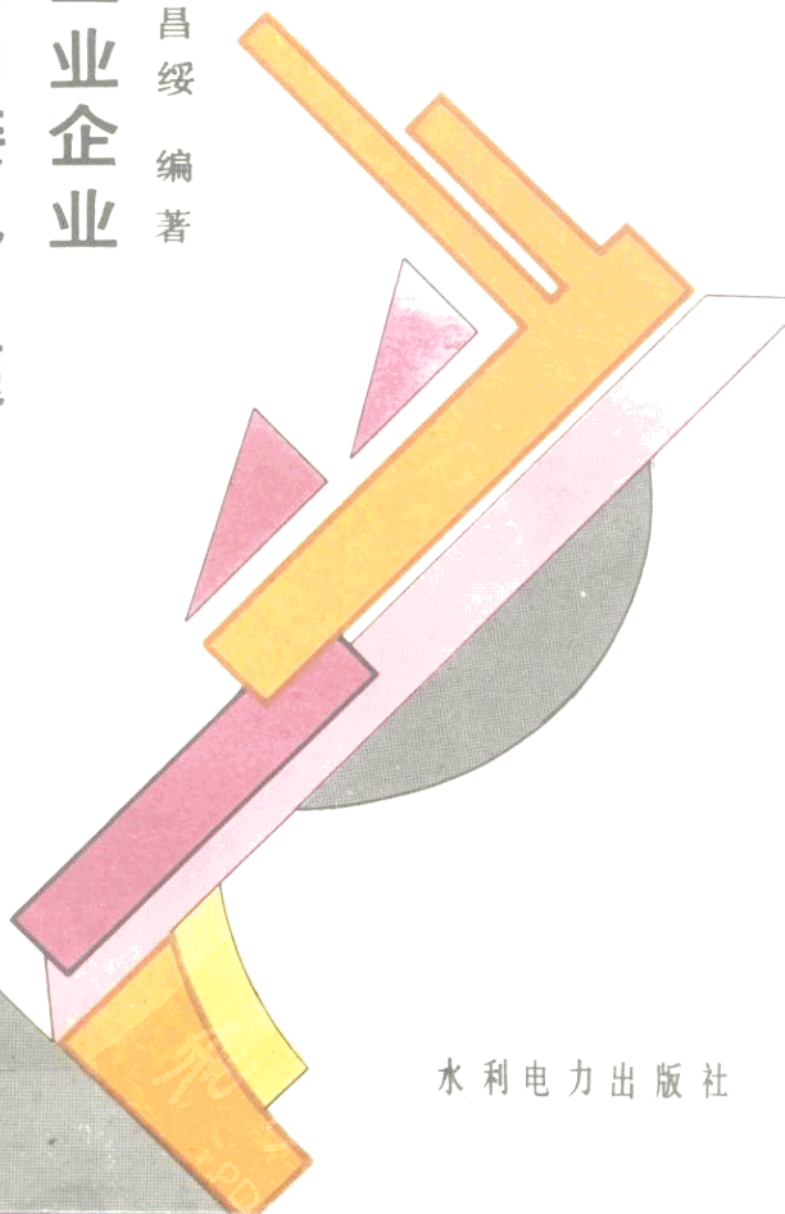


蒋昌绥 编著

工业企业 电网接地问题



水利电力出版社

工业企业 电网接地问题

蒋昌绥 编著

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书以理论结合实际为基础,介绍了与工业企业电网接地有关的许多问题。包括影响电网接地的因素,电网接地的各种方式和比较,过电压的来源,各种接地的选择和设计,接地故障电流的计算,设备的接地,静电和雷电保护接地,接地电阻及土壤电阻率的测量等。为了便于比较,也对IEC标准中有关接地方面的规定和说明作了介绍。

本书可供工业企业电力工程技术人员阅读,也可供高等学校有关专业的师生参考。

3P25/07

工业企业电网接地问题

蒋昌绥 编著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 6印张 132千字 1插图

1994年9月第一版 1994年9月北京第一次印刷

印数 0001 — 1750 册

ISBN 7-120-01980-5/TM·535

定价 6.70 元

序 言

本书初稿的提纲和内容，曾承已故中国电机工程学会理事长、中国科学院学部委员毛鹤年教授过目。认为该课题虽为工业企业中的小问题，但涉及每个工厂的安全运行，是电气设计上不可忽视的重要项目。本书理论联系实际，对比叙述，便于研究，对工业电气设计具有实用价值，有益于四化建设，并推荐出版。后得出版社的支持，几经修改厘订，终于今日与读者见面。原拟在出书前请教授略缀数语，不幸他于前年逝世而不果，追忆缘起，不胜悼念之情，并对出版社的辛劳，致以谢忱。

