_A Z_2}{Z_2 + R_B + R_A} \quad (9-15)$$

全塑电缆芯线的电压，等于芯线电流和芯线自阻抗的乘积与接地线电流和接地线与芯线互阻抗乘积之和，即

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0 Z_0 + \dot{I}_2 Z_{02} \quad (9-16)$$

因芯线开路，故 $\dot{I}_0 = 0$ ，式 (9-12) 可改写为

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_2 Z_{02}$$

全塑电缆芯线和接地线之间的电位差为

$$\dot{U}_{02} = \dot{U}_2 - \dot{U}_0 = \frac{Z_2 - Z_{02}}{Z_2 + R_B + R_A} \dot{I} R_A \quad (9-17)$$

由接地线阻抗 $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$ ， $Z_{02} = j\omega M_{02}$ ，有

$$\dot{U}_{02} = \frac{R_2 + j\omega(L_2 - M_{02})}{R_2 + R_B + R_A + j\omega L_2} \dot{I} R_A \quad (9-18)$$

式中 R_2 ——接地线的电阻， Ω ；

L_2 ——接地线的自感，H；

M_{02} ——接地线和电缆芯线间的互感，H；

ω ——电源角频率。

由式 (9-14) 可知，接地线 R_2 越小，反击过电压就越小；接地越靠近电缆， $(L_2 - M_{02})$ 差值就越小，反击过电压也越小。如果将全塑电缆换为有金属护套的控制电缆，且用两端接地的电缆金属外皮来代替接地线，即用电缆外皮电阻 R_3 代替 R_2 ， L_3

代替 L_2 ，又由于外皮和芯线之间的互感 M_{03} 与外皮的自感相等，故

$$\dot{U}_{03} = \frac{R_3}{R_3 + R_B + R_A + j\omega L_3} \dot{I}R_A \quad (9-19)$$

比较式 (9-13) 和式 (9-14)，当电缆外皮的电阻 $R_3 \leq R_2$ 时，反击过电压会显著减少，但电缆外皮会流过很大的电流，其值为

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{I}R_A}{R_3 + R_B + R_A + j\omega L_3} \quad (9-20)$$

如果这个电流超过电缆外皮允许的载流量，可能发生外皮熔化或穿孔。为避免这种事故，可再敷设一根接地线。

综上所述，可得出如下结论：

(1) 采用全塑电缆时宜沿电缆沟敷设 1~2 根两端接地的接地线，或同时将全塑电缆多余的芯线用 1~2 根芯线两端接地，则减少反击过电压效果更好。

(2) 当采用有金属外皮的电缆时，除将外皮和钢铠两端接地外，为了减少流过外皮的电流和反击过电压，也宜沿电缆沟敷设 1~2 根接地线。

(3) 为固定电缆架沿电缆沟预埋的 40×4 扁钢，只要两端与接地网可靠连接，就能起到上述接地网的作用。

4. 采用屏蔽电缆并和沟架接牢

当系统发生短路时，设备接地点可能具有较高的电位，从而使设备外壳与设备导电部分之间产生高电压（称为反击过电压）。反击过电压的产生有两方面的原因：

1) 地电位升高，即 $U = I_d R$ 。

2) 短路电流在电缆外皮上产生压降，如图 9-4 所示。短路电流流过扁铁 AB，扁铁 ao 段电阻为 R_1 ，另有一根电缆在 o 点与扁铁相连，则暂态电压

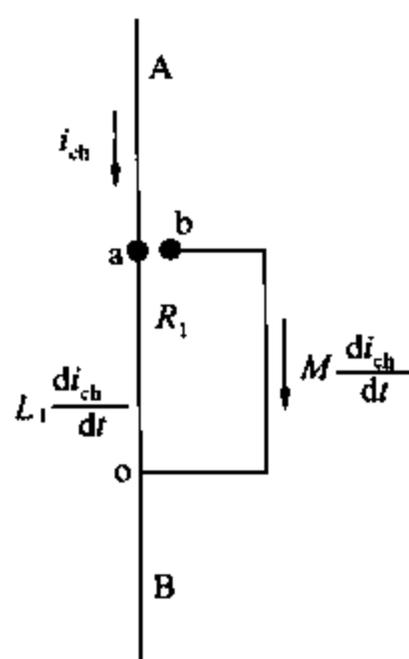


图 9-4 扁铁的压降

$$u_{ab} = u_{ao} + u_{ob} = u_{ao} - u_{bo}$$

而

$$u_{ao} = i_{ch}R_1 + L_1 \frac{di_{ch}}{dt}$$

$$u_{bo} = M \frac{di_{ch}}{dt}$$

$$u_{ab} = i_{ch}R_1 + (L_1 - M) \frac{di_{ch}}{dt} = i_{ch}R_1 + \frac{d\phi_1}{dt} \quad (9-21)$$

式中 i_{ch} ——短路电流冲击值, $i_{ch} = 2.55I_d$;

L_1 ——扁铁 ao 段自感, A;

M ——扁铁与导线间的互感, A。

由式 (9-21) 可知, ab 间电位差并不等于 ao 之间的电位差, 而是要比这个电位差小一个互感电动势, 因此 ab 间电位差与导线 bo 布线路径有关。如果导线紧挨着扁铁布线, 由于 $L_1 = M$, 则 u_{ab} 达最小值, 即只剩下扁铁 ao 段电阻压降。按理可推, 如果在变电站内, 将控制电缆放在支架上, 而支架上有一根扁铁, 则将图 9-4 中导线换成电缆, 电缆外皮的两端分别与扁铁 a 和 o 点相连, 电缆外皮电阻为 R_2 , 电缆外皮的电流为 i_0 , 扁铁 ao 段电流为 $i_{ch} - i_0$, 如图 9-5 所示, 于是

$$\begin{aligned} & (i_{ch} - i_0)R_1 + L_1 \frac{d(i_{ch} - i_0)}{dt} + M \frac{di_0}{dt} \\ & = i_0R_2 + L_2 \frac{di_0}{dt} + M \frac{d(i_{ch} - i_0)}{dt} \end{aligned} \quad (9-22)$$

式中 L_1 ——扁铁 ao 段自感, A;

L_2 ——电缆外皮电感, A;

M ——扁铁和电缆之间的互感, A。

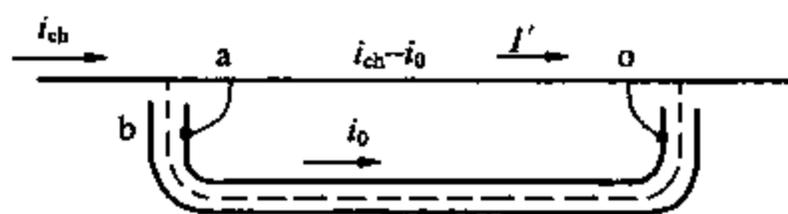


图 9-5 电缆紧挨接地线布置

由式 (9-22) 可得暂态电流

$$i_0 = \frac{i_{ch}R_1 + (L_1 - M) \frac{d(i_{ch} - i_0)}{dt} - (L_2 - M) \frac{di_0}{dt}}{R_1 + R_2}$$

$$= \frac{i_{ch}R_1 + d\Phi'_1/dt}{R_1 + R_2} \quad (9-23)$$

式中 Φ'_1 ——穿过扁铁与电缆外皮构成回流 I' 的磁通。

由前面分析知,当导线紧挨扁铁时,导线与扁铁之间的电位差就等于扁铁的电流乘以扁铁的电阻,现欲求图 9-5 中 ab 间的电位差,则暂态电压

$$u'_{ab} = i_0 R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(i_{ch} R_1 + \frac{d\Phi'_1}{dt} \right) \quad (9-24)$$

因为 $\frac{R_2}{R_1 + R_2} < 1$, $\frac{d\Phi'_1}{dt} < \frac{d\Phi_1}{dt}$, 所以电缆外皮两端接地网时,

扁铁 a 和电缆芯线 b 之间的电位差小于具有同样布线路径但为无屏蔽线时 a 点和 b 点之间的电位差。如果电缆紧挨着接地线布线,即 $\Phi_1 = 0$, a 点和 b 点之间电位差便等于电缆外皮电阻和扁铁电阻并联值与短路电流的乘积。如果电缆外皮的电阻很大或与扁铁接触不良,则 $R_2 \gg R_1$, 电缆外皮就失去了其作用, ab 间电位差就和无屏蔽线时一样了,因此屏蔽电缆外皮要和扁铁接牢。

5. 采用双屏蔽电缆

适用于计算机监控系统使用,其接线如图 9-6 所示。因为变电站的接地不可能分开,故需要另加隔离措施。

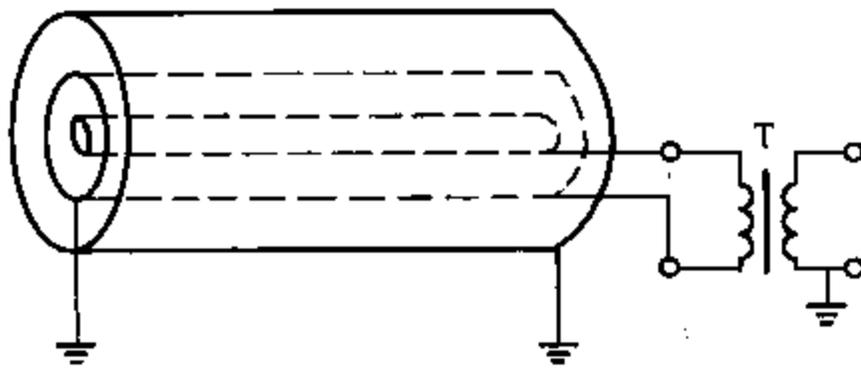


图 9-6 双屏蔽电缆布线

思考题

1. 在高压和超高压变电站中，在什么情况下控制电缆的芯线会产生暂态过电压？
2. 什么叫全塑屏蔽控制电缆的屏蔽抑制系数？
3. 全塑电缆在敷设使用时应注意哪些问题？
4. 什么叫电缆线路中的导引电缆？当电力电缆发生接地故障时，对同沟敷设的导引电缆有何影响？
5. 当电气设备接地引下线发生断线时，为什么会对控制电缆二次系统产生危险影响？应采取哪些保护措施？

附录 A 交联聚乙烯电力电缆结构 尺寸及电气性能 (供参考)

交联聚乙烯电力电缆结构尺寸及电气性能见表 A-1~表 A-12。

表 A-1 3.6/6kV YJV、YJLV 型的结构尺寸及电气性能

结 构 尺 寸							
标称 截面 (mm ²)	导体 直径 (mm)	绝缘 厚度 (mm)	护套 厚度 (mm)	电缆 外径 (mm)	电缆质量 (kg/km)		制造 长度 (m)
					Cu	Al	
3×25	6.0	2.5	2.5	37	1690	1210	300
3×35	7.0	2.5	2.5	39	2150	1480	300
3×50	8.3	2.5	2.5	42	2670	1730	300
3×70	10.0	2.5	2.5	45	3420	2280	300
3×95	11.6	2.5	3.0	50	4420	2590	300
3×120	13.0	2.5	3.0	54	5280	2970	300
3×150	14.6	2.5	3.0	57	6280	3390	250
3×185	16.2	2.5	3.0	60	7420	3860	250
3×240	18.4	2.6	3.5	66	9390	4760	250
3×300	20.6	2.8	3.5	72	11 400	5630	200

