

国外现代高压与超高压电力网

技术手册

第二卷



广西壮族自治区电机工程学会

72.191

8806146

国外现代高压与超高压电力网技术手册

第 二 卷

国外现代接地技术准则及其计算

李桂中 黄咏才 卢 园 编译

张宗鑫 游国权 卢延岳 审核

责任编辑：华 明 光 铎 岳 园

广 西 电 机 工 程 学 会

出 版 前 言

近几年来,由于我国高压与超高压电力网不断地发展与扩大,电力系统装机容量逐年增加,从而导致单相接地短路电流日益增大;现代化的大型变电站或开关站的建设与投产使用也日益增多,新型的SF₆气体绝缘开关配电装置的变电站业已开始建设;以及国家的工、矿企业,乡镇企业的迅速发展和家用电与公用电的普遍使用,致使电气设备的安全接地(或称保护接地),已成为需要进一步妥善解决的重要问题。因此,为适应电力、电机工程科学事业发展和使用的需要,为更好地保障人身与设备的安全,本学会组织有关专家、工程师根据八十年代以来的国外科技文献与科研成果、国外现行的安全接地导则或准则等等,编译《国外现代接地技术准则及其计算》一书(即《国外现代高压与超高压电力网技术手册》第二卷)以供技术交流与参考使用。

该书的第一至六章由李桂中同志编、译,第七、八章由黄咏才同志编、译,第九章由卢园同志进行翻译,编辑人员加以整理。为保证本书质量,特请了科技界与学术界有关权威人士中国电机工程学会理事、广西电机工程学会理事长、原广西电力工业局总工程师张宗鑫高级工程师,广西电机工程学会副理事长、现广西电力工业局副局长游国权高级工程师和广西电机工程学会秘书长卢延岳工程师进行了全面审核。

由于水平所限,经验不足,以及时间仓促,书中不妥之处在所难免,恳望读者与电机工程学会会员提出宝贵意见或指教。为此,本学会致以衷心感谢!

广西电机工程学会

一九八七年十一月

目 录

第一章 发电机接地保护导则

1—1 序言	(1)
1—2 保护方案概况	(2)
1—3 发电机结线	(2)
1—4 接地方法	(3)
1—5 保护方案	(4)
参考文献	(7)

第二章 变电站安全接地导则

2—1 目的与范围	(8)
2—2 安全接地的基本问题	(8)
2—3 引起事故的条件	(9)
2—4 人体容许电流极限值	(9)
2—5 快速切除故障的重要性	(11)
2—6 容许电位差	(12)
2—7 设计与施工步骤	(14)
2—8 调研土壤特性	(14)
2—9 最大接地故障电流的确定	(17)
2—10 接地装置初步设计	(21)
2—11 接地装置电阻的计算	(28)
2—12 接地网电位升高最大值的计算	(28)
2—13 接地网周边跨步电压的计算	(28)
2—14 接地网内跨步电压与接触电压的计算	(29)
2—15 转移电势的讨论	(29)
2—16 特别危险场所	(31)
2—17 关于初步设计的修改	(34)
2—18 关于接地装置的施工	(35)
2—19 施工后的接地装置电阻的测量	(35)
2—20 关于等电位线、跨步电压与接触电压的现场测试	(38)
2—21 根据现场测量结果重新计算修改设计	(39)
2—22 检验现有变电站的安全接地	(39)
附条 I 电位梯度问题的数学分析	(39)
附条 II 计算实例	(45)
附条 III 接地网接地体计算的诺模图	(51)
参考文献	(51)

第三章 变电站安全接地导则修改补充说明

3—1	基本定义	(52)
3—2	安全接地	(52)
3—3	容许电流范围	(53)
3—4	容许人体电流极限	(55)
3—5	事故接地电路	(56)
3—6	允许电位差标准	(60)
3—7	基本设计原理	(63)
3—8	接地网设计的基本问题	(64)
3—9	在困难情况下的设计	(64)
3—10	接地网连接	(65)
3—11	气体绝缘配电装置的特点	(65)
3—12	GIS装置基础接地的注意事项	(68)
3—13	接触电压的等效电路	(68)
3—14	GIS装置的内部与外部故障	(70)
3—15	注意事项与建议	(73)
3—16	接地导体与连接线的选择	(75)
3—17	土壤特性	(80)
3—18	土壤结构与土壤模型选择	(81)
3—19	接地电阻计算	(84)
3—20	土壤的化学处理与膨润土的应用	(85)
3—21	外包混凝土的电极	(85)
	参考文献	(87)

第四章 架空输电线路的接地

4—1	概述	(90)
4—2	输电线路接地装置的一般要求	(90)
4—3	土壤电阻率	(92)
4—4	利用钢筋混凝土基础作为自然接地体	(93)
4—5	线路接地装置的结构	(93)
4—6	利用系数	(95)
4—7	接地装置的计算	(101)
4—8	接地体的冲击电阻分析	(103)
4—9	接地装置冲击电阻计算	(104)
	参考文献	(105)

第五章 变电站最大大地电流与故障电流分布的计算

5—1	概述	(106)
5—2	大地电流计算法的说明	(106)

