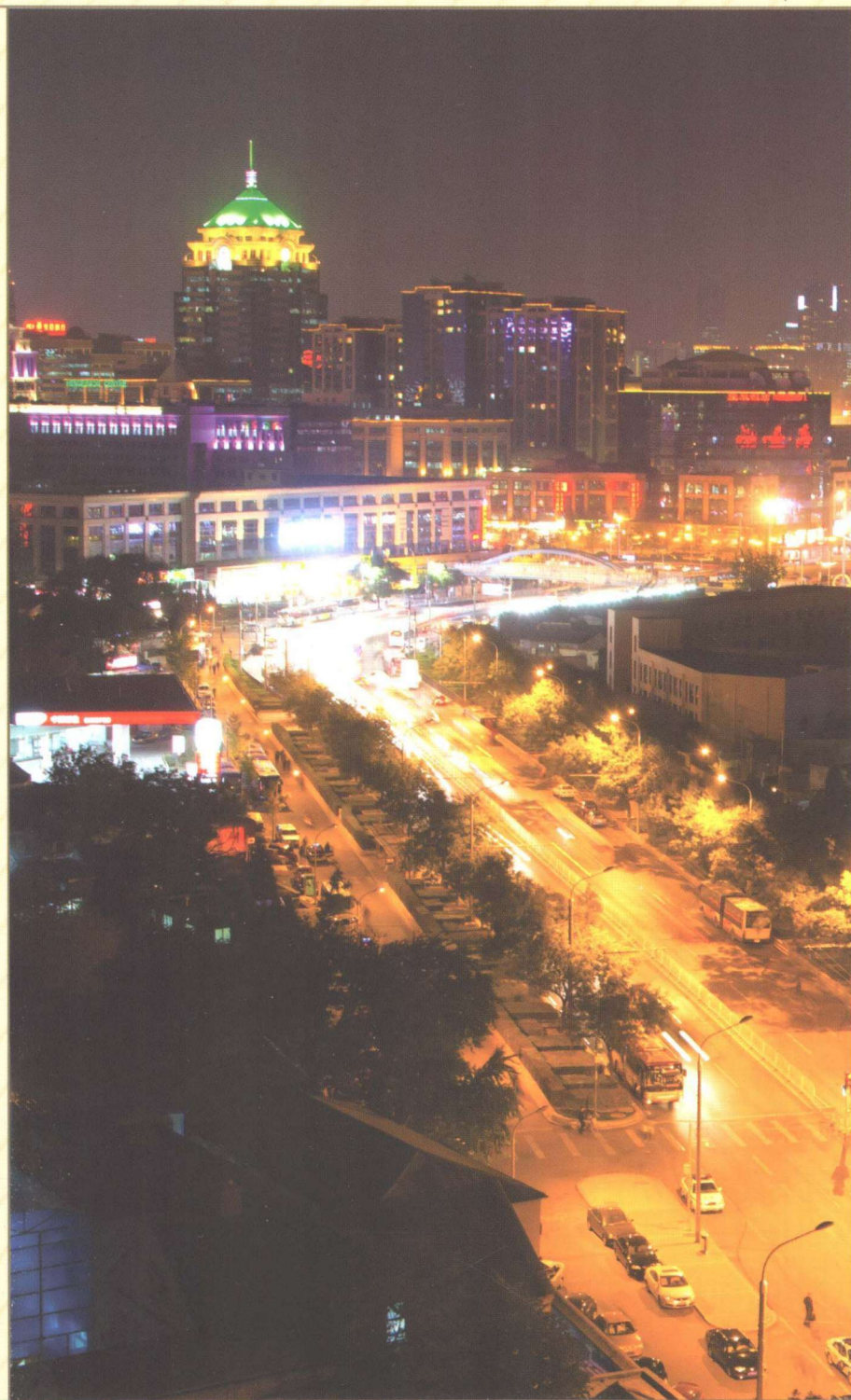




城市供配电技术

杨世海 陈昊 李翔 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

城市供配电技术

常州大学图书馆
藏书章

杨世海 陈 昊 李 翔 徐晟宇 葛夕武
徐 晴 沈秋英 陈铭明 田 涛 卢树峰 编 著
王玉荣 马玉苹 杜红卫



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书深入浅出,理论联系实际,剖析展示行业技术现状,跟踪国内外供用电最新动态,以工程实践为基础,具有极强的可操作性和广泛借鉴意义。全书涵盖城市供用电系统架构、装备、智能化、继电保护与自动装置、分布式能源和新型负荷、优质供电与电能质量等内容。

本书适合从事配网规划、建设、运维、创新研究的工程技术人员使用,也可以供电类专业高校师生和科研人员参考,同时还可以为一般电力用户提供用电安全方面的指导和普及教育。

图书在版编目(CIP)数据

城市供配电技术/杨世海等编著. —北京:中国电力出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-5123-4800-4

I. ①城… II. ①杨… III. ①城市配电 IV. ①TM727. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 179428 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)

印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 1 月第一版 2014 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 426 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