电 气 性 能 和 载 流 量

标称 截面 (mm ²)	导体最大直流电阻 +20℃ (Ω/km)		工作 电容 (μF/km)	载流量 (A)			
	Cu	Al		空 气		土 壤	
				Cu	Al	Cu	Al
3×25	0.727	1.20	0.24	130	105	135	105
3×35	0.524	0.868	0.26	160	130	165	120
3×50	0.387	0.641	0.30	195	155	200	160
3×70	0.268	0.443	0.34	240	180	240	190
3×95	0.193	0.320	0.38	285	220	290	225
3×120	0.153	0.253	0.42	325	255	325	250
3×150	0.124	0.206	0.46	375	290	370	290
3×185	0.099 1	0.164	0.50	415	325	410	320
3×240	0.075 4	0.125	0.54	495	385	475	370
3×300	0.060 1	0.100	0.56	565	440	540	420

表 A-2 6/6kV、6/10kV YJV、YJLV 型的结构尺寸及电气性能

结 构 尺 寸							
标称 截面 (mm ²)	导体 直径 (mm)	绝缘 厚度 (mm)	护套 厚度 (mm)	电缆 外径 (mm)	电缆质量 (kg/km)		制造 长度 (m)
					Cu	Al	
3×25	6.0	3.4	2.5	40	2030	1550	300
3×35	7.0	3.4	2.5	43	2420	1740	300
3×50	8.3	3.4	2.5	45	2970	2000	300
3×70	10.0	3.4	3.0	50	3860	2520	300
3×95	11.6	3.4	3.0	54	4740	2910	300
3×120	13.0	3.4	3.0	57	5610	3290	250
3×150	14.6	3.4	3.0	60	6630	3740	250
3×185	16.2	3.4	3.5	65	7740	4380	250
3×240	18.4	3.4	3.5	70	9750	5130	200
3×300	20.6	3.4	3.5	74	11 700	5920	200

电气性能和载流量

标称 截面 (mm ²)	导体最大直流电阻 +20℃ (Ω/km)		工作 电容 (μF/km)	载流量 (A)			
	Cu	Al		空 气		土 壤	
				Cu	Al	Cu	Al
3×25	0.727	1.20	0.19	130	105	135	105
3×35	0.524	0.868	0.21	160	130	165	120
3×50	0.387	0.641	0.23	195	155	200	160
3×70	0.268	0.443	0.27	240	180	240	190
3×95	0.193	0.320	0.30	285	220	290	225
3×120	0.153	0.253	0.32	325	255	325	250
3×150	0.124	0.206	0.35	375	290	370	290
3×185	0.099 1	0.164	0.38	415	325	410	320
3×240	0.075 4	0.125	0.42	495	385	475	370
3×300	0.060 1	0.100	0.47	565	440	540	420

表 A-3 **8.7/10kV、8.7/15kV YJV、YJLV 型**
的结构尺寸及电气性能

结 构 尺 寸							
标称 截面 (mm ²)	导体 直径 (mm)	绝缘 厚度 (mm)	护套 厚度 (mm)	电缆 外径 (mm)	电缆质量 (kg/km)		制造 长度 (m)
					Cu	Al	
3×25	6.0	4.5	2.5	45	2360	1880	300
3×35	7.0	4.5	3.0	49	2870	2190	300
3×50	8.3	4.5	3.0	52	3460	2500	300
3×70	10.0	4.5	3.0	55	4240	2890	300
3×95	11.6	4.5	3.0	59	5130	3310	250
3×120	13.0	4.5	3.0	62	6020	3700	250
3×150	14.6	4.5	3.5	66	7210	4320	250
3×185	16.2	4.5	3.5	70	8410	4840	200
3×240	18.4	4.5	3.5	74	10 240	5620	200
3×300	20.6	4.5	3.5	80	12 240	6460	200

电气性能和载流量

标称 截面 (mm ²)	导体最大直流电阻 +20℃ (Ω/km)		工作 电容 (μF/km)	载流量 (A)			
	Cu	Al		空 气		土 壤	
				Cu	Al	Cu	Al
3×25	0.727	1.20	0.15	130	105	135	105
3×35	0.524	0.868	0.18	160	130	165	120
3×50	0.387	0.641	0.19	195	155	200	160
3×70	0.268	0.443	0.21	240	180	240	190
3×95	0.193	0.320	0.24	285	220	290	225
3×120	0.153	0.253	0.26	325	255	325	250
3×150	0.124	0.206	0.28	375	290	370	290
3×185	0.099 1	0.164	0.30	415	325	410	320
3×240	0.075 4	0.125	0.34	495	385	475	370
3×300	0.060 1	0.100	0.37	565	440	540	420

252

表 A-4 3.6/6kV YJV₂₂、YJLV₂₂型的结构尺寸及电气性能

结 构 尺 寸							
标称 截面 (mm ²)	导体 直径 (mm)	绝缘 厚度 (mm)	护套 厚度 (mm)	电缆 外径 (mm)	电缆质量 (kg/km)		制造 长度 (m)
					Cu	Al	
3×25	6.0	2.5	2.5	41	2490	2010	300
3×35	7.0	2.5	2.5	43	2990	2310	300
3×50	8.3	2.5	2.5	46	3390	2590	300
3×70	10.0	2.5	3.0	50	4460	3110	300
3×95	11.6	2.5	3.0	54	5380	3560	300
3×120	13.0	2.5	3.0	57	6320	4010	250
3×150	14.6	2.5	3.0	60	7370	4480	250
3×185	16.2	2.5	3.0	64	8590	5030	250
3×240	18.4	2.6	3.5	70	10 670	6050	200
3×300	20.6	2.8	3.5	75	12 800	7030	200

电气性能和载流量

标称 截面 (mm ²)	导体最大直流电阻 +20℃ (Ω/km)		工作 电容 (μF/km)	载流量 (A)			
	Cu	Al		空 气		土 壤	
				Cu	Al	Cu	Al
3×25	0.727	1.20	0.24	125	100	130	100
3×35	0.524	0.868	0.26	155	125	160	115
3×50	0.387	0.641	0.30	190	150	195	155
3×70	0.268	0.443	0.34	235	175	235	185
3×95	0.193	0.320	0.38	275	215	280	220
3×120	0.153	0.253	0.42	315	245	315	245
3×150	0.124	0.206	0.46	360	280	355	280
3×185	0.099 1	0.164	0.50	395	315	395	310
3×240	0.075 4	0.125	0.54	480	370	460	360
3×300	0.060 1	0.100	0.56	550	430	525	410

表 A-5 6/6kV、6/10kV YJV₂₂、YJLV₂₂型
的结构尺寸及电气性能

结 构 尺 寸							
标称 截面 (mm ²)	导体 直径 (mm)	绝缘 厚度 (mm)	护套 厚度 (mm)	电缆 外径 (mm)	电缆质量 (kg/km)		制造 长度 (m)
					Cu	Al	
3×25	6.0	3.4	2.5	43	2850	2370	300
3×35	7.0	3.4	2.5	45	3280	2610	300
3×50	8.3	3.4	3.0	49	4000	3040	300
3×70	10.0	3.4	3.0	53	4840	3490	300
3×95	11.6	3.4	3.0	56	5780	3960	250
3×120	13.0	3.4	3.0	59	6710	4400	250
3×150	14.6	3.4	3.0	63	7740	4920	250
3×185	16.2	3.4	3.5	67	9200	5640	200
3×240	18.4	3.4	3.5	72	11 110	6490	200
3×300	20.6	3.4	3.5	77	13 150	7380	200

电气性能和载流量

标称 截面 (mm ²)	导体最大直流电阻 +20℃ (Ω/km)		工作 电容 (μF/km)	载流量 (A)			
	Cu	Al		空 气		土 壤	
				Cu	Al	Cu	Al
3×25	0.727	1.20	0.19	125	100	130	100
3×35	0.524	0.868	0.21	155	125	160	115
3×50	0.387	0.641	0.23	190	150	195	155
3×70	0.268	0.443	0.27	235	175	235	185
3×95	0.193	0.320	0.30	275	215	280	220
3×120	0.153	0.253	0.32	315	245	315	245
3×150	0.124	0.206	0.35	360	280	355	280
3×185	0.099 1	0.164	0.38	395	315	395	310
3×240	0.075 4	0.125	0.42	480	370	460	360
3×300	0.060 1	0.100	0.47	550	430	525	410

表 A-6 8.7/10kV、8.7/15kV YJV₂₂、YJLV₂₂型的
结构尺寸及电气性能

结 构 尺 寸							
标称 截面 (mm ²)	导体 直径 (mm)	绝缘 厚度 (mm)	护套 厚度 (mm)	电缆 外径 (mm)	电缆质量 (kg/km)		制造 长度 (m)
					Cu	Al	
3×25	6.0	4.5	3.0	50	3360	2880	300
3×35	7.0	4.5	3.0	52	3810	3130	300
3×50	8.3	4.5	3.0	55	4460	3500	300
3×70	10.0	4.5	3.0	59	5310	3960	250
3×95	11.6	4.5	3.0	63	6280	4450	250
3×120	13.0	4.5	3.5	67	7380	5060	200
3×150	14.6	4.5	3.5	70	8500	5610	200
3×185	16.2	4.5	3.5	73	9770	6200	200
3×240	18.4	4.5	3.5	78	11 700	7080	200
3×300	20.6	4.5	4.0	84	14 000	8230	200

电气性能和载流量

标称 截面 (mm ²)	导体最大直流电阻 +20℃ (Ω/km)		工作 电容 (μF/km)	载流量 (A)			
	Cu	Al		空 气		土 壤	
				Cu	Al	Cu	Al
3×25	0.727	1.20	0.15	125	100	130	100
3×35	0.524	0.868	0.18	155	125	160	115
3×50	0.387	0.641	0.19	190	150	195	155
3×70	0.268	0.443	0.21	235	175	235	185
3×95	0.193	0.320	0.24	275	215	280	220
3×120	0.153	0.253	0.26	315	245	315	245
3×150	0.124	0.206	0.28	360	280	355	280
3×185	0.099 1	0.164	0.30	395	315	395	310
3×240	0.075 4	0.125	0.34	480	370	460	360
3×300	0.060 1	0.100	0.37	550	430	525	410