轻工业部设计院荣誉顾问、教授级高工 蒋昌綏

1990年6月

前 言

在工业企业电网设计中，最经常被忽视而又相当重要的问题之一，是接地网络的规划、设计以及维护、管理。它关系到电网运行性能的稳定和改善，涉及到电网与设备的安全运行，考虑和设计合理能避免过电压的危害和破坏，甚至能消除危险的火灾和爆炸。国外一些资料对工业企业中火灾事故的统计表明，约有15%的事故是属于电气事故，而改善接地网络的设计，或加强接地网络的管理，例如经常检查接地点的连接和测量接地电阻等，这类事故就会大为减小。国内尚无这方面可靠的统计资料供研究，但在国内工业企业中，特别在几十万个中小型工业企业中，由于接地网络的设计和管理不善引起的电气事故，甚至因此导致火灾、爆炸或伤亡事故，也不少。可见此问题的重要性，所以必须予以重视。

这个问题涉及的面极广，几乎任何工业企业都会遇到。但有关这方面的知识，只零星地散见于某些书中。目前，为适应我国四化建设的需要，中小型工厂和乡镇企业蓬勃发展，关注这一问题的人士日益增多。编者特根据国内外有关资料编成本书，力争较全面地论述此问题。其中所引用的公式、数据、曲线和图表，多来源于书末所列参考文献，个别处注于该段文字的下面。

我国为IEC会员国，IEC标准正在国际上推行，我国将逐步向它靠拢，因此在书末附录三中摘录了IEC标准364.3(1977)有关接地部分，并包括英国电气装置1981年第15

版的附录三。附录四则简介了原西德西门子系统接地和保护接地概要。这些附录都附有清晰的插图，便于与我国有关这方面的规定进行比较和研究。

张之铨同志仔细地审阅了全稿，提出了许多宝贵意见，在此致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，不妥和错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1990年6月

目 录

序 言 前 言

第一章 电网接地	1
第一节 绪论	1
第二节 影响电网接地的因素	4
第三节 电网过电压的来源	8
第四节 电网接地的方式	14
第五节 电网接地的选择和设计	31
第六节 接地故障电流的计算	45
第七节 接地设备技术规格	56
第八节 特殊问题	60
第二章 设备接地	63
第一节 设备接地的基本目的	63
第二节 与设备接地有关的一些问题	66
第三节 按使用区域分类的接地	78
第四节 人的因素	91
第三章 静电和雷电保护接地	99
第一节 静电发生的理论	99
第二节 静电着火的条件	106
第三节 测试静电的方法	106
第四节 各种工业中的静电危害	112
第五节 产生静电的工序和部位	117
第六节 防止静电灾害和危险的措施	118
第七节 雷暴和雷电防护接地	124

第四章 对地连接	142
第一节 接地电阻	142
第二节 接地极	151
第三节 接地电阻测量	157
附录一 单相接地电容电流的计算	164
附录二 某些粉尘和粉层着火所需最小电能量	166
附录三 有关接地方面IEC标准364.3(1977)节选	167
附录四 原西德电力系统保护问题简介	172
附录五 户外成套变电所典型的接地系统图	179
附录六 可忍受的人体电流问题	180
附录七 接地电阻计算公式(繁式)	182
参考文献	184

第一章 电 网 接 地

第一节 绪 论

在工业企业电气设计中，许多重要而有争议的问题之一就是在各种情况下电网接地的选择问题。在工业电网中，接地是指为了各种不同的目的，对电网和设备进行不同方式的对地连接。

工业电网一般包括发电、变电设备和输配电线路等。工业电网某些设备接地的原因与公用电力系统以及其它大电网相同设备接地的原因，常是一致的，在类似的运行条件下，二者的接地方式也大致相同。但在某些情况下，工业电网中某些设备的接地原因和接地方式，会因设备操作过程的特殊要求，而与公用电力系统以及其它大电网中相同设备有所不同。

有些工程技术人员认为电网不应接地运行，根据是单相接地故障不会影响电网的其它部分。可是现代舆论认为，电网接地的某些方式应该是使瞬态过电压减至最小值。实际上，一个不接地电网，也是通过电网导体的对地电容与地连接的，所以也可以认为是一个电容性的接地电网。

