

现代电能质量技术丛书

交流配电系统的接地方式 及过电压保护

亚洲电能质量联盟中国合作组 组编
侯义明 于辉 王喜伟 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

现代电能质量技术丛书

交流配电系统的接地方式 及过电压保护

亚洲电能质量联盟中国合作组 组编
侯义明 于辉 王喜伟 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要介绍了交流电力系统的中性点直接接地、不接地、经消弧线圈接地和经小电阻接地方式,中、低压配电系统的接地方式,交流用电设备的保护接地,交流配电系统的谐振过电压及其抑制方法,变压器接线组别与谐波,电力电缆护层接地方式及感应过电压等。

本书可供电力系统相关人员阅读参考,也可作为大专院校相关专业学生的课外读物。

图书在版编目(CIP)数据

交流配电系统的接地方式及过电压保护 / 侯义明, 于辉, 王喜伟编著; 亚洲电能质量联盟中国合作组组编. —北京: 中国电力出版社, 2015.12

(现代电能质量技术丛书)

ISBN 978-7-5123-8265-7

I. ①交… II. ①侯… ②于… ③王… ④亚…
III. ①交流电路-配电系统-接地保护 ②交流电路-配电系统-过电压保护 IV. ①TM774 ②TM86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 221300 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.75 印张 168 千字

印数 0001—3000 册 定价 55.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



丛书前言

电能质量问题近年来受到更多的关注。究其缘由，想来有三：第一，大量的非线性和冲击性负荷的广泛应用，对供电系统电能质量造成了严重的污染，恶化了电气设备的电磁环境；第二，以微电子控制技术为核心的高度自动化和智能化设备极其敏感，抗扰度能力不足，对电能质量的要求越来越高；第三，伴随行业的发展，相关组织和单位举办了各类交流会议以及展览，吸引大量媒体关注报道电能质量。在这样的大背景下，电能质量问题从冷门慢慢热了起来。

行业的健康发展，离不开理论的指导和技术经验的交流分享。但是，国内关于电能质量的书籍不是很多，系列丛书更是没有。基于这样的现状，亚洲电能质量联盟中国合作组（简称合作组）发起编写“现代电能质量技术丛书”，这个倡议当时获得了业内很多专家学者的支持。大家共同推选了林海雪教授担当丛书的牵头人，中国电力出版社也欣然应允出版这套丛书，并作为重点图书报送国家新闻出版总署（现为国家新闻出版广电总局），获批列入“‘十二五’国家重点图书出版规划项目”。原计划两年内完成的这套丛书，因多位作者身体抱恙，直至今天才最终陆续付梓，真是好事多磨。

姗姗来迟的这套丛书，从不同的维度介绍了电能质量，以及相应的

测量与控制技术。以基本理论与方法为主的，有《电力系统中电磁现象和电能质量标准》和《电能质量数学分析方法》；以介绍现代测量与实用控制为主的，有《现代电能质量测量技术》和《电能质量实用控制技术》；还有以热点或新问题为主的，有《电气化铁路供电系统及其电能质量控制技术》、《分布式电源接入电网的电能质量》、《电网中电压暂降和短时间中断》、《电力系统直流干扰》及《交流配电系统的接地方式及过电压保护》。

这套丛书整体适合从事电能质量工作的工程师和管理人员作为理论和实践的指引，也适宜对于电能质量问题感兴趣的相关人士阅读，从不同的侧面了解电能质量问题及其影响。希望我们编著的这套丛书可以更好地促进电能质量知识及技能的传播，使读者有所收获，这也是合作组与作者最希望达到的效果。另外，丛书也将成为由合作组作为主办方之一，并由国家人力资源和社会保障部教育培训中心考核认证的“高级电能质量工程师”培训的指定参考书。

最后特别感谢美国国际铜专业协会对于亚洲电能质量联盟中国合作组编著丛书的大力支持，感谢牵头人林海雪教授多年来的辛勤工作，感谢所有丛书作者的认真与执著，感谢编辑们的耐心与信任，感谢丛书审稿专家们提出的建设性的意见和建议。亚洲电能质量联盟将继续努力耕耘，为读者带来更多的接地气的电能质量专著。