表 A-7 3.6/6kV YJSV、YJLSV 型的结构尺寸及电气性能

结 构 尺 寸

标称 截面 (mm ²)	导体 直径 (mm)	绝缘 厚度 (mm)	护套 厚度 (mm)	电缆 外径 (mm)	电缆质量 (kg/km)		制造 长度 (m)
					Cu	Al	
1×25	6.0	2.5	2.0	20	685	520	400
1×35	7.0	2.5	2.0	21	770	580	400
1×50	8.3	2.5	2.0	23	980	660	400
1×70	10.0	2.5	2.0	24	1220	750	400
1×95	11.6	2.5	2.0	26	1500	890	400
1×120	13.0	2.5	2.0	27	1780	1010	300
1×150	14.6	2.5	2.0	29	2170	1200	300
1×185	16.2	2.5	2.0	31	2430	1240	300
1×240	18.4	2.6	2.0	33	3240	1580	200
1×300	20.6	2.8	2.5	37	4570	2210	200
1×400	23.8	3.0	2.5	41	4990	2430	200
1×500	26.6	3.2	2.5	45	6050	2810	200
1×630	30.0	3.2	2.5	49	7430	3420	200
1×800	34.0	3.2	3.0	54		3940	200
1×1000	38.2	3.2	3.0	58		4680	200

电气性能和载流量

标称 截面 (mm ²)	导体最大直流电阻 +20℃ (Ω/km)		工作 电容 (μF/km)	载流量 (A)			
	Cu	Al		空 气		土 壤	
				Cu	Al	Cu	Al
1×25	0.727	1.20	0.24	170	130	170	135
1×35	0.524	0.868	0.26	205	165	205	165
1×50	0.387	0.641	0.30	245	195	240	185
1×70	0.268	0.443	0.34	305	245	295	235
1×95	0.193	0.320	0.38	365	295	345	275
1×120	0.153	0.253	0.42	415	335	385	310
1×150	0.124	0.206	0.46	460	380	420	345
1×185	0.099 1	0.164	0.50	515	420	465	380
1×240	0.075 4	0.125	0.54	590	495	530	435
1×300	0.060 1	0.100	0.56	655	555	580	480
1×400	0.047 0	0.077 8	0.61	755	655	650	550
1×500	0.036 6	0.060 5	0.63	835	725	710	610
1×630	0.028 3	0.046 9	0.70	920	805	770	665
1×800	0.022 1	0.036 7	0.78				
1×1000	0.017 6	0.029 1	0.87				

表 A-8 6/6kV、6/10kV YJSV、YJLSV 型的结构尺寸及电气性能

结 构 尺 寸							
标称 截面 (mm ²)	导体 直径 (mm)	绝缘 厚度 (mm)	护套 厚度 (mm)	电缆 外径 (mm)	电缆质量 (kg/km)		制造 长度 (m)
					Cu	Al	
1×25	6.0	3.4	2.0	22	750	590	400
1×35	7.0	3.4	2.0	23	860	640	400
1×50	8.3	3.4	2.0	25	1150	780	400
1×70	10.0	3.4	2.0	26	1390	890	400
1×95	11.6	3.4	2.0	28	1690	1010	300
1×120	13.0	3.4	2.0	29	2010	1130	300
1×150	14.6	3.4	2.0	31	2320	1300	300
1×185	16.2	3.4	2.0	32	2630	1430	300
1×240	18.4	3.4	2.5	36	3110	1580	200
1×300	20.6	3.4	2.5	38	4570	2220	200
1×400	23.8	3.4	2.5	42	4990	2410	200
1×500	26.6	3.4	2.5	46	6030	2870	200
1×630	30.0	3.4	2.5	49	7350	3350	200
1×800	34.0	3.4	3.0	55		3980	200
1×1000	38.2	3.4	3.0	59		4710	200

电气性能和载流量

标称 截面 (mm ²)	导体最大直流电阻 +20℃ (Ω/km)		工作 电容 (μF/km)	载流量 (A)			
	Cu	Al		空 气		土 壤	
				Cu	Al	Cu	Al
1×25	0.727	1.20	0.19	170	130	170	135
1×35	0.524	0.868	0.21	205	165	205	165
1×50	0.387	0.641	0.23	245	195	240	185
1×70	0.268	0.443	0.27	305	245	295	235
1×95	0.193	0.320	0.30	365	295	345	275
1×120	0.153	0.253	0.32	415	335	385	310
1×150	0.124	0.206	0.35	460	380	420	345
1×185	0.099 1	0.164	0.38	515	420	465	380
1×240	0.075 4	0.125	0.42	590	495	530	435
1×300	0.060 1	0.100	0.47	655	555	580	480
1×400	0.047 0	0.077 8	0.55	755	655	650	550
1×500	0.036 6	0.060 5	0.60	835	725	710	610
1×630	0.028 3	0.046 9	0.66	920	805	770	665
1×800	0.022 1	0.036 7	0.74				
1×1000	0.017 6	0.029 1	0.82				

**表 A-9 8.7/10kV、8.7/15kV YJSV、YJLSV 型的
结构尺寸及电气性能**

258

结 构 尺 寸							
标称 截面 (mm ²)	导体 直径 (mm)	绝缘 厚度 (mm)	护套 厚度 (mm)	电缆 外径 (mm)	电缆质量 (kg/km)		制造 长度 (m)
					Cu	Al	
1×25	6.0	4.5	2.0	24	810	670	400
1×35	7.0	4.5	2.0	25	960	750	400
1×50	8.3	4.5	2.0	27	1240	870	400
1×70	10.0	4.5	2.0	28	1500	990	300
1×95	11.6	4.5	2.0	30	1810	1120	300
1×120	13.0	4.5	2.5	31	2010	1180	300
1×150	14.6	4.5	2.5	33	2430	1410	300
1×185	16.2	4.5	2.5	34	2850	1670	300
1×240	18.4	4.5	2.5	38	3610	2070	200
1×300	20.6	4.5	2.5	40	4680	2350	200
1×400	23.8	4.5	2.5	44	5190	2640	200
1×500	26.6	4.5	2.5	48	6250	3060	200
1×630	30.0	4.5	3.0	52	7600	3580	200
1×800	34.0	4.5	3.0	56		4250	200
1×1000	38.2	4.5	3.0	61		4490	200

电气性能和载流量

标称 截面 (mm ²)	导体最大直流电阻 +20℃ (Ω/km)		工作 电容 (μF/km)	载流量 (A)			
	Cu	Al		空 气		土 壤	
				Cu	Al	Cu	Al
1×25	0.727	1.20	0.15	170	130	170	135
1×35	0.524	0.868	0.18	205	165	205	165
1×50	0.387	0.641	0.19	245	195	240	185
1×70	0.268	0.443	0.21	305	245	295	235
1×95	0.193	0.320	0.24	365	295	345	275
1×120	0.153	0.253	0.26	415	335	385	310
1×150	0.124	0.206	0.28	460	380	420	345
1×185	0.0991	0.164	0.30	515	420	465	380
1×240	0.075 4	0.125	0.34	590	495	530	435
1×300	0.060 1	0.100	0.37	655	555	580	480
1×400	0.047 0	0.077 8	0.43	755	655	650	550
1×500	0.036 6	0.060 5	0.47	835	725	710	610
1×630	0.028 3	0.046 9	0.52	920	805	770	665
1×800	0.022 1	0.036 7	0.57				
1×1000	0.01 76	0.029 1	0.63				

表 A-10 26/35kV YJSV、YJLSV 型的结构尺寸及电气性能

结 构 尺 寸							
标称 截面 (mm ²)	导体 直径 (mm)	绝缘 厚度 (mm)	护套 厚度 (mm)	电缆 外径 (mm)	电缆质量 (kg/km)		制造 长度 (m)
					Cu	Al	
1×50	8.3	10.5	2.5	41	1950	1620	400
1×70	10.0	10.5	2.5	43	2220	1770	400
1×95	11.6	10.5	3.0	45	2520	1920	400
1×120	13.0	10.5	3.0	47	2830	2060	400
1×150	14.6	10.5	3.0	49	3280	2320	400
1×185	16.2	10.5	3.0	50	3690	2510	400
1×240	18.4	10.5	3.0	52	4380	2850	400
1×300	20.6	10.5	3.5	55	5100	3180	300
1×400	23.8	10.5	3.5	59	6310	3740	300
1×500	26.6	10.5	3.5	62	7500	4290	300
1×630	30.0	10.5	3.5	66	8920	4870	300
1×800	34.0	10.5	4.0	70		5670	200
1×1000	38.2	10.5	4.0	74		6550	200

电气性能和载流量

标称 截面 (mm ²)	导体最大直流电阻 +20℃ (Ω/km)		工作 电容 (μF/km)	载流量 (A)			
	Cu	Al		空 气		土 壤	
				Cu	Al	Cu	Al
1×50	0.387	0.641	0.11	250	200	255	165
1×70	0.268	0.443	0.12	320	250	275	215
1×95	0.193	0.320	0.13	385	300	325	255
1×120	0.153	0.253	0.14	445	345	365	285
1×150	0.124	0.206	0.15	505	395	410	320
1×185	0.099 1	0.164	0.16	570	345	460	360
1×240	0.075 4	0.125	0.18	665	525	520	420
1×300	0.060 1	0.100	0.19	760	600	595	470
1×400	0.047 0	0.077 8	0.21	875	695	670	535
1×500	0.036 6	0.060 5	0.23	990	795	750	605
1×630	0.028 3	0.046 9	0.25	1130	915	835	685
1×800	0.022 1	0.036 7	0.28		1055		770
1×1000	0.017 6	0.029 1	0.30		1185		850

表 A-11 48/63kV YJSV、YJLSV 型的结构尺寸及电气性能

结 构 尺 寸							
标称 截面 (mm ²)	导体 直径 (mm)	绝缘 厚度 (mm)	护套 厚度 (mm)	电缆 外径 (mm)	电缆质量 (kg/km)		制造 长度 (m)
					Cu	Al	
1×240	18.4	16.0	3.5	65	5930	4390	400
1×300	20.6	15.5	3.5	66	6540	4600	400
1×400	23.8	15.0	3.5	69	7580	5030	350
1×500	26.6	14.0	3.5	70	8550	5360	350
1×630	30.0	14.0	4.0	74	10 160	6140	350
1×800	34.0	14.0	4.0	78		6920	300
1×1000	38.2	14.0	4.0	83		7780	300

电气性能和载流量

标称 截面 (mm ²)	导体最大直流电阻 +20℃ (Ω/km)		工作 电容 (μF/km)	载流量 (A)			
				空 气		土 壤	
	Cu	Al		Cu	Al	Cu	Al
1×240	0.0754	0.125	0.14	665	525	530	420
1×300	0.060 1	0.100	0.15	760	600	595	470
1×400	0.047 0	0.077 8	0.17	875	695	670	535
1×500	0.036 6	0.060 5	0.19	990	795	750	605
1×630	0.028 3	0.046 9	0.20	1130	915	835	685
1×800	0.022 1	0.036 7	0.22		1055		770
1×1000	0.017 6	0.029 1	0.24		1185		850

