

Modern Distribution System Analysis

现代配电系统分析

■ 王守相 王成山 编著

Modern Distribution System Analysis



高等教育出版社

Modern Distribution System Analysis

现代配电系统分析

第二版



清华大学出版社

TM727/9

2007

现代配电系统分析

王守相 王成山 编著

Modern Distribution System Analysis

高等教育出版社

内容提要

本书较全面地介绍了现代配电系统分析所涉及的内容,阐述了相关的理论、模型和算法,并介绍了该领域的一些新进展。全书共分11章。第1章概述配电系统的特点和组成以及高级配电系统分析所包含的主要内容。第2章建立配电系统各主要元件、网络和负荷的模型,给出配电系统的基本方程。第3章介绍配电网络的拓扑描述、拓扑分析的算法流程以及各种结点编号方案的比较与选择。第4章阐述配电系统确定性潮流计算的理论和方法,对各种方法进行分类和比较,同时给出计及分布式发电的潮流算法。第5章介绍配电系统不确定性潮流计算的理论和方法。第6章介绍配电系统状态估计的理论和方法。第7章是有关配电系统短路故障分析的内容。第8章介绍配电系统可靠性分析的理论和方法。第9章是对配电网络重构问题的描述和算法介绍。第10章是关于配电系统故障定位、隔离与供电恢复的方法与策略的阐述。第11章讨论配电系统电压控制和无功优化问题。附录给出配电系统分析的几个典型算例系统及计算结果。

本书可作为高等院校电力系统及其自动化专业研究生、电气工程及其自动化专业高年级本科生教材,并可供从事配电系统运行、管理和研究的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代配电系统分析 / 王守相, 王成山编著. —北京: 高等教育出版社, 2007. 10

ISBN 978 - 7 - 04 - 022354 - 5

I. 现… II. ①王…②王… III. 配电系统 - 分析
IV. TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 146404 号

策划编辑 刘 英 责任编辑 唐笑慧 封面设计 张申申 责任绘图 吴文信
版式设计 陆瑞红 责任校对 王效珍 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010 - 58581000
经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京明月印务有限责任公司
开 本 787 × 1092 1/16
印 张 13.5
字 数 270 000

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>
版 次 2007 年 10 月第 1 版
印 次 2007 年 10 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 22354 - 00

前 言

随着社会的发展和人民生活水平的提高,对供电可靠性和电能质量方面的要求越来越高。作为电力系统重要组成部分的配电系统,由于直接面向终端用户,它的完善与否直接关系到广大用户的用电可靠性和用电质量。配电系统分析是电力系统及其自动化学科一个重要的研究领域。

配电系统分析的目的是为配电网规划设计人员以及运行调度人员对配电系统进行分析、研究、控制和管理提供有效的方法,了解系统运行状态,并采取相应措施提高系统的安全性和可靠性,实现系统的安全经济运行。

由于配电系统在拓扑结构、支路参数、运行状态等许多方面都具有不同于高压输电系统的典型特征,这决定了本科生教材《电力系统分析》中介绍的潮流计算等分析方法并不适应于城乡配电网,配电系统分析拥有自己的一套分析方法和理论体系。近年来,电力市场的出现和分布式发电技术的蓬勃发展,对配电系统提出了新的要求和挑战,也促进了本研究领域的深入发展。

国内外一大批学者在配电系统研究领域锲而不舍,孜孜以求,使得配电系统分析的理论不断丰富和完善。作者所在的课题组多年来一直致力于配电系统相关领域的研究工作,研究课题得到了国家自然科学基金(50477035)、教育部科学研究重大项目(306004)、教育部博士学科点专项基金(1999005609)等的资助,所取得的研究成果曾获得国家科技进步二等奖。本书就是包括作者所在课题组成员在内的配电系统领域科研群体的部分成果的集中反映。没有他们的辛勤耕耘,本书就无法顺利完成。