亚洲电能质量联盟秘书长 黄炜



本书前言

在电力系统中,为确保系统正常运行、人身和设备安全、提高电能质量,将系统中电气设备的某些部分与埋入大地中的金属体相连接,这就是接地。接地的目的就是保障电力系统的安全运行,避免或减轻由于过电压、接触电压、跨步电压、地电位干扰等造成的人身伤亡和设备故障。

交流配电系统的接地方式主要是指交流配电系统的中性点与接地体的连接方式,为保证安全可靠、经济运行,在交流配电系统中存在不同的接地方式。这是一个技术问题,也是一个科学知识问题。本书从工程实际出发,主要介绍交流配电系统的接地方式和由接地方式引出的过电压、谐波和谐振等问题。本书在编写过程中侧重于实际应用,力求避免烦琐的理论和数学推导,深入浅出的阐述中、低压配电系统的接地、接地方式和过电压保护。

本书的第1章介绍与交流电力系统接地相关的知识和交流电力系统接地分类的基础知识。第2章介绍中压配电网的四种主要中性点接地方式——直接接地、不接地、经消弧线圈接地和经小电阻接地方式的特点,以及中压配电网中性点接地方式的选择。第3章介绍低压配电系统的接地方式和接地装置。第4章介绍交流用电设备的保护接地、剩余电流动作保护的应用和居民住宅供电系统的保护接地。第5章介绍交流配

电系统的谐振现象和谐振过电压及其抑制方法。第 6 章介绍变压器不同接线组别对谐波的影响和抑制。第 7 章介绍电力电缆护层产生感应电压的原理、工频感应电压的计算和过电压防护。

本书的编写除参照若干相关交流接地和交流系统接地方式的书籍以及电力行业相关标准外,还融入了近年来编者对接地方式的相关研究内容。

由于编者水平有限,难免有不妥,敬请读者指正。

编 者

2015 年 1 月

目 录

丛书前言

本书前言

1 概述	1
1.1 基本概念	2
1.2 交流电力系统的接地	5
1.3 交流电力系统的工作接地	5
1.4 交流电力系统的保护接地	9
1.5 交流电力系统的防雷接地	15
2 交流电力系统的中性点接地方式	17
2.1 中性点直接接地方式	17
2.2 中性点不接地运行方式	19
2.3 中性点经消弧线圈接地运行方式	29
2.4 中性点经小电阻接地	49
2.5 中压配电网中性点接地方式的选择	60
3 低压配电系统的接地方式	64
3.1 概述	64
3.2 低压配电系统的接地方式	68
3.3 低压配电系统的接地装置	85
3.4 特低电压供电的接地	91

4	交流用电设备的保护接地	95
4.1	用电设备的防护等级	95
4.2	交流用电设备保护接地	97
4.3	重复接地和等电位连接	101
4.4	剩余电流动作保护	105
4.5	居民住宅供电系统的保护性接地	114
5	交流配电系统的谐振过电压	118
5.1	谐振现象及分类	119
5.2	线性谐振过电压及其抑制方法	120
5.3	铁磁谐振过电压及其抑制方法	125
6	变压器接线组别与谐波	139
6.1	变压器的接线组别	139
6.2	变压器谐波现象及其危害	151
6.3	变压器谐波损耗分析	158
7	电力电缆护层接地方式及感应过电压	164
7.1	电力电缆护层接地方式及要求	165
7.2	冲击电压作用下的护层过电压	166
7.3	金属护套工频感应电压的计算	177
7.4	电缆护层保护的接线方式	190
7.5	电缆护层的过电压防护	193
	参考文献	196

交流电力系统的接地问题是一个看似简单而实际上非常复杂又至关重要的问题，它直接关系到人身和设备的安全及电力系统的安全运行。接地有两方面含义：① 指电气回路导体或电气设备外壳与大地的连接；② 指需要接地部分与代替大地的某一导体相连接，这时以该导体的电位为参考电位而不是以大地电位为参考电位，如用飞机的机舱、汽车的车身以及建筑物的一些金属部分作等电位连接系统来代替大地。前者往往对接地电阻有要求，后者因不取大地电位为参考电位，通常不提对接地电阻的要求，而只要求等电位连接系统的低阻抗。