表 A-12 64/110kV YJSV、YJLSV 型的结构尺寸及电气性能

结 构 尺 寸							
标称 截面 (mm ²)	导体 直径 (mm)	绝缘 厚度 (mm)	护套 厚度 (mm)	电缆 外径 (mm)	电缆质量 (kg/km)		制造 长度 (m)
					Cu	Al	
1×240	18.4	20.0	4.0	75	7320	5840	400
1×300	20.6	18.5	4.0	74	7800	5880	400
1×400	23.8	17.5	4.0	75	8740	6190	400
1×500	26.6	17.0	4.0	78	9870	6670	300
1×630	30.0	16.5	4.0	80	11 220	7190	300
1×800	34.0	16.5	4.0	84		7860	300
1×1000	38.2	16.5	4.0	88		8750	300

电气性能和载流量							
标称 截面 (mm ²)	导体最大直流电阻 +20℃ (Ω/km)		工作 电容 (μF/km)	载流量 (A)			
	Cu	Al		空 气		土 壤	
				Cu	Al	Cu	Al
1×240	0.075 4	0.125	0.12	605	490	455	390
1×300	0.060 1	0.100	0.13	685	560	510	430
1×400	0.047 0	0.077 8	0.15	773	640	565	475
1×500	0.036 6	0.060 5	0.16	850	715	605	520
1×630	0.028 3	0.046 9	0.18	940	805	650	570
1×800	0.022 1	0.036 7	0.20		905		630
1×1000	0.017 6	0.029 1	0.22		990		670

表 A-1~表 A-12 中所列的载流量是在下列假定条件下所得的计算值, 与实际试验结果会略有差别, 仅供参考:

- 1) 导体连续负载最高工作温度为 90℃。
- 2) 电缆安装在空气中的环境温度为 30℃。
- 3) 土壤温度为 25℃。
- 4) 敷设深度, 1~15kV 电缆为 0.7m, 35~110kV 电缆为 1.0m。
- 5) 三相水平敷设电缆间净距为 0.07m。
- 6) 土壤热阻系数为 1.0(℃·m)/W。
- 7) 交联聚乙烯绝缘热阻系数为 3.5(℃·m)/W。
- 8) 聚氯乙烯护套热阻系数为 6.0(℃·m)/W。

表 A-1~表 A-12 适用于以下 3 种情况:

- 1) 单芯电缆三相水平敷设, 金属屏蔽层单端接地。
- 2) 土壤敷设, 热阻系数不变并且该处没有其他热源。
- 3) 空气敷设, 周围空气能自由循环并且环境温度不变。

对于存在着较大短路电流的电网, 选择电缆时应考虑到电缆应具有足够的短路容量, 这是非常重要的。电缆的允许短路电流取决于导体允许的最高温度和短路时间, 短路时间即从短路开始至保护装置切断短路所经过的时间。

导体和金属屏蔽层的最大允许短路电流也可按下列公式计算。

(1) 铝导体

$$I_{k1} = \frac{0.095}{\sqrt{t}} S_1 \quad (\text{A-1})$$

(2) 铜导体

$$I_{k1} = \frac{0.143}{\sqrt{t}} S_1 \quad (\text{A-2})$$

262 式中 I_{k1} ——导体允许短路电流, kA;
 t ——短路时间, s;
 S_1 ——导体标称截面积, mm^2 。

短路前导体温度为 $+90^\circ\text{C}$, 短路后导体温度为 $+250^\circ\text{C}$ 。

(3) 金属屏蔽层

$$I_{k2} = \frac{0.200}{\sqrt{t}} S \quad (\text{A-3})$$

式中 I_{k2} ——金属屏蔽层允许的短路电流, kA;
 t ——短路时间, s;
 S_2 ——屏蔽层标称截面积, mm^2 。

短路前屏蔽层温度为 $+80^\circ\text{C}$, 短路后屏蔽层温度为 $+300^\circ\text{C}$ 。

附录 B 电缆线路参数的测量方法

一、电缆线路、变压器和母线波阻抗的测量

1. 试验方法

波阻抗的测量是利用波的折反射原理进行的，如图 B.1 所

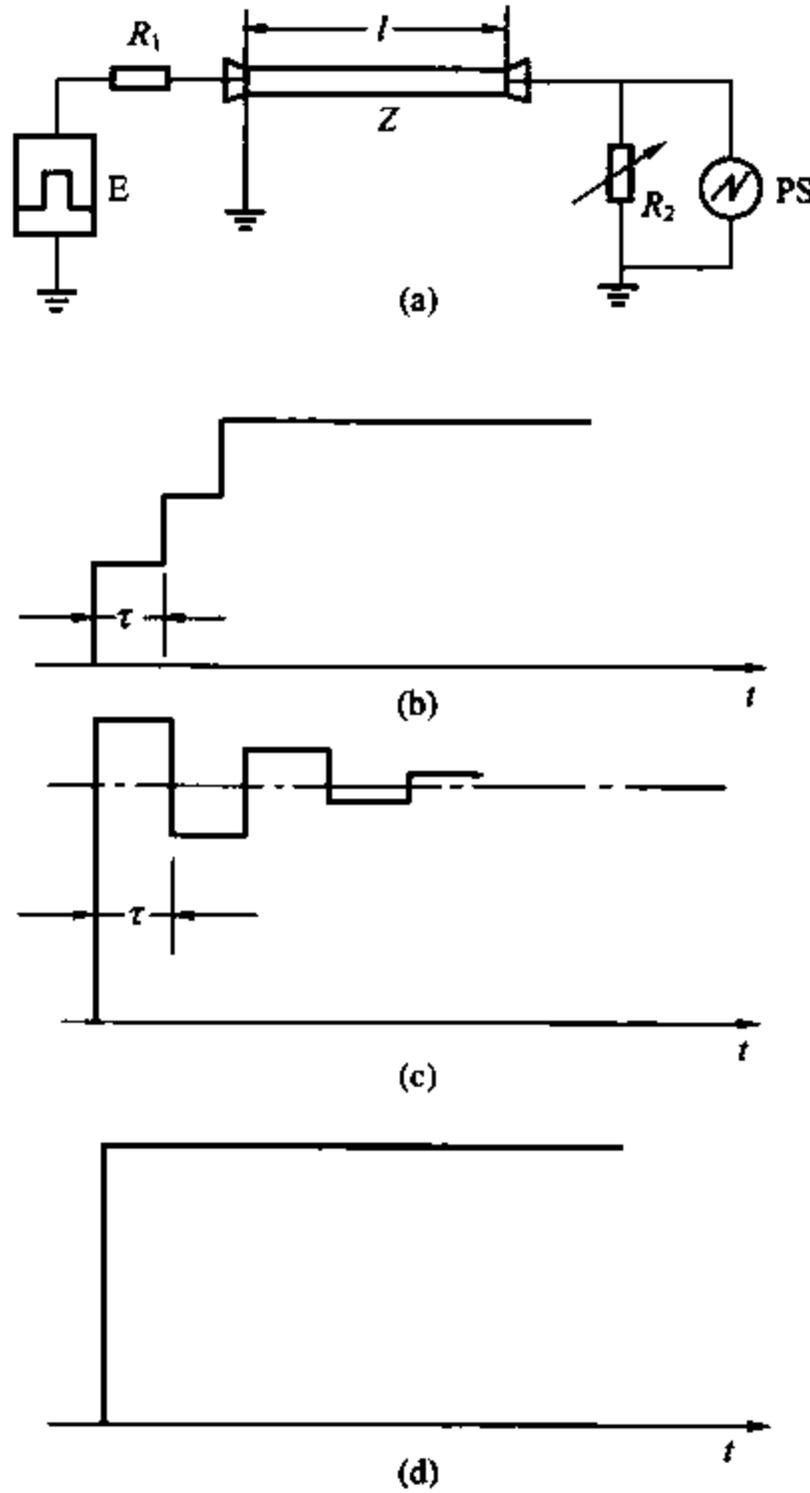


图 B-1 波阻抗测量原理图

(a) 测量原理图；(b) $R_2 > Z$ ；(c) $R_2 < Z$ ；(d) $R_2 = Z$

示。图中 Z 为被测电缆波阻抗, R_1 和 R_2 为无感电阻, 方波发生器 E 从首端经 R_1 输入方波, 其前沿上升时间远小于波在 Z 中的行程时间。利用脉冲示波器观察 R_2 上电压, 当 $R_2 > Z$ 、 $R_2 < Z$ 、 $R_2 = Z$ 时, 电压波形分别如图 B-1 (b)、(c)、(d) 所示。试验中改变 R_2 去逼近图 B-1 (d) 所示的情况, 可以较好地定出波阻抗 Z 。在图 B-1 (b)、(c) 中测量 τ , 按公式 $\tau = \frac{2l}{v}$, 其中 l 为被测电缆的长度, 可以决定 Z 中的波速 v 。