本书在写作过程中,得到了余贻鑫院士的大力支持和帮助。硕士研究生郑志杰、陈云云、江兴月、黄丽娟、谭晓明等为本书的撰写做了大量资料收集和整理的工作。

由于作者水平所限,书中疏漏之处难免,恳请读者不吝赐教。

编著者

2007年8月

于天津大学

目 录

第1章 绪论

1.1 配电系统概述	1
1.2 配电系统的基本设备和设施	3
1.3 配电系统的网络结构	6
1.4 配电系统的中性点接地方式	6
1.5 配电系统的典型特性	8
1.6 配电系统分析的主要内容	9
参考文献	9

第2章 配电系统建模

2.1 概述	10
2.2 配电系统模型	10
2.2.1 高压配电系统	10
2.2.2 中压配电系统	10
2.3 配电元件模型	11
2.3.1 配电线路	11
2.3.2 配电变压器	13
2.3.3 配电电容器	25
2.4 配电负荷模型	26
2.5 配电系统基本方程	28
2.5.1 配电系统的基本电路理论	28
2.5.2 配电系统的结点方程	29
2.5.3 配电系统的回路方程	30
小结	31

参考文献 32

第3章 配电网拓扑分析

3.1 概述 33

3.2 图的基本概念和性质 33

3.3 配电网拓扑结构 37

3.4 配电网拓扑描述 38

 3.4.1 配电网环网的拓扑描述 38

 3.4.2 配电网辐射网的拓扑描述 41

3.5 配电网拓扑分析算法 44

 3.5.1 配电网的遍历 44

 3.5.2 配电网的结点和支路编号 47

3.6 配电网拓扑分析流程 48

小结 51

参考文献 51

第4章 配电系统确定性潮流计算

4.1 概述 52

4.2 辐射状配电系统潮流解的存在性和唯一性 52

4.3 配电系统潮流算法的分类 56

4.4 配电系统基本潮流算法 58

 4.4.1 前推回推法 58

 4.4.2 改进牛顿法 64

 4.4.3 回路阻抗法 67

 4.4.4 隐式 Z_{bus} 高斯法 70

 4.4.5 潮流算法编号方案的比较与选择 72

4.5 计及分布式发电的配电系统潮流算法 76

小结 79

参考文献 80

第5章 计及不确定性的配电系统潮流计算

5.1 概述 81

5.2 配电系统中不确定性信息的分类及其处理方法 82

5.3 随机潮流 83

5.4 模糊潮流 83

5.5 区间潮流	87
小结	97
参考文献	97

第6章 配电系统状态估计

6.1 概述	98
6.2 状态估计基本原理	99
6.3 配电系统状态估计方法	101
6.3.1 基于结点电压的方法	101
6.3.2 基于支路电流的方法	101
6.3.3 基于支路功率的方法	108
小结	109
参考文献	109

第7章 配电系统短路故障分析

7.1 概述	110
7.2 短路故障的类型及基本特点	110
7.3 短路故障分析的方法	112
7.3.1 等效电压源法	112
7.3.2 叠加法	114
7.3.3 相-零回路电流法	121
7.3.4 瞬态仿真法	121
小结	121
参考文献	122

第8章 配电系统可靠性分析

8.1 概述	123
8.2 配电系统可靠性指标	125
8.2.1 负荷点指标	126
8.2.2 系统指标	127
8.3 配电系统可靠性分析模型	130
8.4 配电系统可靠性分析方法	132
8.5 简单辐射状配电系统的可靠性计算	134
8.6 复杂配电系统的可靠性计算	136
8.7 考虑分布式电源的配电系统可靠性计算	139

小结	144
参考文献	144

第9章 配电网重构

9.1 概述	146
9.2 配电网重构问题描述	146
9.3 配电网重构算法	150
9.3.1 解析方法	150
9.3.2 启发式方法	150
9.3.3 随机优化方法	155
9.3.4 智能化方法	159
小结	159
参考文献	160