5—3 综合技术方法.....	(107)
5—4 最大大地电流的计算机程序的应用.....	(110)
5—5 接地电流在架空地线或中性线与土壤之间的分布.....	(112)
5—6 土壤对单相接地故障电流的影响.....	(118)
参考文献.....	(125)
第六章 气体绝缘变电站瞬态接地电位升	
6—1 基本理论.....	(126)
6—2 应考虑的问题.....	(126)
6—3 问题鉴别法.....	(129)
6—4 外壳瞬态电位的计算.....	(130)
6—5 减弱瞬态接地电位升的方法.....	(134)
参考文献.....	(137)
第七章 输电线路杆塔附近的跨步电压和接触电压计算	
7—1 基本情况.....	(138)
7—2 允许电流.....	(142)
7—3 输电线路杆塔附近的大地电位分布.....	(144)
附录 输电线路杆塔附近跨步电压与接触电压计算曲线.....	(148)
7—4 输电线路杆塔附近跨步电压和接触电压触电事故的概率计算.....	(153)
参考文献.....	(156)
第八章 大型变电站与开关站的接地计算	
8—1 概述.....	(158)
8—2 接地电阻计算的解析公式.....	(158)
8—3 接地电阻数值计算方法.....	(168)
8—4 接地网附近的地面电位与网格电压计算.....	(179)
8—5 接地网的电流分布计算.....	(181)
8—6 接地网电阻计算曲线图.....	(185)
参考文献.....	(203)
第九章 试验与测定	
9—1 土壤电阻率测量方法.....	(205)
9—2 大型接地装置的电阻测量.....	(207)
9—3 接地装置的电流密度试测.....	(210)
参考文献.....	(212)

第一章 发电机接地保护导则⁽¹⁾

1—1 序言

根据运行经验,发电机最常见的故障是接地故障。因此,由美国国家标准协会(ANSI)和电气与电子工程师学会(IEEE)所制定的“发电机接地保护导则”(即ANSI/IEEE C37.101)中详细地提供了北美最普遍使用的保护方案的应用情况。同时,在该导则的附录中还介绍了世界其它地方使用的及北美刚开始使用的保护方案。

对于发电机具体保护方案的应用来说,取决于接地方法、接线方式和其本身的保护原理。在该导则中,有些章节是专门介绍各种发电机接线方式和接地方法。而对于所推荐的保护方案,则列在一个汇总表上。应当指出,该导则的主要部分是介绍了各种继电保护接线方案的应用情况。然而,为了联系实际,在该导则的附录二中引用了一些实例,从中介绍如何计算各种保护方案的过电流和过电压继电器的整定值,以及如何使之与电压互感器的二次熔断器配合。此外,根据原始资料,使附录三作为接地故障问题的文献目录。

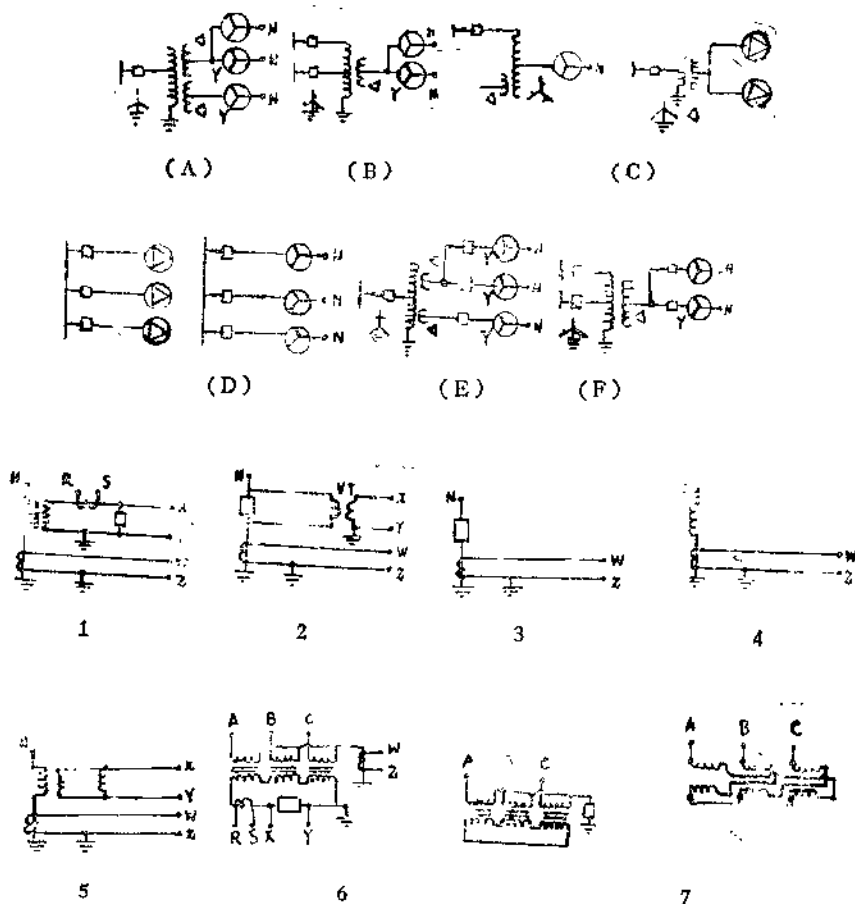


图1—1 表1—1中发电机接线与接地方法的保护方案示意图

1—2 保护方案概况

目前,所推荐采用的各种保护方案见表1—1所示。为了明显表示起见,将其发电机结线、发电机接地方法和保护方案的编号,按其行列编入表中。在表中上部那一行,也就是上面每一栏,是各种常见的发电机—变压器—母线—线路断路器布置单线图;而在垂直方向左侧的那一行,则为审批的接地方法单线图。这些单线图,在IEEE所制定的“同步发电机系统接地应用导则”(即IEEE143)中均列入。应当说明,发电机单线图的中性点(N)与接地方法单线图上的点N是相连的。如果在发电机单线图中无中性点,或者没有表示出,则升压变压器高压侧中性点接地,如图1—1c所示。