如果已经决定电网采用接地运行，那么第二步就是如何选取最佳的接地方式，其中有许多因素必须予以考虑。

过去，许多电网中性点不接地运行，单相故障时，能容许运行一个短暂的时间，直至故障点被确定在何处并修复。继电保护一般在这种情况下，可不投入运行，所以不接地电网能减少停电时间。

当今的工业电网，由于电压日趋升高，线路日趋延长，如果不接地，电网的运行就受到限制。接地故障电流的增大、瞬态接地次数的增加，使接地故障不能再自动消除。加之，闪弧接地现象交织着飞弧的消失和重复闪络，能形成很高的冲击电压，这就成了工程技术人员面临的一个棘手问题。同时，隔离（不接地）电网和接地电网之间瞬态过电压的比较，证明了故障瞬间或开关操作时，不接地电网将承受着较高的过电压，对设备也就具有更大的危险性。

工业电网中性点接地趋向于低压方面采用直接接地，中压方面采用低电阻接地，高压电网通常也采用直接接地。

本书所用有关接地的一些术语介绍如下。

（1）接地。一般分为工作接地、保护接地、过电压保护接地、防静电接地等几种，此外，在工业企业中还有计算站逻辑接地以及通信设备的信号接地等。在电网中，运行过程需要的接地（例如中性点接地），称为工作接地，它是电网回路中的一部分。对于电力设备的金属外壳、钢筋混凝土杆和金属杆塔，由于绝缘损坏有可能带电，为了防止这种电压危及人身安全而装设的接地，称为保护接地，它不是电网回路中的一部分。为了消除过电压危险而装设的接地，称为过电压保护接地。对于易燃油、天然气贮罐和管道等，为了防止静电的影响而装设的接地，称为防静电接地。

（2）接地体、接地线和接地装置。埋入地中直接与大地接触的金属导体，称为接地体。兼作接地体用的直接与大地接触的各种金属构件、金属井管、钢筋混凝土建筑和构筑物的基础、金属管道和设备等，称为自然接地体。连接电力设备或杆塔的接地螺栓与接地体或零线用的金属导体，称为接地线。按照设备的要求，为了实现保护功能或其它功能，

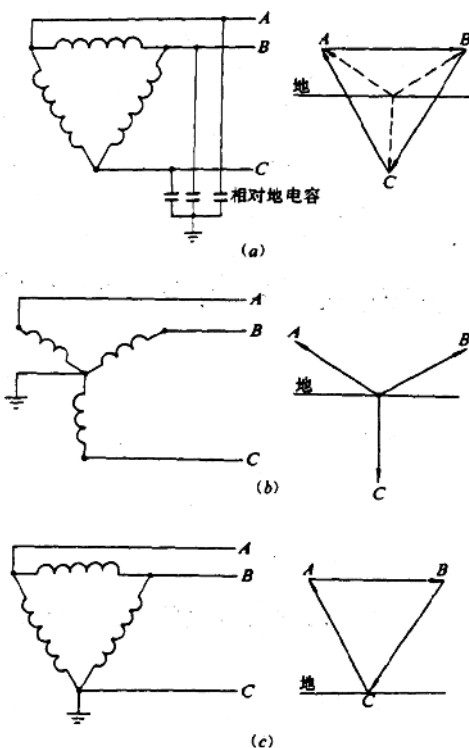


图 1-1 在静态条件下电网对地电压

(a) 不接地电网; (b) 星形接线接地电网; (c) 三角形接线接地电网

用以对地连接或断开的组合体, 称为接地装置。

(3) 不接地。电网或设备对地不连接, 或只通过电位指示仪器或测量仪器与地连接, 称为不接地。

(4) 直接接地。凡电网或设备器件没有特意接入阻抗

的接地，称为直接接地。

(5) 电阻接地。凡通过电阻的接地，称为电阻接地。

(6) 电抗接地。凡通过电抗的接地，称为电抗接地。

(7) 接地故障中和器。接地故障中和器是一种接地器件，其作用是在接地故障中提供感抗分量的电流，足以等于或中和额定的接地故障容抗分量的电流，从而使该电网调谐接地。

(8) 接地变压器。接地变压器是一种为接地提供中性点的特殊变压器。

本书中还经常遇到电网对地电压问题，在静态条件下，电网对地电压如图1-1所示。

第二节 影响电网接地的因素

设计人员在研究电网中性点是否接地时，必须仔细考虑下列因素：运行的连续性、多重对地故障、飞弧故障烧毁、故障定位、人身和设备的安全、不正常电压的危险、费用和电网接地应用的趋势。