前言

近十年来,我国在配电网及供用电设施建设方面投入可观的人力、物力、财力,使得配用电侧的技术、设施、管理模式均获得了根本改观,成效斐然,改变了传统发、输、变电和配电之间的发展不均衡状况,促使我国电力系统向系统化、智能化方向发展,对于国民经济关键支持和人们生活质量的提高均具有重要意义。

供用电技术十余年的飞速发展,体现在配网科学规划与可靠运行、配网装备能力提升与智能化、继电保护与安全控制、新型负荷管理与优质供电等各个方面。供用电技术领域在一、二次装备能力、技术实现手段、管理理念、运营方式等方面发扬电力系统优秀传统,不断提升技术能力,提高电力管理服务水平,拓展供用电技术领域发展空间。在新形势下以确保安全可靠供用电为根本目标,顺应电力体制深化改革的要求,形成了更加先进的技术体系和更为科学的管理格局。

本书针对城市供用电技术面临的新形势和新情况,对城市配电网运行维护新技术和发展趋势进行点面结合的阐述和剖析,以原理和技术论述为主线,结合案例分析,解决实际问题,力求实现理论与工程应用实践的有机结合,旨在解疑释惑,抛砖引玉,为相关领域工程、科研人员、高校师生提供有益的助力。

全书共分十章,其中第一章由杨世海同志编写,第二、四章由杨世海、徐晟宇同志编写,第三章由徐晟宇、陈昊同志编写,第五、六章由李翔、陈昊、杜红卫同志编写,第七章由葛夕武同志编写,第八章由田涛、杨世海、陈昊同志编写,第九章由沈秋英、徐晴、杨世海同志编写,第十章由陈铭明、杨世海、卢树峰、徐晴同志编写,附录由陈昊、王玉荣、马玉苹同志编写。杨世海同志负责全书构架设计。陈昊同志负责全书统筹编排和统稿工作。

本书从酝酿到编写成稿过程中,得到国家电网公司电力需求侧管理编辑部胡红

生总编、南京市照明学会沈茹秘书长、南京市市级机关医院陈晗主治医师等专家学者大力支持和指导帮助，在此表示衷心感谢！

本书不仅介绍传统技术，同时涉及大量现代供用电系统相关的国内外最新技术，限于编者水平所限，疏漏和不当之处敬请广大读者、同仁批评指正，编者不胜感激。期望本书起到抛砖引玉之作用，促进专业水平提高。

