

## ABSTRACT

It is an important way to improve the safety, reliability and stability of power system by designing or reforming the substation grounding system reasonably. The shunt coefficient of lightning shield line directly related to the short-circuit current into ground and then affect the step-voltage and the contact-voltage which may damage the electric equipment and affect the security and stability of power system and even endanger the personal safety, so it needs to be considered when we are designing or reforming the substation grounding network of substation. But the present analysis and calculation models of lightning shield line shunt coefficient have some defects such as hard to analyze many actual cases and calculation complexity and even difficult to determine the parameter related when calculating, which makes the analysis calculation method lacks the practicability, therefore, it is necessary to find a simple calculation method easy to do.

When earth short circuit taking place in substation, besides the current flowing through transformer neutral point, the maximal short-circuit current mainly flow into substation grounding network and lightning shield line-tower system. By research on distribution of short-circuit current when short-circuit happening in substation, mathematical analysis model on short-circuit current distribution is established. This study also derives the practical shunt coefficient model by studying the relationship between the shunt coefficient of lightning shield line and the number of total cardinal number of towers, and verified its correctness combined with actual measurement of shunt impedance on zhou-tang line and miao-zhou line. based on the study, the practical mathematical analysis model on short-circuit current distribution is established, and then the calculation formula of shunt coefficient of lightning shield line is obtained. this method is suitable for the cases that not all the grounding resistance of towers unequal, the space distance between adjacent towers different and the electrical structure of both sides on short circuit point unsymmetrical etc, this method overcomes the deficiency of present calculation method and has great practicability and advantages.

Based on the practical mathematical analysis model on short-circuit current distribution, studying the relationships between the shunt coefficient of lightning shield line and its influencing factors such as grounding resistance of substation, the

parameter of lightning shield line itself, the space distance between adjacent towers, the grounding resistance of towers, number of inlet-outlet line and seasonal factor etc, and found out the approximately variation law of the relationships between the shunt coefficient of lightning shield line and its important influencing factors by means of least square method. The study has great good guiding significance on design of lightning shield line-tower system and grounding network in practical engineering.

**Key Words: Earth short circuit; lightning shield line; shunt impedance shunt coefficient; least square method**

# 长沙理工大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：李德超 日期：2009年5月22日

## 学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权长沙理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

- 1、保密□，在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。
- 2、不保密。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：李德超 日期：2009年5月22日

导师签名：李景禄 日期：2009年5月22日

# 第一章 绪论

## 1.1 课题背景及意义

随着电力工业的迅速发展，电网规模的日益扩大，电压等级的提高，对电力系统的安全性、可靠性和稳定性提出了更高的要求，但同时短路电流的日益增长也是不可避免的。当变电站（或发电厂）内发生接地短路时，在接地故障点会产生强大的短路电流，短路电流的增大给电力系统带来了很大危害<sup>[1]</sup>：

### (1) 增加投资费用

短路电流大幅度增大以后，为满足动、热稳定要求，需选用具有更大遮断电流的断路器及相应的电气设备，这就必然增加投资费用。

### (2) 故障点的破坏性

短路电流大幅度增大以后，故障点破坏加剧，绝缘子破损，导线熔断严重，埋地电缆的损坏更严重，并危及其它电缆。

### (3) 增加对通信线路的危害

随着短路电流大幅度增大，发生不对称短路时，不对称电流会产生足够的磁通，在邻近的电路内感应出很大的电动势，这对架设在高压电力线路附近的通信线路或铁道信号系统将产生很大的干扰，尤其是对平行于电力线路的通信线路，危害性大大增加。

### (4) 增加对主变压器的损害

馈线短路电磁力对变压器的损害有积累效应，短路电流大幅增大以后，多次近区短路的变压器可能潜伏着损坏隐患。

合理的设计或改造变电站的接地系统是提高电力系统的安全、可靠和稳定性的一个重要途径<sup>[2]</sup>，它直接关系到人身安全及电力系统的安全稳定运行，能有效抑制由入地电流引起的电压上升和跨步电压的产生<sup>[3~6]</sup>。而避雷线分流系数是关乎变电站接地系统设计或改造的重要因素，避雷线分流系数的大小很大程度上决定了入地短路电流的大小，DL/T621-1997《交流电气装置的接地》中规定，当变电站（或发电厂）内发生接地短路时，流经接地装置的电流可按式(1.1)进行计算：

$$I = (I_{\max} - I_n)(1 - K_e) \quad (1.1)$$

式中： $I_{\max}$ —接地短路时的最大接地短路电流，A；

$I$ —流经变电站（或发电厂）接地装置的入地短路电流，A；

$I_n$ —流经变电站（或发电厂）接地中性点的接地短路电流，A；

$K_e$ —变电站（或发电厂）内短路时，避雷线的分流系数。

变电站接地网的效果与接地装置接地电阻的大小、地网均压是否良好、电气设备是否有效接地、接地线是否符合热稳定的要求等均有关系。而入地短路电流的大小决定了变电站接地系统设计或改造中很重要的几个环节,即仔细算好接地电阻、跨步电势和接触电势等:

### (1) 接地电阻<sup>[7~9]</sup>

DL/T621-1997《交流电气装置的接地》中规定,在有效接地系统和低电阻接地系统中,变电站(或发电厂)电气装置保护接地的接地电阻在一般情况下应符合 $R \leq \frac{2000}{I}$ 的要求。其中, $R$ 为考虑到季节变化的最大接地电阻; $I$ 为计算用的流经接地装置的入地短路电流(按5~10年发展后的系统最大运行方式确定,并应考虑系统中各接地中性点间的短路电流以及避雷线分走的电流)。

由此分析可知,变电站接地装置的接地电阻目标值是由流经变电站(或发电厂)的入地短路电流唯一确定的。而对变电站接地装置进行设计或改造时,一些接地设计人员根本不知道如何确定变电站(或发电厂)接地装置的接地电阻目标值,盲目地将110kV及以上变电站接地装置的接地电阻目标值定为 $R \leq 0.5 \Omega$ ,认为接地电阻小于 $0.5 \Omega$ 就是合格,无论短路电流多大都不采取措施,没有考虑避雷线分流系数的影响,这是不正确的。

### (2) 接地网电位

当系统接地短路时,强大的短路电流流经接地装置时由地网局部电位差引起地电位干扰。二次系统中的设备,包括继电保护、控制、通信、监测等仪器和仪表都属于弱电设备,其耐压水平和抗干扰能力都比较弱,如不采取措施,这些干扰会造成测量和控制的误差及错误。而在计算接地网的电位 $U_g$ 时需要用到入地短路电流 $I$ :

$$U_g = IR_g \quad (1.2)$$

式中, $I$ —流经接地装置的入地短路电流, A;

$R_g$ —接地装置的接地电阻,  $\Omega$ 。

### (3) 跨步电压和接触电压

当变电站内发生接地短路故障时,短路电流便经接地体流入地中,并向四面八方扩散,形成半球形电场。此半球形球面,在距接地体愈近的地方其表面积愈小,相应的散流电阻就愈大;在距接地体愈远的地方其表面积愈大,相应的散流电阻就愈小。由于散流电阻随半球形球面的大小而变化,因此接地网电位也随之而变化,站内工作人员便可能承受跨步电压和接触电压<sup>[10~11]</sup>。跨步电压是指距离为0.8m(国外常取1m)的地面两点间的电位差;接触电压是指地面上离设备水平距离为0.8m处与设备外壳离地面高1.8m处同一水平面上两点间的电位差。在

进行变电站（或发电厂）接地设计或改造时，需要验算最大跨步电压和接触电压是否符合要求。如果变电站（或发电厂）内的最大跨步电压和接触电压不符合设计要求，超过了所能允许的跨步电压的目标值，同样将危及到人身安全。

在对变电站地网进行设计或改造时，均压带等间距布置时接地网表面的最大跨步电压  $U_{kmax}$  及最大接触电压  $U_{jmax}$  分别按式（1.3）和式（1.4）计算<sup>[15,16]</sup>。

$$U_{kmax} = K_{kmax} U_g \quad (1.3)$$

$$U_{jmax} = K_{jmax} U_g \quad (1.4)$$

式中， $U_{kmax}$ —最大跨步电压，V；

$K_{kmax}$ —最大跨步电压系数；

$U_{jmax}$ —最大接触电压，V；

$K_{jmax}$ —最大接触电压系数；

$U_g$ —接地网接地装置的电位。

由以上分析可以看出，在变电站内发生接地短路时避雷线分流系数的大小将直接影响到入地短路电流的计算，而由入地短路电流所产生的接触电压和跨步电压会危害电气设备及系统的安全稳定运行，甚至危及到人身安全。因此，在进行变电站（或发电厂）接地设计或改造时，一定要考虑避雷线分流系数这一重要参数，减少设计的盲目性。

站内发生短路时，短路电流中除经电站接地网流回变压器中性点的回流电流外，一部分会经变电站接地网流入大地简称入地短路电流；另一部分会经与该接地网相连的避雷线流向远方并经杆塔接地网及对侧变电站接地网入地。那么，减小短路电流对电气设备造成的危害的很重要一个措施便是利用避雷线的分流作用；其中入地短路电流的大小又很大程度上决定着接地网的接地电阻、跨步电压和接触电压等。由此看来，避雷线分流系数直接关系到变电站（或发电厂）内发生接地短路时流经接地装置的入地电流，进而关系到变电站（或发电厂）接地装置的接地电阻目标值的确定、地电位干扰的分析，还关系到变电站接地网的均压设计等。因而避雷线分流系数在接地计算时是一个非常重要的参数，避雷线分流系数测量计算方法的研究将为变电站（或发电厂）接地装置的设计或改造提供计算依据<sup>[17~26]</sup>。这样，一方面能确保在变电站（或发电厂）内发生接地短路时电力系统的安全稳定运行及人身安全；另一方面可以进行经济预算，节约投资，避免造成无谓的浪费。

## 1.2 避雷线分流系数研究现状

很早以前就有人提出采用序分量法，通过建立序分量模型来计算避雷线分流系数，即采用建立简化的电路模型，按照序网法计算出各段避雷线上流过的电流

及杆塔分流电流，再计算出避雷线分走的电流及避雷线的分流系数<sup>[26,27]</sup>，这也是目前计算避雷线分流系数最常用的一种方法。这种方法是建立在对称分量法的基础上的，当输电线路是全换位时，正、负、零序网络能够相互解耦，此时应用对称分量法能方便地求解出短路点处的电弧电流。但在实际中，由于架空地线多处接地或逐塔接地，并且故障点与变电站之间不可能保证全换位，各序之间存在耦合，故障条件下各相电量之间的关系不对称，此时应用传统序分量法计算很不准确甚至无法进行求解。

由于避雷线逐塔接地，各相导线与避雷线均以大地做为返回通路，考虑到线路换位等实际情况，短路故障条件下各相电量之间的关系不是对称的，因此，无法应用传统的序分量法进行求解。为了更好地反映实际情况，加拿大 F. Dawalibi 博士先后在 1980 年和 1984 年提出了解决这类电路问题的能很好地反映避雷线多点接地、换位等实际情况的相分量模型<sup>[28,29]</sup>。其中 1980 年提出的是普通双侧消去法电路模型，仅限于分析单相电路的短路，相应的分析方法为普通双侧消去法。1984 年提出的是广义双侧消去法电路模型，除了可以分析单相短路，还可以分析两相和多相的短路，以及平行管道的电流分布，相应的分析方法为广义双侧消去法 (Generalized Double-Sided Elimination Method, GD-SEM)。相分量模型考虑到大地有感应电流，呈现集肤效应；避雷线存在自阻抗，与相线之间又有互阻抗；各相导线可为分裂导线，避雷线可分为单根或双根，将变电站和线路各杆塔之间的等效电路联接，得到计算避雷线分流电流的等效电路模型，利用双侧消去法进行短路电流布计算<sup>[30~32]</sup>，再计算出避雷线的分流系数。但由于计算模型过于复杂，考虑参数太多，一些参数不是无法确定就是不易确定，致使避雷线分流系数的计算无法进行。

基于广义双侧消去法 GD-SEM，加拿大 SES 公司推出了商业软件 CDEGS，并已有成功的工程应用实例报道<sup>[33]</sup>。但广义双侧消去法 GDSEM 尚存在需改进之处，双侧消去的顺利进行是以线路的电气结构一致为前提的，因为要保证求解过程中涉及到的矩阵的维数一样，双侧消去法不能跨越连接不同电气结构线路的节点展开。因此，在求解不同电气结构互联的线路系统时，需增加虚拟导线，给实际应用带来不便，而且增加了不必要的计算量。另外，GDSEM 只允许存在一个故障点，不能模拟多点同时故障的线路工况。从软件开放性的角度来讲，CDEGS 不提供与其它软件系统（如 EMTP）的接口，功能扩充困难。与 GDSEM 相比，统一广义双侧消去的计算模型，借助线路边界概念<sup>[34]</sup>，可分析具有不同电气结构互联的线路系统，同时，故障点的数目和故障形式可以任意，进一步拓展了 GDSEM 的使用范围。统一广义双侧消去法的数学本质是块三对角阵的“追赶法”，由于块矩阵的“追赶法”本身是一种节省内存的快速算法，所以统一广义双侧消去法的计算效率很高而计算存储量的需求很小。这个方法的计算模型中将所有的线路横向支路封闭在

一个“黑箱”网络（阻抗网络）中，但是这个黑箱网络中的线间电容、线路间的联结阻抗和互阻抗大小取值难以准确确定。

另外，还有一些简易模型法<sup>[90]</sup>，但所考虑情况也过于简单，将所有杆塔接地电阻和杆塔档距均认为相等，这在实际中是不可能出现的，因此，也就不具有实用性。

### 1.3 主要研究内容

本课题来源于与江西九江供电公司合作的《避雷线分流系数现场实测研究》。主要通过对变电站内发生接地短路时短路电流的实际分布情况进行研究，将理论知识与现场实践真正地结合起来，通过分流阻抗法对两条线路现场实测数据分析验证，建立分流阻抗实用模型。基于分流阻抗模型推导出避雷线分流系数的计算方法，避免了目前避雷线分流系数的计算麻烦、不准确，甚至无法进行等问题，并找出避雷线分流系数与一些影响因素之间的变化规律。其研究成果能为变电站（或发电厂）的接地网设计或改造提供计算依据，并可将研究成果广泛地应用到各电压等级的中性点有效接地的系统中。

主要内容有：

(1) 目前常用的避雷线分流系数的测量计算方法进行研究，对各种方法进行深入分析，并对其缺点和不足提出符合实际的有效解决方案，最终找出符合实际情况的测量计算避雷线分流系数的方法。

(2) 通过对架设有避雷线的变电站内发生接地短路时短路电流实际分布研究，建立起变电站内发生接地短路时的避雷线分流阻抗模型，对九江两所变电站线路进行实际测量对分流阻抗模型准确性进行验证。通过对避雷线分流阻抗模型研究，推导出实用避雷线分流阻抗模型进而得出避雷线分流系数的计算公式。

(3) 对避雷线分流系数的各个实际影响因素主要如短路变电站接地电阻、避雷线本身参数、杆塔档距、杆塔接地电阻、进出线回路数和季节因素等进行分析，并利用 MATLAB 编程找出大致规律。



## 第二章 常用避雷线分流系数分析方法

变电站在运行过程中由于各种原因可能发生故障，在站内接地短路时避雷线将对接地短路电流起到很大分流作用。目前，避雷线分流系数的分析方法主要有两种，即基于传统序分量模型的分析方法和加拿大 F.Dawalibi 博士提出了基于相参数模型的分析方法。

### 2.1 变电站运行及故障分析

#### 2.1.1 变电站运行

变电站是联系电网的纽带，是电力系统中变换电压、接受和分配电能、控制电力的流向和调整电压的电力设施，主要是通过变压器将各级电压的电网联系起来，起着变换和分配电能的作用，其运行的可靠和安全与否直接关系到整个电网的安全运行。变电站的主要设备是变压器，起变换电压的作用；除此之外，变电站的设备还有开闭电路的开关设备、汇集电流的母线、计量和控制用互感器等；另外，由于近年来雷害事故越来越多，对电力系统的危害也越来越大，防雷保护的装置（接地网和避雷线等）显得越来越重要。

##### 1. 变电站类型

变电站是联系大电厂和用户的中间环节，根据其在电力系统中的作用和地位，可以分成以下几类<sup>[30]</sup>：

##### (1) 枢纽变电站

枢纽变电站位于电力系统的枢纽点，电压等级一般为 330kV 及以上，连接电力系统高压和中压的几个部分，汇集着多个电源，出线回路多，变电站容量大。全站（所）停电后将造成大面积停电或系统瓦解，甚至使出线系统瘫痪。

##### (2) 中间变电站

中间变电站位于系统主干环行线路或系统主要干线的接口处，电压等级一般为 220~330kV，汇集 2~3 个电源或若干线路，高压侧以交换功率为主，使长距离输电线路分段，且同时降压向地区用户供电。

##### (3) 地区变电站

地区变电站是一个地区或一个中、小城市的主要变电站，电压等级一般为 110~220kV，是以对地区用户供电为主的变电站。

##### 2. 中性点运行方式

电力系统的中性点接地方式指的是变压器星型绕组中性点与大地的电气连

接方式。由于对各种电压等级电网的运行指标的要求日益提高，电力系统中性点接地方式的正确选择具有越来越重要的实际意义。我国早期的《接地技术规程》中规定，不论电力系统中性点的接地方式如何，只要单相接地电流或同点两相接地时的入地电流大于 500A，则称为大接地短路电流系统；反之，则称为小接地短路电流系统。由于此项规定不够合理，因而后来在修订规程中被删除。

国外电力系统中性点接地方式的划分各有自己的特点。如美国与加拿大根据自己的国情规定，单相接地短路电流值处在三相短路电流的 0~25% 范围内，为小电流接地系统，在 25%~100% 范围内为大电流接地系统；而接地电流大于 100% 并小于 150% 时为非常大电流接地系统，不过，如此划分也存在一些问题。在中压范围内，我国和许多国家的电网普遍采用小电流接地方式，其单相接地电弧能够自行熄灭是一个突出特点，这应当是进行小电流接地系统范围界定的重要条件和依据，而按美、加的划分方法，势必有一部份单相接地故障电弧不能自行熄灭的系统也被化入小电流接地系统之中了，这显然是不合理的。

电力系统的中性点接地方式虽然有多种表现形式，但根据上述原则，基本上可以划分为两大类：凡是需要断路器遮断单相接地故障者，属于大电流接地方式。凡是单相接地电弧能够瞬间自行熄灭者，属于小电流接地方式。对于中性点是否有效接地，美国电机工程师学会第 32 号标准对此做出明确规定：当在系统或系统的指定部分的所有点上，无论运行情况如何以及连接的发电机容量多大，零序电抗对正序电抗之比都不大于 3，而且零序电阻对正序电抗之比不大于 1 时，该电力系统或系统的一部分可被认为是中性点有效接地的。当电力系统不是全部有效接地，而在系统的一个指定部分的所有各点上，上述要求得到满足时，可认为该指定部分是有效接地的。这个标准沿用至今，在国际上得到广泛的认同<sup>[21]</sup>。

我国电网按不同电压等级通常采用以下接地方式：

(1) 330kV 及以上(超高压):中性点采用有效接地方式。

(2) 110kV 及 220kV 以上(高压):中性点通常采用有效接地方式，部分变压器中性点可采用不接地方式。

(3) “66kV (中压)中性点通常采用不接地方式或接地方式，进入 80 年代，在少数城网和若干工矿企业开始采用低电阻或高电阻接地方式。

### 3. 变电站接地网

对变电站进行接地是维护电力系统可靠运行的重要措施。变电所电气设备的接地装置，除了利用自然接地极外，敷设以水平接地体为主的人工接地网<sup>[16,19]</sup>。人工接地网的外缘应闭合，外缘各角应做成圆弧形，圆弧的半径不宜小于均压带间距的一半。接地网内应敷设水平均压带。接地网的埋设深度不宜小于 0.6m，有条件的埋设在 1m 以下，北方冻土区应埋设在冻土层以下。接地网可采用长孔网或方孔网，且方孔网的均压特别是在冲击电流作用下的均压效果要好得多；接

地网的均压带可采用等距或不等距布置。35kV 以上变电所接地网边缘经常有人出入的走道外，应铺设砾石、沥青路面或在地下装设两条与地网相连的均压带。

除此之外，变电站电气装置中下列部位应专门敷设接地线接地：

(1) 发电机座或外壳、出线柜、中性点柜的金属底座和外壳、封闭母线的外壳；

(2) 110kV 及以上的钢筋混凝土构件支座上电气设备的金属外壳；

(3) 箱式变电站的金属箱体；

(4) 直接接地的变压器中性点；

(5) 高压并联抗器中性点所接消弧线圈、接地电抗器、电阻器或变压器等的接地端子；

(6) 避雷器，避雷针、线等的接地端子。

## 2.1.2 避雷线架设

### 1. 避雷线架设

通常来说，线路电压等级愈高，采用避雷线的效果愈好，而且避雷线在线路造价中所占的比重也愈低(一般不超过线路总造价的 10%)。随着线路电压等级的下降，线路的绝缘水平也随之逐级下降，避雷线的防护效果也就逐步降低，以致在很低电压(例如 20kV 以下)时失去实用意义，因此，避雷线一般只用于输电线路中。

从防雷的角度来讲，一般要求 330kV 及以上电压等级线路全线架设双避雷线；220kV 电压等级应全线架设避雷线；110kV 线路一般应全线架设避雷线，但在少雷区或运行经验证明雷电活动轻微的地区可不沿线架设避雷线；未沿全线架设避雷线的 35~110kV 架空送电线路，应在变电所 1~2km 的进线段架设避雷线，并应在变电站进线段，在电缆与架空线的连接处应装设阀形避雷器。连接电缆段的 1 km 架空线路应架设避雷线。