第10章 配电系统故障定位、隔离与供电恢复

10.1 概述	161
10.2 配电系统故障处理方式	162
10.2.1 无信道时的故障处理方式	162
10.2.2 有信道时的故障处理方式	164
10.3 配电系统故障定位	165
10.4 配电系统故障隔离	166
10.5 配电系统供电恢复	167
10.5.1 供电恢复的基本要求	168
10.5.2 供电恢复的目标函数	169
10.5.3 供电恢复的约束条件	170
10.5.4 供电恢复方法	170
小结	172
参考文献	172

第11章 配电系统电压控制及无功优化

11.1 概述	174
11.2 电压控制	175
11.2.1 电压损耗与电压偏差	175
11.2.2 电压调整的基本原理	178
11.2.3 配电网无功功率补偿装置	180

11.2.4 配电网无功功率补偿方式	185
11.3 无功优化	186
11.3.1 配电电容器优化配置	187
11.3.2 配电电容器优化投切	189
11.3.3 配电网无功优化算法	191
小结	194
参考文献	194

附录 配电系统分析常用算例系统及结果

绪 论

1.1 配电系统概述

传统上将电力系统划分为发电、输电和配电三大组成系统。发电系统发出的电能经由输电系统的输送,最后由配电系统分配给各个用户。

在我国,通常将电力系统的电压等级范围划分为低压、中压、高压、超高压和特高压,见表 1-1。

表 1-1 我国电压等级范围的划分

	低压	中压	高压	超高压	特高压
电压等级	1 kV 及以下	6 ~ 20 kV	35 ~ 220 kV	330 ~ 500 kV	1 000 kV 及以上

我国输电网的电压等级一般在 220 ~ 1 000 kV 之间,基本属于高压、超高压和特高压的范畴。而配电网的电压等级一般选为 110 kV(或 35 kV)及以下,大致涵盖了低压、中压和高压的各种电压等级。

不同国家的配电系统所采用的电压等级的差异较大,表 1-2 列出了几个具有代表性的国家所采用的配电电压等级。

表 1-2 国内外配电系统电压等级比较

国别	配电系统电压等级
中国	110 kV、66 kV、35 kV、(20 kV)、10 kV、(6.6 kV)、0.4 kV/220 V
美国	34.5 kV、23.9 kV、14.4 kV、13.2 kV、12.47 kV、(4.16 kV)、110 V
俄罗斯	110 kV、35 kV、20 kV、10 kV、0.4 kV/220 V
英国	132 kV、33 kV、11 kV、415/240 V
法国*	20 kV、0.4 kV

*注:法国根据电压等级将全电力网划分为一次输电网(400 kV)、二次输电网(225 kV、150 kV、90 kV、63 kV)和配电网(20 kV 及以下)。

电力系统的组成划分如图 1-1 所示。发电厂发出的电能一般通过升压变电站提升电压后,经由超高压输电网来输送,升压的目的是为了减少输电损耗。当电能输送到靠近负荷中心如城市的郊区后,再经降压变电站(通常为高压变电站)降低电压,经由高压输电网向高压配电变电站输送电力。经高压配电变电站进一步降压后,再经由高压配电系统输送到中压配电变电站,经中压配电变电站更进一步降压后,再经由中压配电系统输送到低压配电变压器,最终经由低压配电系统向终端用户供电。