编著者

2013年6月

目录

前言

第一章 绪论	1
第二章 城市供用电系统构成及特点	4
第一节 城市电网的构成	4
第二节 中性点接地方式	6
第三节 城市供用电系统接线方式	10
第四节 城网主要装备概述	28
第三章 城市配电网电缆运行维护及相关技术	37
第一节 概述	37
第二节 电缆的勘察设计及施工验收	43
第三节 运行维护	58
第四节 电缆常见故障分析	60
第五节 发展趋势	71
第四章 城市配电网配电变压器运行维护及相关技术	74
第一节 概述	74
第二节 油浸式变压器	76
第三节 干式变压器	94
第四节 配电变压器的发展趋势	99
第五章 城网配电自动化	102
第一节 配电自动化概述	102
第二节 配电自动化功能	103
第三节 配调自动化	105
第四节 配电网空间负荷预测	109

第五节 配电自动化的发展方向展望·····	110
第六章 配电网运行方式管理与负荷转供·····	112
第一节 我国配电网接线方式及负荷转供·····	112
第二节 配电网线路的解合环分析·····	113
第三节 配电网解合环操作安全分析·····	115
第四节 配电网解合环操作与网络重构·····	119
第七章 配电自动化建设·····	121
第一节 概述·····	121
第二节 配电自动化建设实施方案·····	122
第三节 通信方式的选择·····	128
第四节 设备选型·····	134
第五节 工程施工与验收·····	142
第六节 配电自动化系统运行与维护·····	150
第八章 配电网继电保护与安全自动装置·····	152
第一节 配电网继电保护的基本要求·····	152
第二节 配电网继电保护·····	153
第三节 配电网安全自动装置·····	168
第四节 保护装置的校验·····	176
第五节 智能电网下的配电网保护·····	180
第九章 新型供用电技术·····	186
第一节 分布式能源与储能技术·····	186
第二节 电动汽车及充换电站·····	192
第三节 用户互动技术·····	200
第四节 智能电能表及其应用·····	217
第五节 展望·····	238
第十章 配电网优质供电与电能质量·····	240
第一节 配电网优质供电指标·····	240
第二节 配电网负荷特性·····	254
第三节 配电网电能质量现状·····	257
第四节 配电网电能质量监测与谐波治理·····	258
附录 触电紧急救护·····	268
参考文献·····	274

第一章

绪 论

经济发展，电力先行，数十年大规模的电力现代化建设促使我国电力工业高速发展，基础设施建设取得显著成绩，电力系统发、输、变、配、用、调度等环节对国民经济的支持能力大大增加，电网建设和运营管理进一步向智能化发展。

供用电系统是电力系统的重要组成部分，其研究对象主要在于电力网络中的配电网部分，电压等级一般界定在 110kV 及以下，是本书的主要讨论范围。部分特大型电力用户拥有 220kV 专用线路和专用变压器，亦应划归供用电系统。

供用电系统处于电力系统能量输送过程的末端，直接面向社会和用户，担负着分配电能的任务，是保证用户可靠供电和用电品质的关键环节。其可靠性指标与各级电力用户密切相关，直接体现了电网经营企业的管理水平和服务品质，关系着电力企业能否实现其自身价值和提高经济效益。供用电系统的运行效果直接关系到国民经济和各级用户能否享受到优质服务，对用户满意度起着决定性影响作用，在当前探索构建智能型电网、大力倡导电力服务品质、电力需求侧社会关注度不断加大的背景下引起更为广泛的重视。

电力系统存在的重要意义就是支持国民经济发展、服务用户、提供优质经济的电能。建国初期，我国工业基础较为薄弱，电力产业发展滞后，在这种情况下，大力建设以火电为主的各类电厂和覆盖面广阔的输电网成为基础性的重大工程。相比而言，供用电系统及配网建设则一度从基础硬件设施到运维管理技术发展均滞后于输电网，自动化程度低、网架结构薄弱、供电可靠性低、供电质量无法满足用户特别是高精加工行业的要求。针对这种情况，我国从 20 世纪 90 年代起，首先在条件较好的城市配电网逐步开展配电自动化系列科研和工程实践工作，采取加强装备建设、建立配电网通信通道、实施馈线自动化、研发应用高级配电网软件等系列措施，提高供电可靠性、管理水平和自动化程度，加强从变电、配电到用电过程的监视、优化控制和管理，经过二十年努力，配电网运行管理水平显著提高。