### 2. 避雷线材料

一般避雷线材料为钢绞线或钢芯铝线，钢绞线型号有 GJ35、GJ50、GJ70 等，钢芯铝线 LGJ120、LGJ150、LGJ185 等。随着电力通信的发展，光纤复合架空地线 OPGW(Optical Fiber Composition Overhead Ground Wire)得到越来越广泛的应用。根据国家电网的发展，电力系统光传输网络规划：在 2010 年前，建成“三横四纵”的国家电力光传输的主干网，要求所有新建 500kV 线路均采用 OPGW，形成全国电力的主干光传输网络；要求各地区(包括省、市)建立区域光传输网络(主要是 220kV 线路、110kV 线路和少部分 35kV 线路)，形成覆盖全国的电力传输网络。

### 3. 避雷线接地

按照用途之不同，避雷线悬挂方式有两种，一种是直接悬挂于杆塔上，另一种是经过绝缘子与杆塔相连，即使避雷线对地绝缘。避雷线与电力导线之间会产生电磁耦合和静电场耦合，使得避雷线上感应产生沿线分布的纵向感应电动势和静电感应电压，其电压值可达数千 kV 至数万 V<sup>[30]</sup>。由于避雷线至各相导线的距离一般是不相等的，它们之间的互感就有些差别，因此，尽管在正常情况下三相导线上的负荷电流是平衡的，但在避雷线上仍然要感应出一个纵向电动势。如果避雷线逐杆塔直接接地，则避雷线可通过大地形成回路，形成感应电流回路；若架设双避雷线，则避雷线与避雷线之间也可通过大地形成回路，形成两避雷线的线间环流，两种电流的产生，将使输电线路的附加电能损耗大大增加。对于 220kV 长 200~300km 的送电线路，这个附加电能损失每年约可达几十万度，而对于 500kV 长 300~400km 的线路，每年可损失数百万度。因此，目前我国新设计的超高压线路，一般采用绝缘避雷线以减少能耗。

根据电力行业标准《交流电气装置的接地》(DL/T621-1997)规定，送电线路的架空避雷线须直接联接到变电站的接地网，避雷线在送电线路各个杆塔上也须直接联接到杆塔的接地网(绝缘避雷线除外)。在接地方式上，目前在工程中 OPGW 基本采用逐基接地的方式，而普通避雷线则多采用分段绝缘、一点接地的方式。

## 2.1.3 变电站故障及避雷线分流

### 1. 变电站常见故障分析

在变电站的运行过程中，不可避免地会出现故障。尽管故障出现的几率很小，持续的时间也不长，但产生的后果却往往十分严重。电力系统发生故障时，运行状态将急剧变化，轻则造成电流增大、电压下降，危及设备安全使系统无法正常运行；重则将导致电力系统对用户的正常供电局部甚至全部遭到破坏。

#### (1) 变压器故障

变电站中，变压器是一种重要的设备，一旦发生故障，将会系统的正常供电和安全运行带来严重的影响，但由于它是静止设备，故障机会相对比较少。

#### (2) 线路故障

电力线路是系统的动脉，其运行状态直接决定电力系统的安全和效益。根据故障情况，线路故障一般分为以下几种：

① 断路故障：是指线路的某一个回路非正常断开，使电流不能正常的在回路中流通的故障。

② 短路故障：指的是线路中不同电位的两点被导体短接起来，造成线路不能正常工作的故障。

③ 接地故障：是指线路中某点非正常接地所形成的故障。接地故障有单相

接地、两相接地和三相接地故障；对于中性点不接地系统的单相接地来讲，实际上构成了单相短路故障，从而造成电气绝缘击穿故障等<sup>[39]</sup>。根据短路情况不同，短路故障分为金属性短路、非金属性短路；单相短路、多相短路相间短路等。造成短路故障产生的基本原因是不同电位的导体之间的绝缘击穿或相互短接形成的。造成绝缘击穿的原因有内部原因，也有外部原因，内部原因是由于固体绝缘、油绝缘以及设备壳体内部的电气回路故障和绝缘介质劣化引起的故障；外部原因主要是由于裸露接头压接不良等原因，在大电流作用下，接头温度升高，接触电阻增大，降低或击穿绝缘而造成的。

### (3) 母线故障

母线发电厂和变电站的母线是电力系统中重要的组成元件之一，是系统中汇集电能、分配电能的枢纽点。当母线上发生故障时，将使与母线连接的所有元件短时或长期停电，特别是当枢纽变电站的母线上发生故障时，还可能引起系统稳定性的破坏，造成严重的后果。运行经验表明：大多数母线故障是单相接地，而两相相间短路和三相短路故障所占的比例很小。母线发生接地故障的原因多数是：

- ① 母线绝缘子和断路器套管的闪络。
- ② 装设在母线上的电压互感器及装设在断路器和母线之间的电流互感器发生故障。
- ③ 操作切换时引起空气断路器和隔离开关的支持绝缘子损坏。
- ④ 因为空气中含有损坏绝缘子的气体或固体而导致的闪络。
- ⑤ 由于工作人员的误操作，例如带负荷拉隔离开关产生电弧而引起的母线故障等<sup>[40]</sup>。

## 2. 避雷线分流

当变电站内发生接地短路时，入地短路电流便会有一部分通过避雷线所连接的杆塔接地网流入大地。下面引用国外在一个电压等级为 380kV 的变电站所做的通讯干扰试验来说明避雷线分流的效果。

参考图 2.1，在 B 变电站的接地网内人工造成单相接地短路，测得接地短路点的总短路电流为 1050A，与 M 变电站相连接的一回避雷线分流 550A，另一回在 C 变电站与电源变压器断开的架空线路的避雷线上分得电流为 120A。两回避雷线所分得电流分别占到总电流的 52.4%和 11.4%，也即两回避雷线的分流系数分别为 0.524 和 0.114；由此可见，避雷线在变电站内短路时起着非常大的分流作用。

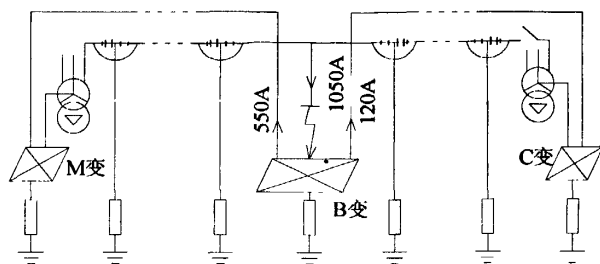


图 2.1 B 变电站内单相接地短路避雷线分流图

由以上分析可知，当站内发生接地短路故障时，短路电流很大一部分通过避雷线经线路杆塔和避雷线所连对侧变电站流入大地。

## 2.2 序分量模型法

### 2.2.1 序分量模型法介绍

在序分量模型中，假设装有避雷线的所有跨距的长度都相等，并且按照此假定得出各段避雷线的有效阻抗都相等；各基杆塔接地电阻值和变电站接地网接地电阻值都相等，其值取接地网的接地电阻，即近似认为接地网是“避雷线-杆塔”接地系统中序号为零的一个杆塔。此时可以认为流经接地网的入地短路电流等于流经“避雷线-杆塔”接地系统零号杆的电流，其余的电流则由不包括零号杆在内的“避雷线-杆塔”接地系统所分流，其模型等值图如图 2.2 所示。图 2.2 中， $I_{max}$  为最大接地短路电流，A； $I_n$  为经变电站变压器接地中性点流走的电流，A； $I$  为流入变电站地网的入地短路电流，A； $I_k$  为避雷线分走的电流，A； $Z_{bo}$  为避雷线平均档距的零序阻抗， $\Omega$ ； $Z_{m0}$  为架空输电线路导线与避雷线间平均档距的零序互感抗， $\Omega$ ； $R_g$  为杆塔接地电阻和变电站接地网的接地电阻， $\Omega$ 。

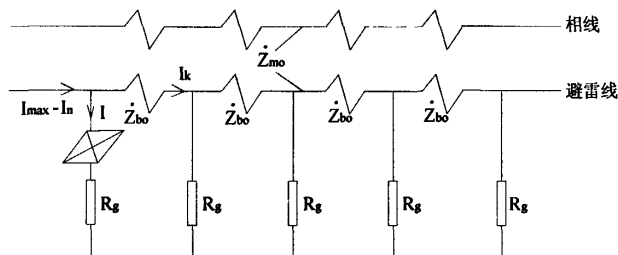


图 2.2 避雷线-杆塔系统等值图

参照图 2.2，可以写出具有无限个档距的“避雷线-杆塔”接地系统任一杆塔流过的电流为<sup>[11]</sup>：

$$I_{gn} = 3I_{g0}(1 - e^{-\beta})e^{-\beta n} \quad (2.1)$$

当  $n=0$  时，即流经接地网的入地短路电流为：

$$I = I_{g0}(1 - e^{-\beta}) \quad (2.2)$$

流经“避雷线-杆塔”（不包括零号杆塔）接地系统的电流为：

$$I_k = I_{\max} - I_n - 3I_{g0}(1 - e^{-\beta}) \quad (2.3)$$

因为流经包括接地网在内的整个系统的电流  $I_{\max} - I_n$  应等于流经避雷线上的 3 倍零序强制电流  $I_{k0}$  与流经地中（由杆塔流入大地）的 3 倍零序“空间-自由电流”  $I_{g0}$  自由分量之和，即

$$I_{\max} - I_n = 3I_{k0} + 3I_{g0} \quad (2.4)$$

流经避雷线上的零序强制电流和零序电流之比等于导线、避雷线间零序互感抗与避雷线的零序阻抗之比，即

$$\frac{3I_{b0}}{I_{\max} - I_n} = \frac{\dot{Z}_{m0}}{\dot{Z}_{b0}} \quad (2.5)$$

由式(2.3)、式(2.4)及式(2.5)，则可求得在变电站接地网内发生短路时避雷线分流系数的一般求解公式：

$$Ke = \frac{I_k}{I_{\max} - I_n} = \frac{3I_{b0} + 3I_{g0}e^{-\beta}}{I_{\max} - I_n} = \left| \frac{\dot{Z}_{m0} + (1 - \frac{\dot{Z}_{m0}}{\dot{Z}_{b0}})e^{-\beta}}{\dot{Z}_{b0}} \right| \quad (2.6)$$

$$e^{-\beta} = \frac{1 - \sqrt{\frac{b}{4+b}}}{[1 + \sqrt{\frac{b}{4+b}}]} \quad (2.7)$$

$$b = \frac{\dot{Z}_{b0}}{3R_g} \quad (2.8)$$

$$\dot{Z}_{m0} = (0.15 + j0.189 \ln \frac{D_g}{D_{1-2}}) \frac{L_{av}}{1000} \quad (2.9)$$

式(2.7)、(2.8)、(2.9)中，

$L_{av}$ —线路平均档距，m；

$R_g$ —接地网的工频接地电阻， $\Omega$ ；

$\dot{Z}_{m0}$ —架空输电线路导线与地线间平均档距的零序互感抗， $\Omega$ ；

$D_{1-2}$ —避雷线对导线的几何平均距离，m；

$\dot{Z}_{b0}$ —避雷线平均档距的零序阻抗， $\Omega$ ；

$D_g$ —避雷线对地的等价镜像距离，m。

$D_g$ 的表达式为：

$$D_g = \frac{1.94 \times 10^{-3}}{\sqrt{\frac{f}{\rho_{av}} \times 10^{-11}}} \quad (2.10)$$

式中， $f$ —频率，取 50Hz；

$\rho_{av}$ —线路所经地段的土壤电阻率平均值， $\Omega \cdot m$ 。

双避雷线时：

$$D_{1-2} = \sqrt[3]{D_{1-A}D_{1-B}D_{1-C}D_{2-A}D_{2-B}D_{2-C}} \quad (2.11)$$

单避雷线时：

$$D_{1-2} = \sqrt[3]{D_{1-A}D_{1-B}D_{1-C}} \quad (2.12)$$

式 (2.11)、(2.12) 中，

$D_{1-A}D_{1-B}D_{1-C}$ —1 号避雷线对导线 A、B、C 相的距离，m；

$D_{2-A}D_{2-B}D_{2-C}$ —2 号避雷线对导线 A、B、C 相的距离，m。

$Z_{bo}$  表达式为：

$$Z_{bo} = \left( \frac{3r}{p} + 0.15 + j0.189 \ln \frac{D_g}{R_b} \right) \frac{L_{av}}{1000} \quad (2.13)$$

式(2.13)中， $p$ —避雷线根数；

$r$ —避雷线电阻， $\Omega/km$ ；

$R_b$ —等价避雷线的几何平均半径，m。

双避雷线时： $R_b = \sqrt{r_m D_m}$

单避雷线时： $R_b = r_m$

其中， $D_m$  为避雷线间的距离，m；

当为钢芯铝线时， $r_m = 0.95r$ ， $r$  为避雷线半径，m；

当为钢绞线时， $r_m = r \times 10^{-6.9X_0}$ ， $X_0$  为单位长度钢绞线的内感抗， $\Omega/km$ 。

其值见表 2.1：

表 2.1 部分钢绞线、钢芯铝线的电阻和内感抗

钢绞线 GJ	截面 $s$ /半径 $r$ ( $mm^2/mm$ )	35/3.9	50/4.6	70/5.75
	电阻 $R_0$ ( $\Omega/km$ )	4.6	3.5	2.2
	内感抗 $X_0$ ( $\Omega/km$ )	2.4	1.5	1.2
钢芯铝线 LGJ	截面 $s$ /半径 $r$ ( $mm^2/mm$ )	120/7.6	150/8.5	185/9.5
	电阻 $R_0$ ( $\Omega/km$ )	0.27	0.21	0.17



## 2.2.2 序分量模型法分析

传统序分量法采用简化的电路模型，在序分量模型中的数据处理时，将接地网接地电阻和所有杆塔接地电阻认为相等，并且设定所有档距的避雷线长度和有效阻抗值都相等，这在现实情况中是不可能出现的；该序分量模型计算时没有考虑线路换位、避雷线和电缆护套接地等实际情况，故障条件下各相电量之间的关系不对称时传统序分量法便计算很不准确甚至无法进行求解。

另外，单从传统序分量法的计算公式可以看出，避雷线分流系数计算非常麻烦且不现实，主要存在以下问题致使在实际计算上无法进行或计算结果不确切：

(1) 土壤电阻率平均值  $\rho_{av}$  无法确定。一般来说，线路都较长，会经过各种不同的地形。如果线路所经地段为平原地带，还较便于进行土壤电阻率的测量、计算，取其平均值；如果线路所经地段地形复杂，地势变化多样，土壤电阻率的测量、取值将非常困难，因每基杆塔所处地段的土壤电阻率会有较大差异，土壤电阻率平均值也不便计算，这时式(2.9)中的避雷线对地的等价镜像距离  $D_g$  将无法取值。

(2) 避雷线对导线的几何距离  $D_{1-2}$  不便取值。该参数会随着架空输电线路杆塔的塔形变化而变化，并不是一个定值，因而取值该参数非常麻烦，对于不同的线路需要进行重新测量、计算。

(3)  $D_g$  和  $D_{1-2}$  的不便取值使架空输电线路导线与避雷线间平均档距的零序互感抗  $\dot{Z}_{m0}$  不易确定。在测试线路参数时，该参数也不易测试，因而只能是粗略地估算，而且随着架空输电线路的架设方式的不同，该参数也会发生变化。

(4) 截面积的影响。电缆外护套两端均与变电站的接地网相连，变电站内接地短路，其外护套能较好地作为回流线，减少接地短路入地电流，因而，不同截面积、电缆水平排列、间距对侧站接地网电阻等的取值也会对分流系数的计算造成影响。避雷线对导线的几何距离会随着杆塔的塔形变化而变化并不是一个定值，因而影响计算值。

(5) 未考虑参数的影响。除了线路的回数、长度及对侧发电厂、变电所接地装置的接地电阻等一些参数外，还有一些参数在避雷线分流系数的计算中也没加考虑<sup>〔42~44〕</sup>。比如线路所经各基杆塔的接地电阻等参数均会对系统的短路电流分布造成影响，即便对于同一种塔形结构，位于不同位置的相线发生单相接地短路时，避雷线分流系数的值都会有较大的差别。但这些在计算中并没有考虑，因而其计算结果的准确度值得置疑。

## 2.3 相分量模型法

为解决传统的序分量法未考虑到线路换位等实际情况使得各相电量之间的关系不对称等，加拿大 F.Dawalibi 博士提出了相参数模型，该模型能很好的反映实际情况，准确度更高，可适用于相对复杂的输电系统网络短路时短路故障电流的分布计算；其中，F.Dawalibi 在 1980 年提出的相分量模型仅限于分析单相电路的短路，相应的分析方法为普通双侧消去法；1984 年 F.Dawalibi 提出的相分量模型如图 2.3 所示，除了可以分析单相短路，还可以分析两相和多相电路的短路，以及平行管道的电流分布，相应的分析方法为广义双侧消去法。

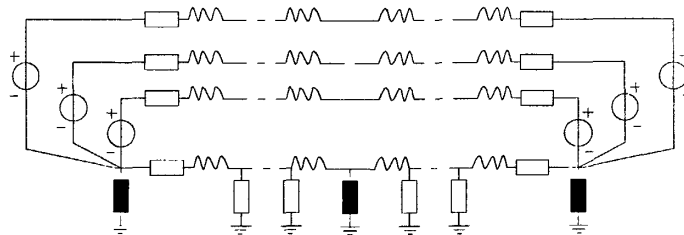


图 2.3 相分量模型

### 2.3.1 应用回路电流的广义双侧消去法

基于相分量模型，可以通过应用回路法形成双侧电压消去法来求得短路电流分布规律，进而求出避雷线分流系数的方法。广义双侧消去法设定的待求量是回路电流，其基本回路如图 2.4 所示。按避雷线线接地的档距分段，共分  $n$  段，第一段为短路点侧，第  $n$  段为电源侧。规定有关符号表示意义如下：

$Z_{i,k}$ —第  $k$  段第  $i$  相线以大地为回路时第  $i$  相导线自阻抗；

$Z_{g,k}$ —第  $k$  段避雷线  $g$  以大地为回路时避雷线  $g$  自阻抗；

$Z_{ij,k}$ —第  $k$  段第  $i$  相线回路与第  $j$  相线回路之间的互阻抗；

$Z_{gj,k}$ —第  $k$  段第  $g$  相线回路与第  $j$  相线回路之间的互阻抗；

$Z_{si}$ —第  $i$  相电源内阻抗；

$E_i$ —第  $i$  相电源电动势；

$r_0, I_0$ —短路处杆塔的接地阻抗和流过其中的电流；

$r_{F,i}, I_{F,i}$ —短路处第  $i$  相线与避雷线之间的阻抗和流过其中的电流；

$C_{i,k}$ —第  $k$  段第  $i$  相线的横向阻抗。

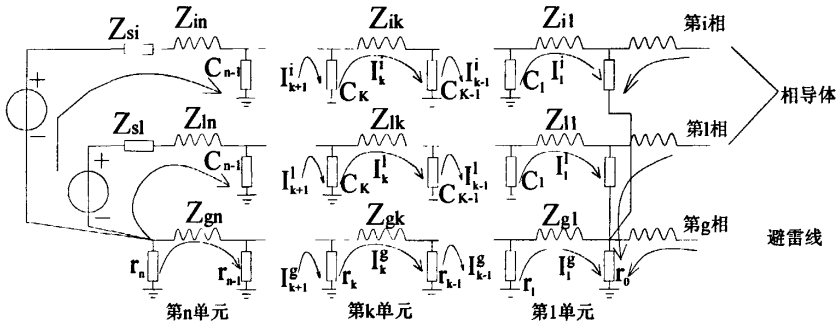


图 2.4 应用回路电流分析的等效网络图

按基尔霍夫电压定律，对于第  $k$  段第  $l$  相线-大地网孔有：

$$\sum_{j \neq l} Z_{lj,k} I_k^{(j)} + (C_{l,k-1} + Z_{l,k} + C_{l,k}) I_k^{(l)} - C_{l,k-1} I_{k-1}^{(l)} - C_{l,k} I_{k+1}^{(l)} = 0 \quad (2.14)$$

对于第  $k$  段避雷线-大地网孔有：

$$\sum_{j \neq g} Z_{gj,k} I_k^{(j)} + (r_{k-1} + Z_{g,k} + r_k) I_k^{(g)} - r_{k-1} I_{k-1}^{(g)} - r_k I_{k+1}^{(g)} = 0 \quad (2.15)$$

综合考虑，可将以上两式的矩阵形式简记为：

$$[S_k][I_k] = [A_k][I_{k-1}] + [B_k][I_{k+1}] \quad (2.16)$$

同理，在电源侧  $k=n$  段，对于第  $l$  相线-大地网孔有：

$$\sum_{j \neq l} Z_{lj,k} I_n^{(j)} + (C_{l,n-1} + Z_{l,n} + Z_{s,l}) I_n^{(l)} + \sum_j r_n I_n^{(j)} - C_{l,n-1} I_{n-1}^{(l)} = E_l \quad (2.17)$$

对于避雷线-大地网孔有：

$$\sum_{j \neq g} Z_{gj,n} I_n^{(j)} + (r_{n-1} + Z_{g,n}) I_n^{(g)} + \sum_j r_n I_n^{(j)} - r_{n-1} I_{n-1}^{(g)} = 0 \quad (2.18)$$