配电系统的发展始于 1882 年的纽约。1887 年（明治二十年）日本东京出现配电系统，为直流发电机供电的直流三线式系统，其中性点不接地；1889 年日本大阪出现 1kV 的交流配电系统，随后在东京出现 2kV 和 3kV 的交流配电系统，变压器二次侧均不接地。这种变压器二次侧不接地的配电系统，在变压器一次侧与二次侧之间的绝缘被破坏时，一次侧的高电压会侵入二次侧，造成二次侧电压升高，可能导致火灾或触电事故。为应对这种情况，配电系统变压器二次侧开始接地。目前这种接地方式在世界范围内已被广泛应用。

交流电力系统的接地主要有工作接地、防雷接地和保护接地。工作接地也称为系统接地，是指电气回路导体与大地连接，电力系统的工作接地也决定了电力系统的运行方式。防雷接地是针对防雷保护的需要而设置的接地，目的是为降低加在设备设施上的过电压幅值，减少雷电流通过接地装置时的地电位升高。保护接地指电气设备的外壳接地，其作用是保护人身和设备的

安全。此外还有信息接地，这种接地方式（包括计算机系统接地）是信息技术设备抗干扰的主要措施之一，如地电位的均衡、共模电压和地电流的抑制和消除等。本书的侧重点是介绍交流电力系统的接地方式和由接地方式引出的交流系统的过电压问题，对防雷接地和信息接地不做深入介绍。

交流电力系统的接地方式关系到电力系统运行的可靠性和经济性，对于低压配电系统，接地方式还关系到用电环境和用电安全问题。

另外，需要说明的是接地有低频和高频之分。本书中的交流配电系统属低频范畴，它只对接地回路中电阻成分规定要求，而电气设备的防雷和抗干扰属高频范畴，除电阻成分外，它还对接地系统中的电抗成分规定要求，在电气设备的设计安装和校验中应对此注意加以区分。

1.1 基 本 概 念

交流电力系统接地方式是一个涉及电力系统许多方面的综合性技术课题，它不仅涉及电网本身的安全可靠性、过电压绝缘水平的选择，而且对通信干扰、人身安全也有重要影响。为便于对本书后面内容的理解，这里对一些与接地有关的名词加以说明。

1.1.1 中性点

中性点是指在三相系统中星形连接和曲折形（或称 Z 形）连接中的公共点。交流电力系统是三相系统，其中性点是指在三相星形接线中，

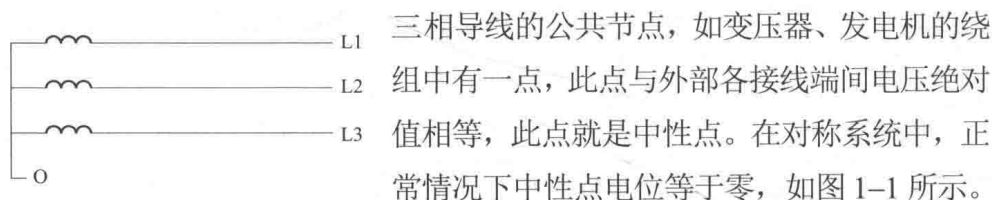


图 1-1 电源中性点示意图

三相电源或三相负载连接成星形，并且三相星形连接负载的中性点 n 与电源的中性点 O 连在一起时，负载中性点 n 的电位因受到电源的直接约束而与电源的中性点 O 的电位基本

相同。但若三相星形连接负载的中性点 n 不与电源的中性点 O 相连，当负载不对称时，便会出现所谓中性点位移现象。中性点位移是指在矢量图上负载中性点 n 和电源中性点 O 不再重合。

三相三线制的不对称电路中的电源可以是星形连接，也可以是三角形连接，二者可以等效互换。为了分析方便，一般选用星形连接的三相电源。取电源中性点 O 为参考节点，用节点电压法可求出负载中性点 n 的电压。 E_a 、 E_b 、 E_c 是电源的相电压， Z_A 、 Z_B 、 Z_C 分别是负载 A 相、B 相和 C 相的复数阻抗，可求出负载的各相电压、电流。由于负载中性点电压 E_n 不为零，造成三相负载电压不对称，这时有的相会远远低于电源相电压，有的相会远远大于电源相电压，而中性点电压却可能达到电源相电压，这就是接地引起的过电压。