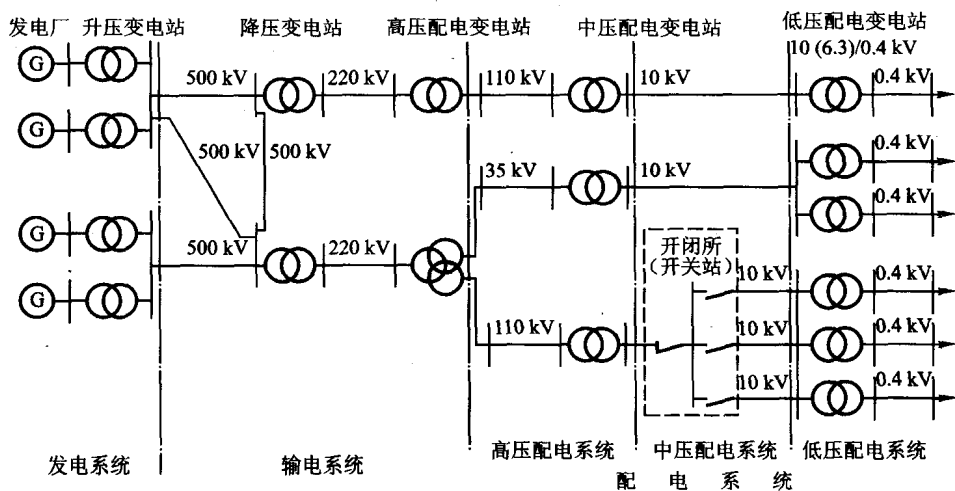


图 1-1 电力系统的组成划分示意图

一般地,将电力系统中从降压配电变电站(高压配电变电站)出口到用户端的这一段系统称为配电系统。国内外关于配电系统范围的划分有一定的差异。

在我国,配电系统可划分为高压配电系统、中压配电系统和低压配电系统三部分。

高压配电系统与输电系统直接相连,接收输电系统输送的电能,向负荷中心直接放射供电或经降压配电。高压配电系统的电压等级通常选为 35 kV、66 kV 或 110 kV,有些大型城市也将 220 kV 作为高压配电系统电压等级,以适应城市用电规模的增长。高压配电系统的电源一般来自不同的 220 kV 或 500 kV 中心变电站(或枢纽变电站)。

中压配电系统是指从 110/10 kV 或 35/10 kV 降压变电站的 10 kV 母线出发经中压配电线路到低压配电变压器的那一部分网络系统。中压配电系统的电压等级一般选为 10 kV(6.3 kV)或 20 kV。通常将降压变电站的每一回 10 kV 出线称为一条馈线。

低压配电系统是指从 10(6.3)/0.4 kV 低压配电变压器到用户端的那一部分网络系统。一般将低压配电系统的电压等级选为 0.4 kV,或称为 380/220 V,即线电压 380 V,相电压 220 V。

在国际上,有时在高压输电系统和配电系统之间还存在一个次输电系统(Sub-transmission System),实际上大致对应我国的高压配电系统。国外的配电系统多分为两部分,即一次配电系统和二次配电系统,通常将从次输电系统末端的降压变电站的配电网至低压配电变压器入口范围的那一部分系统称为一次配电系统,而将从低压配电变压器的出口到用户端的那一部分系统称为二次配电系统。这二者大致对应我国的中压配电系统和低压配电系统。

由于配电系统作为电力系统的最后一个环节直接面向终端用户,它的完善与否直接关系着广大用户的用电可靠性和用电质量,因而在电力系统中具有重要的地位。

1.2 配电系统的基本设备和设施

配电系统是由多种配电设备(或元件)和配电设施所组成的变换电压和直接向终端用户分配电能的一个电力网络系统。配电设备或元件的不同连接方式构成了不同的配电网结构。

配电设备按电压等级可分为高压配电设备和低压配电设备。习惯上,高压配电设备包含中、高压配电系统所属电压等级[110 kV、35 kV、10(6.3) kV]的设备。低压配电设备则是用于低压配电系统所属电压等级(0.4 kV)的设备。

配电设备按功能可分为一次设备和二次设备。一次设备用于直接输送电能。配电线路、配电变压器、自动调压器(或电压调整器)、配电电容器、(配电)母线和配电开关设备等都属于一次设备。二次设备则用于实行系统的测量、保护与控制等,主要有:电流互感器(TA)、电压互感器(TV)、馈线终端单元(FTU)、变压器终端单元(TTU)、避雷器、故障指示器等。其中,馈线终端单元 FTU 又包括杆上 FTU、柱上 FTU、环网柜 FTU、开闭所 FTU 等。

配电系统的主要设施则包括配电变电站、馈线、开关站、环网柜等,它们的共同特点是由几种配电基本元件组成。

下面扼要介绍几种常见的配电设备和设施。

1. 配电变电站

配电变电站俗称变电所,是具备变换电压和分配电力功能的配电设施。最常见的可分为 110 kV(高压配电)变电站、35 kV(高压配电)变电站和 10 kV(中压配电)变电站。其中,10 kV 变电站又可分为 10 kV 箱式变电站(简称箱式变)、10 kV 配电站(俗称配电室)和 10 kV 配电变压器台(简称变台)。