综合考虑，可将以上两式的矩阵形式简记为：

$$[S_n][I_n] = [A_n][I_{n-1}] + [E] \quad (2.19)$$

类似的，在短路点侧，即  $k=l$  段，对于  $l$  相线-大地网孔有：

$$\sum_{j \neq l} Z_{lj,l} I_l^{(j)} + (C_{l,1} + Z_{l,1} + Z_{F,l}) I_l^{(l)} + r_{F,l} I_{-1}^{(j)} + \sum_j r_0 I_l^{(j)} - C_{l,1} I_2^{(l)} + \sum_j r_0 I_{-1}^{(j)} = 0 \quad (2.20)$$

对于避雷线-大地网孔有：

$$\sum_{j \neq g} Z_{g,l} I_l^{(j)} + (r_1 + Z_{g,l}) I_l^{(g)} + \sum_j r_0 I_l^{(j)} - r_0 I_2^{(g)} + \sum_j r_0 I_{-1}^{(j)} = 0 \quad (2.21)$$

综合考虑，可将以上两式的矩阵形式简记为：

$$[S_l][I_l] = [B_l][I_2] - [H_l][I_{-1}] \quad (2.22)$$

根据图 2.4 的电流参考方向，回路电流  $[I_l]$ 、 $[I_{-1}]$  之和就是短路电流  $[I_0]$ ，为了在左侧网络消去的过程中，不涉及右侧网络的回路电流，可直接用短路电流

$[I_0]$ 替代式(5-12)中的 $[I_{-1}]$ 。即把 $[I_1]+[I_{-1}]=[I_0]$ 作为一个附加的方程代入(它就是短路点处的边界条件),于是有:

$$[S_1][I_1]=[B_1][I_2]-[H_1]([I_0]-[I_1]) \quad (2.23)$$

上式可进一步转化为:

$$[S_1][I_1]=[B_1][I_2]-[H_1][I_0] \quad (2.24)$$

需要指出的是,这里的 $[S_1]$ 已合并了 $[H_1]$ 部分,与式(2.23)中已有不同。

双侧消去法的计算过程分往返两个方向,以寻求电流之间的递推关系,可先由电源向短路点方向消去,在电源一侧有:

$$[S_n][I_n]=[A_n][I_{n-1}]+[E] \quad (2.25)$$

$$[S_{n-1}][I_{n-1}]=[B_{n-1}][I_n]+[A_{n-1}][I_{n-2}] \quad (2.26)$$

于是有:

$$[I_n]=[S_n]^{-1}[A_n][I_{n-1}]+[S_n]^{-1}[E] \quad (2.27)$$

$$[I_{n-1}]=[S_{n-1}]^{-1}[B_{n-1}][I_n]+[S_{n-1}]^{-1}[A_{n-1}][I_{n-2}] \quad (2.28)$$

由式(2.27)和式(2.28)消去 $[I_n]$ 得:

$$[I_{n-1}]=[S_{n-1}]^{-1}[B_{n-1}]( [S_n]^{-1}[A_n][I_{n-1}]+[S_n]^{-1}[E] )+[S_{n-1}]^{-1}[A_{n-1}][I_{n-2}] \quad (2.29)$$

$$(E-[S_{n-1}]^{-1}[B_{n-1}][S_n]^{-1}[A_n])[I_{n-1}]=[S_{n-1}]^{-1}[A_{n-1}][I_{n-2}]+[S_{n-1}]^{-1}[B_{n-1}]( [S_n]^{-1}[E] ) \quad (2.30)$$

$$[I_{n-1}]=(E-[S_{n-1}]^{-1}[B_{n-1}][S_n]^{-1}[A_n])^{-1}[S_{n-1}]^{-1}[A_{n-1}][I_{n-2}]+(E-[S_{n-1}]^{-1}[B_{n-1}][S_n]^{-1}[A_n])^{-1}[S_{n-1}]^{-1}[B_{n-1}][S_n]^{-1}[E] \quad (2.31)$$

式(2.31)式可记为:

$$[I_{n-1}]=[ \alpha_{n-1} ][I_{n-2}]+[ \lambda_{n-1} ] \quad (2.32)$$

式(2.32)中, $[I_{n-1}]$ 和 $[I_{n-2}]$ 为未知量, $[ \alpha_{n-1} ]$ 和 $[ \lambda_{n-1} ]$ 为已知量, $[ \lambda_{n-1} ]$ 反映了边界值 $[E]$ 的影响。同理,在第 $k$ 段,有递推规律:

$$[I_k]=[ \alpha_k ][I_{k-1}]+[ \lambda_k ] \quad (2.33)$$

然后,从短路点向电源侧消去,在短路点一侧有:

$$[S_1][I_1]=[B_1][I_2]-[H_1][I_0] \quad (2.34)$$

$$[S_2][I_2]=[B_2][I_3]+[A_2][I_1] \quad (2.35)$$

由式(2.34)和式(2.35)可得:

$$[I_1]=[S_1]^{-1}[B_1][I_2]-[S_1]^{-1}[H_1][I_0] \quad (2.36)$$

$$[I_2] = [S_2]^{-1}[B_2][I_3] + [S_2]^{-1}[A_2][I_1] \quad (2.37)$$

将式(2.36)和式(2.37)中消去 $[I_1]$ 得:

$$[I_2] = [S_2]^{-1}[B_2][I_3] + [S_2]^{-1}[A_2]([S_1]^{-1}[B_1][I_2] - [S_1]^{-1}[H_1][I_0]) \quad (2.38)$$

$$(E - [S_2]^{-1}[A_2][S_1]^{-1}[B_1])[I_2] = [S_2]^{-1}[B_2][I_3] - [S_2]^{-1}[A_2][S_1]^{-1}[H_1][I_0] \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} [I_2] &= (E - [S_2]^{-1}[A_2][S_1]^{-1}[B_1])^{-1}[S_2]^{-1}[B_2][I_3] - \\ &(E - [S_2]^{-1}[A_2][S_1]^{-1}[B_1])^{-1}[S_2]^{-1}[A_2][S_1]^{-1}[H_1][I_0] \end{aligned} \quad (2.40)$$

式(2.40)可记为:

$$[I_2] = [\eta_2][I_3] + [\delta_2][I_0] \quad (2.41)$$

式(2.41)中,  $[I_2]$ 和 $[I_3]$ 为未知量,  $[\eta_2]$ 和 $[\delta_2]$ 为已知量,  $[\delta_2]$ 反映了边界值 $[I_0]$ 的影响。同理, 在第 $k-1$ 段, 有递推规律:

$$[I_{k-1}] = [\eta_{k-1}][I_k] + [\delta_{k-1}][I_0] \quad (2.42)$$

联合式(2.33)和式(2.42)得:

$$[I_k] = [\alpha_k]([\eta_{k-1}][I_k] + [\delta_{k-1}][I_0]) + [\lambda_k] \quad (2.43)$$

$$[I_k] = (E - [\alpha_k]([\eta_{k-1}])^{-1}[\lambda_k] + E - [\alpha_k]([\eta_{k-1}])^{-1}[\alpha_k][\delta_{k-1}])[I_0] \quad (2.44)$$

式(2.44)可记为:

$$[I_k] = [U_k] + [V_k][I_0] \quad (2.45)$$

由于 $[\lambda_k]$ 反映了边界值 $[E]$ 的影响, 所以 $[U_k]$ 反映了电源对 $[I_k]$ 的影响, 而 $[V_k][I_0]$ 则反映了边界电流 $[I_0]$ 对 $[I_k]$ 的影响。这表明, 任一段上的电流 $[I_k]$ 可以由两侧的边界值表示, 电源分量是已知量, 剩下的问题就是确定边界电流 $[I_0]$ 。

根据 KCL, 短路点左边网络和右边网络的第一段满足:

$$[I_0] = [I'_1] + [I''_1] \quad (2.46)$$

式(2.46)中,  $l$ 和 $r$ 分别表示左边和右边网络。由上面的推导可知, 对于短路点左右边网络的第1段, 有:

$$\begin{cases} [I'_1] = [U'_1] + [V'_1][I_0] \\ [I''_1] = [U''_1] + [V''_1][I_0] \end{cases} \quad (2.47)$$

将式(2.47)代入式(2.46)可得:

$$[I_0] = (E - [V'_1] - [V''_1])^{-1}([U'_1] + [U''_1]) \quad (2.48)$$

得到了 $[I_0]$ 后即可根据式(2.45)计算得到各段的电流 $[I_k]$ 。

以  $I_f$  表示各相线短路电流之和，则各段避雷线分流系数  $K_i$  为：

$$K_i = \frac{I_k}{I_f} \quad (2.49)$$

### 2.3.2 应用节点电压的广义双侧消去法

如果利用节点电压为变量就也可以形成双侧电压消去法。基于相分量模型的避雷线分流电流的等效电路模型如图 2.5 所示。图 2.5 中， $\dot{U}_i$  表示对应杆塔和变电站接地网的电位，V； $\dot{I}_{si}$  表示对应段避雷线流过的等效电流，A； $\dot{I}_{gi}$  为对应段杆塔的入地电流，A； $R_0$  和  $R_n$  分别表示短路变电站和线路对端变电站接地网的接地电阻， $\Omega$ ； $R_1, R_2, \dots, R_{n-1}$  分别为线路所经各基杆塔的接地电阻， $\Omega$ ； $\dot{E}_0, \dot{E}_1, \dots, \dot{E}_{n-1}$  分别为各段避雷线等效电动势，V； $Z_0, Z_1, \dots, Z_{n-1}$  分别为各段避雷线的自身阻抗， $\Omega$ 。

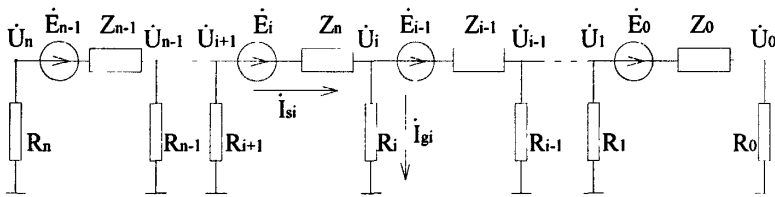


图 2.5 应用节点电压分析的等效网络

对节点  $i$ ，应用 KCL，有：

$$\dot{U}_i = A_i \dot{U}_{i-1} + B_i \dot{U}_{i+1} + C_i \dot{I}_p \quad (2.50)$$

式(2.50)中， $A_i, B_i$  为与杆塔接地电阻有关的系数， $C_i \dot{I}_p$  反映了等效电动势  $\dot{E}_i$  的作用， $C_i$  为与杆塔接地电阻、避雷线分流阻抗以及相线与避雷线之间的互感阻抗有关的系数。

求得两端节点电位后，再利用递推公式计算任一杆塔电位，进一步得到各段避雷线的等效电流  $\dot{I}_{si}$  为：

$$\dot{I}_{si} = \frac{\dot{U}_{i+1} + \dot{E}_i - \dot{U}_i}{Z_i} \quad (2.51)$$

以  $\dot{I}_F$  表示各相线短路电流之和，则各段避雷线分流系数  $K_{Si}$  为：

$$K_{Si} = \frac{\dot{I}_{Si}}{\dot{I}_F} \quad (2.52)$$

### 2.3.3 相分量模型法分析

从计算原理上来分析，双侧消去的顺利进行是以线路的电气结构一致为前提的，不能跨越连接不同电气结构线路的节点展开，对于导体数目不同的线路互联结构，就得增设虚拟线路，大大增大计算量，也降低计算准确性。另外，从计算模型和计算过程所涉及到的参数来看，很多参数都是未知量，因而并没有多大的实用价值。以基于相分量模型的应用节点电压双侧消去法为例分析，主要存在以下几个方面的问题：

(1) 对应杆塔和变电站接地网的电位  $\dot{U}_i$ 、对应段避雷线流过的等效电流  $\dot{I}_{Si}$ 、

对应段避雷线的等效电动势  $\dot{E}_i$ 、对应段杆塔的入地电流  $\dot{I}_{gi}$  不易确定。这些参数在计算中不便于测量取值，对于每条线路的情况都不一样；即便是对于同一条线路，只要中间杆塔的布置发生变化，这些参数也会发生变化，不易确定，从而影响到计算。

(2) 参数  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  无法确定。在计算中，只确定  $A_i$ 、 $B_i$  为与杆塔接地电阻有关的系数， $C_i$  为与杆塔接地电阻、避雷线分流阻抗以及相线与避雷线之间的互感阻抗有关的系数。但至于  $A_i$ 、 $B_i$  与杆塔接地电阻有何种关系， $C_i$  与杆塔接地电阻、避雷线分流阻抗以及相线与避雷线之间的互感阻抗有何关系，这些都无法确定。因此，参数  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  都是些未知参数，在计算中是无法确定的。

(3) 由计算变电站和避雷线分走电流的等效网络图 2.5 可以看出，此等效网络图考虑参数过多，模型过于复杂，不便于计算。并且在计算中，所考虑的一些参数都无法确定，或者不易确定，致使避雷线分流系数的计算无法进行。

## 2.4 本章小结

本章对变电站运行及故障进行了介绍，并主要对目前常用的两种避雷线分流系数分析计算方法进行了分析。

(1) 在电压等级较高系统中一般采用中性点有效接地方式，同时也大部分都架设了避雷线，在站内发生接地短路故障时，避雷线对短路电流起到很大的分流作用。

(2) 传统计算避雷线分流系数的序分量模型法采用了简单的理想化模型,没有考虑到线路换位等实际情况,推导出的计算公式涉及参数比较多、计算比较麻烦,且有些参数很难取值,使得序分量法不具有实用性。

(3) 加拿大 F.Dawalibi 博士提出的相参数模型考虑到了线路换位等实际情况,准确度较高,能适较复杂书店系统网络短路分析。但基于相分量模型的双侧消去法要求线路的电气结构一致,不能跨越所连不同电气结构线路的节点展开,具有一定局限性;同时,计算公式也相当繁琐,且无法摆脱很多参数不易取值的缺陷,同样不具有实际性。



### 第三章 避雷线分流阻抗模型法研究

变电站内发生接地短路故障时，短路电流除了部分经中性点回流外，主要通过变电站接地网和避雷线-杆塔接地系统流入大地。避雷线-杆塔系统的等效阻抗即避雷线分流阻抗很大程度上影响着避雷线分流系数的大小。

#### 3.1 站内短路电流分布研究

##### 3.1.1 站内短路时短路电流分布

以架设一回避雷线的中性点有效接地变电站内发生接地短路故障为例，其短路电流分布模型如图 3.1 所示：

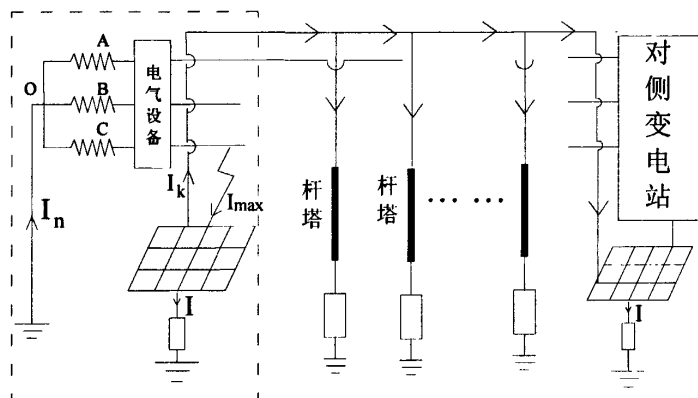


图 3.1 变电站内接地短路时短路电流分布示意图

避雷线与变电站接地网和避雷线-杆塔系统均直接连接，而杆塔是直接接地的，变压器中性点与接地网有效连接。那么，变压器中性点、短路故障点和避雷线-杆塔系统都可以通过大地形成回路。最大接地短路电流  $I_{\max}$  由变电站变压器接地中性点回流的电流  $I_n$ 、经避雷线-杆塔接地系统分走的故障电流  $I_k$  和流经变电站接地网的入地短路电流  $I$  三部分组成，即

$$I_{\max} = I + I_n + I_k \quad (3.1)$$

式中， $I_{\max}$ —站内接地短路时的最大接地短路电流，A；

$I$ —流经变电站接地装置的入地短路电流，A；

$I_n$ —经中性点回流的接地短路电流，A；

$I_k$ —流经避雷线的故障电流即避雷线分流电流，A。

其中，避雷线-杆塔系统分走的电流即避雷线分流电流  $I_k$  是从短路变电站出来经从短路变电站至对侧变电站之间的避雷线所连各基杆塔逐塔入地，最后由对侧变电站接地网入地。

### 3.1.2 避雷线-杆塔系统研究

#### 1. 避雷线-杆塔系统模型

狭义的避雷线-杆塔系统主要由两大部分构成：各基杆塔和各杆塔档距之间的避雷线。则避雷线-杆塔接地系统的阻抗值便主要由各基杆塔接地电阻和各档避雷线的阻抗组成。其中，杆塔接地电阻值主要受接地装置和杆塔所在位置土壤电阻率影响；避雷线阻抗除受避雷线自身参数影响外，还受各相导线的互感影响，若是两根避雷线，则还受两避雷线之间的互感影响。对于有杆塔总基数为  $n$  的逐塔接地的避雷线-杆塔系统，若将各档避雷线均用其等效阻抗表示后，避雷线-杆塔系统电路模型如图 3.2 所示：

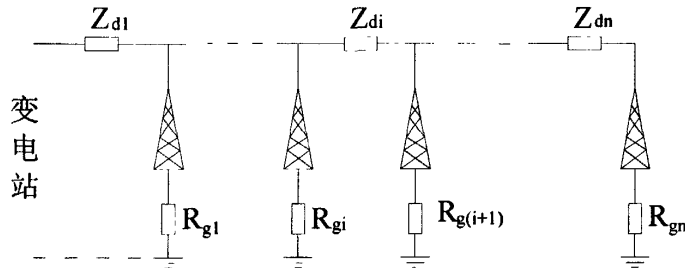


图 3.2 狭义避雷线-杆塔系统模型

其中， $Z_{d1}$  表示变电站与第一基杆塔之间避雷线也即第一档避雷线的等效阻抗， $Z_{di}$  表示第  $i$  档避雷线的等效阻抗， $Z_{dn}$  表示最后两基杆塔之间档距避雷线的等效阻抗； $R_{g1}$  表示第一基杆塔的接地电阻； $R_{gi}$  和  $R_{g(i+1)}$  分别表示第  $i$  基和第  $i+1$  基杆塔的接地电阻； $R_{gn}$  表示第  $n$  基杆塔的接地电阻。

实际上，避雷线另一端与对侧变电站接地网相连，可以将对侧变电站看成避雷线所连的最后一基杆塔。那么，广义的避雷线-杆塔系统便包括：各基杆塔和各杆塔档距之间的避雷线以及避雷线所连的对侧变电站接地网，如图 3.3 所示：

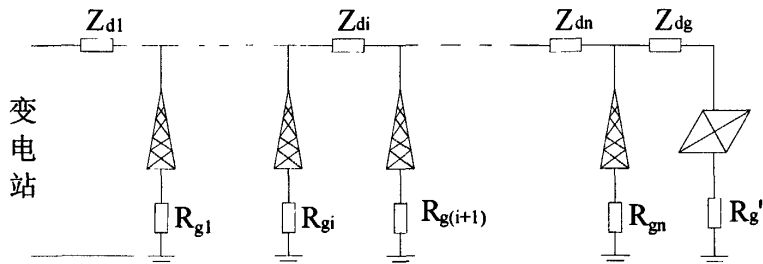


图 3.3 广义避雷线-杆塔系统等值模型

其中， $Z_{dg}$  表示最后一基杆塔与避雷线所连对侧变电站之间档距避雷线的等

效阻抗， $R_g'$ 表示避雷线所连对侧变电站的接地电阻。

若避雷线不采用逐塔接地方式，则可跳过与避雷线绝缘的杆塔，将被绝缘杆塔两侧的杆塔之间避雷线看做是一档。

## 2. 杆塔接地电阻

在接地工程中，一个接地装置有可能由若干个水平接地体组成各种不同的形状。当接地体的总长度相等时，不同的形状就会有不同的接地电阻值，这是因为接地体之间的相互屏蔽作用造成的。当水平接地体组成不同形状时，其相互间的屏蔽效果不一样，考虑到当接地体的总长度 $l$ 相等时，直线形电极将具有最小的接地电阻，其他各种水平接地体均会受到不同程度的屏蔽。因此，包括放射形接地极在内的各种水平接地体的接地电阻都可以在直线形电极的基础上用一屏蔽系数 $A$ 进行修正，即可写成式(3.2)或式(3.3)。

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{l^2}{hd} - 0.6 + A \right) \quad (3.2)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{l^2}{hd} + B \right) \quad (3.3)$$

式中， $l$ —接地体的总长度，m；

$h$ —水平接地体的埋深，m；











$d$ —水平接地体的直径，m；

$A$ —屏蔽系数；

$B$ —水平接地体的形状系数。

屏蔽系数 $A$ 和形状系数 $B$ 值列于表3.1中：

表 3.1 水平接地体的形状

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
水平接地体形状										
屏蔽系数 A	0	0.42	0.60	1.08	1.49	1.60	2.79	3.63	5.31	6.25
形状系数 B	-0.6	-0.18	0	0.48	0.89	1	2.19	3.03	4.71	5.65

实际的接地装置往往是由若干条水平接地体和若干个垂直接地体并联组成，当垂直接地棒由埋设在地中的水平接地体相连时，水平和垂直接地体组合的接地电阻为：

$$R = \frac{V}{I} = \frac{R_{11}R_{22} - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2R_{12}} \quad (3.4)$$

式中,  $R_{11}$ —垂直接地体单独存在时的接地电阻即垂直接地体自阻,  $\Omega$ ;

$R_{22}$ —水平接地体单独存在时的接地电阻即水平接地体自阻,  $\Omega$ ;