在表1—1中各个部分所列的各种可以应用的接地故障保护方案编号(如1、2、3等等),适用于给定发电机结线和接地方法的情况下。对于在括号内所表示的方案,不仅是表明应用最为广泛,而且也是推荐的方案。在方案编号中的尾标S(如5S、8S)是表示该保护方案适用于正在运行或虽与系统切断但仍在施加励磁的发电机。此外,在表中表示的有编号的保护方案,在其导则的“单相接地故障保护方案”一节中都有详细说明。

表1—1 发电机结线、发电机接地方法和保护方案编号

编 号	发电机结线 接地方法	(A) 见图1—1中的 图 A	(B) 见图1—1中的 图 B	(C) 见图1—1中的 图 C	(D) 见图1—1中的 图 D	(E) 见图1—1中的 图 E	(F) 见图1—1中的 图 F
I	见图1—1中的图1	{1、7、10} 2、3、4、9、11 5S、8S				{12、15} 13 5S、8S	{1、7、10} 2、3、4、9、11 5S、8S
II	见图1—1中的图2	{1、7、10} 2、3、4、11 5S、8S				{12、15} 13 5S、8S	{1、7、10} 2、3、4、9、11 5S、8S
III	见图1—1中的图3		10、11、15、16			{14、16} 10、11、15	
IV	见图1—1中的图4		10、11、15、16			10、15、16	
V	见图1—1中的图5	{6}					6、10、11 5S
VI	见图1—1中的图6			{1、9、10} 2、3、4、11 5S	{12、17} 13 5S		
VII	见图1—1中的图7				12、13	12、13	
VIII	不接地		{21、15}、13 8S		{12、17}、13 8S	{12、15}、13 8S	

应当说明,在表内所示的接地方法单线图上的X—Y点与保护方案单线图上的电压继电器相连;而R—S点和W—Z点则与保护方案单线图上的电流继电器相连接。

1—3 发电机结线

在表1—1中列有六种不同的发电机结线图,这些结线图是美国目前通常采用的典型结线图。在表1—1的A栏中,虽然有两种不同的结线图,但对这两种接线图均可采用同一的保护方案。然而,确定这些结线图的准则是:

当发电机单相接地故障时,系统不产生大的零序电流或零序电压,或者在系统发生单相接地故障时,发电机也同样不产生大的零序电流或零序电压;

如果有两台机组并列共用一台变压器时,则在星形绕组中通常只有一个中性点接地;
若各机组都分别与变压器的低压绕组连接,则各机组应分别接地,并要有各自的保护方案。

在B栏中表示具有一个绕组或者仿真的三次绕组自耦变压器。在这两种情况下,自耦变压器均能保证在发电机与系统之间的零序连接。若发电机中性点不接地,即便是主电路断路器已切断,这时如仍施加励磁,则三次绕组作为提供在定子内接地故障电流的故障电流源。

在C栏中表明,除发电机按三角形接线外,皆与A栏相同。该接地方法,采用星形一开路三角形升压变压器与发电机主引出线连接(即表1—1中的接地方法Ⅵ)。

对于表1—1中的D和E栏,则分别表示在没有接入任何升压变压器的情况下,具有三角形与星形绕组的发电机直接与系统母线连接。这种接地方法,通常用于小型发电机与中性点接地电力系统的连接。

分析一下F栏内的发电机接线图,除发电机低压侧采用电路断路器外,其它均与A栏相同。一般说来,每台发电机都装设有接地装置和保护装置。但是,为了确定接地故障位置,对接地继电器则要求有不同的延时整定值,以便顺序地使发电机与变压器的三角形公用绕组断开。

1—4 接地方法

继上述,下面就介绍导则中所列出的八种接地方法。应当说明,现行的导则对IEEE 143“同步发电机系统接地应用导则”中所提出的七种接地保护已有六种作了介绍。但是,尚未考虑持续不断接地发电机的保护。

1. 接地方法 I—配电变压器接地

就其物理意义来说,这是一种高电阻接地方法。在变压器初级电压等于或大于发电机相电压的情况下,这时利用配电变压器连接至发电机中性点。对于暂态过电压可以选用二次侧电阻器加以控制,这样,在发电机接线端发生单相接地故障时,以使其损失(千瓦)等于或大于对地零序电容(千伏安)。通常,最大的单相接地故障电流限制在3~25安。

2. 接地方法 II—中性点电阻器接地

同样,这也是一种大电阻接地的方法。分析起来,其作用与接地方法 I 相同。为使所限制的接地故障电流与接地方法 I 的相同,在选择直接连接中性点的电阻器规格时也采用同样的准则。

3. 接地方法 III—中性点电阻器接地

与上述接地方法不同,这是一种低电阻接地方法,它能充分限制接地故障电流,能使发电机标准差动继电器动作。

4. 接地方法 IV—中性点电抗器接地

这是一种利用低感应电抗的接地方法。不过,采用这一方法,能容许故障电流比上述诸方法大几倍。

5. 接地方法 V—接地故障中和器接地

这是一种感应调谐接地方法。这个方法采用一台按方法 I 选择的配电变压器,及采用一台二级电抗器。而二级电抗器的反射值等于对地零序电容电抗的 $1/3$ 。对于接地故障电流,则被限制到以不起电弧为准。该方法很可能不适用于低压侧具有断路器的发电机组(如F栏所示)。