1.1.2 中性线 (N 线)

中性线是从电源中性点引出的带电导体，它正常时通过单相电流、三相不平衡电流和某些谐波电流。对于低压配电网，这些电流引起的电压降使其末端正常时对 PE 线 (用作设备保护接地的导线) 带几伏电压。如果此电压过大，说明其截面积选用过小，将影响设备的工作性能；如果此电压超过一定幅值，则说明电源线路上可能有故障，例如相线有接地故障，或电源中性线有断线故障，应进行检查，以防止可能发生的电气事故。电源和负载中性点与中性线示意图如图 1-2、图 1-3 所示。

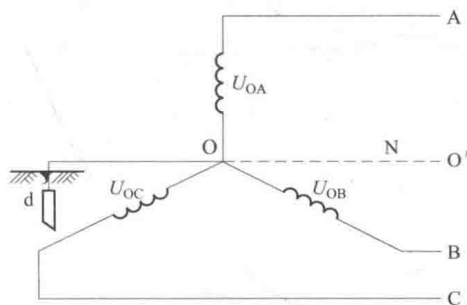


图 1-2 电源中性点与中性线的示意图

O—中性点；N—中性线；d—接地装置

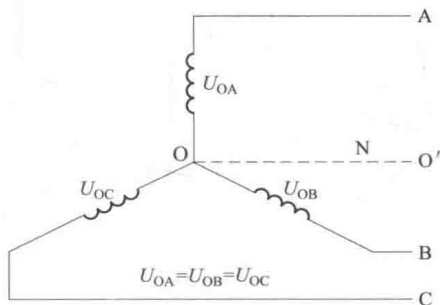


图 1-3 负载中性点与中性线的示意图

A、B、C、O'—电机外部各端子；

O—中性点；N—中性线

中性线的功能：① 用来连接额定电压为相电压的单相用电设备；② 用来传导三相系统中的不平衡电流和单相电流；③ 用来减小负载中性点的电位偏移。

用作中性线的导体除电源端的系统接地外一般不应接地，它应采用浅蓝色的色标，以便识别。

1.1.3 保护线（PE 线）

保护线指一回路内用作设备保护接地的导线，它不是回路的带电导体，除微量的泄漏电流外，它正常时不带电流（三相回路中为三相泄漏电流的相量和），只在设备发生接地故障时传送故障电流并有故障电压出现。如果 PE 线带有几安甚至几十、上百安的电流和若干伏电压，则说明线路存在故障或疵病，例如安装中将 PE 线和中性线接反，或线路对地绝缘破损等，这些故障或疵病应及时排除或纠正，否则易导致电击或电气火灾等电气事故，并招致保护电器的频繁动作。

PE 线的功能是保障人身安全、防止发生触电事故。系统中所有设备的外露可导电部分通过 PE 线接地，可在设备发生接地故障时降低触电危险。

PE 线应贴近相线敷设，并应采用黄绿相间的色标，以便与中性线区分。

1.1.4 保护中性线（PEN 线）

PEN 线指兼有 PE 线和 N 线功能的回路导线，它只能在固定安装的回路中装用。它正常时带有和 N 线相同的电流和几伏对地电压，发生接地故障时将带有与 PE 线相同的故障电流和对地故障电压。这种保护中性线在我国通称为零线，俗称地线。

PEN 线通常可采用黄绿相间的色标，并在端头做淡蓝色标记；也可采用淡蓝色的色标，并在端头做黄绿相间的标记。

1.1.5 等电位连接线

等电位连接线不是回路导体，它的作用是传递电位。它虽然在电气上与 PE 线并联，但因远离相线，分流极少，故正常时几乎不带电流，

故障时有少量 PE 线电流的分流通过。连接线及接地线与 PE 线相同，应采用黄绿相间的色标。

1.2 交流电力系统的接地

交流电力系统的接地是指电网和设备的某些部分与大地连接，利用大地作为对地短路故障电流或部分工作电流的路径，使电流从一个接地点流入大地而从其他接地点返回电网，可将大地视为电网的一个器件，对于低频或工频电流可将该器件视为电阻，而对于冲击电流或高频电流要视为阻抗，器件的端子为各接地点。按目的或用途分类，接地主要分为：