$R_{12}$ —水平接地体和垂直接地体间的互阻,  $\Omega$ 。

### 3. 避雷线等效阻抗模型

变电站内发生接地短路时,任意两基杆塔和两塔之间的避雷线均可通过大地形成回路,形成感应电流回路,则避雷线等效阻抗便要考虑相导线与避雷线之间的互阻抗;若架设双根避雷线,则避雷线与避雷线之间也可通过大地形成回路,形成两避雷线的线间环流,则避雷线等效阻抗除了要考虑避雷线与向导线之间互阻抗外,还要考虑两根避雷线之间的互阻抗。

#### (1) 单避雷线等效阻抗

架设单根避雷线时,避雷线等效阻抗主要由自身直流电阻、自感抗和相导线(主要为短路相)与避雷线之间的互阻抗组成。单根避雷线时,以第  $i$  个网孔为例,基杆塔之间的避雷线等值电路如图 3.4 所示:

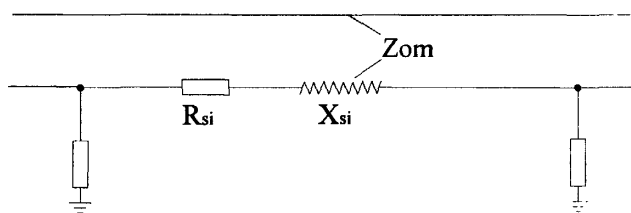


图 3.4 单根避雷线时第  $i$  个网孔等值电路

图 3.4 中,  $R_{si}$  表示第  $i$  档避雷线自身直流电阻,  $X_{si}$  表示第  $i$  档避雷线自感抗,  $Z_{om}$  表示短路相导线与第  $i$  档避雷线之间的互阻抗。

由电路理论可得第  $i$  档避雷线的有效阻抗  $Z_{sdi}$  为:

$$Z_{sdi} = R_{si} + jX_{si} + Z_{om} \quad (3.5)$$

$$Z_{om} = L_i(0.05 + j0.145 \lg(D_e / D)) \quad (3.6)$$

$$D_e = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (3.7)$$

式中,  $D$ —导线和避雷线间几何均距,  $m$ ;

$D_e$ —地中电流等值深度,  $m$ ;

$\rho$ —大地电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;

$f$ —频率,  $50\text{Hz}$ ;

$L_i$ —第  $i$  档避雷线长度,  $m$ 。

#### (2) 双避雷线等效阻抗

架设两根避雷线时,避雷线的等效阻抗除了包括自身直流电阻、自感抗和相

导线与避雷线之间的互阻抗外，还包括两根避雷线之间的互感抗，以架设两根不同避雷线为例，等值电路如图 3.5 所示：

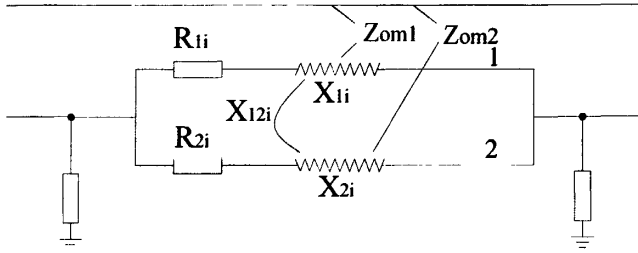


图 3.5 双避雷线时第  $i$  个网孔等值电路

图 3.5 中， $R_{1i}$  表示第  $i$  档避雷线 1 的自身直流电阻； $X_{1i}$  表示第  $i$  档避雷线 1 的自感抗； $R_{2i}$  表示第  $i$  档避雷线 2 的自身直流电阻； $X_{2i}$  表示第  $i$  档避雷线 2 的自感抗； $Z_{om1}$  表示短路相导线与第  $i$  档避雷线 1 之间的互阻抗； $Z_{om2}$  表示短路相导线与第  $i$  档避雷线 2 之间的互阻抗； $X_{12i}$  表示第  $i$  档避雷线 1 和 2 之间的互感抗。

消去相线与避雷线之间的互感和避雷线 1 与避雷线 2 之间的互感，可得到图 3.6 所示等值电路。

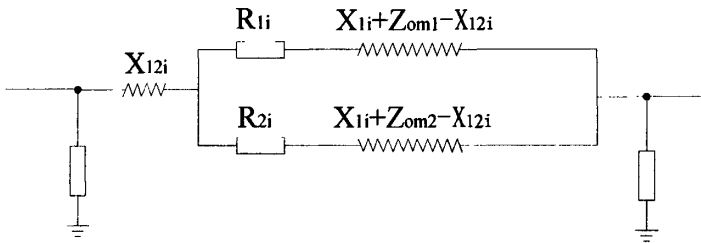


图 3.6 变换后的等值电路图

由电路理论知识可知，相关参数存在如下计算关系：

$$Z_{1i} = R_{1i} + j(X_{1i} + Z_{om1} - X_{12i}) \quad (3.8)$$

$$Z_{2i} = R_{2i} + j(X_{2i} + Z_{om2} - X_{12i}) \quad (3.9)$$

则双避雷线的等效阻抗为：

$$Z_{di} = jX_{12i} + Z_{1i} // Z_{2i} = jX_{12i} + Z_{1i}Z_{2i} / (Z_{1i} + Z_{2i}) \quad (3.10)$$

各参数具体计算如下：

$$X_{1i} = L_i 0.145 \lg(D_e / r_1) \quad (3.11)$$

$$X_{2i} = L_i 0.145 \lg(D_e / r_2) \quad (3.12)$$

$$X_{12i} = L_i 0.145 \lg(D_e / D_{12}) \quad (3.13)$$

$$Z_{om1} = L_i (0.05 + j0.145 \lg(D_e / D_{d1})) \quad (3.14)$$

$$Z_{om2} = L_i (0.05 + j0.145 \lg(D_e / D_{d2})) \quad (3.15)$$

式中， $Z_{di}$ —第  $i$  档避雷线的等效阻抗， $\Omega$ ；

$D_e$ —地中电流等值深度, m;

$\rho$ —土壤电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;

$f$ —频率, 50Hz;

$r_1, r_2$ —避雷线 1 和避雷线 2 的等值半径, m (钢芯铝绞线等值半径= $0.81 \times$ 几何半径);

$L_i$ —第  $i$  档的档距, km;

$D_{12}$ —避雷线 1 与 2 之间的距离, m;

$D_{A1}$ —短路相导线与避雷线 1 之间的距离, m;

$D_{A2}$ —短路相导线与避雷线 2 之间的距离, m。

### 3.1.3 站内短路电流分布数学模型

通过对变电站内短路时短路电流的分布研究可知,站内短路电流除经变压器中性点回流外,主要是通过短路变电站的接地网和避雷线-杆塔接地系统入地。由于三相不平衡引起的中性点对地偏移电压为变电站接地网和避雷线-杆塔接地系统提供了一个电源,进而产生了接地网入地短路电流和避雷线分流电流。由于变电站接地网和避雷线-杆塔系统连接于地,并且在地面以上部分都连接于避雷线,那么变电站接地网与避雷线-杆塔接地系统属于并联关系。结合图 3.1 所示的变电站内接地短路时短路电流分布示意图可知,避雷线-杆塔系统分走的电流  $I_k$  是从短路变电站出来经避雷线所连各基杆塔逐塔入地并最后由对侧变电站的地网流入大地的。因此,避雷线分流电流实际上是流经了含有对侧变电站的广义避雷线-杆塔接地系统,可建立站内短路电流分布数学模型,如图 3.7 所示:

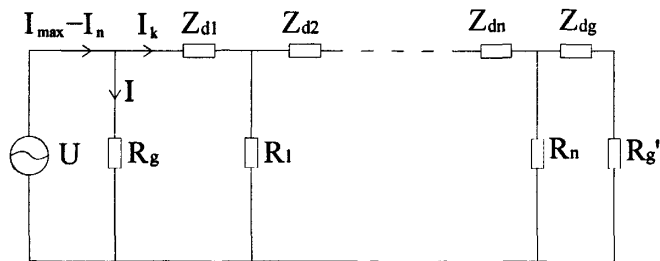


图 3.7 站内短路电流分布数学模型

图 3.7 中,  $U$  为变电站内发生单相接地故障时由于三相不平衡引起中性点对地偏移电压, V;  $I$  为流经短路变电站接地网的入地短路电流, A;  $I_{max}$  为接地短路时的最大短路电流, A;  $I_n$  为经变电站变压器中性点回流的短路电流, A;  $I_k$  为避雷线分流电流, A;  $R_g$  为短路变电站接地网的接地电阻,  $\Omega$ ;  $R_1, R_2, \dots, R_n$  为避雷线所连的各基杆塔接地电阻,  $\Omega$ ;  $Z_{d1}$  表示变电站至第一基杆塔之间避雷线也即第一档避雷线的等效阻抗;  $Z_{d2}, \dots, Z_{dn}$  分布表示杆塔之间各个档距避雷线的等效阻抗;  $Z_{dg}$  表示最后一基杆塔与避雷线所连对侧变电站之间档距的避

雷线等效阻抗； $R_g'$ 为避雷线所连对侧变电站接地网的接地电阻， $\Omega$ 。

### 3.2 实用分流阻抗模型推导

#### 3.2.1 避雷线分流阻抗计算分析

##### 1. 避雷线分流阻抗定义

由变电站内短路时短路电流分布分析可知，从变电站经避雷线流走的避雷线分流电流其实流过了广义避雷线-杆塔系统。广义避雷线-杆塔系统的阻抗包括避雷线有效阻抗、避雷线所连各基杆塔的接地电阻、避雷线所连对侧变电站接地网的接地电阻。而各档距避雷线有效阻抗又受避雷线材料、横截面积、杆塔档距、相线与避雷线之间的互感等因素影响，对于双回避雷线而言还受两根避雷线之间的互感影响；杆塔接地电阻和避雷线所连变电站接地网接地电阻受土壤电阻率、杆塔接地装置形式等因素影响。综合所有这些因素后的广义避雷线-杆塔接地系统的有效阻抗值便称为避雷线分流阻抗。

##### 2. 初步分流阻抗模型

通过对避雷线-杆塔系统模型分析，避雷线分流阻抗主要由各档避雷线等效阻抗和杆塔接地电阻决定。在对避雷线分流阻抗即基于广义避雷线-杆塔系统的等效阻抗值进行计算时，若将避雷线所连对侧变电站看做最后一基即标号为  $n$  的杆塔，则初步分流阻抗模型如图 3.8 所示：

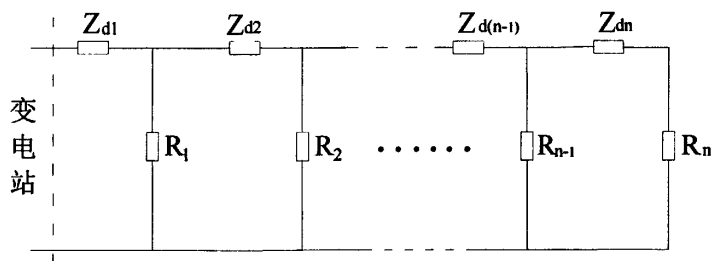


图 3.8 初步分流阻抗模型

则根据电路理论知识，避雷线分流阻抗  $Z$  的计算公式如下：

$$Z = (\dots(R_{n-1} // (Z_{dn} + R_n) + Z_{d(n-1)}) // R_{n-2} + \dots // \dots) // R_1 + Z_{d1} \quad (3.16)$$

由式(3.16)可以看出，对于杆塔基数  $n$  比较大的避雷线-杆塔系统而言，其计算量相当大，且由于杆塔档距、避雷线型号、杆塔接地电阻等参数都不确定，不便于对避雷线分流阻抗进行计算。

##### 3. 简化分流阻抗模型

为了更简便的找出避雷线分流阻抗值的大小随杆塔总基数数目变化的大体规律进而找出避雷线分流阻抗实用分析模型，先将避雷线分流阻抗模型进行简化，即将所有杆塔档距的避雷线等效阻抗都设定相等，所有杆塔接地电阻值（将

避雷线所连对侧变电站看做第  $n$  基杆塔) 都设定为相同, 可得到简化模型如图 3.9 所示:

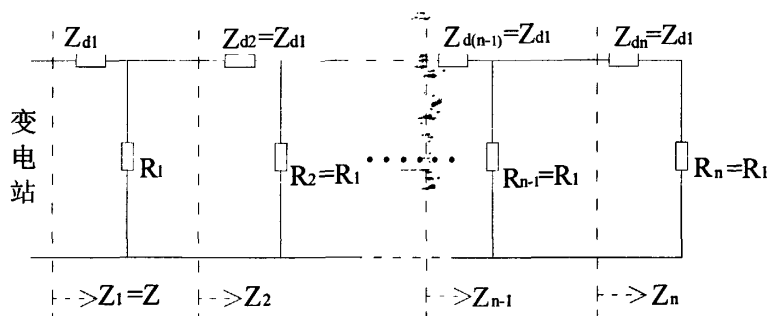


图 3.9 简化分流阻抗模型

### 3.2.2 实用分流阻抗模型的建立

#### 1. 基于简化模型的避雷线分流阻抗计算

基于如图 3.9 所示的简化模型, 在杆塔总基数有限时, 避雷线-杆塔系统等效阻抗即避雷线分流阻抗的求解可按照由电路理论推导出的数学表达式来进行计算, 如式 (3.17) 所示:

$$Z = (\dots(R_1 // (R_1 + Z_{d1}) + Z_{d1}) // R_1 // \dots // R_1) + Z_{d1} \quad (3.17)$$

基于图 3.9, 令第  $n-1$  基杆塔之后部分的阻抗为  $Z_n$ , 第  $n-2$  基杆塔之后部分的阻抗为  $Z_{n-2}$ , ....., 第 2 基杆塔之后部分的阻抗为  $Z_2$ , 总阻抗为  $Z_1=Z$ 。由电路理论知识可得:

$$\begin{aligned} Z_n &= Z_{d1} + R_1 \\ Z_{n-1} &= Z_{d1} + R_1 // Z_n \\ &\vdots \\ Z_2 &= Z_{d1} + R_1 // Z_3 \\ Z &= Z_1 = Z_{d1} + R_1 // Z_2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

由图3.9和式(4.18)可以看出,  $Z$  ( $Z_1$ )、 $Z_2$ 、.....、 $Z_{n-1}$ 、 $Z_n$ 计算上存在递归关系, 利用递归法进行MATLAB编程可以简便快速的计算出避雷线分流阻抗。因为所有相邻杆塔档距的避雷线等效阻抗都相等, 所有杆塔接地电阻值都相等, 在避雷线有效阻抗和杆塔接地电阻给出后, 避雷线分流阻抗只决定于杆塔总基数  $N$ , 故可以编制避雷线分流阻抗  $Z$  与杆塔总基数  $N$  之间的函数程序。其简易流程如图3.10所示:



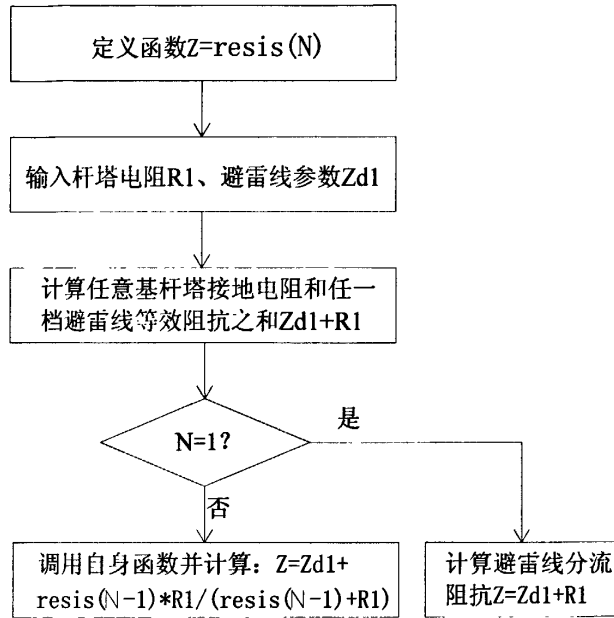


图3.10 基于简化模型的计算流程图

注意：在实际情况中，总是有总基数 $N > 1$ 。

## 2. 避雷线分流阻抗与杆塔总基数的关系

为便于研究避雷线分流阻抗与杆塔总基数关系的大致规律，以避雷线分流阻抗简化模型为基础，利用所编程序进行分析。在简化模型中，所有相邻杆塔档距的避雷线等效阻抗都相等，所有杆塔接地电阻值都相等，在避雷线有效阻抗和杆塔接地电阻给出后，避雷线分流阻抗只决定于杆塔总基数 $N$ ，很容易得出避雷线分流阻抗与杆塔总基数的大致规律。为具有代表性，在分析时选取钢绞线和钢芯铝绞线两种避雷线各一种型号进行研究。

### (1) 选钢绞线材料避雷线

假定选用架设双根 GJ-80 避雷线，避雷线平均档距取 300 米，则任一档距避雷线阻抗值为  $Z_{d1} = (3.55 + j1.87) \times 0.3 = 1.065 + j0.561 \Omega$ ；杆塔接地电阻均取  $7 \Omega$ ；分别取杆塔总基数为  $N=8, N=9, \dots, N=29$ ，利用所编写函数对杆塔总基数不同取值时避雷线分流阻抗进行计算，并对杆塔基数总数变化时的分流阻抗变化率进行计算。其中，变化率  $\delta_N$  为：

$$\delta_N = \frac{Z_{k+1} - Z_k}{Z_k} \quad (3.19)$$

式中， $Z_{k+1}$ 、 $Z_k$  分别为杆塔总基数  $N=k+1$  和  $N=k$  时的避雷线分流阻抗。

不同杆塔总基数时的避雷线分流阻抗值及变化率计算结果如表 3.2 所示：

表 3.2 杆塔总基数不同时避雷线分流阻抗值及变化率 1

杆塔总基数 N	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
避雷线分流阻抗 值( $\Omega$ )	4.16 93	4.12 74	4.11 04	4.10 41	4.16 93	4.10 22	4.10 20	4.10 22	4.10 25	4.10 28	4.10 29
变化率 $\delta_N$ 绝对 值 (%)	—	1.00 50	0.41 15	0.15 20	0.04 57	0.00 63	0.00 56	0.00 73	0.00 59	0.00 40	0.00 25
杆塔总基数 N	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
避雷线分流阻抗 值( $\Omega$ )	4.10 30	4.10 31	4.10 31	4.10 31	4.10 31	4.10 32	4.10 32	4.10 32	4.10 32	4.10 32	4.10 32
变化率 $\delta_N$ 绝对 值 (%)	0.00 02	0.00 01	0.00 01	0.00 00	0.00 00	0.00 00	0.00 00	0.00 00	0.00 02	0.00 01	0.00 01

(2) 选钢绞线材料避雷线

杆塔接地电阻一般在 5~20 $\Omega$  之间，不同型号避雷线的阻抗值各不相同，但相对杆塔接地电阻值而言都很小，只相当于杆塔接地阻抗的几十分之一，可以忽略避雷线间互感作用。

假设选用架设双根 LGJ-95/55 避雷线（良导体避雷线），避雷线平均档距取 400 米，则各档距避雷线阻抗值为  $Z_d = (0.35 + j0.72) \times 0.4 \div 2 = 0.07 + j0.144\Omega$ ；杆塔平均电阻取 10 $\Omega$ ；分别取杆塔总基数为  $N=6, N=9, \dots, N=29$ ，利用所编写函数对杆塔总基数不同取值时避雷线分流阻抗进行计算，并对杆塔基数总数变化时的变化率进行计算，结果如表 3.3 所示，

表 3.3 杆塔总基数不同时避雷线分流阻抗值及变化率 2

杆塔总基数 N	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
避雷线分流阻抗 值( $\Omega$ )	2.15 81	2.01 46	1.93 23	1.88 87	1.86 91	1.86 42	1.86 77	1.87 55	1.88 49	1.89 43	1.90 29
变化率 $\delta_N$ 绝对 值 (%)	—	6.65 28	4.08 09	2.26 07	1.03 61	0.26 23	0.18 75	0.41 59	0.50 14	0.50 05	0.45 27
杆塔总基数 N	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
避雷线分流阻抗 值( $\Omega$ )	1.91 02	1.91 61	1.92 07	1.92 41	1.92 66	1.92 83	1.92 95	1.93 02	1.93 06	1.93 09	1.93 09
变化率 $\delta_N$ 绝对 值 (%)	0.38 37	0.30 97	0.24 01	0.17 93	0.12 92	0.08 96	0.05 95	0.03 75	0.02 19	0.01 14	0.00 45

由表 3.2 和表 3.3 所示的计算结果可以看出，无论是钢绞线还是钢芯铝绞线（良导体避雷线），在杆塔总基数为 10 以后，分流阻抗变化率分别小于 0.1% 和 2%，均维持在 5% 以内，即避雷线分流阻抗趋于稳定。当避雷线长度增大到一定

长度以后（如 5 公里），线路长度再增加，对避雷线分流阻抗的影响不大，进而对避雷线分流系数的影响也就不大。

### 3. 实用分流阻抗模型建立

由以上分析，从避雷线分流阻抗值的计算角度来讲，我们可以只考虑第 10 基杆塔之前的避雷线-杆塔系统，进而可以得出相对实用的避雷线-杆塔数学模型如图 3.11 所示：

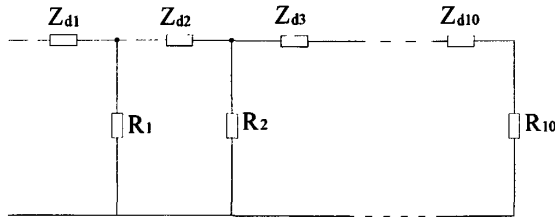


图 3.11 实用分流阻抗模型

图 3.11 中， $Z_{d1}$  表示变电站至第一基杆塔之间避雷线也即第一档避雷线的等效阻抗， $Z_{d2}$ 、 $Z_{d3}$ 、……、 $Z_{d10}$  分别表示第 2 档、第 3 档、……、第 10 档避雷线的等效阻抗。 $R_1$ 、 $R_2$ 、……、 $R_{10}$  分别表示第 1 基、第 2 基、……、第 10 基杆塔的接地电阻。