6. 接地方法 VI—接地变压器接地

这也是一种大电阻的接地方法，用于三角形结线的发电机，它采用三台与发电机主引出线连接的接地星形—开路三角形结线的配电变压器。该配电变压器及跨接在开路三角形两端的二级电阻器按方法 I 选择。

7. 接地方法 VII—接地变压器接地

这是一种中值电阻的接地方法，它允许所选择的继电保护有相当大的电流。对星形—三角形或“Z”形结线的变压器初级绕组，与发电机引出线连接，并由变压器中性点连接的电阻器接地。

8. 接地方法 VIII—不接地

这种方法，在发电机引出线或中性点上均不接地。

1—5 保护方案

表1—1所列入的保护方案，在现行导则中均作了全面的介绍与说明。这里只简单地介绍一下近几年来北美最普遍采用的17种保护方案。

对保护方案1~4和方案7，是用来检测大电阻接地的发电机通过三角—星形结线的变压器与系统连接时的单相接地故障。在上述的结线情况下，发电机出线端的接地故障，将产生整个中性点位移，其结果所产生的电压出现在如表1—1所示的X—Y两端。该电压大约按整个绕组的百分比和与中性点的距离成正比。这种方法的故障检测，是采用连接在X—Y端的过电压继电器来实现，正如图1—2所示保护装置59。

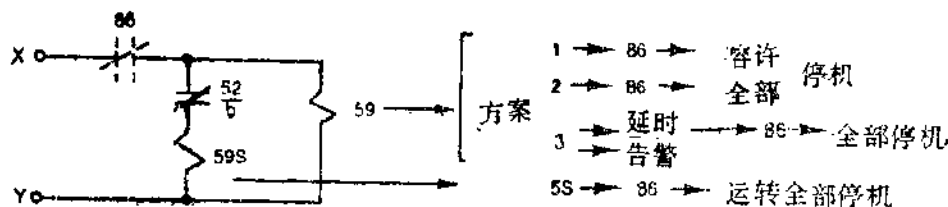


图1—2 接地过电压保护方案1、2、3和5S

在保护方案1至4中，其故障是通过中性点接地装置的端电压检测；而在方案7中，则由电压互感器的开路三角形次级绕组的端电压检测。然而，对于装置59的启动电压整定值必须很大，这样使其系统在正常不平衡所产生的基频电压下不动作，或者是当发电机满负荷的情况时，不至因产生三次谐波电压而动作。在采用三次谐波滤波器的情况下，继电器仍是有效的运行，并可以根据定子绕组中性点端的情况，安全地整定在10%之内。此外，为防止输电系统故障时而引起发电机误动作（如停机），则需要短期延迟；同样，为使在电压互感器或其次级绕组引线上发生单相接地故障时，与电压互感器的熔断器相互配合，也需要延时。

对保护方案1~4和方案7来说，在频率大大低于额定频率的条件下，应用过电压继电器将不能保证灵敏的保护。如果发电机在加速和停机时激励励磁的话，那么除了方案1~4和方案7外，则还应采用类似于5S或8S等起动结线方案。

在发生接地故障时，在保护方案1中就操纵装置59并使之装置86自保持继电器带电。这样，自保持继电器就可起动完成停机，这种停机，其中包括主断路器和励磁开关跳闸，以及关闭汽轮机主汽门。

应当指出，虽然保护方案2、3、4和7与保护方案1不同，但皆利用同一过电压继电器，

即装置59。就方案2来说，是一个容许的停机方案，而其主断路器与励磁开关的跳闸，由汽轮机主汽门上的位置开关操纵，如图1—2所示。此外，方案2又可防止在超转速的同时甩满负荷。为遮断过电压继电器操作线圈电路，使用自保持装置86上一个触点，如由于操作电压大于线圈额定电压值，可以应用时限的延长周期。

保护方案3也示于图1—2，不仅可直接提供告警信号，而且也能延迟全部停机过程。同时，该方案又可进一步改变自保持继电器装置86，使其在汽轮机容许停机时关闭主汽门。

在图1—3所示的方案4仅能用于告警信号。如果过电压继电器装置59不能长期耐受施加于操作线圈的电压，也可另外增设灵敏度较低、额定值较高的过电压继电器装置59H。对于装置59H的整定值，可低于装置59持续运行的额定值。但是，对于电路的布置，要使59H在发生接地故障时，能插入一个与59线圈串联的电阻器，因而便可使装置59上的电压降低至安全值。

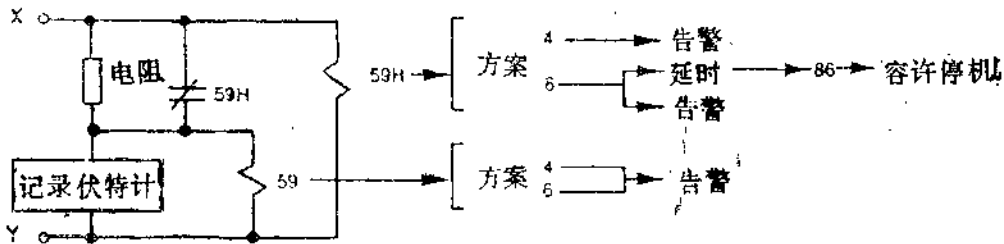


图1—3 方案4接地过电压和方案6接地故障中和器

对于保护方案7，是采用星形—开路三角形的电压互感器与发电机引出线连接，如图1—4所示。在发电机出线端发生接地故障时，出现在继电器端子的总电压将等于相对中性点电压的3倍除以电压互感器的变压比。通常，方案7是用于低压侧均备有电路断路器并与同一变压器的三角形绕组连接的2台或2台以上的发电机组。应当指出，保护方案1是用于分别保护发电机，而保护方案7则用来保护变压器的三角形绕组及有关的母线。