10 kV 箱式变电站是由 10 kV 开关设备、电力变压器、低压开关设备、电能计量设备、无功功率补偿设备、辅助设备和连接件等元件组成的成套配电设备,这些元件

在工厂内被预先组装在一个或几个箱壳内,用来从中压系统向低压系统输送电能。

10 kV 配电站是具有 10 kV 进线配电装置、配电变压器和低压配电装置,仅带低压负荷的户内配电设施。10 kV 配电站分为 10 kV 户内配电站和地下配电站。10 kV 户内配电站是将设备安装在建筑物内的配电站。10 kV 地下配电站是将设备安装在地下建筑物内的配电站。

10 kV 变台是用于将中压降压到低压的简易集合式设备的总称(包含配电变压器、开关设备、测量设备及相关的附属设施等)。10 kV 变台主要包括 10 kV 柱上变台、10 kV 屋顶变台和 10 kV 落地变台。10 kV 柱上变台指安装在一根或多根电杆上的 10 kV 变台。10 kV 屋顶变台指安装在屋顶的 10 kV 变台。10 kV 落地变压器台指安装在地面的 10 kV 变台。

2. 馈线

在我国,通常将 110/10 kV 或 35/10 kV 中压配电变电站(降压变电站)的每一回 10 kV 出线称为一条馈线。每条馈线由一条主馈线、多条三相或两相或单相分支线、电压调整器、配电变压器、电容器组、配电负荷、馈线开关、分段器、熔断器等组成。图 1-2 示出了从同一中压配电变电站的同一条 10 kV 母线引出的 3 条馈线:馈线 1、馈线 2 和馈线 3。其中,馈线 1 和馈线 2 之间通过动合的联络开关相连。

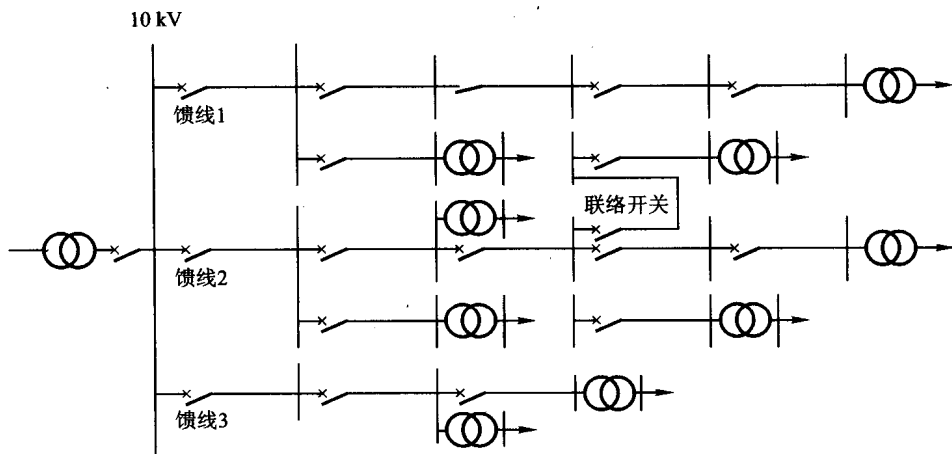


图 1-2 典型的配电馈线结构

3. 配电开关设备

配电开关设备分为高压配电开关设备和低压配电开关设备。高压配电开关设备包括高压断路器、高压负荷开关、高压隔离开关和高压熔断器;低压配电开关设备则包括低压断路器、低压负荷开关和低压熔断器。重合器和分段器则是用于配电网自动化的智能化开关设备。

高压断路器又称馈线开关,是安装在馈线上,当系统发生故障时用以断开故障的设备。它具有熄弧能力,能够切断故障电流。按灭弧介质可分为少油断路器、多油断路器、真空断路器和 SF_6 断路器。