实用分流阻抗模型中，各档距避雷线有效阻抗并不相等，各基杆塔接地电阻也不相同，避雷线分流阻抗值的大小按照图 3.11 所示的电路图进行计算，根据电路理论知识，避雷线分流阻抗  $Z$  的计算公式如下：

$$Z = (\cdots (R_9 // (Z_{d10} + R_{10}) + Z_{d9}) // R_8 + \cdots // \cdots) // R_1 + Z_{d1} \quad (3.20)$$

### 3.3.3 实际测量验证

#### 1. 测量原理

该课题现场测量采用避雷线分流阻抗法<sup>[45]</sup>，即测量避雷线分流接地阻抗上的压降和流过避雷线的电流，从而计算出避雷线实际分流阻抗值，现场测试接线如图 3.12 所示。试验电源采用退出一台所变为试验专用，甩开二次侧其他负荷并解开接地中性点，试验用 380V 线电压。

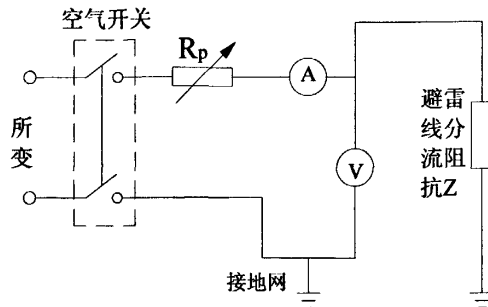


图 3.12 避雷线分流阻抗现场测量原理图

图 3.12 中， $Z$  为所需要测的避雷线分流阻抗， $\Omega$ ； $R_p$  为滑动变阻器；④为电流表，测量在避雷线分流阻抗上施加的试验电流值；⑤为数字万用表，测量在试验电流下避雷线接地阻抗上的压降，V。

由图 3.12 可知，无论避雷线是采用逐塔接地还是采用分段绝缘的接地方式，无论线路所经线路土壤电阻率如何变化即杆塔接地电阻如何变化，无论杆塔档距是否均一，无论短路点两侧电气结构是否对称，都可采用电流电压实测法真实的测量出避雷线分流阻抗值。

考虑到避雷线干扰电压的影响，为了克服地网杂散电流的影响，提高试验的信噪比，应尽量将试验电流升到较大值；同时，为了减小试验误差，需先测量出避雷线的干扰电压，采用倒相法重复试验。倒相法测量消除误差原理是：设不加电源时的干扰电压为  $U_r$ ，正向电源电压为  $U_u$ ，正向电压测量值为  $U_1$ ，反向电源电压为  $U_u'$ ，反向电压测量值为  $U_2$ ，得到电压矢量关系如图 3.13 所示：

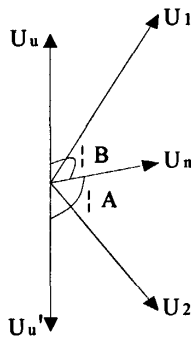


图 3.13 倒相法误差消除原理图

测量过程中假设  $U_u = U_u'$ ，则有：

$$\begin{aligned} U_1^2 &= U_u^2 + U_r^2 - 2|U_u|U_r \cos \alpha \\ U_2^2 &= U_u'^2 + U_r'^2 - 2|U_u'|U_r \cos \alpha \end{aligned} \quad (3.21)$$

因为  $\cos \alpha + \cos \beta = 0$ ，则由式(3.21)可得：

$$U_s = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 - 2U_r^2}{2}} \quad (3.22)$$

式中， $U_s$  为考虑干扰电压影响后的实际电源电压。

## 2. 测量数据

按图 3.12 所示的避雷线分流接地阻抗测量原理图，我们分别在 2006 年 5 月 27 日，对江西省九江供电公司 110kV 周岭变电站的 110kV 塘周线进行了现场测量；在 2006 年 10 月 31 日，对江西省九江供电公司 110kV 妙周线进行了现场测量。

### (1) 所用仪器及导线

在进行现场测量时，用到如下仪器仪表及导线：

- ① 专用所变一台（为测量试验提供 380V 线电压）；

② 电流表一台（型号：T51，可选量程：5A/10A/50A/100A，试验时选用 10A 量程，误差：±0.5%）；

③ 漏电断路器一台（型号：DZ10LE-100/430，额定电压：380V，额定电流：100A，额定漏电动作电流：100mA，额定漏电不动作电流：50mA，漏电动作时间：≤0.2s，测试频率：50Hz）；

④ 数字万用表一台（型号：FLUKE 179 TRUE RMS MULTIMETER）；

⑤ 滑动变阻器两台（型号：BX7-14，额定电流：1A，额定电阻：300Ω）；

⑥ 架空避雷线绝缘引下导线 25m 及连接导线若干。

## (2) 试验步骤

① 首先把一台所变退出运行，甩开其余二次侧接线及中性点接地，按图 3.12 接好线；断开架空地线与地网的连接，并用绝缘导线引下；

② 用万用表测直流电阻，估算交流阻抗，以更准确的对仪表量程进行选择；

③ 不加电流，先测量流经架空地线的干扰电压，并做好记录；

④ 合上空气开关，测量并记录流经架空地线的电流和架空地线分流阻抗上的电压。

对于 110kV 塘周线，选用周岭变电站 2 号主变 110kV 中性点 1020 接地刀闸为入地注入点；对于 110kV 妙周线，选用妙智变电站 110kV 妙周线 II 母电压互感器 B 相为入地注入点，并得到了测量数据如表 3.4 所示：

表 3.4 现场测量数据

测量数据 线路名称	正相测试			反相测试		
	$U_{正}$ (V)	$I$ (A)	$U_{正扰}$ (V)	$U_{反}$ (V)	$I$ (A)	$U_{反扰}$ (V)
110kV 塘周线	10.2	2.5	0.34	10.8	2.5	0.32
110kV 妙周线	17.7	8.6	1.0	18.4	8.6	0.92

由于变电站出线端档距比较小且地形限制不易测量，出线端档距忽略，所测线路前 10 基杆塔接地电阻和杆塔档距分别如表 3.5 和表 3.6 所示：

表 3.5 塘周线和妙周线前 10 基杆塔接地电阻

杆塔号		$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$
接地电 阻 (Ω)	塘周线	29	35	21	19	18	22	13	14	20	22
	妙周线	6.5	8.3	12.8	17.4	17.9	12.6	10.7	11.6	8.0	11

表 3.6 塘周线和妙周线前 10 基杆塔档距

档距号		$L_{1.2}$	$L_{2.3}$	$L_{3.4}$	$L_{4.5}$	$L_{5.6}$	$L_{6.7}$	$L_{7.8}$	$L_{8.9}$	$L_{9.10}$
档距值 (m)	塘周线	188	143	237	255	260	335	167	254	473
	妙周线	132	180	222	198	230	93	132	243	221

### 3. 数据计算

由图 3.13 所示的避雷线分流接地阻抗测量原理图，可测量出避雷线分流接地阻抗  $Z$  上的压降  $U$  和避雷线分流接地阻抗  $Z$  上流过的试验电流  $I$ 。利用两次测量的结果，对数值进行校正，为了更准确的计算干扰电压，在正相测量和反相测量时分别测出不加电压的干扰电压，即先用电源正相升流侧出  $U_{正}$ ，并测出干扰  $U_{正扰}$ ，然后将是电源反相，测量另一组数据  $U_{反}$  并测出干扰  $U_{反扰}$ 。利用正相和反相测量时干扰电压的平方和代替式 (3.22) 中两倍干扰电压的平方进行求解，则得出避雷线分流接地阻抗  $Z$  为：

$$Z = \frac{\sqrt{\frac{U_{正}^2 + U_{反}^2 - (U_{正扰}^2 + U_{反扰}^2)}{2}}}{\sqrt{\frac{I_{正}^2 + I_{反}^2}{2}}} = \frac{\sqrt{U_{正}^2 + U_{反}^2 - (U_{正扰}^2 + U_{反扰}^2)}}{\sqrt{I_{正}^2 + I_{反}^2}} \quad (3.23)$$

式中， $U_{正}$ —正相测量时避雷线分流接地阻抗  $Z$  上的压降，表  $\nabla$  的读数，V；

$U_{正扰}$ —正相测量时将电源断开后测得的干扰电压，V；

$U_{扰}$ —正相测量时将电源断开后测得的零序干扰电压，V；

$U_{反扰}$ —反相测试时将电源断开后测得的干扰电压，V；

$Z$ —考虑到测试误差进行校正后的避雷线分流接地阻抗， $\Omega$ 。

将表 3.6 中相关值代入式 (3.23)，即可得到塘周线和妙周线避雷线分流接地阻抗为：

$$Z_{塘周} = \frac{\sqrt{U_{正}^2 + U_{反}^2 - (U_{正扰}^2 + U_{反扰}^2)}}{\sqrt{I_{正}^2 + I_{反}^2}} = \frac{\sqrt{10.2^2 + 10.8^2 - (0.34^2 + 0.32^2)}}{\sqrt{2.5^2 + 2.5^2}} = 4.1996 \quad (3.24)$$

$$Z_{妙周} = \frac{\sqrt{U_{正}^2 + U_{反}^2 - (U_{正扰}^2 + U_{反扰}^2)}}{\sqrt{I_{正}^2 + I_{反}^2}} = \frac{\sqrt{17.7^2 + 18.4^2 - (1^2 + 0.92^2)}}{\sqrt{2 \times 8.6^2}} = 2.0963 \quad (3.25)$$

妙周线和塘周线采用了 GJ-50 型号避雷线，将其参数按表 2.1 进行取值，利用表 4.4 中相关数据对塘周线第 1 基至第 10 基杆塔之间(不含第一基杆塔接地电阻值)的避雷线-杆塔系统阻抗值  $Z_{2-10}$  进行计算，计算结果为  $Z_{2-10}=4.7247\Omega$ ，于是可得前 10 基杆塔的避雷线-杆塔系等效阻抗约为： $Z=R_1//Z_{2-10}=4.7247 \times 29 / (4.725 + 29) = 4.0628\Omega$ ，塘周线的避雷线分流阻抗实际测量计算值为：4.1996 $\Omega$ ，两者误差为： $(4.1975 - 4.0421) / 4.1975 = -0.0326 = -3.26\%$ 。

同样，利用妙周线数据对  $Z_{2-10}$  进行计算，计算结果为  $Z_{2-10}=3.0348\Omega$ ，于是可得前 10 基杆塔的避雷线-杆塔系等效阻抗约为： $Z=R_1//Z_{2-10}=7.5 \times 3.0348 / (7.5 + 3.0348) = 2.1606\Omega$ ，塘周线的避雷线分流阻抗实际测量计算值为：2.0963 $\Omega$ ，两者误差为： $(2.0963 - 2.1606) / 2.1606 = -0.0307 = -3.07\%$ 。

由理论数据和实际测量计算数据对比可知，基于实用分析模型的避雷线分流阻抗理论值与实际值测量计算值之间存在一定的误差，但误差在 5% 以内。由此，可证实避雷线的分流阻抗主要决定于前 10 基杆塔，验证实用分流阻抗模型的正确性。

### 3.4 避雷线分流系数推导及计算

#### 1. 站内短路电流分布实用分析模型

由前面章节分析，在变电站内发生接地短路故障时，最大接地短路电流  $I_{max}$  除了由变电站变压器接地中性点分走的电流  $I_n$  外，其余电流一部分 ( $I_k$ ) 通过避雷线-杆塔接地系统逐塔入地（经对面变电站接地网入地的电流可以忽略不计），另一部分 ( $I$ ) 经变电站接地网流入大地。则相当于站内接地故障时中性点对地偏移电压为变电站接地网和避雷线-杆塔系统的并联线路提供了电流  $I_{max}-I_n$  的电源。结合避雷线实用分流阻抗模型，可得到站内短路电流分布实用分析模型如图 3.14 所示：

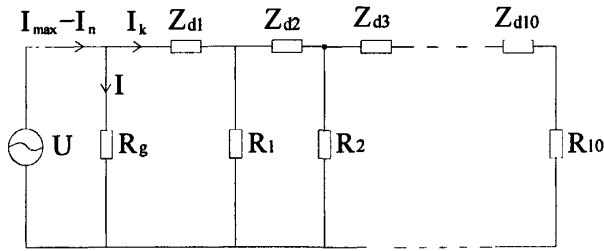


图 3.14 站内短路电流分布实用分析模型

图 3.14 中， $U$  为变电站内发生单相接地故障时，由于三相不平衡引起中性点对地偏移电压， $V$ ； $I$  为流经短路变电站接地网的入地短路电流， $A$ ； $I_{max}$  为接地短路时的最大接地短路电流， $A$ ； $I_n$  为变电站变压器接地中性点的最大接地短路电流， $A$ ； $I_k$  为避雷线分走的电流， $A$ ； $R_g$  为所测变电站接地网的接地电阻， $\Omega$ ； $Z_{d1}$  表示变电站至第一基杆塔之间避雷线也即第一档避雷线的等效阻抗， $Z_{d2}$ 、 $Z_{d3}$ 、...、 $Z_{d10}$  分别表示第 2 档、第 3 档、...、第 10 档避雷线的等效阻抗。 $R_1$ 、 $R_2$ 、...、 $R_{10}$  分别表示第 1 基、第 2 基、...、第 10 基杆塔的接地电阻。

#### 2. 避雷线分流系数推导

从分析可知，短路变电站接地网接地电阻  $R_g$  和避雷线分流阻抗  $Z$  是并联关系，结合对如图 3.1 所示的变电站内短路时短路电流的分布情况及图 3.7 所示的站内短路电流分布数学模型分析，站内短路电流分布的等效模型如图 3.15 所示：

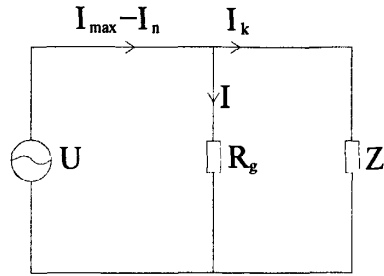


图 3.15 等效模型图

图 3.15 中， $R_g$  为短路变电站接地电阻； $Z$  为避雷线分流阻抗。

由 DL/T621-1997《交流电气装置的接地》中规定的变电站内发生接地短路时流经接地装置的电流计算公式即式(1.1)可得：

$$I = (I_{\max} - I_n) - (I_{\max} - I_n)K_e \quad (3.26)$$

结合式(3.1)可得：

$$I_k = (I_{\max} - I_n)K_e \quad (3.27)$$

式中， $I$ —流经变电站（或发电厂）接地装置的入地短路电流，A；

$I_{\max}$ —接地短路时的最大接地短路电流，A；

$I_n$ —流经变电站接地中性点的接地短路电流，A；

$K_e$ —变电站内短路时的避雷线分流系数；

$I_k$ —流经避雷线的故障电流，A。

将式(3.27)变形即得：

$$K_e = \frac{I_k}{I_{\max} - I_n} \quad (3.28)$$

由式(3.28)和图 3.15 可得避雷线分流系数推导公式：

$$K_e = \frac{I_k}{I_{\max} - I_n} = \frac{\frac{U}{Z}}{\frac{U}{R_g + Z}} = \frac{R_g}{R_g + Z} \quad (3.29)$$

将式(3.20)代入式(3.29)即可将避雷线分流系数公式变形如下：

$$K_e = \frac{R_g}{R_g + (\dots(R_9 // (Z_{d10} + R_{10}) + Z_{d9}) // R_8 + \dots // \dots) // R_1 + Z_{d1}} \quad (3.30)$$



由以上分析，站内短路电流分布实用数学模型只需考虑第 10 基杆塔之前的避雷线-杆塔系统，线路涉及范围比较小，便于参数的取值。另外，无论避雷线采用逐塔接地方式还是绝缘接地方式，无论短路点左右两侧电气结构是否对称，都可以采用分流阻抗模型进行避雷线分流阻抗的计算，克服了目前两种方法的主要缺陷。

### 3. 避雷线分流系数 MATLAB 计算

基于站内短路电流分布的实用分析模型图，令第 9 基杆塔之后部分的阻抗为  $Z_{10}$ ，第 8 基杆塔之后部分的阻抗为  $Z_9$ ，……，第 1 基杆塔之后部分的阻抗为  $Z_2$ ，总阻抗为  $Z_1=Z$ ，则有如下关系：

由电路理论知识可得：

$$\begin{aligned} Z_{10} &= Z_{d10} + R_{10} \\ Z_9 &= Z_{d9} + R_9 // Z_{10} \\ &\vdots \\ Z_2 &= Z_{d2} + R_2 // Z_3 \\ Z &= Z_1 = Z_{d1} + R_1 // Z_2 \end{aligned} \quad (3.31)$$

将式(3.30)再代入公式(3.29)即可求出避雷线分流系数。

以式(3.29)、式(3.30)和式(3.31)为基础，利用MATLAB编程来进行避雷线分流系数的计算，计算流程大体如下：

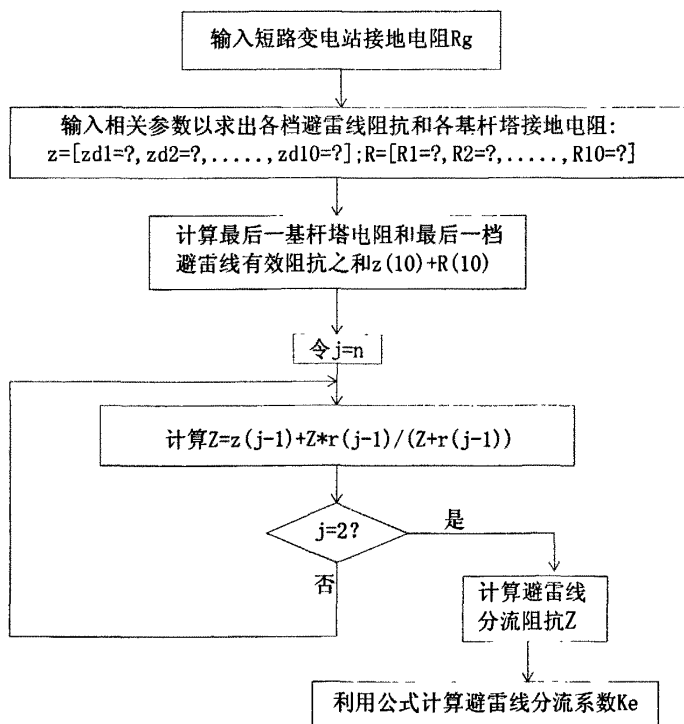


图3.16 避雷线分流系数计算流程图

### 3.5 本章小结

本章主要对站内短路电流分布模型进行了研究,对分流阻抗模型法进行了探讨并以此为基础对避雷线分流系数计算方法进行了研究。

(1) 对变电站内短路时短路电流的分布进行了研究,并建立起站内短路电流数学分析模型。站内短路时,最大短路电流除经变压器中性点回流的一部分外,主要通过变电站接地网和避雷线-杆塔系统流入大地。避雷线-杆塔系统对避雷线有效阻抗值即避雷线分流阻抗对避雷线分流系数计算非常重要,但计算十分复杂。

(2) 对避雷线分流阻抗与杆塔总基数之间关系进行分析可知,避雷线分流阻抗值主要决定于第 10 基杆塔之前的避雷线-杆塔系统,由此得到实用分流阻抗模型。通过对两条线路避雷线进行实际测量计算,验证了分流阻抗模型的正确性。

(3) 基于分流阻抗实用模型对分流阻抗的求解进行分析,并结合对站内短路电流分布数学模型研究,推导出避雷线分流系数的计算方法。

## 第四章 避雷线分流系数影响因素研究

避雷线分流系数主要由变电站接地电阻和避雷线分流阻抗决定,而避雷线分流阻抗又主要由杆塔接地电阻和避雷线自身参数、杆塔档距等决定。另外,在一些冬天天气比较寒冷的地区,无论是变电站接地网还是杆塔接地装置,其接地电阻均受季节变化的影响,进而影响到避雷线分流系数。

### 4.1 最小二乘法介绍

在对数据进行插值处理时,一些常用插值方法如 Lagrange 插值并不能保证当增加多项式的阶数时能够对给定函数进行更好的逼近。这个问题可通过复合插值来解决(如分段线性插值或者样条插值)。但它们都不适合用于从已知数据中外推其他信息,即在所给插值节点的区间之外的其他节点处生成新值。通常,为了得到更好的结果,可以避开插值条件,采用下面将要描述的最小二乘逼近法亦即最小二乘法<sup>[46]</sup>。

假设已知数对  $\{(x_i, f(x_i)), i = 0, \dots, n\}$ 。要找出一个阶数为  $m \geq 1$  的多项式  $\tilde{f}$ , 使得对于每个阶数为  $m$  的多项式  $P_m$ , 均满足下列不等式:

$$\sum_{i=0}^n [f(x_i) - \tilde{f}(x_i)]^2 \leq \sum_{i=0}^n [f(x_i) - P_m(x_i)]^2 \quad (4.1)$$

如果上式存在,  $\tilde{f}$  就称为  $f$  的最小二乘逼近。对于  $m$  和  $n$  的任意值, 并不能保证对于所有的  $i = 0, \dots, n$  都有  $f(x_i) = \tilde{f}(x_i)$ 。

令:

$$\tilde{f}(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m \quad (4.2)$$

其中系数  $a_0, \dots, a_m$  是未知的, 则:

$$\Phi(a_0, a_1, \dots, a_m) = \min_{\{b_j, j=0, \dots, m\}} \Phi(b_0, b_1, \dots, b_m) \quad (4.3)$$