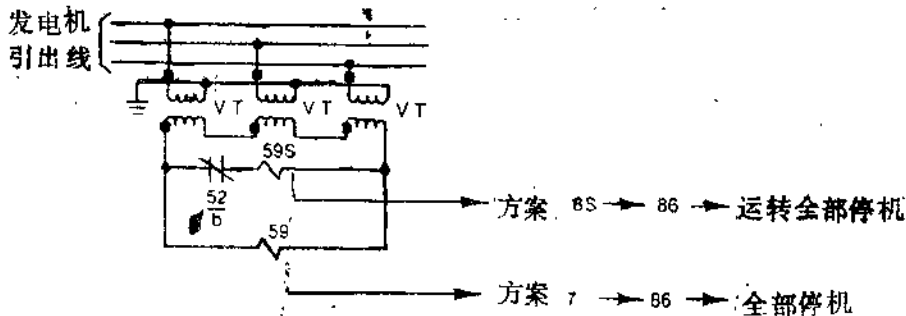


图1—4 星形—开路三角形电压互感器接地过电压保护方案7和8S

谈到保护方案5S和8S是运转接地过电压保护方案，它用于检测发电机与系统切断之际仍施加励磁运行时定子的接地故障。而图1—2所示的保护方案5S是在上述保护方案1~4配合的情况下，用于大电阻接地的发电机，也可用于低压侧装有断路器发电机的大电阻接地故障中和器。至于保护方案8S正如图1—4所示是用于配合保护方案7及不接地的发电机。用于保护方案5S和8S的装置59S，是瞬时过电压继电器，而它的灵敏度（电压/赫兹）是比较稳定，其值低至它的直流起动值。因此，尽管发电机加速或停机能保证保护水平相同。对于装置59S的操作线圈与电路断路器有关的辅助开关（52/b）串联，并接于X—Y端，以便断路器

遮断时提供保护。

保护方案6是适用于借助接地故障中和器方法接地的发电机，它是保护方案4衍生而来的，采用上述如图1—3所示的相同装置59和59H。接地故障中和器可将定子绕组和连接设备内的故障电流限制到其值不产生电弧。由于这种方法能严格限制故障危害，使得有可能有顺序地停机。由于中和电抗器两端经常出现零序电压，故可用记录伏特计监测。当零序电压下降时，则表明发电机中性点出线端附近有接地故障；而其电压增高时，说明其绝缘恶化。

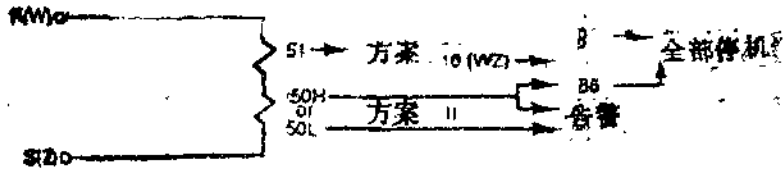


图1—5 接地过电流保护方案9、10和11

在图1—5中所示的保护方案9、10和11，都用于检测单相接地故障的过电流继电器保护方案。应当指出，所有这三种保护方案均可用于检测其接地电阻大，并应用三角形绕组升压器与系统分开的发电机接地故障。另外，保护方案10与11也能用于低阻抗接地系统。

保护方案9系采用过电流继电器，它与连接电流互感器的次级R—S端相连。在选定电流互感器变流比时，要使继电器的电流等于发电机中性点电流。实质上，保护方案9是方案1的变种，因此对方案1的应用讨论也适用于方案9。由于方案9的过电流继电器对谐波敏感，因此必须使其灵敏度低于方案1的过电压继电器的灵敏度，因为后者对谐波也是敏感的。

分析一下保护方案10，除了过电流继电器与串联于发电机接地阻抗的电流互感器一次侧W—Z端连接外，也是由方案9衍变而来。若经大电阻接地的发电机，当升压变压器与系统分开时，则方案1与方案9的适用情况相同。为使继电器电流与发电机中性点电流相匹配，则电流互感器的变流比应采用5/5。当发电机的接地阻抗颇小时，则电流互感器的变流比应较大（一般说来，则为400/5），这时，发电机的接地继电器必须与系统的接地继电器相适应。但是，如发电机接地电阻颇小时，很可能由于总的接地故障电流大而使发电机发生严重事故。

方案11是一种瞬时过电流继电器，它可以与方案9或10配合使用。当与方案9配合使用时，装置50H可对变压器的三角形绕组、主引出线、以及50%~70%的发电机定子绕组中的所有接地故障进行高速检测。装置50H除可用于告警、跳闸外，还可用来确定故障位置。当方案11与方案10配合使用时，装置50L通常只用于告警，这是因为它对检测发电机中性点附近故障极其灵敏的缘故，而这一点用方案10中的装置51是检测不出的。