264

当试品首、末端距离比较远时, 采用图 B-2 所示接线测量电缆波阻抗更合适。E 是一个内阻为零的切断式方波发生器。在

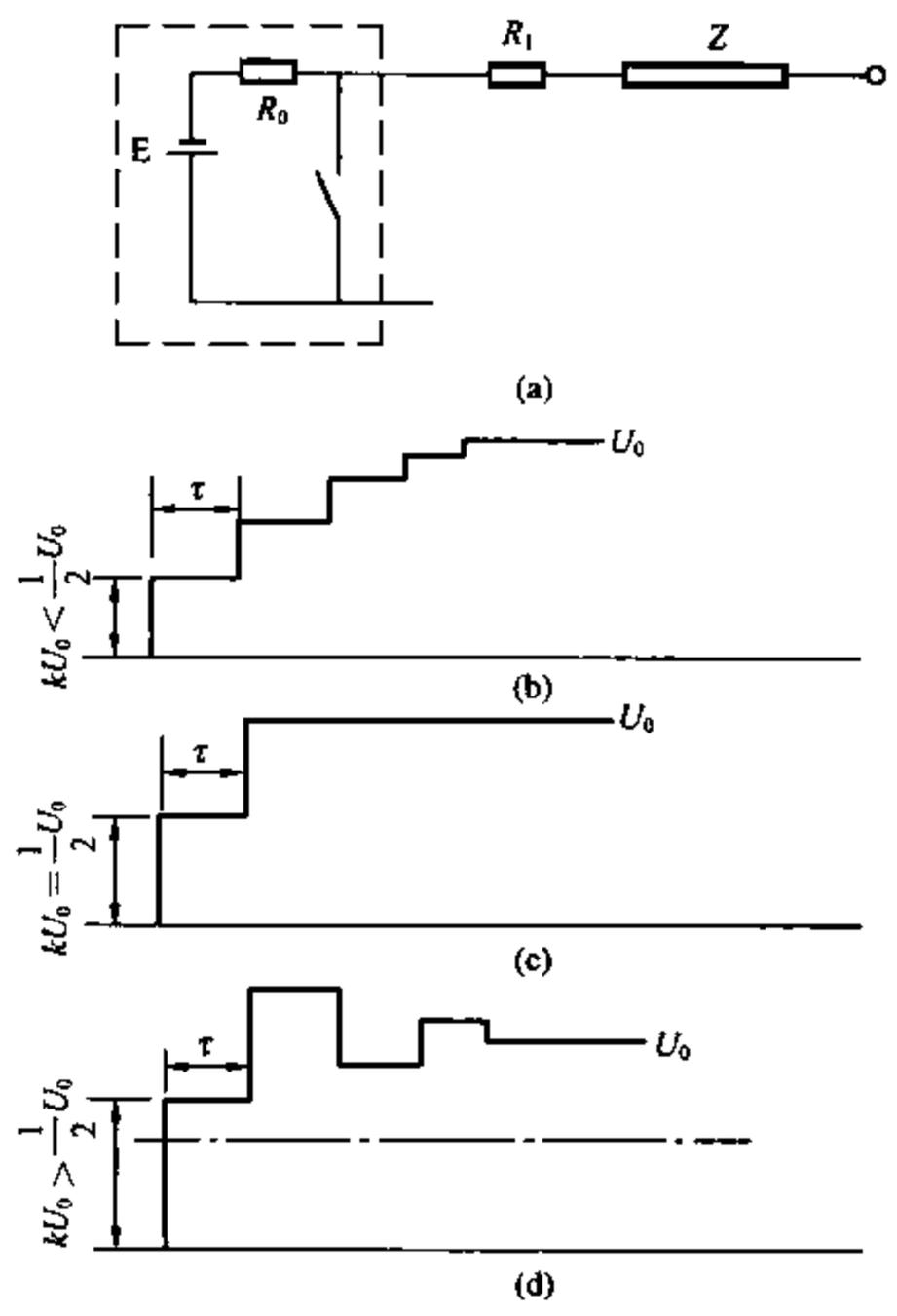


图 B-2 中性点不接地设备波阻抗测量
(a) 测量原理图; (b) $R_1 > Z$; (c) $R_1 = Z$; (d) $R_1 < Z$

$R_1 > Z_1$ 、 $R_1 = Z$ 、 $R_1 < Z$ 的情况下，被测电缆首端电压波形分别如图 B-2 (b)、(c)、(d) 所示。波形和图 B.1 所示波形比较，多了一个起始部分，其高度取决于 R_1 与 Z 的比值。试验中改变 R_1 去逼近图 B-2 (c) 所示波形，可以决定波阻抗 Z 。利用公式 $K = \frac{Z}{R_1 + Z}$ 也可求得 Z 。电缆、母线、发电机和中性点不接地变压器均可利用此方法测量它们的波阻抗。

对于自耦变压器或中性点接地的变压器，波阻抗测量方法可采用如图 B-3 (a) 所示的原理图，用脉冲示波器测量 Z 和 R_1 首端电压，如图 B-3 (b)、(c) 所示， U_a 、 U_b 起始电压比值为 $K = \frac{Z}{Z + R_1}$ 。当 $R_1 = Z_1$ 时， $K = \frac{1}{2}$ 。

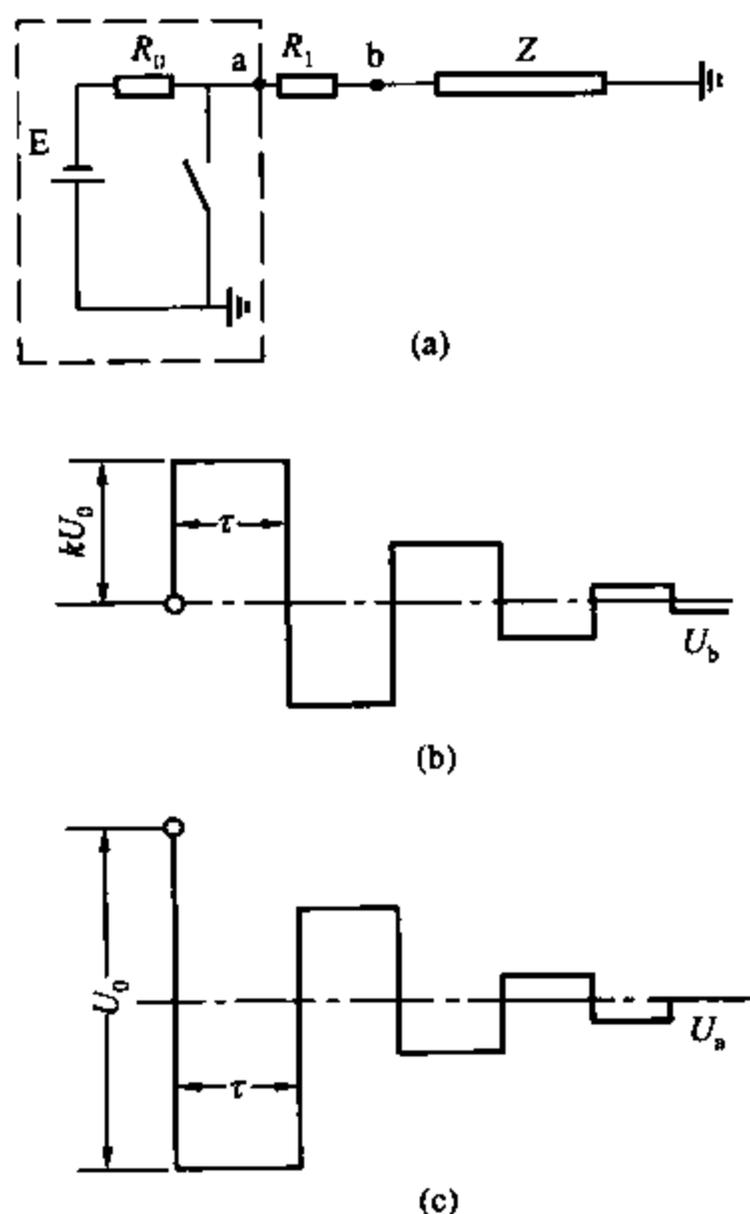


图 B-3 中性点接地设备波阻抗测量
(a) 测量原理图；(b) U_b 波形；(c) U_a 波形

以上测试中所使用的仪器：E 为 MFD-1A 型方波发生器；电压波形是利用脉冲示波器 SBM-14 或同步示波器 SBT-5 测量的，图 B-1 (a) 中用 PS 统一表示。

2. 实际测量结果

编者在湖南凤滩水电站测量了 3 种电缆和槽形母线的波阻抗，其结果见表 B-1，其波形如图 B-4 所示。

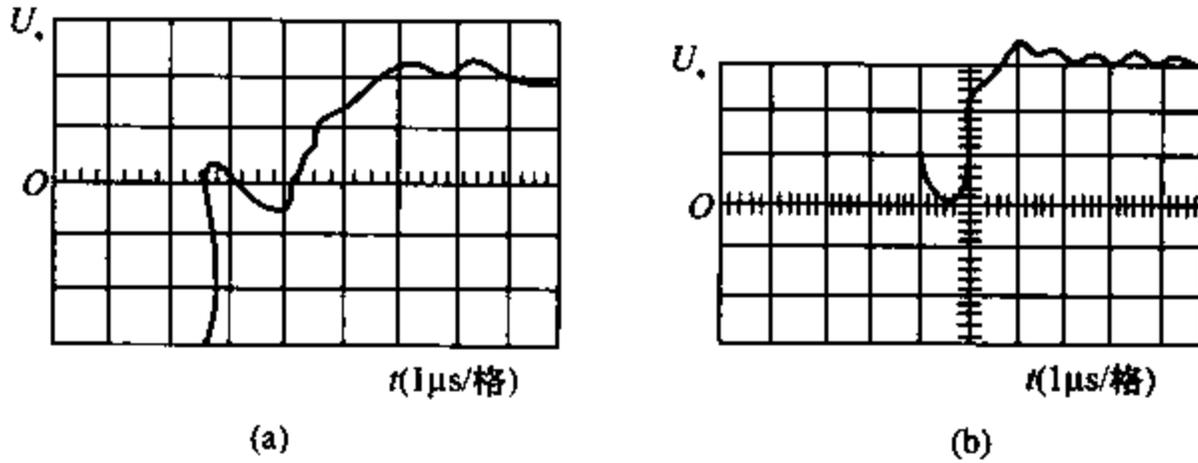


图 B-4 电缆及槽形母线波阻抗示波图
(a) 电缆 $Z_1=28\Omega$ ；(b) 槽形母线 $Z_1=109\Omega$

表 B-1 电缆和双槽形母线波阻抗测量结果

试品 项目	220kV 电缆 $1 \times 600\text{mm}^2$	220kV 电缆 $1 \times 400\text{mm}^2$	110kV 电缆 $1 \times 700\text{mm}^2$	双槽形母线 LMY*
l (m)	165	135	294	100
Z_1 实测值 (Ω)	28	29	15	109
τ (μs)	2	1.6	示波图不清	0.9
v (m/ μs)	165	168	示波图不清	220
Z_1 理论值 (Ω)	27.4	30.4	16.5	—
β (衰减系数)	0.97	—	—	—

* 该双槽形母线的高为 175mm，宽为 80mm，厚为 8mm。

二、电缆线芯直流电阻测定

测量时分别将电缆线路末端三相线芯和金属护套短路，用双臂电桥在电缆线路首端测量。测量原理接线如图 B-5 所示，测量结果见表 B-2。

表 B-2 直流电阻测量结果

名称	R_{AB} (Ω)	R_{BC} (Ω)	R_{CA} (Ω)	t_c ($^{\circ}\text{C}$)
线芯	0.159	0.160	0.161	27
金属护套	1.040	1.044	1.040	35

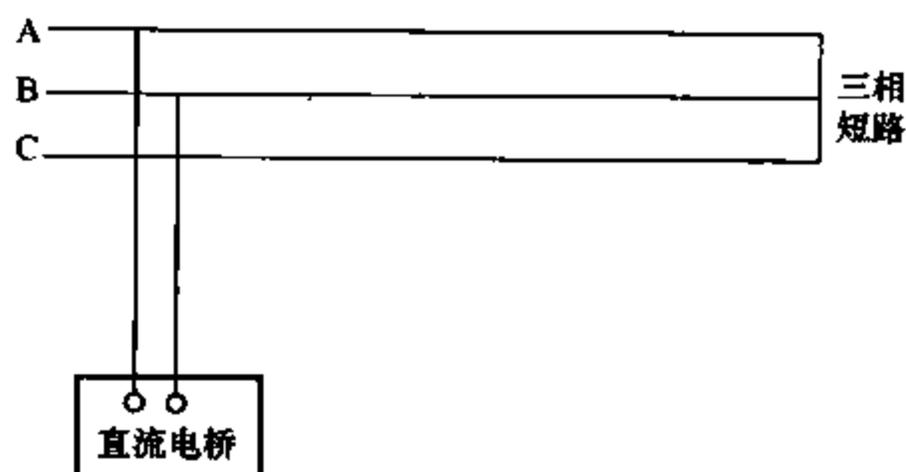


图 B-5 直流电阻测量原理接线

根据公式

$$R_A = \frac{1}{2}(R_{AB} + R_{CA} - R_{BC})$$

$$R_B = \frac{1}{2}(R_{AB} + R_{BC} - R_{CA})$$

$$R_C = \frac{1}{2}(R_{BC} + R_{CA} - R_{AB})$$

可计算出各相直流电阻值见表 B-3。

表 B-3 直流电阻计算值

名称	R_A (Ω)	R_B (Ω)	R_C (Ω)	R_{cp} (Ω)	R' (Ω/km)
线芯	0.08	0.078	0.081	0.08	0.025 6
金属护套	0.522	0.513	0.522	0.519	0.166 9