高压负荷开关是安装在线路上的开关设备,具有简单的灭弧装置,能够开断正常的负荷电流,但不能切断故障电流。与高压熔断器组合使用,可代替高压断路器以节省投资。

高压隔离开关用于设备停运后退出工作时断开电路,以保证与带电部分隔离,起隔离电压的作用。隔离开关没有灭弧装置,其开合电流能力极低,不能用作接通或切断电路的控制电器。

高压熔断器(或熔丝)是通过过热熔断来防止电路中电流的过载和短路的配电设备。可分为跌落式和限流式两大类。

低压断路器又称自动空气开关,是低压配电系统中既能分合负荷电流又能分断短路电流的开关设备,可分为万能式、塑壳式和小型模块化三种类型。

低压负荷开关主要分为开启式和封闭式两类,其中开启式负荷开关俗称闸刀开关。

低压熔断器与低压负荷开关的闸刀开关配合,可用于配电线路、照明电路、小容量电动机等的短路保护。

重合器本身具有控制及保护功能。它能检测故障电流并能够按照预定的开断和重合顺序在交流线路中自动进行开断和重合操作,并在其后自动复位和闭锁。

分段器是用来隔离故障线路区段的自动开关设备,它一般与重合器、断路器或熔断器相配合,串联于重合器与断路器的负荷侧,在无电压或无电流情况下自动分闸。

4. 开关站和环网柜

开关站又称开闭所,是由10 kV开关设备和母线所组成的配电设施。开关站具有母线延伸的作用,一般只具备配电功能而不具备变电功能,但也可附设配电变压器。10 kV开关站分为10 kV户内开关站、10 kV户外开关站和10 kV地下开关站。

环网柜,又称环网供电单元,是一种把所有开关设备密封在密闭容器内运行的环网开关设备,应用在10 kV配电系统电缆网中,可实现环网接线、开环运行的供电方式。图1-3所示是环网柜的结构和功能示意,它一般由3至5路开关共箱组成,由进线单元、计量单元、母线单元等多种单元任意组合成多种方案。

环网柜通常采用负荷开关,而开关站一般采用断路器。由于环网柜体积小,技术指标先进,减少了占地面积,缩短了出线电缆长度,降低了整体造价和维护费用,因而当它采用断路器时,完全可以取代常规的开关站,作为接受和分配电能之用。