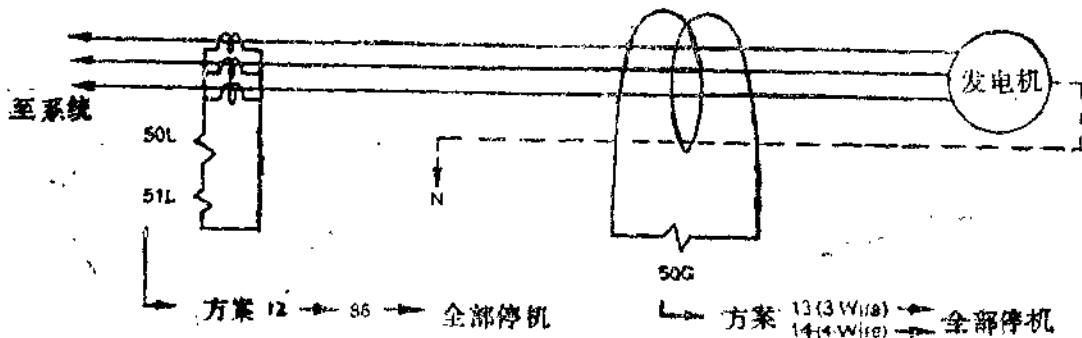


图1—6 接地过电流保护方案12、13和14

在图1—6中所示的继电保护方案12、13和14均为发电机接地过电流继电保护方案，发电机与接地装置可以是直接连接，也可通过自耦变压器连接。这种过电流继电器能探测由系统经发电机引出线流到发电机的接地故障电流。对不接地和大电阻接地的发电机来说，在方案12和13中所用的瞬时接地过电流继电器，其电流整定值必须大于由外部系统接地故障引起的发电机区段零序电容电流。

方案12是使用时限与瞬时过电流继电器连接到发电机各相引出线的电流互感器上。瞬时过电流继电器的电流整定值必须大于电流互感器不同特性引起的任何临时残余电流值。

图中的方案13是方案12的衍变方案，但因采用穿圈式电流互感器，所以发电机各相引出线将穿过其中。穿圈式电流互感器是测量发电机引出线在接地故障时的零序电流。所以，对穿圈式电流互感器及其有关继电器，必须作为一个系统进行试验，以确定其时限电流特性和灵敏度。

一般说来，方案14基本上类似于方案13，它也是采用穿圈式电流互感器与瞬时过电流继电器，发电机的各相引出线和中性线都通过电流互感器，随后将中性点“N”与发电机中性接地的特定的设施连接。这种布置在内部故障时，在电流互感器将系统和发电机的全部接地故障电流输送到继电器的情况下，能使接地差动继电器自补偿，在外部故障情况下，继电器内无电流通过。

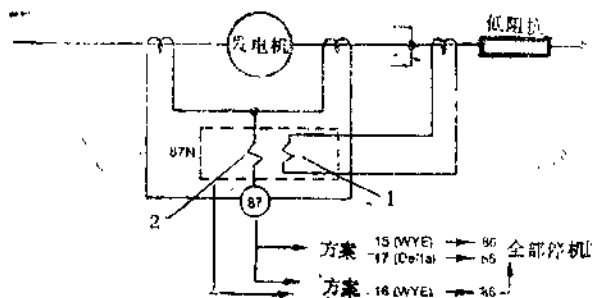


图1—7 发电机差动保护方案15、16和17

在图1—7所示的继电保护方案15、16和17，均为发电机按常规比率的差动继电保护方案，只要发电机与完整接地装置连接，不论是直接连接还是通过自耦变压器连接，都可用于接地故障保护。对于方案16还可采用电流极化乘积式过电流继电器，以及采用其差动继电器电路中性点上的操作线圈和在发电机中性点上从电流互感器送电的极化线圈。应当指出，方案16不仅能增加对内部故障的灵敏度，而且在外部故障的情况下也能保证安全。对于方案17所采用的差动继电器，系按三角形结线与发电机连接，以便用于接地故障保护。

参 考 文 献

1. A working group report for the Power System Relaying Committee, A.C. Pierce "Generation Ground Protection Guide", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS—103, No. 7, July 1984.

第二章 变电站安全接地导则^[1]

2—1 目的与范围

本导则的主要宗旨是:

1. 从安全方面检查接地工程与设施。
2. 确定在故障情况下, 变电站内人体可能接触到的各点之间电位差的安全允许值, 并以此值作为设计的依据。
3. 根据上述的安全允许值, 逐项对具体的接地装置设计给予指导。
4. 为获得接地装置的设计数据和检验施工后接地装置的安全性 with 合理性, 推荐其测试方法。
5. 用数学方法分析和解决典型的电位梯度问题。

就其全部情况而言, 本导则主要涉及屋外式交流变电站的设备与装置, 只有少数章节适用于屋外式变电站的室内部分或屋内式变电站。

如果建筑物的地板与地电位能有效的隔离, 或者相当于完全处于变电站地电位中的导电板或闭合栅网的情况时, 并假定建筑物结构与构件的导电部分完全与变电站地电位等同, 显然, 在变电站场地内所存在的地电位梯度不会同样出现在建筑物中。但是, 即便全部是屋内变电站, 也需要考虑本导则所提及的由于“周边电位梯度”(即在建筑物入、出口处), 以及因转移电势而引起的某些可能带来的危险。当然, 本导则主要适用于故障时的接地系统可能出现高电位的大容量变电站。

本导则不涉及解决直流变电站许多特有的接地问题; 对雷电波的影响也不作定量分析。但是, 对雷电波仅阐述陡波的波头, 由于它具有较大的阻抗, 将使与接地装置相接的接地引线上的电压降增加, 从而使接地网较远处的利用率降低。在雷电波的情况下, 人体所容许的电流值明显比工频(如60赫兹)下要大得多。