其中,

$$\Phi(b_0, b_1, \dots, b_m) = \sum_{i=0}^n [f(x_i) - (b_0 + b_1x_i + \dots + b_mx_i^m)]^2 \quad (4.4)$$

下面在  $m=1$  的特殊情况下求解此题。由于:

$$\Phi(b_0, b_1) = \sum_{i=0}^n [f(x_i)^2 + b_0^2 + b_1^2 x_i^2 + 2b_0 b_1 x_i - 2b_0 f(x_i) - 2b_1 x_i f(x_i)] \quad (4.5)$$

$\Phi$  的图形是一个凸状抛物面，使得  $\Phi$  取最小值的点  $(a_0, a_1)$  满足下列条件：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial b_0}(a_0, a_1) = 0, \frac{\partial \Phi}{\partial b_1}(a_0, a_1) = 0 \quad (4.6)$$

这里符号  $\partial \Phi / \partial b_j (j=0,1)$  表示在其他变量保持不变的情况下， $\Phi$  对于  $b_j$  进行求偏导数运算（即变化率），进行求偏导以后可得：

$$\sum_{i=0}^n [a_0 + a_1 x_i - f(x_i)] = 0, \sum_{i=0}^n [a_0 + a_1 x_i^2 - x_i f(x_i)] = 0 \quad (4.7)$$

上式是含有两个变量  $a_0$  和  $a_1$  的两个方程系统：

$$\begin{aligned} a_0(n+1) + a_1 \sum_{i=0}^n x_i &= \sum_{i=0}^n f(x_i) \\ a_0 \sum_{i=0}^n x_i + a_1 \sum_{i=0}^n x_i^2 &= \sum_{i=0}^n f(x_i) x_i \end{aligned} \quad (4.8)$$

设  $D = (n+1) \sum_{i=0}^n x_i^2 - (\sum_{i=0}^n x_i)^2$ ，则解为：

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{D} [\sum_{i=0}^n f(x_i) \sum_{j=0}^n x_j^2 - \sum_{j=0}^n x_j \sum_{i=0}^n x_i f(x_i)] \\ a_1 &= \frac{1}{D} [(n+1) \sum_{i=0}^n x_i f(x_i) - \sum_{j=0}^n x_j \sum_{i=0}^n f(x_i)] \end{aligned} \quad (4.9)$$

相应的多项式  $\tilde{f}$  称为最小二乘直线或回归线。

前述方法可以推广到  $m$  为任意值的情形。相应的对称  $(m+1) \times (m+1)$  线性系统形式如下：

$$\begin{aligned} a_0(n+1) + a_1 \sum_{i=0}^n x_i + \cdots + a_m \sum_{i=0}^n x_i^m &= \sum_{i=0}^n f(x_i) \\ a_0 \sum_{i=0}^n x_i + a_1 \sum_{i=0}^n x_i^2 + \cdots + a_m \sum_{i=0}^n x_i^{m+1} &= \sum_{i=0}^n x_i f(x_i) \\ \vdots & \\ a_0 \sum_{i=0}^n x_i^m + a_1 \sum_{i=0}^n x_i^{m+1} + \cdots + a_m \sum_{i=0}^n x_i^{2m} &= \sum_{i=0}^n x_i^m f(x_i) \end{aligned} \quad (4.10)$$

## 4.2 避雷线相关参数的影响

### 4.2.1 避雷线本身参数及单双根的影响

避雷线本身参数主要由材料和型号决定。在截面积相同时，不同材料避雷线

的阻抗值也不同。一般而言，单位长度钢绞线材料的阻抗值比钢芯铝绞线（良导体避雷线）材料阻抗值要大。在避雷线材料相同的情况下，若型号不同，截面积也不相同，那么单位长度的阻抗值也不相同。故避雷线材料和型号的不同会影响避雷线分流阻抗值的大小，避雷线采用单根或双根时分流阻抗值也不相同，进而都影响着避雷线分流系数的大小。

### 1. 模拟分析 1

取短路变电站接地电阻为  $0.4\Omega$ ，避雷线所连前 10 基杆塔接地电阻为  $15\Omega$ ，靠近变电站的终端塔档距取 70 米，前 10 基杆塔中其他档距均取 280 米，所处位置土壤电阻率为  $400\Omega\cdot m$ ，避雷线与相导线的几何均距取 5m。为了研究避雷线型号对避雷线分流系数的影响，分别以 GJ-35（自身阻抗取  $4.6+j2.4\Omega/km$ ）、GJ-50（自身阻抗取  $3.5+j1.5\Omega/km$ ）、GJ-80（自身阻抗取  $2.2+j1.2\Omega/km$ ）、LGJ-95/55（自身阻抗取  $0.2992+j0.419\Omega/km$ ）、LGJ-185/45（自身阻抗取  $0.1564+j0.406\Omega/km$ ）为架空避雷线。

#### (1) 单根避雷线时参数计算

地中电流等值深度为：

$$D_e = 660\sqrt{\frac{\rho}{f}} = 660 \times \sqrt{\frac{400}{50}} = 1866.76 \text{ m} \quad (4.11)$$

则单位长度的互阻抗  $z_{om}$  为：

$$z_{om} = 0.05 + j0.145 \lg(D_e / D) = 0.05 + j0.145 \lg \frac{1866.76}{5} = 0.05 + j0.37, (\Omega / km) \quad (4.12)$$

参照式（3.5）可得各型号避雷线单位长度的阻抗分别为：

$$\begin{aligned} Z_{1(GJ-35)} &= 4.6 + j2.4 + 0.05 + j0.37 = 4.65 + j2.77, (\Omega / km) \\ Z_{1(GJ-50)} &= 3.5 + j1.5 + 0.05 + j0.37 = 3.55 + j1.87, (\Omega / km) \\ Z_{1(GJ-80)} &= 2.2 + j1.2 + 0.05 + j0.37 = 2.25 + j1.57, (\Omega / km) \\ Z_{1(LGJ-95/55)} &= 0.2992 + j0.419 + 0.05 + j0.37 = 0.3491 + j0.789, (\Omega / km) \\ Z_{1(LGJ-185/45)} &= 0.1564 + j0.406 + 0.05 + j0.37 = 0.2064 + j0.776, (\Omega / km) \end{aligned} \quad (4.13)$$

#### (2) 两根避雷线时参数计算

若将模拟分析例 1 中的避雷线改为两根，其间距取 4.5m，每根避雷线与相导线的几何均距也均取 5m。

则两根避雷线与相导线的互感相等参数计算如下：

$$\begin{aligned} z_{om1} = z_{om2} &= 0.05 + j0.145 \lg(D_e / D_{A1}) \\ &= 0.05 + j0.145 \lg \frac{1866.76}{5} = 0.05 + j0.37, (\Omega / km) \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$x_{12i} = j0.145 \lg(D_e / D_{12}) = j0.145 \lg \frac{1866.76}{4.5} = j0.3796, (\Omega / km) \quad (4.15)$$

参照公式(3.8)、式(3.9)和式(3.10)可得两根避雷线的等效阻抗为：

$$\begin{aligned}
 Z_{2(GJ-35)} &= j0.3796 + (4.6 + 0.05 + j2.4 + j0.37) \times 0.5 = 2.325 + j1.5748, (\Omega / km) \\
 Z_{2(GJ-50)} &= j0.3796 + (3.5 + j(2.4 - 0.3796) + 0.05 + j0.37) \times 0.5 = 1.775 + j1.167, (\Omega / km) \\
 Z_{2(GJ-80)} &= j0.3796 + (2.2 + j(1.2 - 0.3796) + 0.05 + j0.37) \times 0.5 = 1.125 + j0.9748, (\Omega / km) \\
 Z_{2(LGJ-95/55)} &= j0.3796 + (0.2992 + j(0.419 - 0.3796) + j0.37) \times 0.5 \\
 &= 0.1746 + j0.5843, (\Omega / km) \\
 Z_{2(LGJ-185/45)} &= j0.3796 + (0.1564 + j(0.406 - 0.3796) + 0.05 + j0.37) \times 0.5 \\
 &= 0.1032 + j0.5778, (\Omega / km)
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

由计算所得的单位长度避雷线等效阻抗值见式(4.13)和式(4.16)，可得单根和双根两种情况时各档距避雷线等效阻抗分别如表4.1所示：

表 4.1 不同避雷线时各档避雷线等效阻抗

避雷线型号		GJ-35	GJ-50	GJ-80	LGJ-95/55	LGJ-185/45
单根	$Z_{d1}(\Omega)$	0.3255+ j0.1939	0.2485+ j0.1309	0.1575+ j0.1099	0.02444+ j0.05523	0.01445+ j0.05432
	$Z_{d2} \sim Z_{d10}(\Omega)$	1.302+ j0.7756	0.994+ j0.5236	0.63+ j0.4396	0.0978+ j0.221	0.0578+ j0.2173
双根	$Z_{d1}(\Omega)$	0.1628+ j0.1102	0.1243+ j0.0817	0.0788+ j0.0682	0.0122+ j0.0409	0.0072+ j0.0404
	$Z_{d2} = \dots = Z_{d10}(\Omega)$	0.6510+ j0.4409	0.497+ j0.3268	0.315+ j0.2729	0.0489+ j0.1636	0.0289+ 0.1618

## 2. 避雷线分流系数变化规律分析

基于图 3.14 所示的站内短路电流分布实用分析模型，将表 4.1 所示数据代入式(3.30)并利用所编 MATLAB 函数进行计算，计算结果如表 4.2 所示：

表 4.2 不同避雷线及不同根数时的避雷线分流系数

避雷线型号		GJ-35	GJ-50	GJ-80	LGJ-95/55	LGJ-185/45
避雷线分流系数 $K_e$	单根时	0.0824	0.0935	0.1096	0.1702	0.1781
	双根时	0.1085	0.1207	0.1378	0.186	0.1909

由表 4.2 中数据分析可知，选用钢芯铝绞线材料比钢绞线材料做避雷线时的分流系数大；对于一种材料的避雷线而言，其横截面越大，避雷线分流系数越大；对于任一种避雷线，架设双回避雷线比架设单回避雷线时的分流系数要大。因此，选用良导体材料做避雷线可以增大其分流系数，一般而言，钢芯铝绞线比钢绞线的导电性能要好，在多雷区或比较重要的线路可以考虑选用钢芯铝绞线做避雷线用。在材料相同情况下选用横截面积较大的避雷线或在同一回线路上架设双根避

雷线都可以增大避雷线分流效果,进而减小站内短路时短路电流对系统稳定性和人身安全造成的危害。

#### 4.2.2 杆塔档距的影响

杆塔档距的大小将影响各档距间避雷线的阻抗值,而避雷线的阻抗值很大程度上影响着避雷线分流阻抗,进而影响避雷线分流系数。

##### 1. 模拟分析例 2

若某 220kV 变电站接地电阻为  $0.5\Omega$ ,各基杆塔接地电阻均取值  $7.5\Omega$ ,所处位置土壤电阻率和避雷线与导线的几何均距均与例 1 相同;其中,终端塔档距取值 80m;1~10 基杆塔各档距分别均取 200m、220m、250m、280m、300m、330m、350m、380m、400m。下面对线路架设单根 LGJ-95/55 型避雷线和单根 GJ-80 型避雷线两种情况进行避雷线分流系数计算。由例 1 计算知 LGJ-95/55 型避雷线单位长度阻抗值为  $0.1746+j0.5843\Omega/\text{km}$ ,GJ-80 型避雷线单位长度阻抗值为  $2.25+j1.57\Omega/\text{km}$ ;按图 3.14 所示模型,结合避雷线分流系数的计算函数可得两种避雷线架设情况下该线路档距取值不同时避雷线分流系数值如表 4.3 所示:

表 4.3 不同档距时避雷线分流系数

档距取值(m)	200	220	250	280	300	330	350	380	400	420
LGJ-95/55 型避雷线分流系数 $K_e$	0.3102	0.3032	0.2934	0.2842	0.2785	0.2704	0.2654	0.2583	0.2539	0.2497
$K_e$ 变化率 (%)	—	2.257	-3.232	-3.136	-2.006	-2.908	-1.849	-2.675	-1.703	-1.654
GJ-80 型避雷线分流系数 $K_e$	0.2007	0.1905	0.1874	0.1808	0.1769	0.1717	0.1685	0.1641	0.1615	0.159
$K_e$ 变化率 (%)	—	-2.84	-3.897	3.522	-2.157	-2.94	-1.864	-2.611	-1.584	-1.548

##### 2. 避雷线分流系数变化规律分析

利用最小二乘法分别对表 4.3 中的杆塔档距和避雷线分流系数  $K_e$  两组数据进行四阶多项式逼近,可得出模拟分析例 2 的避雷线分流系数  $K_e$  随杆塔档距变化的拟合曲线如图 4.1 所示:

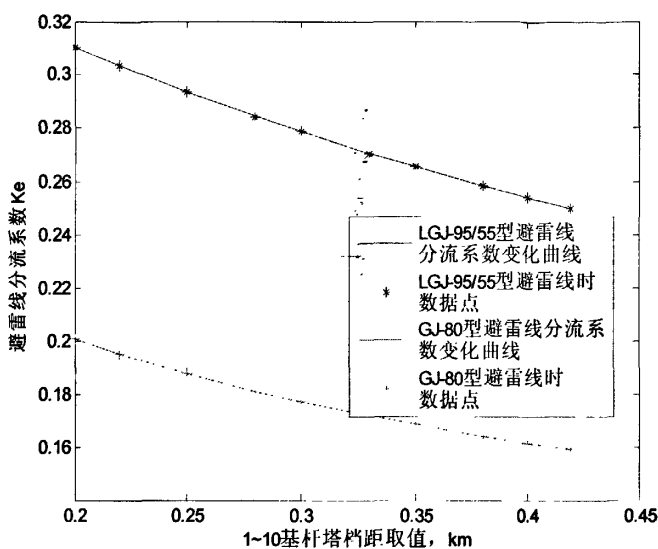


图 4.1 避雷线分流系数随杆塔档距的变化曲线

由以上分析可知，在变电站和杆塔接地电阻及避雷线型号确定的情况下，避雷线分流系数随着杆塔档距的增大而减小，减小杆塔档距可以增大避雷线分流系数。但在杆塔档距相距不是很大的情况下，避雷线分流系数变化幅度不是特别大。

### 4.3 变电站接地电阻的影响

#### 4.3.1 对避雷线分流系数影响分析

由前面章节对变电站内发生接地故障时短路电流分布分析可知，变电站接地网接地电阻值的大小对避雷线分流系数有着很大的影响。

##### 1. 模拟分析例 3

若短路变电站出线线路选用架设双根 GJ-80 避雷线，出线端档距取 75m，1~10 基杆塔档距均取 300 米，杆塔平均电阻取  $10\Omega$ ，避雷线与相线之间几何均距与例 1 相同。则  $Z_{d1}=(1.125+ j0.9748)\times 0.075=0.0844+j0.0731(\Omega)$ ， $Z_{d2}= Z_{d3}=... = Z_{d10}=(1.125+ j0.9748)\times 0.3=0.3375+j0.2924(\Omega)$ ；变电站接地电阻  $R_g$  也分别取  $0.1\Omega$ 、 $0.2\Omega$ 、 $0.3\Omega$ 、 $0.4\Omega$ 、 $0.5\Omega$ 、 $0.8\Omega$ 、 $1\Omega$ 、 $2\Omega$ 、 $3\Omega$ 、 $4\Omega$ ，可利用所编 MATLAB 程序进行计算，计算所得该变电站站内接地短路时避雷线分流系数如表 4.4 所示：

表 4.4 不同变电站接地电阻对应相关参数 1

变电站接地电阻 ( $\Omega$ )	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.8	1	2
分流系数 Ke	0.047	0.089	0.128	0.164	0.197	0.282	0.33	0.496



Ke 变化率 (%)	—	91.06	43.54	27.85	20.02	43.02	16.76	50.35
电位系数 Kg	0.095	0.182	0.261	0.334	0.401	0.573	0.669	1.006

在其他参数不变，避雷线改为单根 LGJ-95/55， $Z_{d1}=0.0262+j0.0592(\Omega)$ ， $Z_{d2}=Z_{d3}=\dots=Z_{d10}=0.1047+j0.2367(\Omega)$ ，此时利用所编 MATLAB 程序进行计算，所得避雷线分流系数如表 4.5 所示。

表 4.5 不同变电站接地电阻对应相关参数 2

变电站接地电阻 ( $\Omega$ )	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.8	1	2
分流系数 Ke	0.060	0.113	0.161	0.203	0.242	0.338	0.390	0.561
Ke 变化率 (%)	—	88.33	42.47	26.08	19.21	39.66	15.38	43.85
电位系数 Kg	0.094	0.177	0.251	0.318	0.378	0.529	0.609	0.877

## 2. 变化规律分析

利用最小二乘法分别对表 4.4 和表 4.5 中的变电站接地电阻值和避雷线分流系数 Ke 两组数据进行四阶多项式逼近，可得出模拟分析例 3 的避雷线分流系数 Ke 随变电站接地电阻 Rg 的拟合曲线，如图 4.2 所示，

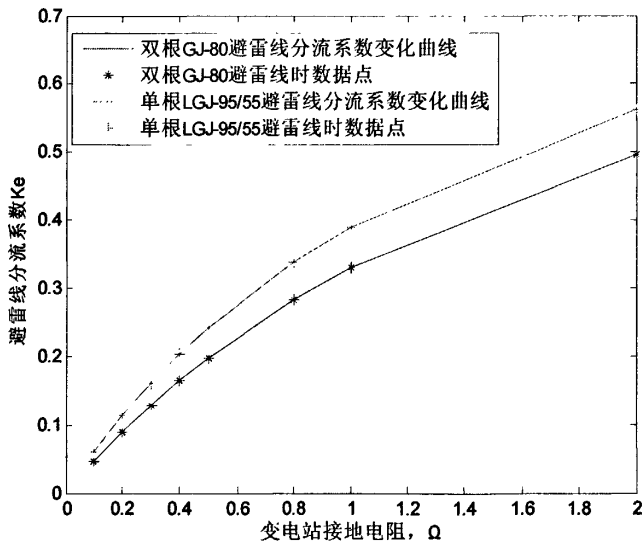


图 4.2 避雷线分流系数随变电站接地电阻变化曲线

由以上分析可知，避雷线分流系数随着变电站接地电阻的增大而增大；随着变电站接地电阻的减小而减小。并且，避雷线分流系数随变电站接地电阻变化而变化的幅值比较大，因此，变电站接地电阻的大小将很大影响着避雷线分流系数。

### 4.3.2 对变电站接地网电位影响分析

由站内短路时流经变电站接地装置的电流计算公式(1.1) 和接地网电位计算

公式(1.2)可得，

$$U_g = (I_{\max} - I_n)(1 - K_e)R \quad (4.17)$$

令

$$U_g = K_g (I_{\max} - I_n) \quad (4.18)$$

则有：

$$K_g = (1 - K_e)R \quad (4.19)$$

定义  $K_g$  为电位变化系数，则在最大短路电流与经中性点回流的电流差  $I_{\max} - I_n$  一定的情况下，变电站接地网地电位只决定于电位变化系数  $K_g$  且与之成正比。模拟分析例 3 中采用不同避雷线的两种情况下计算所得电位变化系数  $K_g$  分别见表 4.4 和表 4.5。

利用最小二乘法分别对表 4.4 和表 4.5 中的变电站接地电阻值和电位变化系数两组数据进行拟合，可得拟合出的变化规律曲线如图 4.3 所示：

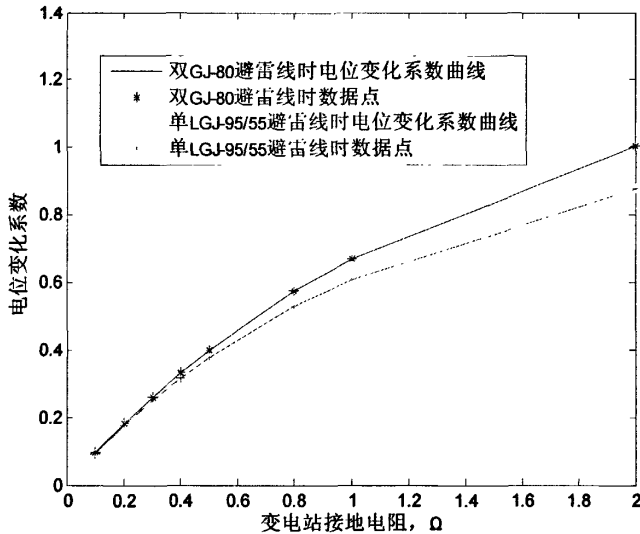


图 4.3 电位变化系数随变电站接地电阻变化曲线

由式图 4.2 和图 4.3 可知，变电站接地电阻越大，避雷线分流系数越大，接地网电位也会越高，相应的，最大跨步电压和最大接触电压也就越大，因此，对电力系统安全稳定运行的危害和人身安全的威胁也就越大；反之，接地网接地电阻越小，对电力系统安全稳定运行和人身安全的危害也就越小。并且，变电站对变电站电位的影响比较大，因此，有必要对变电站进行降低接地电阻改造。

### 4.3.3 降低接地电阻措施

#### 1. 增大接地网

由《工业与民用配电设计手册》中接地电阻的估算公式： $R = 0.5\rho/\sqrt{S}$  可以看出，增大接地网面积是降低接地网接地电阻十分有效的办法。但是随着电力系统

紧凑型、小型化设备的大量采用以及城市用地的紧张,变电站占地面积越来越小,增大变电站本身地网面积便受到很大限制,这时可考虑采用外延接地网等措施。在高阻率地区,若变电站本身地网不能满足接地要求而需另行采用其他降阻措施时,应先对变电站周围进行认真的勘探、测量,当变电站 2km 以内有较低电阻率土壤时,可以敷设外延接地网进行降阻。