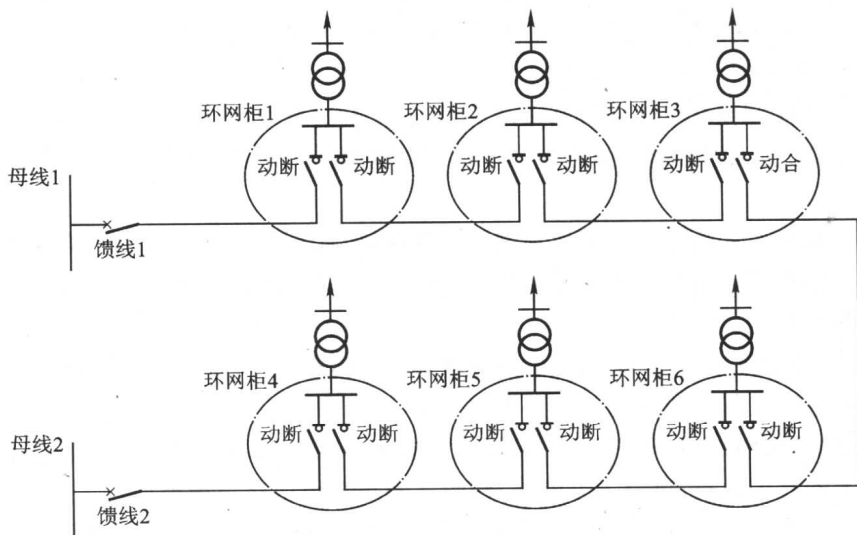


图 1-3 环网柜结构和功能示意

1.3 配电系统的网络结构

高压配电系统与输电系统直接相连,一般与输电系统一样具有网状的结构。

中压配电系统则多采用辐射状、环状或网状等结构方式,正常情况下多为辐射状运行。

在供电方式上,高、中压配电系统一般采用三相三线制。而低压配电系统则采用三相四线制,也存在单相两线和两相三线供电的情况。

我国低压配电系统的接线一般采用以配电小室(箱式配变)或柱上变压器为中心的辐射状结构,不形成环网。这样的低压配电网结构简单、安全可靠,除了采用三相四线制以辐射状向负荷供电,有时也通过单相两线线路向单相负荷供电,或通过两相三线线路向两相负荷供电。

1.4 配电系统的中性点接地方式

三相配电系统的中性点与大地的电气连接方式称为配电系统的中性点接地方式。配电系统的中性点接地方式可以分为:中性点不接地、中性点经消弧线圈接地、

中性点经电阻接地和中性点直接接地等。其中,中性点不接地、中性点经消弧线圈接地和中性点经电阻接地的配电系统又称为小电流接地系统。世界各国配电系统采用的中性点接地方式的情况差异较大。

我国的高压配电系统一般采用中性点直接接地方式。当系统发生单相接地故障时,故障电流较大,有利于迅速检测出故障,以快速切除故障线路,这样对线路上电气设备的绝缘等级的要求较低,可降低投资费用。其缺点是由于发生单相接地故障时即进行跳闸,供电可靠性较低。

我国的中压配电系统一般采用中性点不接地或经消弧线圈接地的方式,属小电流接地系统。由于配电线路对地有电容,当中压配电系统发生单相接地故障时,因为没有直接构成回路,接地点接地相电流仅为电网对地的电容电流,其值一般不大,通常比负载电流都小得多,因此中性点不接地系统又称小电流接地系统。随着网络的延伸,接地点接地相的容性电流也逐渐增大,以致有可能使接地点电弧不能自行熄灭而引起弧光接地过电压。为了避免这种情况,有时在中性点处安装消弧线圈,其产生的感性电流分量可以与容性电流分量相抵消,从而减少接地点的总电流。中性点不接地系统的优点在于发生单相接地故障时,由于接地电流很小,若是瞬时故障,一般能自动熄弧,非故障相电压升高不大,不会破坏系统的对称性。根据安全规约,系统发生单相接地故障后可允许继续运行不超过两小时,从而获得了排除故障的时间,相对提高了供电的可靠性。

我国的低压配电系统一般采用中性点直接接地方式。这是从电气设备和人身安全出发考虑的。根据国际电工学会 IEC 的规定,在低压配电系统中,按电气设备的接地方式分为 TT 系统、TN 系统、IT 系统。其中 TN 系统又可分为 TN-C、TN-S 系统等。

TT 系统是指将电气设备的金属外壳直接接地的保护系统,称为保护接地系统。第一个符号 T 表示电力系统中性点直接接地;第二个符号 T 表示负载设备外露不与带电体相接的金属导电部分与大地直接连接,而与系统如何接地无关。在 TT 系统中负载的所有接地均称为保护接地。

TN 系统是将电气设备的金属外壳与工作中性线相接的保护系统,又称为接零保护系统。一旦电气设备外壳带电,TN 方式接地系统能将漏电电流上升为很大的短路电流,可为 TT 系统的数倍以上,实际上相当于发生单相接地短路故障,这样熔断器的熔丝会熔断,低压断路器也会动作而跳闸,使故障设备断电。因而,TN 方式接地系统在我国和其他许多国家得到了广泛应用。

在 TN 方式接地系统中,根据其保护中性线是否与工作中性线分开可区分为 TN-C 和 TN-S 两种方式。其中,TN-C 方式接地系统是用工作中性线兼作接零保护线,可以称为保护中性线。TN-C 方式接地系统只适用于三相负载基本平衡的情况,原因是当配电系统三相负载不平衡时,工作中性线上将产生不平衡电流,形成对地电压,这与保护线所连接的电气设备金属外壳也会带一定的电压。TN-S 方式