(1) 工作接地。工作接地又称为系统接地，是为满足电力系统运行需要而设置的接地。工作接地通过电气设备的中性点来进行，所以也称为中性点接地。电力系统的中性点接地方式主要有不接地、直接接地、经消弧线圈接地和经小电阻接地四种。设置工作接地的主要目的：保证电力系统在正常工作及故障情况下具有适当的运行条件；保证电力设备绝缘所要求的工作条件；保证继电保护和自动装置及过电压保护装置的正常工作。

(2) 保护接地。保护接地是为保护人身安全而装设的接地，如设备的金属外壳接地，一旦设备的绝缘损坏导致外壳带电时，可以利用该接地措施限制外壳电压，保证接触到设备外壳的人员的人身安全。

(3) 防雷接地。防雷接地是针对防雷保护的需要而设置的接地，目的是减少雷电流通过接地装置时的地电位升高。

1.3 交流电力系统的工作接地

交流电力系统的工作接地也称为中性点接地，交流电力系统的中性点可运行在不同的接地方式下，直接影响交流系统的设备绝缘、运行方

式、经济性及其可靠性。

交流电力系统发展初期，因供电范围小、电压等级低，发电机和变压器的中性点都是不接地的。随着交流系统规模的不断扩大，中性点不接地系统在运行中常发生弧光接地过电压引起的事故。于是考虑改变交流电力系统中性点的运行方式，以减少此类事故的发生。

交流电力系统的长期运行经验表明，中性点的运行方式关系到交流电力系统的接线方式、绝缘水平、运行可靠性、经济性、接地保护方式以及对通信的干扰等问题。

1.3.1 接地方式

目前，我国交流电力系统中普遍采用的工作接地方式有中性点直接接地、中性点不接地、中性点经消弧线圈接地三种。此外，在电缆线路较多的中压配电系统中，我国也采用中性点经小电阻接地方式。

按系统单相故障后短路电流的大小分类，交流电力系统的接地可分为小电流接地系统和大电流接地系统。由于中性点直接接地系统发生单相接地时的短路电流较大，故称之为大电流接地系统；而中性点不接地和中性点经消弧线圈接地系统，当发生单相接地故障时，其短路电流的数值较小，故称这两种方式为小电流接地系统。小电流接地（非有效接地）系统与大电流接地（有效接地）系统的划分依据是零序电抗 X_0 和正序电抗 X_1 之比，我国电力系统一般规定 $X_0/X_1 \leq 3$ 是大电流接地系统。

1.3.2 接地的作用

交流电力系统接地的主要作用有：为大气或操作过电压提供对地泄放的回路，避免电气设备绝缘被击穿；提供接地故障回路，当发生接地故障时，产生较大的接地故障电流，迅速切断故障回路。

交流电力系统的工作接地可使系统以大地电位为参考电位，降低系统对地绝缘水平的要求，保证系统的正常和安全运行，例如当雷击时，地面强大的瞬变电磁场使架空线路感应幅值很大的瞬态过电压，它持续时间极短，以微秒计，但过电压幅值和变化陡度很大，使设备和线路承受危险电涌电压的冲击。做系统接地后，线路感应的雷电荷获得对地泄

放的通路,大大降低了对地瞬态过电压,减轻了设备和线路绝缘被击穿的危险。又如高、低压共杆的架空线路,如果发生高压线路坠落在低压线路上的故障,系统接地既可降低低压线路上的对地电压,又可使高压侧故障电流通过系统接地返回电源,使高压侧继电保护动作,从而避免或减轻高压侧故障对低压系统的危害。