实际上, 按本导则建议所设计的接地装置将具有可靠的保护作用, 能防御进入变电站的雷电波陡波, 并通过变电站的接地装置引入大地。不过, 落在变电站内的直击雷, 有可伤害正在变电站外活动的人员。

2—2 安全接地的基本问题

当发生接地故障时, 流入大地的电流将会在变电站内部及其周围产生电位梯度, 图2—1即表示了在均质土壤中简单矩形接地网的电位分布。如果在设计中没有采取适当的防护措施, 这时地面最大电位梯度可能很大, 因而在非常不利的情况下, 能危及这里步行或活动的人们; 另外, 在故障时, 构筑物或接地的设备构架与附近地面之间, 有时也会出现危险的电位差。

事实上, 电位梯度与电势的预先精确的计算很难符合实际, 接地装置的几何形状通常要比图2—1所示的布置复杂得多, 而且对地下土壤特性的了解可能很不完全。

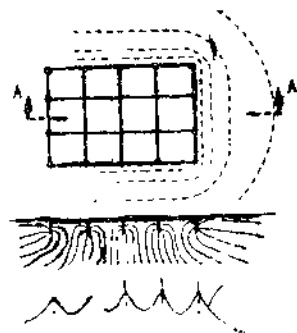


图2—1 简单矩形接地网的电位分布

因此，应该强调指出：变电站接地电阻低，并不是安全的保证。接地系统的总接地电阻与最大冲击电流之间不是简单的关系，接地电阻比较低的变电站，在某些情况下可能是危险的，而在某些接地电阻很高的变电站却有可能是安全的，或者是通过精心设计也能达到安全。

除局部电位梯度的幅值外，某些因素也会导致安全问题。这些因素是：电击持续时间、人体电阻、不同的人体状况以及触电的概率。

2—3 引起事故的条件

对电击事故而言，首先要合理地确定引起事故的条件，而典型事故条件，则要求考虑下述不利因素的组合，这些因素是：

- 1.较大的接地故障电流与接地装置尺寸和土壤电阻率的关系。
- 2.由于土壤电阻率对接地电流的影响，可能在一点或更多点上出现高电位梯度。
- 3.因地点、时间与位置的巧合，人体跨接在高电位差的二点上。
- 4.因无足够的接触电阻或其它串联电阻，不能将在上述条件下通过人体的电流限制在安全值以内。
- 5.当人体接触故障时（有电流通过人体），接触的持续时间在一定的电流强度下，时间长则会对人体引起危害。

经研究表明，除非电源完全停止供电，否则，要在一切时间、地点和条件下防止出现危险电压是绝不可能的。但是，这并不意味着工程技术人员可不尽最大努力去减少事故的概
率。事实证明，在大多数的情况下，只要通过精心、合理的设计，可使危险电压降低到最低值。

2—4 人体容许电流极限值

据过去的研究分析表明，对于各种危险都取决于通过人体要害区的电流频率、幅值与持续时间。

1. 频率

本导则主要是指50或60赫兹用电频率。经研究认为，在25赫兹时，人体可承受稍高的电流，甚至是直流时的5倍。而在雷电波下人体似乎能承受高达几百安培的电流。就上述直流和振荡脉冲电流的比较来说，振荡脉冲电流的危险性更大。

2. 电流值

从其危险性出发，首先应按几秒钟或更长的持续时间来考虑不同电流值的影响。

一般认为人体能感觉到的最小电流约为1毫安。

通常，9~25毫安电流对人体的刺激是相当痛苦的，可能使肌肉失去控制能力，难以或不能松开手中握住的带电物体。

若电流继续增大，肌肉收缩可使呼吸困难，但与下面所述的由于电流更大而使呼吸受到抑止的那种情况不同。因为这种现象并非永久性的，是随着电流中断而消失。当然，除非肌肉收缩非常严重与呼吸停止。由于这种现象是常达几分钟才能出现，而现代继电保护或其它保护装置能约在几秒钟或更短的时间内切断电击电流，因此，不会因肌肉收缩而引起窒息。

如果电流变得更大时，这时心脏会出现纤维性颤动而引起死亡。通常，这种情况不能立即恢复正常呼吸，需要采用一种称为可控计数冲击的方法进行治疗，它需要有熟练的技术与

一定的设备，且只在极短的时间内才有效。若在野外，就无法利用上述的治疗方法。因此，引起心脏纤维性颤动的电击电流临界值是需要考虑的主要问题。根据哥伦比亚大学对体重与心脏重与人差不多的动物身上进行多次试验得出：最长电击时间为3秒时，其电击电流临界值为100毫安。

若电流仍继续升高，则会出现心脏停止跳动、呼吸停止或严重烧伤，直至引起死亡。

本导则主要考虑心脏纤维性颤动临界值，若电击电流能保持在此值以下，将会避免由此引起的死亡或烧伤。

对低于临界值的电击电流，本导则仅考虑一种综合条件，即持续时间为几分钟（也就是因缺乏有效的保护装置与有效的营救方法），并且可能由于足够大的接地电位梯度的电击，使胸部肌肉严重收缩而造成呼吸停止。