一、运行的连续性

前已谈到，有些工业企业为了取得暂时的运行连续性，配电网采用不接地运行方式。这是由于不接地电网在单相接地故障出现时，不致即刻停止运行，可以暂时获得运行的连续性。可是实践经验表明，事实并不是这样，许多工业企业由于单相故障，而继电保护不投入运行，引起故障的扩大，酿成更严重的事故。这一点，下面还将详细论述。根据实践的验证，电网中性点接地远比不接地能取得更高层次的运行连续性。

二、多重对地故障

电网中性点不接地运行时，当一相发生接地故障，在故障没有消除之前，可能会产生危险的过电压，转而在故障点附近的其它线路上引起绝缘破坏的故障，从而会出现第二个接地故障，甚至会出现第三个接地故障，结果会引起两相或三线的线对线故障，自然很容易启动继电器，从而使线路断路器动作，导致故障扩大，并使局部线路中断。

电网不接地运行的一相接地故障引起的线对线电压出现于整个电网，此电压为正常值的173%。线对地之间的绝缘，此时将承受线对线电压，结果将导致绝缘损坏，或降低了它的耐压能力，不接地的运行连续性的优点就没有了。

不接地电网必须安装一种音响或光示接地检测器，在检测之后，应立即用组装好的维护程序予以定位，并将故障消除。可是在中性点接地电网中，很少遇到多重接地故障。

三、飞弧故障烧毁

根据经验得知，飞弧故障（特别在低压电网中）能产生严重的烧损、破坏作用，甚至导致电气设备的全部报废。在不接地电网中两相或多相导体之间，或者在中性点直接接地电网中线与地之间，可能出现飞弧现象。在故障点，电弧释放大量的能量，随之产生强烈的热气体和电弧等离子区。产生的热量可以蒸发铜或铝导体，甚至影响周围的钢板封壳，有时还会使有机绝缘物蒸馏出毒性气体和可燃气体，其破坏程度常严重到使设备不得不全部更换。

飞弧故障不能用正常的过流保护装置来检验，因为飞弧故障电流一般都较小，不足以启动这些保护装置，即使能启动，从防止设备烧毁的角度讲，已太迟了。

防止飞弧故障烧毁必须依赖灵敏而快速的检验装置。试

验表明，这类故障必须在 $0.2 \sim 0.4 \text{ s}$ ($10 \sim 20$ 周波)之内就要予以遮断，在中性点接地电网中，这样灵敏快速的检验是可能的。因为飞弧故障在接地通道中会导致线对地故障，甚至还会导致线对线飞弧故障，这两种故障电流都较大，因此就可以灵敏而快速地检查出这类故障。

在正常状态下，接地回路中通过的电流不大，监视直接接地电网的接地回路中的电流，就能检验和消除破坏性的飞弧对地故障。这样，接地回路继电保护的灵敏度和动作速度是与正常负荷电流和过流保护装置的整定不相关的，各有一套继电保护系统，自然根据各自的要求整定各自的抽头。

为了防止线对地破坏性的飞弧故障烧毁，在直接接地或低电阻接地电网中都提供了最佳的保护。不接地或高电阻接地电网就很少有这类飞弧故障，所以这类电网不提供由于飞弧故障导致的飞弧冲击和危险电弧的防护措施。可是没有一个电网能完全防止轻微的线对线飞弧故障的烧毁。

四、故障定位

在不接地电网中，接地故障不会使线路脱扣跳闸，所以应该安装声响或直观的检测器，但它只能指示所涉及的相，并不指示哪条馈电线出现故障。所以还必须停止运行，直到检测器表示的故障信号不见时为止。在多重故障情况下，可能需要切断所有的馈电线，逐一恢复，直到故障已经消除。有些接地定位装置不须馈电线断电，但都需要时间去寻找故障位置。例如，许昌继电器厂生产的ZD-4型小电流接地信号装置，就是专用于中性点不接地系统的，可以指出电网单相接地故障，并能找出发生故障的线路，同时能切换20条线路，即使多重接地故障，也容易找出故障，操作相当方便。