## 2. 利用自然接地体

在接地工程中,合理利用一些自然接地体来增大接地体等效几何尺寸,既节省降阻投资,又能取得很好的效果。变电站降阻时可充分利用的自然接地体包括:与大地有可靠连接的建筑物及构架物的金属构架和钢筋混凝土基础,埋设在地下的金属管道,非绝缘的架空地线等,对于水电站或周围有河流的变电站,还应有办法充分利用水资源及水下资源来降阻。

## 3. 等效土壤电阻率

可以采用换土法将接地体周围(约 0.5m)的电阻率较高的土壤置换成电阻率较低的土壤(如粘土、黑土及砂质粘土等),其施工相对来讲比较简单,是高土壤电阻率地区普遍采用的有效办法,但要在取土方便的地方采用。

## 4. 使用降阻剂

在接地极周围施加降阻剂后,能起到降低土壤电阻率和降低接触电阻的作用,也是首选降阻措施之一,其降阻机理如下:

(1) 由于降阻剂的渗透与扩散改善了周围土壤的电阻率从而大大提高了降阻效果。

(2) 利用降阻剂的吸水性和保水性。

(3) 降低接地体周围电阻率并使表面变得光滑从而减小接触电阻。

# 4.4 杆塔接地电阻的影响

## 4.4.1 对避雷线分流系数影响分析

一般而言,避雷线-杆塔系统中的杆塔接地电阻比避雷线阻抗值大的多,对避雷线分流阻抗的大小也有着重要影响,也是研究避雷线分流系数时应重点考虑的因素。

### 1. 模拟分析例 4

假设若某 220kV 变电站接地电阻为  $0.5\Omega$ ,某回出线架设单根 LGJ-95/55 型避雷线,终端塔避雷线档距取值 100m,其他各档距取值 290m,避雷线相关参数按参考文献[35]取值,则  $Z_{d1}=0.035+j0.072\Omega$ ,  $Z_{d2}=Z_{d3}=\dots=Z_{d10}=0.1014+j0.2088\Omega$ ; 分别取前 10 基杆塔接地电阻均为  $5\Omega$ 、 $7\Omega$ 、 $9\Omega$ 、 $11\Omega$ 、 $13\Omega$ 、 $15\Omega$ 、 $17\Omega$ 、 $19\Omega$ 、 $22\Omega$ 、 $25\Omega$ ; 将相关参数代入式(3.25)并利用所编 MATLAB 程序进行计算,

可得杆塔接地电阻不同取值时避雷线分流系数值如表 4.6 所示：

表 4.6 不同杆塔接地电阻时的避雷线分流系数 1

方案	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
杆塔接地电阻( $\Omega$ )	5	7	9	11	13	15	17	19	22	25
分流系数 $K_e$	0.33 01	0.29 27	0.26 38	0.24 02	0.22 04	0.20 35	0.18 99	0.17 61	0.15 99	0.14 63
$K_e$ 变化率 (%)	—	-11. 33	-9.8 74	-8.9 46	-8.2 43	-7.6 68	-6.6 83	-7.2 67	-9.1 99	-8.5 05

以模拟分析例 4 所描述的变电站及杆塔档距取值为基础，改用架设双根 LG J-95/55 型避雷线；则计算结果如表 4.7 所示：

表 4.7 不同杆塔接地电阻时的避雷线分流系数 2

方案	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
杆塔接地电阻( $\Omega$ )	5	7	9	11	13	15	17	19	22	25
分流系数 $K_e$	0.40 19	0.34 93	0.30 84	0.27 57	0.24 91	0.22 7	0.20 84	0.19 26	0.17 29	0.15 68
$K_e$ 变化率 (%)	—	-13. 09	-11. 71	-10. 6	-9.6 48	-8.8 72	-8.1 94	-7.5 82	-10. 23	-9.3 12

## 2. 分流系数变化规律分析

利用最小二乘法分别对表 4.6 和表 4.7 中的变电站接地电阻值和避雷线分流系数  $K_e$  两组数据进行四阶多项式逼近，可得出模拟分析例 3 的避雷线分流系数  $K_e$  随杆塔接地电阻变化规律拟合曲线，如图 4.4 所示，

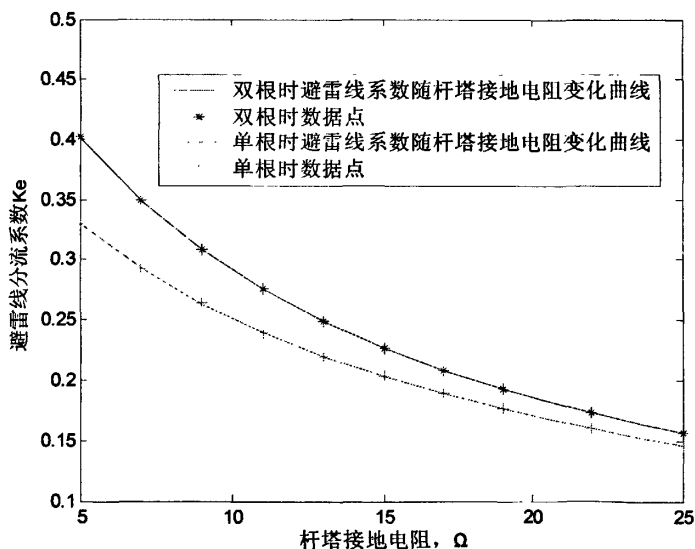


图 4.4 避雷线分流系数随杆塔接地电阻的变化曲线

### 3. 调整方案研究

为了更准确的得出前5基与后5基杆塔接地电阻对避雷线分流系数的影响程度，采用前5基和后5基接地电阻不同（对调取值）的取值方案，对例4计算结果如表4.8和表4.9所示：

表 4.8 例 4 调整方案后单避雷线时的计算结果

方案		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
杆塔接地电阻( $\Omega$ )	第 1~5 基	5	25	7	22	9	19	11	17	13	15
	第 6~10 基	25	5	22	7	19	9	17	11	15	13
避雷线分流系数 $K_e$		0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
		11	24	68	15	42	11	25	08	15	09

表 4.9 例 4 调整方案后双避雷线时的计算结果

方案		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
杆塔接地电阻( $\Omega$ )	第 1~5 基	5	25	7	22	9	19	11	17	13	15
	第 6~10 基	25	5	22	7	19	9	17	11	15	13
避雷线分流系数 $K_e$		0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
		43	89	95	63	67	49	49	39	39	37

由表 4.8、表 4.9 和图 4.4 可以看出，在变电站接地电阻和避雷线参数确定的情况下，避雷线分流系数随杆塔接地电阻的增大而减小，杆塔接地电阻每增大  $2\Omega$  左右，避雷线分流系数便减小 10% 左右；反之，随杆塔接地电阻的减小而增大。减小杆塔接地电阻可以增大避雷线分流系数。另外，通过表 4.8 和表 4.9 可以看出，前 5 基杆塔接地电阻比后 5 基杆塔接地电阻对避雷线分流系数的影响更大。故，为了有效增大避雷线分流系数，要着重降低靠近变电站的几基杆塔接地电阻，这样可以起到事半功倍的效果。

#### 4.4.2 降低杆塔接地电阻措施

##### 1. 规程规定

DL/T621-1997《交流电气装置的接地》的 6.3 条对高压架空线路杆塔接地装置型式做了具体的要求如下：

① 有地线（避雷线）的送电线路每基杆塔的接地装置，在雷季干燥时，不连地线的工频接地电阻，不宜超过表 4.10 所列数值。

表 4.10 有地线架空送电线路杆塔的工频接地电阻

土壤电阻 $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	100 及以下	100 以上至 500	500 以上至 1000	1000 以上至 2000	2000 以上
工频接地电阻 ( $\Omega$ )	10	15	20	25	30

② 在土壤电阻率  $100\Omega\cdot m < \rho \leq 300\Omega\cdot m$  的地区，除利用铁塔和钢筋混凝土杆的自然接地外，并应增设人工接地装置，接地极埋设深度不宜小于 0.6m。

③ 在土壤电阻率  $300\Omega\cdot m < \rho \leq 2000\Omega\cdot m$  的地区，可采用水平敷设的接地装置，地极埋设深度不宜小于 0.5m。

④ 在土壤电阻率  $\rho > 2000\Omega\cdot m$  地区，可采用 6-8 根总长不超过 500m 的放射形接地极或连续伸长接地极。放射形接地极可采用长短结合的方式。接地极埋设深度不宜小于 0.3m。

⑤ 放射形接地极的最大长度，应符合表 4.11 的要求。

表 4.11 杆塔放射形接地极每根的最大长度

土壤电阻率 ( $\Omega\cdot m$ )	$\leq 100$	$\leq 1000$	$\leq 2000$	$\leq 5000$
最大长度 (m)	40	60	80	100

## 2. 降阻措施探讨

### (1) 水平外延接地

若杆塔所在的地方允许水平放射接地体时应尽量采用水平放射方式。因为水平放射施工费用低，不但可以降低工频接地电阻，还可以降低冲击接地电阻，起到有效的防雷作用。

### (2) 深埋式接地极

如地下深处的土壤电阻率较低，可用竖井式或深埋式接地极。它具有不易受外力破坏、不易氧化锈蚀、钢材消耗量小等优点。目前国内有在杆塔基础下部打入深埋式接地极的应用与报道，只适用于土壤电阻率较低 ( $\rho \leq 300\Omega\cdot m$ ) 的地方

### (3) 降阻剂

填充电阻率较低的物质或降阻剂是规程推荐的有效方法，如附近有可以利用的低电阻率物质可以因地制宜，综合利用。

### (4) 接地模块

非金属接地模块由导电性、稳定性较好的非金属材料和电解物质组成。能成倍地加大接地体和土壤层之间的接触面积，从而增大接地体的散流面积，减小了接地体和土壤之间的接触电阻。且非金属接地模块还具有很强的吸湿性和保湿性，从而能充分发挥了接地体中电解质的导电作用。

### (5) 爆破接地技术

这种方法的基本原理是用钻机垂直钻孔几十米( $\phi 100$  mm)，在孔中布置接地电极，然后沿孔每隔一定的距离安放一定量的炸药来进行爆破，将岩石爆裂、爆松，接着用压力机将调成浆状的物理降阻剂压入深孔及爆破制裂产生的缝隙中，以达到通过降阻剂将地下巨大范围内的土壤内部沟通，加强接地电极与土壤、岩

石的接触，从而达到较大幅度降低接地电阻的目的。但此项技术的缺点是工程造价高，而且用于杆塔降阻时要考虑对杆塔基础稳定性的影响。

## 4.5 线路回路数的影响

### 4.5.1 同塔多回线路影响分析

电力线路中的每一根导与线避雷线之间都存在耦合，在避雷线上产生感应电动势。对于同塔多回线路而言，不同回路的各相导线与避雷线之间的耦合作用也不一样。导线与避雷线之间的耦合系数( $k_0$ )可由无损平行多导线系统波的传播方程求。设有与地面平行的  $n$  根平行导线系统，导线  $k$  的电位可由麦克斯韦静电方程求得为：

$$U_k = z_{k1}i_1 + z_{k2}i_2 + \cdots + z_{kk}i_k + \cdots + z_{kn}i_n \quad (4.20)$$

式中， $z_{kk}$ —导线  $k$  的自波阻抗；

$z_{kn}$ —导线  $k$  与导线  $n$  间的互波阻抗。

$$z_{kk} = 60 \ln \frac{2hk}{r_k}, z_{kn} = 60 \ln \frac{D_{kn}}{d_{kn}}$$

其中， $r_k$ —导线  $k$  的半径；

$h_k$ —导线  $k$  的平均高度；

$d_{kn}$ —导线  $k$  与导线  $n$  间的距离；

$D_{kn}$ —导线  $n$  与导线  $k$  的镜像间的距离；

对于一根避雷线（设为 1）及任意一根导线（设为 2），则按式（4.20）可列出：

$$u_1 = z_{11}i_1 + z_{12}i_2 \quad (4.21)$$

$$u_2 = z_{21}i_1 + z_{22}i_2$$

由于导线（2）是对地绝缘的，故  $i_2 = 0$ ，于是可得到避雷线与这一根导线之间的耦合系数  $k_{0-1}$  为：

$$k_{0-1} = \frac{\ln \frac{D_{12}}{d_{12}}}{\ln \frac{2h_1}{r_1}} \quad (4.22)$$

式中， $r_1$ —避雷线的半径；

$h_1$ —避雷线的平均高度；

$d_{12}$ —避雷线与导线间的距离；

$D_{12}$ —避雷线与导线镜像间的距离。

利用麦克斯韦方程，可求得两根避雷线（1 及 2）与一根导线（3）的几何耦

合系数为：

$$k_{0-2} = \frac{z_{13}(z_{22} - z_{12}) + z_{23}(z_{11} - z_{12})}{z_{11}z_{22} - z_{12}^2} \quad (4.23)$$

式中， $Z_{11}$ 、 $Z_{22}$ —分别为避雷线（1）及避雷线（2）的自波阻抗；

$Z_{12}$ —避雷线（1）与避雷线（2）之间的互波阻抗；

$Z_{13}$ 、 $Z_{23}$ —分别为避雷线（1）和避雷线（2）与导线（3）间的互波阻抗；

由式（5.20）、式（5.22）和式（5.23）可以看出，与避雷线距离越近的导线，其耦合作用越强；反之，距离越远，耦合作用越小。在同塔多回线路中，由于每一回路的各相导线与避雷线之间的距离相差一般比较大，耦合作用相差也比较大。当变电站内不同相发生接地短路时，在避雷线上所产生的感应电压也不同，进而对避雷线分流系数的影响也不一样。一般而言，当位于最上方（离避雷线最近）的一相导线发生接地短路时，避雷线分流系数会相对大一些；当位于最下方（离避雷线最远）的一相导线发生接地短路时，避雷线分流系数相对会小一些。

## 4.5.2 多条进出线路影响分析

### 1. 多条进出线路时分流阻抗探讨

在有多条架设避雷线的进出线的变电站，当站内发生接地短路时，各条进出线的避雷线均能对最大接地短路电流起到分流作用。对于整个变电站而言，避雷线分流阻抗有效总值实际上是多条避雷线并联值。由于站内发生接地短路时最大接地短路电流比较大，在变电站附近部分的各进出线上均产生较大耦合作用，使得各条线路的避雷线之间产生互感屏蔽作用。假设一变电站有  $n$  条假设避雷线的进出线，如图 4.5 所示，

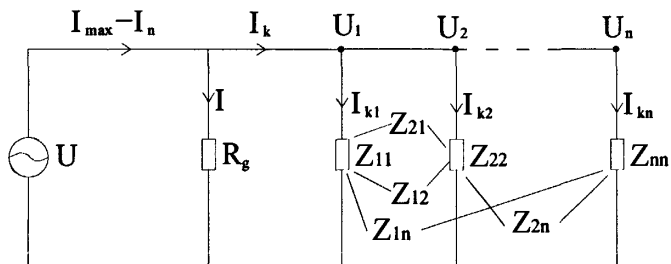


图 4.5 多条进出线架设避雷线时分流阻抗分析图

图 4.5 中， $Z_{11}$  表示第 1 条线路自身避雷线分流阻抗， $Z_{22}$  表示第 2 条线路自身避雷线分流阻抗， $Z_{nn}$  表示第  $n$  条自身避雷线分流阻抗； $Z_{12}$ 、 $Z_{1n}$  表示第 1 条线路与第 2、第  $n$  条线路间的互阻抗， $Z_{21}$ 、 $Z_{2n}$  表示第 2 条线路与第 1、第  $n$  条线路间的互阻抗。

各阻抗之间的关系可以仿静电方程式写出



$$\begin{aligned}
 U_1 &= Z_{11}I_{k1} + Z_{22}I_{k2} + \dots + Z_{1n}I_{kn} \\
 U_2 &= Z_{21}I_{k1} + Z_{22}I_{k2} + \dots + Z_{2n}I_{kn} \\
 &\dots \\
 U_n &= Z_{n1}I_{k1} + Z_{n2}I_{k2} + \dots + Z_{nn}I_{kn}
 \end{aligned}
 \tag{4.24}$$

式中， $U_1、\dots、U_n$ —第 1~n 条避雷线分流阻抗上的电位；

$I_{k1}、\dots、I_{kn}$ —第 1~n 条避雷线的分流电流；

$Z_{ii}、\dots、Z_{ik}$ —第 i 线路避雷线分流阻抗自身值，第 i 和第 k 线路间的互阻抗。

式 (2.31) 的自电阻和互电阻，是借用静电方程式中的自电位系数和互电位系数的概念来导出的。根据互换原理，具有同样的两个数字脚码但排列次序不同的电位系数是相等的，即有：

$$Z_{ik} = Z_{ki} \tag{4.25}$$

若某变电站短有两条架设避雷线的线路，则当站内接地短路时有：

$$\begin{aligned}
 U_1 &= Z_{11}I_{k1} + Z_{12}I_{k2} \\
 U_2 &= Z_{21}I_{k1} + Z_{22}I_{k2}
 \end{aligned}
 \tag{4.26}$$

因为  $U = U_1 = U_2, I_k = I_{k1} + I_{k2}$ ，则该变电站的避雷线分流阻抗等效值为：

$$Z_{\text{效}} = \frac{U}{I_k} = \frac{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}^2}{Z_{11} + Z_{22} - 2Z_{12}} > \frac{Z_{11}Z_{22}}{Z_{11} + Z_{22}} \tag{4.27}$$

可见，两条线路的避雷线分流阻抗有效值并不等于它们自身分流阻抗的并联值，而是由于屏蔽作用的存在大于它们自身阻抗的并联值。因此，引入一个屏蔽系数进行修正，即

$$Z_{\text{总}} = \eta \times Z_{\text{效1}} // Z_{\text{效2}} // \dots // Z_{\text{效n}} \tag{4.28}$$

式中， $\eta$ —屏蔽系数，取 1~1.2；

$Z_1、Z_2、\dots、Z_n$ —分别为第 1 条、第 2 条、...、第 n 条线路避雷线的分流阻抗等效值。

## 2. 模拟分析例 5

取变电站接地电阻  $R_g$  分别为  $0.2\Omega$  和  $0.3\Omega$ ，架设单根 LGJ-95/55 避雷线，其相关参数和杆塔接地电阻及杆塔档距等均以模拟分析例 1 中参数取值；取避雷线出线数分别为 1~10 条，各回避雷线进出线间屏蔽系数分别取 1~1.2，则可得出避雷线分流系数如表 4.12 所示，

表 4.12 避雷线分流系数受进出回路数的影响

避雷线进出回路数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_g=0.2\Omega$ 时避雷线分流系数 $K_e$	0.08	0.16	0.24	0.27	0.31	0.34	0.38	0.40	0.43	0.45
	98	21	02	13	35	98	14	91	35	53

Ke 变化率 (%)	—	80.5	48.1	12.9	15.5	11.5	9.03	7.26	5.96	5.02
		12	8	47	55	79	37	27	43	88
Rg=0.3Ω 时避雷线分流系数 Ke	0.12	0.22	0.32	0.35	0.40	0.44	0.48	0.50	0.53	0.55
	89	49	17	83	65	66	05	94	45	63
Ke 变化率 (%)	—	74.4	43.0	11.3	13.4	9.86	7.59	6.01	4.92	4.07
		76	41	77	52	47	07	46	74	86

### 3. 分流系数变化规律分析

利用最小二乘法分别对表 4.12 中的变电站接地电阻值和避雷线分流系数 Ke 两组数据进行逼近, 可得出避雷线分流系数 Ke 随杆塔档距变化规律拟合曲线如图 4.6 所示,

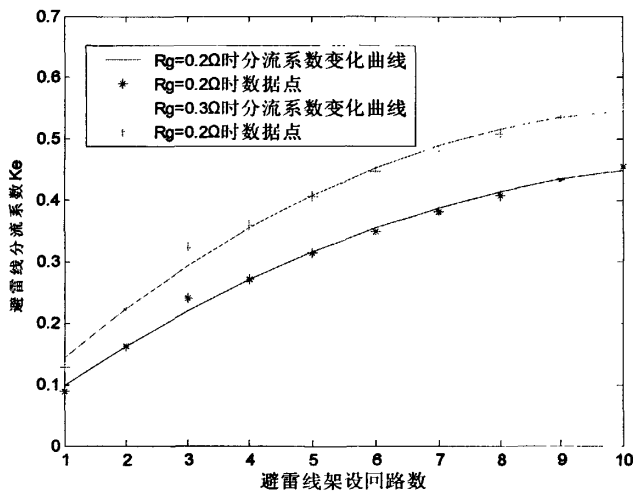


图 4.6 有效避雷线分流系数随进出线回路数变化曲线

由表 4.12 和图 4.6 可以看出, 架设有避雷线的进出线回路数越多, 变电站的有效避雷线分流系数越大。在变电站回路数比较少的时候, 增加架设有避雷线的回路数对有效避雷线分流系数的增大幅度较大。但在架设有避雷线的回路数增大到一定数目以后, 避雷线分流系数增加缓慢, 呈现稳定趋势, 如模拟分析例 5 的避雷线分流系数基本稳定在 0.6 以内。

## 4.6 季节因素的影响

接地系统是电力系统安全运行的基本保证, 其接地电阻等电气参数决定于所处的土壤情况, 而对于地址结构固定的已建成变电站, 季节因素将明显影响其土壤电阻率<sup>[47, 48]</sup>。冬季对土壤的冰冻作用将导致土壤地表的电阻率明显增加, 多年冻土的电阻率可达未冻土电阻率的数十倍<sup>[49]</sup>。受季节影响的地表层厚度小于电网接地装置的埋设深度时, 地表高阻层对接地网的接地电阻影响很小, 而地表高