注 1. R_{cp} 为三相直流电阻平均值。

2. 电缆线路长度为 3.12km, 则 $R' = \frac{R_{cp}}{3.12}$ 。

3. 线芯为铜材, 截面为 700mm^2 。

三、电缆线路正序阻抗测定

测量时分别将电缆线路三相线芯和金属护套短路, 并使其接触良好。电缆线路末端按图 B-6 所示接线通电测量。

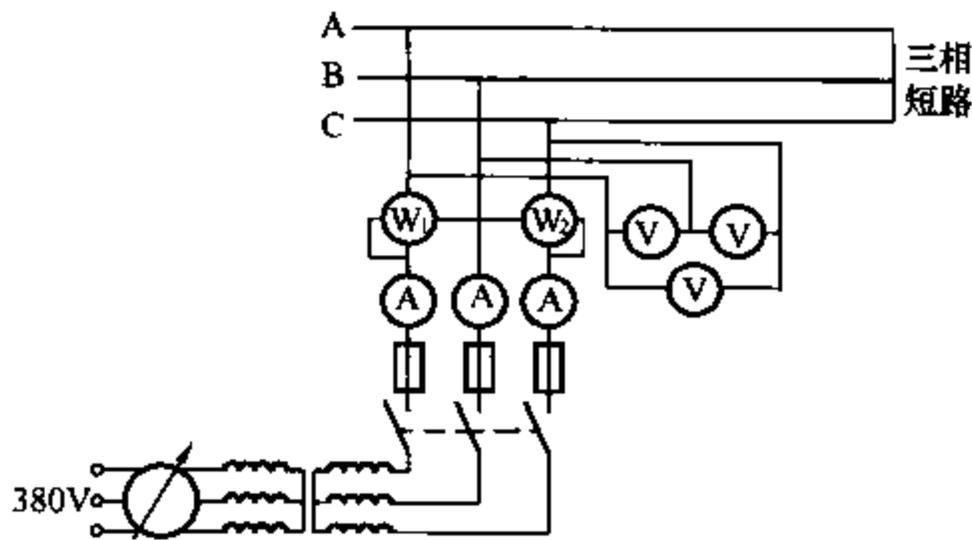


图 B-6 正序阻抗测量原理接线

使用仪表设备有:

- 1) 三相调压器: 15kVA, 380/0~450V, 1台。
 - 2) 隔离变压器: 15kVA, 380/40V, 1台。
 - 3) 电流互感器: 50/5, 15VA, 0.2级, 3个(备用, 当 $I \leq 5A$ 时不需要)。
 - 4) 电流表: 0~2.5~5A, 0.5级, 3个。
 - 5) 电压表: 0~75~500V, 0.5级, 3个。
 - 6) 功率表: 0~2.5~5A, 0~75~300V, 0.5级, 2个。
- 测量得原始数据见表 B-4。

表 B-4 正序阻抗测量原始数据

名称	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	I_{CP} (A)	U_{AB} (V)	U_{BC} (V)
线芯	35.5	40	31.5	35.7	40.3	40
金属护套	20	20	19.8	19.9	24	24.2
名称	U_{CA} (V)	U_{CB} (V)	W_1 (W)	W_2 (W)	W_{Σ} (W)	f (Hz)
线芯	41	40.4	+815	-275	540	50
金属护套	23.5	23.9	470	157.5	627.5	50

注 I_{cp} 为三相电流平均值。

两瓦特表法

$$W_{\Sigma} = W_1 + W_2 = 815 + (-275) = 540 \text{ (W)}$$

根据公式

$$Z_1 = \frac{U_{CP}}{\sqrt{3}I_{CP}} \quad (\Omega/\text{相}) \quad (\text{B-1})$$

$$R_1 = \frac{W_{\Sigma}}{3I_{CP}^2} \quad (\Omega/\text{相}) \quad (\text{B-2})$$

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} \quad (\Omega/\text{相}) \quad (\text{B-3})$$

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f} \times 10^3 \quad (\text{mH}/\text{相}) \quad (\text{B-4})$$

$$\theta = \arctan \frac{X_1}{R_1} \quad (^\circ) \quad (\text{B-5})$$

可得计算结果见表 B-5。

表 B-5 正序阻抗计算结果

名称	全 线 值			
	R (Ω)	X (Ω)	L (mH)	Z (Ω)
线 芯	0.141	0.638	2.031	0.653/77.5°
金属护套	0.522	0.451	1.436	0.694/40.5°
名称	每 千 米 值			
	R (Ω)	X (Ω)	L (mH)	Z (Ω)
线 芯	0.048	0.204	0.651	0.209/177.5°
金属护套	0.169	0.145	0.460	0.222/40.5°

四、零序阻抗测定

测量时，分别将电缆线路三相线芯和金属护套短路按图 B-7 所示接线通电测量。

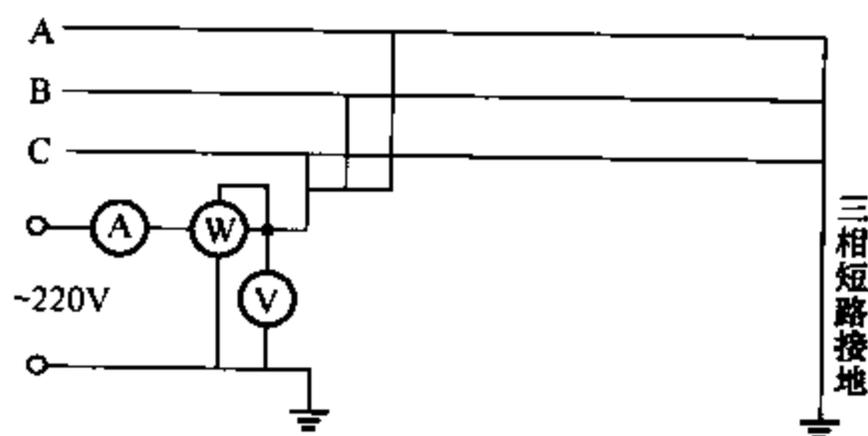


图 B-7 零序阻抗测量原理接线

使用仪表设备有：

- 1) 电源设备同前。
- 2) 频率表：45~55Hz，220V，0.2级，1个（现场测量时一般不需接频率表）。

- 3) 电流表: 2~2.5~5A, 0.5级, 1个。
 4) 电压表: 0~75~300V, 0.5级, 1个。
 5) 瓦特表: 0~2.5~5A, 0~75~300V, 0.5级, 1个。
 测得原始数据见表 B-6。

表 B-6 零序阻抗测量原始数据

名 称	I_0 (A)	U_0 (V)	W_0 (W)	f_0 (Hz)
线 芯	50	17.7	825	50
金属护套	30	31.2	470	50

根据公式

$$Z_0 = \frac{3U_0}{I_0} \quad (\Omega/\text{相}) \quad (\text{B-6})$$

$$R_0 = \frac{3W_0}{I_0^2} \quad (\Omega/\text{相}) \quad (\text{B-7})$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (\Omega/\text{相}) \quad (\text{B-8})$$

$$L_0 = \frac{X_0}{2\pi f_0} \times 10^3 \quad (\text{mH}/\text{相}) \quad (\text{B-9})$$

$$\theta = \arctan \frac{X_0}{R_0} \quad (^\circ) \quad (\text{B-10})$$

可得计算结果见表 B-7。

表 B-7 零序阻抗计算结果

名 称	全 线 值			
	R_0 (Ω)	X_0 (Ω)	L_0 (mH)	Z_0 (Ω)
线 芯	0.99	0.384	1.224	$1.062 \angle 21.2^\circ$
金属护套	1.567	2.698	3.592	$3.12 \angle 59.9^\circ$
名 称	每 千 米 值			
	R_0 (Ω)	X_0 (Ω)	L_0 (mH)	Z_0 (Ω)
线 芯	0.317	0.123	0.392	$0.34 \angle 21.2^\circ$
金属护套	0.502	0.865	2.754	$1.00 \angle 59.9^\circ$

五、正序电容测定

测量时, 电缆线路三相线芯和金属护套开路, 按图 B-8 所示接线通电测量。

使用仪表设备:

- 1) 电源设备同前。
 - 2) 电流表: 0~100~200mA, 1A, 0.5 级, 3 块。
 - 3) 电压表: 0~150~300~600V, 0.5 级, 3 块。
- 测量得原始数据见表 B-8。

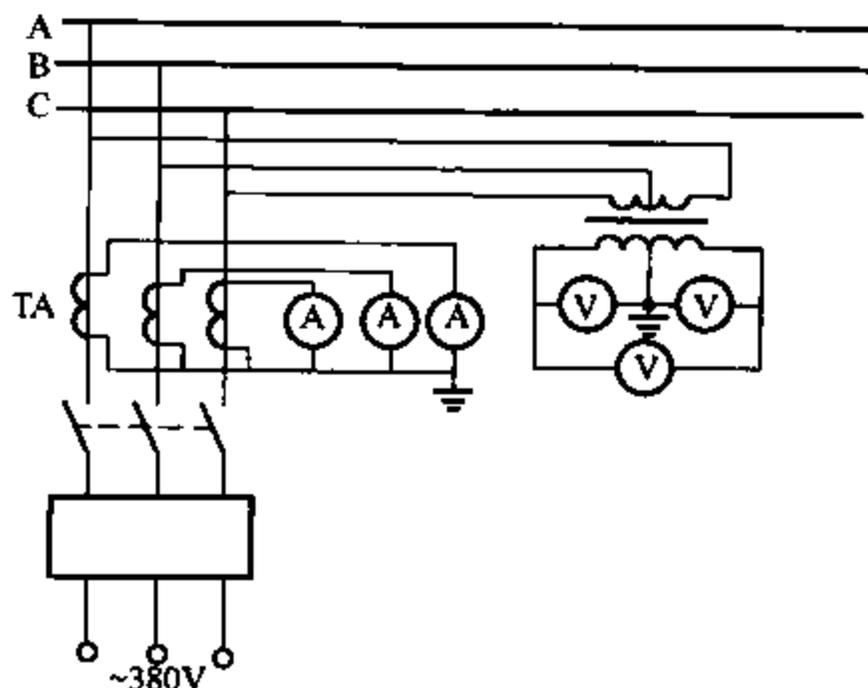


图 B-8 正序电容测量接线

表 B-8 正序电容测量原始数据

名称	I_A (mA)	I_B (mA)	I_C (mA)	I_{φ} (mA)	U_{AB} (V)	U_{BC} (V)	U_{CA} (V)	U_{CP} (V)	f (Hz)
线芯	60	60.5	61	60.5	372	395	400	389	50
金属护套	750	725	738	738	450	452	448	450	50