相反，在接地电网中，接地故障能用接地线路和设备的

自动遮断来指明，故障的位置也能确定。

五、人身和设备的安全、不正常电压的危险

在工厂电网中，出现过许多对人身和设备发生危险的事，大都是由于电网中电气设备和金属结构不接地，或接地不良造成的。在不接地电网中，如果在一相上保留接地故障，人们不慎触及其它任一相，对地会承受1.73倍正常电网电压，故触及带电导体是很危险的。可是中性点直接接地或低电阻接地电网就不会有这种情况。所以，人们认为在一个不接地电网中，可以接触带电导体而没有危险的观点是完全错误的。

事实上，不接地电网的过电压会引起比接地电网更多的设备故障，而且能同时导致多台设备出现故障，这种多重故障可能涉及到几条不同的馈电线。因为在不接地电网中，设备的绝缘将承受单相接地故障产生的过电压，这种过电压再同其它持续过电压相叠加，可能导致第二故障的发生，或绝缘寿命的缩短。

但对于接地电网上的过电压，采用各种不同的引导方法，完全可以消除掉，或减轻它的影响，这样就不会对设备和绝缘造成损害。

六、费用、电网接地应用的趋势

中性点接地电网的费用比不接地电网要多一些，多多少取决于电网的电压等级，电网是新建还是扩建或旧有。对于中性点接地的低压电网，星形接线成套变电所系统的接地费用比三角形接线成套变电所系统最多高出6%左右。对于中性点接地的中压电网，星形接线变压器的接地费用比三角形接线变压器小一些。另外，如果采用电阻或阻抗接地的话，还要考虑接地的继电保护装置的费用。

从原有不接地电网改为接地运行，费用是很高的，因为

这需要增加接地变压器、保护装置、接地阻抗(如需要的话),还需在线路中加装第三个电流互感器,以便三相都能得到保护。但与整个电网的投资比较,所增加的费用还是微不足道的。

现今工业电网的趋势是倾向中性点接地运行。一方面是克服不接地运行的缺点;另一方面是电网中性点接地运行有下列三个优点,也可以说是三个基本理由。

(1) 在各种不同故障状态下,可以限制电网的过电压;

(2) 可以限制局部区域内不绝缘导体之间的电位差;

(3) 在故障出现时,可以使故障设备或器件与线路隔离,易于故障定位和消除。

所以近年来许多新的工企变电所的变压器,都是带绝缘中性点外接端子的,以便中性点接地运行,同时也具有中性点不接地运行的灵活性。

第三节 电网过电压的来源

在电网上,经常会遇到一些影响运行的过电压,它们主要来源如下:

(1) 雷电 (Lightning);

(2) 开关冲击 (Switching surge);

(3) 静电 (Static);

(4) 触及高压系统 (Contact with H.V.system);

(5) 线对地故障 (Line-to-ground faults);

(6) 谐振状态 (Resonant conditions);

(7) 再触发接地故障 (Restriking ground faults)。

一、雷电

自然界对电力系统的影响，以雷电产生的过电压最为严重，但大多数工业电网都具有有效的屏蔽能力，能防止直接雷击。许多线路或者埋设在地下沟槽中，或者敷设在接地的金属管道之中。对于敞开的高压架空线路，采用架空地线作屏蔽。对于整个广场（例如原料堆垛场所、大变电所的户外进出线走廊等），利用高架避雷针来保护此区域，也常有利用附近高层建（构）筑物进行屏蔽保护的。在工厂电源进线段处采用避雷装置，以限制工厂进线所受的冲击。工厂内旋转电机之类的设备有时也会受到感应雷击，需要装设避雷装置来防止雷击的破坏。对于从较高电压降压的变电所，为了防止高压侧避雷装置和变压器反射波的冲击，可在低压侧装设避雷器。

二、开关冲击

在电网中开关电器操作过程有两种情况必须予以研究，一种是正常的开关操作，一种是非正常的开关情况，特别是后一种情况更值得注意。

当开关电器断开时，单相线路的恢复电压可能会高达电网正常峰值电压的 2 倍；当开关电器闭合时，如果闭合的瞬间恰在电压为零时，其峰值电流能达到稳态电流的 2 倍。事实上，这是一种理论数值，在实际线路中并不能达到，因为线路具有阻抗，会出现阻尼作用。可是，在其它条件下，能出现比此数值大得多的电压和电流，称之为非正常瞬态电压和电流。所有非正常瞬态情况有一点是共有的，那就是都涉及到线路中能量的收集贮存和随之而来的能量释放，这是由于线路上或电容器件上的充电电压，或电感器件上的充电电流引起的。如果线路完全处于静态情况下，当开关电器在开