阻层厚度超过接地网的埋深时，接地电阻将急剧增加。接地电阻的变化将引起避雷线分流系数的变化，以下面模拟实例来分析季节因素对避雷线分流系数的影响作用。

假设某 500kV 变电站 A 共有 5 回进出线，其中 1 回与变电站 B 连接，这两个变电站之间通过两根架空避雷线相联，一根为 LGJ-95/55，阻抗为  $Z_{D1}=0.35+j0.72\Omega/\text{km}$ ，另一根 OPGW 阻抗为  $Z_{D2}=0.37+j0.81\Omega/\text{km}$ ，输电线路全长 200km，其杆塔档距为 400m，终端塔档距为 100m，即  $Z_{d1}=0.18+j0.3812\Omega, Z_{d2}=Z_{d3}=\dots=Z_{d10}=0.72+j1.525\Omega$ 。变电站接地网尺寸为  $400\text{m}\times 400\text{m}$ ，按间距为 20m 均匀布置，埋深为  $H=1\text{m}$ （正常接地电阻为  $0.113\Omega$ ）；输电线路杆塔的接地装置为十字形结构，埋深为  $h=0.6\text{m}$ （正常季节接地电阻为  $10\Omega$ ），如图 4.7 所示。

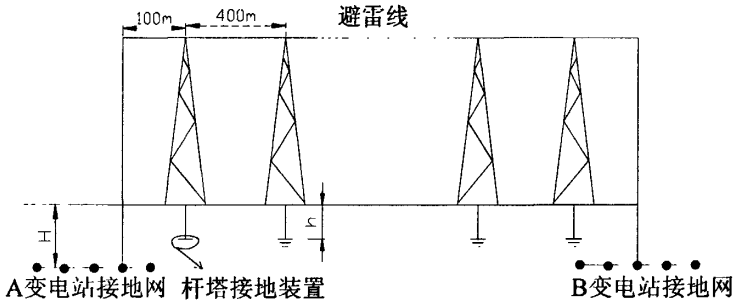


图 4.7 A 与 B 变电站连接示意图

若不采用垂直接地极，当土壤地表的冻土层由薄变厚时，地表高电阻率层的厚度对变电站接地系统和输电线路杆塔接地装置接地电阻的影响如表 4.13 所示：

表 4.13 无垂直接地极时冻土层对接地电阻影响

冻土层厚度 (m)	变电站水平地网接地电阻( $\Omega$ )	十字型杆塔结构接地电阻( $\Omega$ )
0.0	0.1130	10
0.5	0.1140	11.62
0.7	0.1146	21.77
0.9	0.1158	115.10
1.1	0.2595	160.79
1.2	0.2933	178.10
1.5	0.3397	220.10
3.0	0.4243	334.59

基于表 4.13 中所给数据，可以算得该回路避雷线分流系数如表 4.14 所示：

表 4.14 无垂直接地极时避雷线分流系数随冻土层深度的影响

冻土层深度/m	0.0	0.5	0.7	0.9	1.1	1.2	1.5	3.0
避雷线分流系数 K <sub>e</sub>	0.029	0.027	0.020	0.007	0.013	0.014	0.013	0.011
Ke 数据变化率 (%)	—	-6.55	-26.2	-61.0	71.79	4.477	-3.57	-14.0
相对无冻土层时 K <sub>e</sub> 变化率 (%)	—	-6.55	-31.0	-73.1	-53.7	-51.7	-53.4	-60.0

采用垂直接地极可有效降低存在季节冻土时接装置的接地电阻,由于杆塔接地装置和变电站接地网接地电阻降低比率不一样,则避雷线分流系数变化也不一样。将上述 A 变电站接地网的四角和各边中点共埋设 8 根长度为 40m 的垂直接地极,在杆塔四角共埋设 4 根长度为 5m 的垂直接地极时,变电站和杆塔接地电阻随冻土层变化的影响如表 4.15 所示:

表 4.15 有垂直接地极时冻土层对接地电阻影响

冻土层厚度/m	有垂直接地极时变电站网接地电阻/ $\Omega$	有垂直接地极时十字型杆塔结构接地电阻/ $\Omega$
0.0	0.1116	3.7367
0.5	0.1124	3.9878
0.7	0.1129	5.6343
0.9	0.1139	5.8484
1.1	0.2128	6.0033
1.2	0.2305	6.1382
1.5	0.2527	6.4538
3.0	0.2903	8.8374

基于表 4.15 中所给数据,可以算得该回路避雷线分流系数如表 4.16 所示:

表 4.16 有垂直接地极时避雷线分流系数随冻土层深度的影响

冻土层深度/m	0.0	0.5	0.7	0.9	1.1	1.2	1.5	3.0
避雷线分流系数 K <sub>e</sub>	0.047	0.046	0.039	0.038	0.068	0.073	0.078	0.075
Ke 变化率 (%)	—	-2.49	-16.3	-1.02	78.49	6.386	7.503	-3.93
相对无冻土层时 K <sub>e</sub> 变化率 (%)	—	-2.5	-18.3	-19.2	44.2	53.4	64.9	58.4

为了得到更准确的变化规律,利用最小二乘法分别对表 4.14 和表 4.16 中的

冻土层深度和避雷线分流系数  $K_e$  两组数据进行 8 阶多项式逼近, 可得出避雷线分流系数  $K_e$  随冻土层深度变化规律拟合曲线如图 4.8 所示,

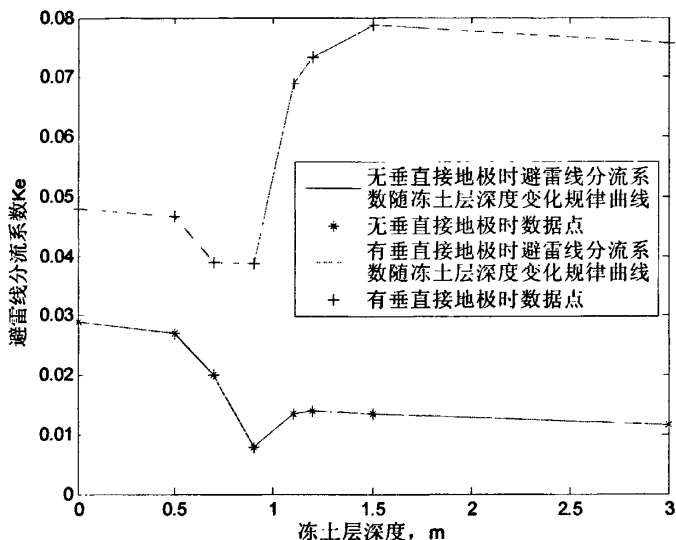


图 4.8 避雷线分流系数受冻土层影响曲线

由于一些寒冷地区季节冻土对变电站接地网和杆塔接地装置影响效果不同, 避雷线分流系数也随之变化; 但在有垂直接地极时季节因素对变电站和杆塔接地电阻影响相对小很多。由表 4.15、表 4.16 和图 4.8 可知, 当冻土层超过杆塔接地装置埋深 (0.6m) 而未到达变电站接地网埋深 (1.0m) 时, 避雷线分流系数都减小; 当冻土层同时超过杆塔接地装置和变电站接地装置埋深时, 由于变电站接地电阻也开始增大, 避雷线分流系数开始增加并逐渐趋于稳定; 因为有垂直接地极时冻土层对杆塔接地装置的影响相对减小, 有垂直接地极时比没有垂直接地极时避雷线分流系数增大的幅度要大。

由以上分析, 在冻土层地区进行接地装置埋设时, 要尽量埋设在冻土层以下。并且, 采用垂直接地极可以增大避雷线分流系数, 进而减小站内短路对系统稳定性和人身安全等造成的威胁。

## 4.7 本章小结

本章主要对避雷线分流系数的影响因素进行了研究, 主要得到如下结论:

(1) 避雷线型号和材料及杆塔档距均对避雷线分流系数有着重要影响。采用双根避雷线时比采用单根避雷线时的效果好, 但相对而言, 采用钢芯铝绞线比钢绞线做避雷线的分流效果好的多, 即避雷线材料比避雷线型号 (如横截面积等) 的对分流系数的影响更大。杆塔档距越大, 避雷线分流系数越小, 但档距变化不是特别大时, 避雷线分流系数的变化幅度不是很大。

(2) 变电站接地电阻越大, 避雷线分流系数越大, 但接地网电位也越大, 对

系统危害也越大，并且随着变电站接地电阻的变化，接地网电位的变化幅度比较大。因此，降低变电站接地电阻能有效降低站内短路时的接地网电位，进而降低最大跨步电压和最大接触电压。

(3) 避雷线分流系数随杆塔接地电阻的减小而增大，且增幅比较大。另外，越靠近变电站的杆塔，其接地电阻值对分流系数的影响越大。因此，有必要采取措施对靠近变电站的几基杆塔进行适当的降阻。

(4) 架设避雷线的进出线回路数越多，避雷线分流系数越大，当回路数特别多时，由于各回线之间的屏蔽作用，避雷线分流系数会逐渐趋于稳定。在同塔多回线路中，越靠近避雷线的一相导线发生接地短路，由于耦合作用，避雷线分流系数会越大。

## 结论

目前常用的两种避雷线分流系数分析计算即序分量模型法和相分量模型法存在各自的缺点与不足，难以解决实际问题。本文通过搭建避雷线-杆塔系统数学模型，对避雷线分流阻抗与杆塔总基数的关系研究，得到实用实用分流阻抗模型；基于实用分流阻抗模型结合对站内短路电流分布的分析，推导出避雷线分流系数的计算公式。并利用实用分流阻抗模型对避雷线分流系数影响因素进行了研究，主要得出如下结论：

(1) 序分量法在考虑到线路换位等实际情况使得各相电量之间的关系不对称时便无法求解；且存在因计算参数如沿线路土壤电阻率等参数无法确定使计算无法进行的问题。基于相分量模型的双侧消去法要以线路的电气结构一致为前提，另外，从向分量模型本身和计算过程来看，很多参数都是未知量，因而并没有多大的实用价值。

(2) 通过对避雷线-杆塔系统数学模型的搭建及其有效阻抗即避雷线分流阻抗影响因素的进行研究。借助 MATLAB 编程对避雷线分流阻抗进行计算，找出了避雷线分流阻抗与杆塔总基数的大致关系，即避雷线分流阻抗值主要决定于前 10 基杆塔的避雷线-杆塔系统。由此得到避雷线-杆塔系统的实用分流阻抗分析模型。通过对一些线路的现场测量和分析计算，验证了实用分流阻抗模型的正确性。结合对变电站内短路电流分布的分析，推导出避雷线分流系数计算公式。该方法只考虑第 10 基杆塔之前的避雷线-杆塔系统，所考虑范围相对小得多，使得土壤电阻率取值比较容易，对无论避雷线何种接地方式、短路点两侧电气结构是否对称的线路，都能较为准确的计算出避雷线分流系数，进而解决了目前常用避雷线分流系数分析计算方法的一些不足。

(3) 以站内短路时短路电流分布实用数学模型为基础，利用最小二乘法对避雷线分流系数与其影响因素进行了研究，找出了它们之间的变化规律。避雷线分流系数随着变电站接地电阻的增大而增大，但同时地电位也增大，相应的最大跨步电压和最大接触电压也会增大，给电力系统的危害性也越大。因此，在考虑避雷线分流系数影响因素的情况下，合理的对变电站进行降低接地电阻改造将非常重要。

导电性能好的避雷线比导电性能差的避雷线分流效果明显要好；对于同一种材料避雷线而言，其横截面积越大避雷线分流系数越大，即分流效果越好；架设双回避雷线比架设单回避雷线时分流效果要明显好很多；另外，避雷线分流系数随着杆塔档距的增大而减小。在比较重要的一些线路中，应尽量采用良导体避雷

线并可考虑架设双根避雷线。

杆塔接地电阻是影响避雷线分流系数的很重要因素，避雷线分流系数随杆塔接地电阻的减小而增大；且越靠近变电站，对避雷线分流系数影响越大。因此，对靠近变电站的几基杆塔进行合理降阻是非常必要的。

对于各相导线与避雷线距离相差较大的同塔多回线路而言，离避雷线最近的一相导线发生接地短路时，避雷线分流系数会相对大一些，反之会小一些。避雷线分流系数随进出避雷线回路数的变化趋势明显，增加进出变电站的避雷线回路数对改善避雷线分流效果作用十分明显。

对于寒冷地区，季节影响也是十分明显；在冻土层超过杆塔接地装置埋深而未达到变电站接地网埋深时，避雷线分流系数开始减小，但当冻土层同时两者接地装置埋深时，避雷线分流系数开始回升，且没有垂直接地极时比有垂直接地极时避雷线分流系数回升幅度要大很多。因此，在进行接地装置设计或改造时，要将接地装置埋设在冻土层以下。



## 参考文献

- [1] 贺健,刘洪涛,杨京燕.电网规划中短路电流限制措施的研究.中国电力教育,2007年研究综述与技术论坛专刊:(50-52)
- [2] ANSI/IEEE Std80-2000.IEEE Guide for Safety in AC Substation Ground-ing.2000
- [3] 川濑太郎,高桥健彦.图解接地技术.马杰译.北京:科学出版社,2003,10-16
- [4] 川濑太郎.接地技术与接地系统.冯允平译.北京:科学出版社,2001,1-9
- [5] 陈家斌.接地技术与接地装置.北京:中国电力出版社,2003,234-237
- [6] 向铁元,丁坚勇,仝猛.接地的重要性.电力系统及其自动化学报,2001,13(1):26-30
- [7] 李进扬.大型地网接地电阻的测量.高电压技术,2006,32(10):141-142
- [8] 王昭斌.接地系统安装设计中应注意的几个问题.大连大学学报,2006,27(4):97-102
- [9] 朱颖.变电站接地设计相关问题的探讨.兰州石化职业技术学院学报,2006,6(2):16-18
- [10] 解广润.电力系统接地技术.北京:水利电力出版社,1991,118-133
- [11] 邓雨荣,何金良,马玉林.变电站接地系统状态评估方法.广西电力,2006(5):1-4
- [12] 吴新丽.跨步电压触电的研究.河南广播电视大学学报,2006,19(3):57-58
- [13] 朱文强.降低接触电压和跨步电压的方法.水利科技,2006(2):54-55
- [14] 张亮.变电所接地设计问题分析.中国农村水利水电,2004(8):95-100
- [15] 李景禄,胡毅,刘春生.实用电力接地技术.北京:中国电力出版社,2002,67-92
- [16] 李景禄.接地装置的运行与改造.北京:中国水利水电出版社,2005,32-61
- [17] Sverak J G.Optimum grounding grid design using variable spacing technique.IEEE T-PAS,1976,95(1):362-374
- [18] Dawalibi F,Mukhedkar D.Optimum design of substation grounding in a two layer earth structure.IEEE T-PAS,1975,94(2):252-272
- [19] Huang L,Chen X,Yan H.Study of unequally spaced grounding grids [J].IEEE Trans on PWRD,1995,10(5):716-722
- [20] 孙旭,王琦.变电站接地网优化设计.广东电力,2005,12(3):16-18

- [21] 高延庆, 何金良, 曾嵘. 发、变电站接地网安全性能分析. 中国电力, 2001, 34(5):33-36
- [22] Stoll R L. The analysis of eddy currents. Oxford: Oxford University Press, 1974, 15-36
- [23] Frederick Wgrover. Inductance calculations. New York: Dover publications, 1962, 24-54
- [24] 李中新, 袁建生, 张丽萍. 变电站接地网模拟计算. 中国电机工程学报, 1999, 19(5):76-79
- [25] Hyung-soo Lee, Jung-Hoo, Dawalibi F, et al. Efficient ground grids designs in layered soils. IEEE Trans on PWRD, 1998, 13(3):745-751
- [26] 李长益. 接地网入地短路电流的计算. 江苏电机工程, 1999, 18(1):4-7
- [27] 郑巍, 张德艺. 深圳地区变电站接地电阻计算中分流系数的探讨. 广东电力, 2004, 17(2):22-24
- [28] Dawalibi F. Ground fault current distribution between soil and neutral conductors. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(2):452-461
- [29] Dawalibi F, Niles G B. Measurements and computations of fault current distribution on overhead transmission lines. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS-103(3):553-560
- [30] 邹军, 袁建生, 李昊等. 架空线路短路电流分布及地线屏蔽系数的计算. 电网技术, 2000, 24(10):27-30
- [31] 汤寿泉, 孙旭. 短路电流分流系数的计算与测试方法. 广东输电与变电技术, 2003(2):5-8
- [32] 赵志斌, 李琳, 崔翔. 电力线路架空地线分流电流的计算. 华北电力大学学报, 2002, 29(4):5-7
- [33] Dawalibi F, Donoso F. Integrated analysis software for grounding, EMF and EMI. IEEE computer application in power, 1993, 6(2):19-24
- [34] 邹军, 袁建生, 周宇坤等. 统一广义双侧消去法与架空线路地下电缆混合输电系统故障电流分布的计算. 中国电机工程学报, 2002, 10(10):112-115
- [35] 李亚平, 包德章. 架空地线返回电流分布简易模型及应用. 华中电力, 2004, 17(4):4-6
- [36] 卢文朋, 吴佩雄主编. 发电厂变电所电气设备. 北京: 水利电力出版社, 2007, 13-15
- [37] 李润先. 中压电网系统接地实用技术. 北京: 中国电力出版社, 2002: 15-23
- [38] 唐勇, 王大, 唐圣严等. 对架空避雷线进行技术改造的综合措施方案. 高电

- 压技术, 1997,23(1):77-80
- [39] 刘一平. 微机变压器保护的现状及原理的模糊化分析. 新祖国钢铁, 2003/1:21-24
- [40] 陈家斌. 电气设备故障检测诊断及实例. 北京:中国水利水电出版社, 2003:40-385
- [41] 曾永林. 接地技术. 北京:水利电力出版社, 1979:78-96
- [42] He Jinliang, Zeng Rong, Gao Yanqing, et al. Seasonal influences on safety of substation grounding system. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3):788-795
- [43] 王晶晶, 何金良, 邹军. 季节性冻土对变电站接地系统分流系数的影响. 电网技术, 2006, 30(2):41-45
- [44] He Jinliang, Gao Yanqing, Zeng Rong, et al. Optimal design of grounding system considering the influence of seasonal frozen soil layer. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1):107-115
- [45] 李德超, 李景禄, 万欣等. 避雷线分流系数现场实测研究. 电瓷避雷器, 2008, (3):28-31
- [46] Alfio Quarteroni & Fausto Saleri. MATLAB 科学计算(原名: Scientific Computing with MATLAB). 李敏波译. 北京: 清华大学出版社, 2005:48-67
- [47] 孙为民, 何金良, 曾嵘等. 季节因素对发变电站接地系统安全性能的影响. 中国电机工程学报, 2000, 20(1):15-18
- [48] 孙为民, 何金良, 曾嵘等. 季节因素对发变电站地表高阻层安全效果的影响. 中国电机工程学报, 2000, 20(1):15-18
- [49] 王晶晶, 何金良, 邹军. 季节性冻土对变电站接地系统分流系数的影响. 电网技术, 2006, 30(2):41-45

## 致 谢

本论文是在导师李景禄教授的悉心指导下完成的。李老师开阔的思维、渊博的知识、灵活处理问题的方式、严谨的治学态度都将使我受益终身。在学业上，导师提供了良好的研究环境使课题得以顺利完成；在生活上，导师给予我诸多的关怀，在此谨向李老师致以我最诚挚的谢意和最崇高的敬意！

在论文完成过程中得到了江西九江供电公司领导和员工的大力支持，同时也得到了重庆市电力公司长寿供电局万欣师兄的帮助，在此向你们表示深深的感谢！

感谢李灵同学在 MATLAB 分析计算方面给予我的极大帮助，同时感谢女友张玉环和室友张平、郝建军等同学在平时生活上给予的帮助和包容。

在三年的研究生学习生活中，得到了电气学院高电压研究所有同学和师弟师妹们的帮助和支持，是你们的友谊让我度过了愉快的研究生生活，同时也得到电气与信息工程学院多位老师的关心和帮助，在此向你们一并表示衷心的感谢！

特别要感谢养育我二十多年的父母，从你们身上继承的纯朴坚强是我一生的财富，感谢你们给予我的物质和精神上的支持，感谢亲人们的关怀，你们的理解、关心、支持和鼓励是我克服一切困难向前迈进的动力。

最后对在百忙之中抽出时间评阅论文的参加答辩的各位专家、教授表示衷心的感谢！由于本人水平有限，缺点在所难免，恳请各位专家们批评指正。

李德超

2009.4

## 附录 A 攻读硕士学位期间发表论文及参研课题

### 1. 发表的学术论文

- [1] 李德超, 李景禄, 张玉环等.关于架空地线工频分流系数测试方法的探讨[J].电力建设(核心期刊): 2008年3月已登刊。
- [2] 李德超, 李景禄等.两种杆塔接地电阻测量方法的分析比较[J].电瓷避雷器(核心期刊): 2008年4月已登刊。
- [3] 李德超, 李景禄等.避雷线分流系数现场实测研究[J].电瓷避雷器(核心期刊): 2008年6月已登刊。
- [4] Li De chao, Li Jing lu,Zhang Yu huan.Field Measurement Studies on Shunt Coefficient of Lightning Shield Line[C].International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation(已被 EI 检索)。
- [5] 李德超, 李景禄等.架空线路外绝缘污闪及其防护[J].绝缘材料(核心期刊): 2009年2月已登刊。

### 2. 参加的科研课题

- [1] 《避雷线分流系数现场实测研究》，江西九江供电局，2005.6-2007.8
- [2] 《山岩地区利用杆塔基础降低杆塔接地电阻研究》，福建省电力有限公司，2007.6-2008.6