根据公式

$$C_1 = \frac{\sqrt{3}I_{\varphi}}{2\pi f U_{CP}} \times 10^3 \quad (\mu\text{F}/\text{相}) \quad (\text{B-11})$$

计算得每相正序电容值见表 B-9。

表 B-9 每相正序电容计算值

名称	全线值 (μF)	每千米值 (μF)
线芯	0.86	0.276
金属护套	9.046	2.899

六、零序电容测定

测量时将电缆线路首端三相线芯和金属护套短路，按图 B-9 所示接线通电测量。

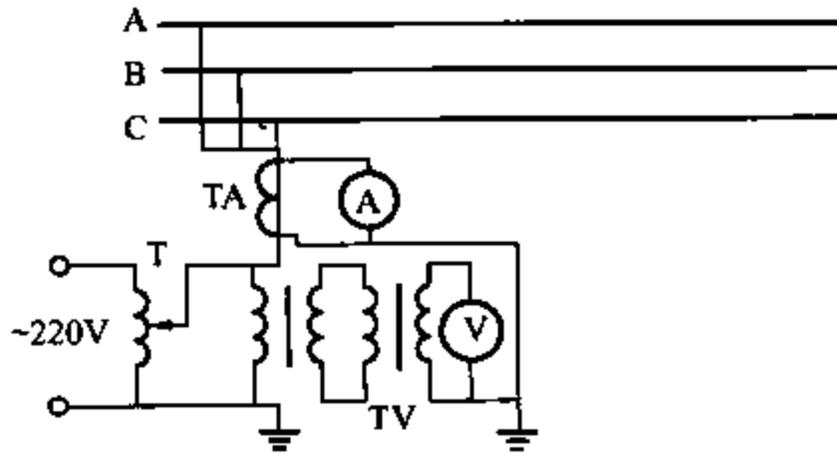


图 B-9 零序电容测量原理接线

使用仪表设备：

- 1) 电源设备同前。
- 2) 电流表：0~200mA~5A，0.5级，1个。
- 3) 电压表：0~300~600V，0.5级，1个。

测得原始数据见表 B-10。

表 B-10 零序电容测量原始数据

名称	I_0 (mA)	U_0 (V)	f_0 (Hz)
线芯	200	246	50
金属护套	2000	251	50

根据公式

$$C_0 = \frac{I_0}{3 \times 2\pi f_0 U_0} \times 10^3 \quad (\mu\text{F}/\text{相}) \quad (\text{B-12})$$

可得计算结果见表 B-11。

表 B-11 零序电容计算结果

名称	全线值 (μF)	每千米值 (μF)
线芯	0.86	0.276
金属护套	8.135	2.607

对上述各项测量结果补充说明如下：

(1) 从线芯的正序阻抗测定试验可以看出, 当电缆线路外加三相对称电源时, 三相电流并不完全平衡一致, 这是由于电缆敷设得并不对称, 且全线线芯未经换位, 三相阻抗并不完全相等所致。金属护套由于经过交叉换位, 三相阻抗基本相等, 故当金属护套外加三相对称电源时, 三相的电流基本平衡一致。

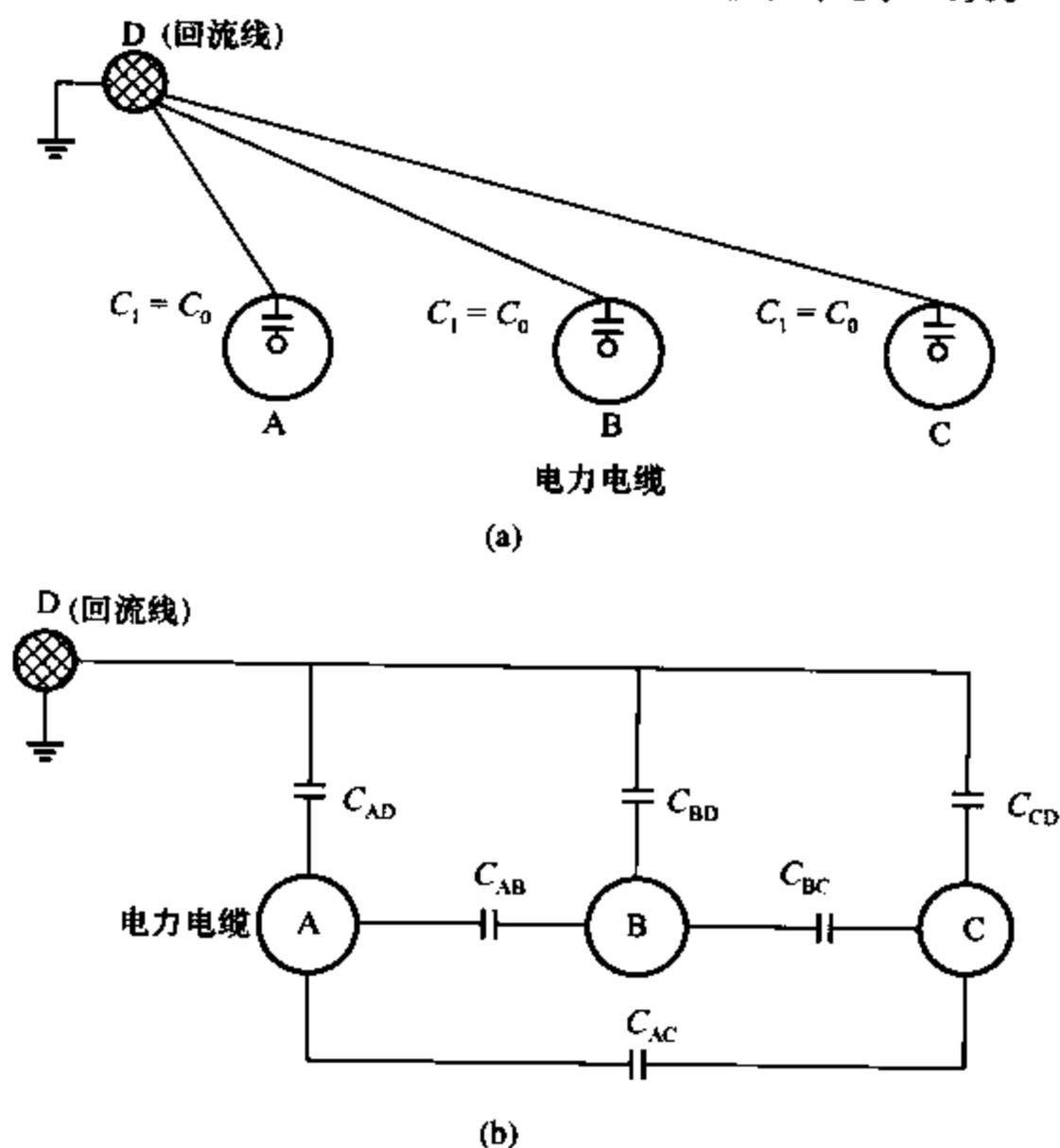


图 B-10 电缆线芯和金属护套的等值电容图

(a) 电缆线芯等值电容图; (b) 金属护套等值电容图

(2) 金属护套接地方式对线芯的正序阻抗值影响不大的原因在于金属护套沿线已经过交叉换位循环, 线芯与金属护套虽仍有变压器的耦合关系, 但由于金属护套经过换位, 相当于 Δ 接变压器, 金属护套正序基波合成电动势为零, 在金属护套有不平衡电流流过, 故影响不大。

(3) 电容量的测量直接采用交流伏安法是基于电缆的电容量

较大，绝缘性能好，而且试验所加的低电压下根本不会产生电晕损耗，可把加压后的电流看作纯电容电流，所产生的误差是很小的。

同时试验结果表明，电缆线芯的正序电容与零序电容相等。这是由于电缆为单相同轴电缆并且金属护套接地。但是，金属护套的正序电容却大于零序电容，与线芯不同，究其原因，是由于在测量时金属护套对地是绝缘的，这时的地主要是指回流线、地线等沿线敷设的金属接地体，其等值关系如图 B-10 所示。

从图 B-10 可以清楚看出：金属护套的正序电容为各相对地电容 C 与各相间电容合成后的等效值，当然要比单独为对地电容的零序电容大，实测结果是合理的。

附录 C 电力电缆直埋敷设 有关尺寸规定

直埋敷设电缆的路径选择应符合下列规定：

(1) 应避开含受酸、碱强腐蚀或杂散电流电化学腐蚀严重影响的地段。

(2) 无防护措施时，宜避开白蚁危害地带、热源影响和易遭外力损伤的区段。

直埋敷设电缆方式应符合下列规定：

(1) 电缆应敷设于壕沟里，并应沿电缆全长的上、下紧邻侧铺以厚度不小于 100mm 的软土或砂层。

(2) 沿电缆全长应覆盖宽度不小于电缆两侧各 50mm 的保护板，保护板宜采用混凝土制成。

(3) 城镇电缆直埋敷设时，宜在保护板上层铺设醒目标志带。

(4) 位于城郊或空旷地带时，沿电缆路径的直线间隔 100m、转弯处和接头部位，应竖立明显的方位标志或标桩。

(5) 当采用电缆穿波纹管敷设于壕沟时，应沿波纹管顶全长浇注厚度不小于 100mm 的素混凝土，宽度不应小于管外侧 50mm，电缆可不含铠装。

直埋敷设于非冻土地区时，电缆埋置深度应符合下列规定：

(1) 电缆外皮至地下构筑物基础不得小于 0.3m。

(2) 电缆外皮至地面深度不得小于 0.7m；当位于行车道或耕地下时，应适当加深，且不宜小于 1.0m。

直埋敷设于冻土地区时，宜埋入冻土层以下；当无法深埋时可埋设在土壤排水性好的干燥冻土层或回填土中，也可采取其他防止电缆受到损伤的措施。

直埋敷设的电缆严禁位于地下管道的正上方或正下方。

电缆与电缆、管道、道路、构筑物等之间的容许最小距离应符合表 C-1 的规定。

表 C-1 电缆与电缆、管道、道路、构筑物等之间的容许最小距离 m

电缆直埋敷设时的配置情况		平行	交叉
控制电缆之间		—	0.5 ^①
电力电缆之间或与控制电缆之间	10kV 及以下电力电缆	0.1	0.5 ^①
	10kV 以上电力电缆	0.25 ^②	0.5 ^①
不同部门使用的电缆		0.5 ^②	0.5 ^①
电缆与地下管沟	热力管沟	2 ^③	0.5 ^①
	油管或易(可)燃气管道	1	0.5 ^①
	其他管道	0.5	0.5 ^①
电缆与铁路	非直流电气化铁路路轨	3	1.0
	直流电气化铁路路轨	10	1.0
电缆与建筑物基础		0.6 ^③	—
电缆与公路边		1.0 ^③	—
电缆与排水沟		1.0 ^③	—
电缆与树木的主干		0.7	—
电缆与 1kV 以下架空线电杆		1.0 ^③	—
电缆与 1kV 以上架空线杆塔基础		4.0 ^③	—