220V/380V 交流系统,如果不做工作接地,则当系统中一相发生接地故障时,另两相对地电压将由原来的相电压(220V)升高为线电压(380V),如图 1-4 所示。由于没有返回电源的导线通路,故障电流仅为极小的导线对地间的电容电流,保护电器不动作,此过电压将持续存在,人体如接触无故障的相线,接触电压将高达 380V,电击致死的危险大大增加,对设备及线路绝缘的安全也是很不利。

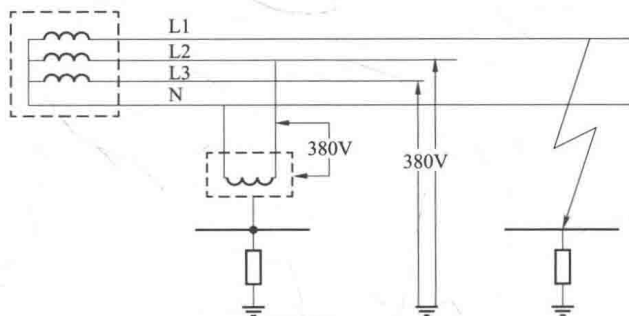


图 1-4 无系统接地时一相故障接地示意图

IEC 标准对系统接地的实施有严格的要求,它不允许在变压器室或发电机室内将中性点就地接地,如图 1-5 所示,还规定自变压器(或发电机)中性点引出的 PEN 线(或 N 线)必须绝缘,并只能在低压配电盘内与接地的 PE 母排一点连接而实现系统接地,除这点以外,在同一建筑物内不得再在其他处接地,不然中性线电流将通过不确定的并联通路而返回电源,这部分中性线电流被称作杂散电流,它可能引起下述电气灾害:

- (1) 杂散电流可能因不确定的通路导电不良而打火,引燃可燃物。
- (2) 杂散电流如以大地为通路返回电源,可能腐蚀地下基础钢筋或金属管道等金属部分。

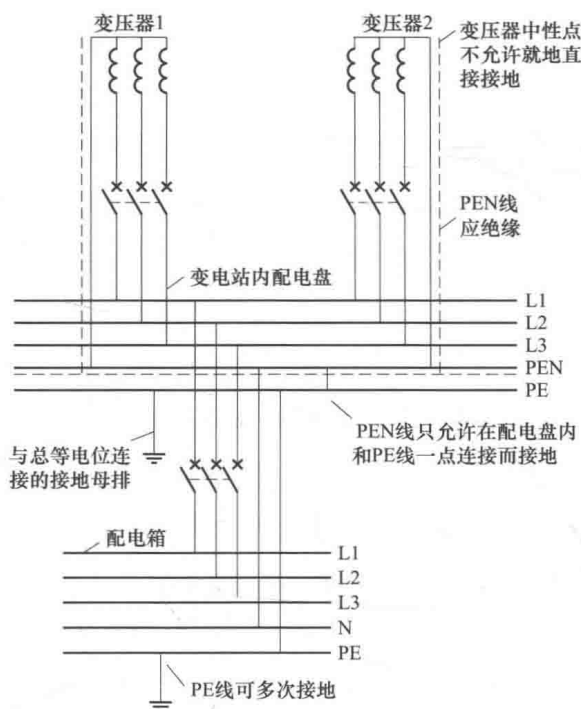


图 1-5 低压系统接地示意图

(3) 杂散电流通路与该中性线正常回路通路两者可形成一封闭的大包环绕，环内的磁场可能干扰环内敏感信息技术设备的正常工作。

从 PEN 线引出的 PE 线因不承载工作电流，它可能多次接地而产生杂散电流。

1.3.3 接地方式应用情况

目前，我国交流电力系统中性点接地方式的应用情况如下：

(1) 110kV 及以上系统采用中性点直接接地方式，即系统在各种条件下应该使零序与正序电抗之比 (X_0/X_1) 为正值并且不大于 3，而其零序电阻与正序电抗之比 (R_0/X_1) 为正值并且不大于 1。

(2) 330kV 及 500kV 系统不允许变压器中性点不接地运行。

(3) 110kV 和 220kV 变压器中性点可直接接地，也可不接地或经小阻抗接地，但其是否接地需经电力系统调度部门根据运行方式来确定。

(4) 3~66kV 系统，当单相接地故障电容电流不超过 10A 时，采用