因故障而引起很高的地电位梯度通常是少见的，但由此所引起的电击却很普遍。此外，如因它持续时间短，就企图指望通过设计将仅给人体带来痛苦而不引起伤害的电击是不现实的。

但是，对故障时分析地电位梯度而得出的判别标准，并不意味着必然能用到受该电位作用与电击概率较高的各种场合。

3. 持续时间

经分析研究认为，若持续时间非常短，人体能承受很大的电流而不会出现心脏纤维性颤动。根据实验研究得出99.5%的人可承受由下式所得到的不致引起心脏纤维性颤动的电流值：

$$I_k t = 0.0135 \quad (2-1)$$

式中： $I_k = 0.116 / \sqrt{t}$ (2-2)

I_k —通过人体的电流有效值（安）；

t —电击持续时间（秒）；

0.0135—根据经验推导出的“能量系数”。应当指出，上式的结果是，1秒为116毫安，0.1秒（即6个周波）则为367毫安。

对于（2-2）式，是把持续时间限制到3秒时由试验获得。显然，对人体可能承受的某电流值来说，持续时间长是不恰当的。在哥伦比亚大学的试验基础上，建议以100毫安作为没有明确规定电击持续时间的心脏纤维性颤动的临界值。然而，由于哥伦比亚大学的试验不包括较长的电击持续时间，也因没有排除胸部肌肉拉长后收缩所引起窒息的可能性，所以在电击电压持续几分钟或更长的时间又没有迅速采取营救措施的情况下，通常采用25毫安或甚至采用达尔齐尔（Dalziel）提出的安全释放值，即男人9毫安；女人6毫安。

式（2-2）又表明，对于速动保护装置能可靠地限制故障持续时间的地方，可允许大得多的电流。至于采用主保护还是后备保护的切除时间来作为计算的基础，因继电器误动作与其它种种不利因素会同时出现的概率很低，应取主保护的切除时间。但是，若按后备保护的时间计算，在许多场合按时间条件考虑是安全的，而按其它条件考虑就可能是危险的。

4. 再次电击

经现代运行实践表明，故障后的重合闸现象是很普遍的。一次“快速自动重合”一般是在离第一次电击后不到0.5秒内就会引起第二次电击。对于触电者来说，要在如此短的时间内使自己摆脱触电场合是很少有可能的。而在手动重合时，时间间隔一般从几秒至几分钟，

这时触电者摆脱触电场合的可能性较大，但不能绝对保证触电者可以避免重合时的第二次电击。

哥伦比亚大学的试验报告指出：“心脏对纤维性颤动的敏感性，在连续电击时没有累积效应”。这个结论是在短时时间间隔内重复10次试验性电击的情况下，仅部分地根据“心脏如没有发生纤维性颤动的话，几乎总是在流过电流后5分钟内恢复正常”时得到的。

在时间间隔比较暂短的再次电击过程中，人体受到的第一次电击可能不是永久性的损伤，只是暂时地受到干扰和打击。但是，若人体在恢复正常以前又受到第二次电击，这时即使比第一次弱一些，则有可能导致发生人身事故。

目前，在对再次电击尚未完全了解的情况下，不能给予定量分析上的指导，建议对再次电击规定容许限值。然而，设计人员在这种困难的情况下，并非忽略这个因素，而是希望至少通过增加式(2—2)中的“ t ”值来获得一个大概的允许范围。例如，可以假定每一次持续时间为0.1秒的二次紧跟的电击结果，应该比一次这样的冲击要严重些，至少不应比持续时间为0.2秒的一次冲击要严重。

显然可见，为了更全面地估价再次电击，还需要进一步研究。

5. 流过人体的电流路径

应当指出，上述的讨论都与流过人体的电流路径有关，例如手对单脚或手对双脚之间的路径，其中大部分电流要通过包括心脏在内的人体要害器官。通常认为，电流从一只脚流到另一只脚时，其危险性很小。根据德国的卢克斯(Loucks)通过实验证明，要在心脏部位引起同样的电流，脚对脚流过的电流，要比手对脚大得多，其比率高达25:1。

如果所考虑的电流路径是从一脚到另一脚，并欲使容许流过的电流比式(2—2)所得出的值要大得多，则应具备适当的条件。但是，尚应考虑下列因素：

(1) 对两脚之间的电压应是使人感到痛苦，并有可能因电流流过胸部而跌倒，但不是致命的。而这里的危险主要取决于故障的持续时间与重合闸时连续故障的概率。

(2) 在故障发生时，这时工作人员可能在倾斜的状况下进行工作或者是休息。

(3) 流过四足动物的前、后腿之间的电流将通过胸部区。一般说来，大动物的前、后腿与地面跨接的距离大约是人的2倍。

如果由于上述的原因引起的事故很小，与根据式(2—2)计算手对脚之间的电流相比，则脚对脚之间的容许电流将会增大，甚至可达10倍以上。但是在实际应用中，不能取这么大的值。

显然，由脚对脚接触引起的危险性远远小于其它方式引起的危险。不过，根据运行经验，因脚对脚接触引起的伤亡曾经发生过，因此，其危险性也不能有所忽视。

2—5 快速切除故障的重要性

应当指出，如将快速切除故障作为安全因素而进行过分强调的话，那也是不全面的，但它在如下两个方面有积极作用。

1. 与故障电流持续几分钟或几个小时的情况相比，受电击的可能性通常是随着合理的快速切除故障而明显地降低。因为对人来说，由于接地故障电位梯度而引起的大多数人身事故发生在故障电流持续时间较长的情况下。

2. 如触电情况相同，试验与实践都表明，若通过人体电流的持续时间非常短，则严重的伤亡率便会大大降低。