① 用隔板分隔或电缆穿管时不得小于 0.25m。

② 用隔板分隔或电缆穿管时不得小于 0.1m。

③ 特殊情况时,减小值不得大于 50%。

直埋敷设的电缆与铁路、公路或街道交叉时,应穿保护管,保护范围应超出路基、街道路面两边以及排水沟边 0.5m 以上。

直埋敷设的电缆引入构筑物,在贯穿墙孔处应设置保护管,管口应实施阻水堵塞。

直埋敷设电缆的接头配置应符合下列规定:

(1) 接头与邻近电缆的净距不得小于 0.25m。

(2) 并列电缆的接头位置宜相互错开,且净距不宜小于 0.5m。

(3) 斜坡地形处的接头位置应呈水平状。

(4) 重复回路的电缆接头宜在其两侧约 1m 开始的局部段，按留有备用量的方式敷设电缆。

直埋敷设电缆采取特殊换土回填时，回填土的土质应对电缆外护层无腐蚀性。

附录 D 交流系统单芯电缆金属护套 正常感应电压计算

交流系统中单芯电缆线路一回或两回的各相按通常配置排列情况下，在电缆金属护套上任一点非直接接地处的正常感应电压值可按下式计算

$$U_s = U_{s0}l$$

式中 U_s ——感应电压，V；

l ——电缆金属护套的电气通路上任一部位与其直接接地处的距离，km；

U_{s0} ——单位长度的正常感应电压，V/km。

U_{s0} 的表达式见表 D-1。

表 D-1 U_{s0} 的表达式

电缆回路数	每根电缆相互间中心距均等时的配置排列特征	A或C相 (边相)	B相 (中间相)	Y	a (Ω/km)	b (Ω/km)	X_s (Ω/km)
1	2根电缆 并列	IX_s	IX_s	—	—	—	—
	3根电缆 呈等边 三角形	IX_s	IX_s	—	—	—	—
	3根电缆 呈直角形	$\frac{I}{2}\sqrt{3Y^2 + \left(X_s - \frac{a}{2}\right)^2}$	IX_s	$X_s + \frac{a}{2}$	$2\omega \ln 2 \times 10^{-4}$	—	$2\omega \ln \frac{S}{r} \times 10^{-4}$
	3根电缆 呈直线并列	$\frac{I}{2}\sqrt{3Y^2 + (X_s - a)^2}$	IX_s	$X_s + a$	$2\omega \ln 2 \times 10^{-4}$	—	$2\omega \ln \frac{S}{r} \times 10^{-4}$

续表

电缆回路数	每根电缆相互间中心距均等时的配置排列特征	A或C相 (边相)	B相 (中间相)	Y	a (Ω/km)	b (Ω/km)	X _s (Ω/km)
2	两回电缆等距直线并列 (相序同)	$\frac{I}{2} \sqrt{3Y^2 + \left(X_s - \frac{b}{2}\right)^2}$	$I \left(X_s + \frac{a}{2} \right)$	$X_s + a + \frac{b}{2}$	$2\omega \ln 2 \times 10^{-4}$	$2\omega \ln 5 \times 10^{-4}$	$2\omega \ln \frac{S}{r} \times 10^{-4}$
	两回电缆等距直线并列 (但相序排列互反)	$\frac{I}{2} \sqrt{3Y^2 + \left(X_s - \frac{b}{2}\right)^2}$	$I \left(X_s + \frac{b}{2} \right)$	$X_s + a - \frac{a}{2}$	$2\omega \ln 2 \times 10^{-4}$	$2\omega \ln 5 \times 10^{-4}$	$2\omega \ln \frac{S}{r} \times 10^{-4}$

注 1. $\omega = 2\pi f$ 。2. r —电缆金属护套的平均半径, m。3. I —电缆导体正常工作电流, A。4. f —工作频率, Hz。5. S —各相邻电缆之间中心距, m。6. 回路电缆情况, 假定其每回 I 、 r 均等。

参 考 文 献

- [1] 郑肇骥、王焜明, 陆德宏. 高压电缆线路. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 朱德恒、严璋. 高电压绝缘. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [3] 解广润. 过电压及保护. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [4] 江日洪. 城网供电. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.
- [5] 李维尧. 中压交联聚乙烯电缆的基本结构、用途和标准. 广州: 广东电缆技术, 2004(1): 36-38.
- [6] 刘明光等. 冲击负荷下 XLPE 高压电缆线芯截面选择. 供用电, 2002(4): 36-38.
- [7] 李韶荪, 蔡兴波. 110kV 交联电缆接头的选型. 供用电, 1994(3): 16~17.
- [8] 刘毅刚. 用数字存贮示波器测量电力电缆故障. 供用电, 1992(1): 21~22.
- [9] 张博, 张文新. 220kV 超高压 XLPE 电缆局放测试技术的现场应用. 广东电缆技术, 2007(1): 14-17.
- [10] 闵斌等. 变频谐振技术与 XLPE 电缆试验. 广东电缆技术, 2006(1): 30-34.
- [11] 赵强, 梁智勇. 超低频电压耐压试验标准浅析. 广东电缆技术, 2006(1): 34-36.
- [12] 徐绍军. 110/220kV XLPE 电缆运行状况在线监测. 广东电缆技术, 2007(3): 19-21.
- [13] 徐绍军等. 单芯高压电缆金属护套环流异常原因分析. 广东电缆技术, 2007(2): 19-21.
- [14] 何利平. 110kV 都北线电缆护套感应电压和环流分析计算. 广东输变电技术, 2006(6): 56-60.
- [15] 王晓林, 施围, 王秉钧. 电缆出线的限流电抗器上的过电压. 高电压技术, 1993(2): 13~17.
- [16] 罗俊华等. 单芯电力电缆金属护套过电压保护器参数设计高电压技

- 术. 2008(2): 355-358.
- [17] 王乃军, 王忠建. 配网隧道电缆防火. 广东电缆技术. 2006(4): 45-48.
- [18] 黎家欣. 电力电缆对同沟敷设导引电缆的影响. 供用电. 1992(4): 32-35.
- [19] 福田修(日)等. 电缆金属护套感应电压引起的循环电流. 日本, 住友电气. 1994: 144-146.
- [20] S. Yamaguchi(日). 交联聚乙烯配电电缆的改进和电缆带电监测设备. 1989年第十届国际供电会议论文集第3册《电缆和架空线》. 1989: 141~145.

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 交联聚乙烯电力电缆线路

作者 = 江日洪编著

页数 = 281

s s 号 = 12202084

出版社 = 中国电力出版社

出版日期 = 2009.02

封面
书名
版权
前言
目录

第一章	交联聚乙烯电力电缆概述
第一节	电力电缆的分类和特点
第二节	交联聚乙烯电力电缆的特性
第三节	交联聚乙烯电力电缆的制造工艺
第四节	中压交联聚乙烯电力电缆的品种和结构
第五节	交联聚乙烯电力电缆及附件的发展
	思考题
第二章	交联聚乙烯电力电缆的选用
第一节	交联聚乙烯电力电缆型号和选用原则
第二节	交联聚乙烯电力电缆线芯数和截面选择
第三节	交联聚乙烯电力电缆热特性和载流量的计算
第四节	电力电缆线路允许通过短路电流的计算
第五节	交联聚乙烯电力电缆金属屏蔽层截面选择
	思考题
第三章	交联聚乙烯电力电缆的电气试验
第一节	交联聚乙烯电力电缆额定电压 U_0 / U 的制定和分类
第二节	交联聚乙烯电力电缆电气试验分类、试验标准和方法
第三节	交联聚乙烯电力电缆交流耐压试验设备和试验程序
第四节	交联聚乙烯电力电缆线路故障定位方法
第五节	交联聚乙烯电力电缆局放测试技术的现场应用
	思考题
第四章	交联聚乙烯电力电缆敷设与附件选型和安装
第一节	交联聚乙烯电力电缆线路的敷设方式与条件
第二节	110 kV 交联聚乙烯电力电缆的施工工艺
第三节	交联聚乙烯电力电缆中间接头的选型和安装
第四节	交联聚乙烯电力电缆终端头的选型和安装
第五节	110 kV 交联聚乙烯电力电缆户外电缆终端应用现状
	思考题
第五章	交联聚乙烯电力电缆绝缘老化机理及监测
第一节	交联聚乙烯电力电缆绝缘老化机理
第二节	交联聚乙烯电力电缆水树的形成和电缆特性的变化
第三节	水树老化的判断方法和离线监测
第四节	交联聚乙烯电力电缆绝缘在线监测
第五节	110 / 220 kV 交联聚乙烯电力电缆在线监测法的评估
	思考题
第六章	电力电缆线路的过电压保护
第一节	电力电缆绝缘冲击电压水平的选择
第二节	电力电缆线路的冲击特性长度和绝缘配合
第三节	电缆—GIS 系统避雷器保护范围的计算
第四节	电力电缆线路上的限流电抗器及过电压保护
第五节	220 kV 长电缆线路过电压保护计算实例
	思考题
第七章	高压单芯电缆护层过电压保护及金属护套环流计算
第一节	冲击电压作用下的护层过电压
第二节	金属护套工频感应电压的计算
第三节	电缆护层保护的接线方式
第四节	电缆护层保护器的技术要求及其设计
第五节	电缆金属护套环流分析及计算实例
	思考题
第八章	交联聚乙烯电力电缆线路的防火与阻燃措施
第一节	国内外电缆火灾事故分析

第二节 电缆防火阻燃措施现状及存在问题

第三节 防止电缆着火延燃的措施

第四节 电缆防火材料的选择和应用

第五节 配网隧道电缆的防火

思考题

第九章 电力系统中的控制电缆和导引电缆

第一节 1 kV 及以下全塑电缆的正确使用

第二节 电力电缆对同沟敷设导引电缆的影响及防护措施

第三节 控制电缆的使用条件、线芯数及截面选择

第四节 控制电缆的事故分析及保护措施

思考题

附录 A 交联聚乙烯电力电缆结构尺寸及电气性能（供参考）

附录 B 电缆线路参数的测量方法

附录 C 电力电缆直埋敷设有关尺寸规定

附录 D 交流系统单芯电缆金属护套正常感应电压计算

参考文献