配电网上承输变电环节、下启用电环节，其运行管理涉及配电网规划、装备建设、配电网调度与自动化、配电网继电保护、电力负荷接入、供电可靠性和电能质量等环节，是电力

公司与各级各类用户共同关心的部分。

配电网的网架结构、线路和设备与输电网显著不同。配电网单条线路长度相对较短，结构多样，分布范围广，信息采集和管理难度大。随着城市对环保、市容、安全等方面要求的提高，城市配电网特别是大城市中心区域、旅游区和居民小区更多采用地下电缆作为供用电通道，架空线路则应用于郊区、农村或人口较少的小城市。相对于枢纽变电站中的大型电力变压器，配电变压器数量庞大、型号复杂，但容量较小，要求节能、环保、低噪声、小型化，可直接向终端用户供电，是目前配电网中最主要的设备，根据不同的现场要求干式和油浸式均有使用。可靠优质、智能控制的配电变压器对于配电网节能降耗具有重要意义，也是配电网一次设备智能化的重要体现。

2000年后，在电气设备、自动化技术、通信技术、计算机和微电子技术发展的背景下，欧美发达国家逐渐形成智能电网概念，此后相关的科研攻关和工程实践持续进行。我国于2008年后大范围开展智能电网相关设备研发、标准制订、体系构建、运行优化等工作。智能电网战略目标的提出给配电自动化注入了新的内涵，配电网建设和研究的方向随之逐渐向智能化发展。配电网是智能电网的重要组成部分，配电自动化是提高供电可靠性、供电质量和供电能力，实现配电网高效经济运行的重要手段，是智能电网的重要体现。在前期配电自动化技术发展和进一步深入研究应用的基础上，以信息化、数字化、自动化、互动化为导向，增强配电网的可观测性和可控性，提高供电可靠性、运行经济性与灵活性。优化配电网继电保护配置，开展科学规划、合理组网、网络故障重构、配电网潮流优化等科研和工程相关研究实践，建立故障切除反应快速、可自愈、供电可靠、电能质量达标的高效优质配电网，全面提高配电网智能化水平。为有效指导配电自动化建设与改造工作，国家电网公司组织制定了其公司企业标准 Q/GDW 382—2009《配电自动化技术导则》和在导则基础上进一步深化和细化的《配电自动化试点建设与改造技术原则》，对配电自动化的规划、设计、建设和改造提出规范性技术要求，对国内各辖区配电自动化工作具有指导或借鉴意义。近年来配电自动化和智能化水平显著提高，供电可靠性相比过去有了质的提升。

电力系统是发、输、变、配、用同步进行的同步实时系统，电力负荷特性研究和优化管理对提高供用电系统稳定性、节能降损、提高用户经济效益具有重要意义。随着生产技术和科技的进步，各类用电设备品种日益繁多，电力负荷更为复杂，如电动汽车充换电站即为新型负荷，具有特殊的负荷特性。近年来引起各国广泛重视的分布式能源、储能设备接入配电网后，使供用电系统的内涵和运营模式发生了较大变化，“自发自用、余电上网”的模式逐渐获得认可并试点应用，配电网终端电力负荷的电量流动由单纯用电到双向互动，从而促使用户互动和高级计量技术不断进步，电力供应与服务向互动化、规范化、精细化、人性化发展。风力发电、太阳能光伏发电发展迅速，部分以分布式电源的方式直接接入地区配电网，在接入规范制订、电网稳定性评估、经营许可和电量贸易结算等方面均带来了新的课题。

一方面，种类繁多的电力负荷特别是高精加工、精密仪器、微电子等用户对供电可靠性和电能质量要求较高；另一方面，大量带有较高谐波含量的非线性负荷对供用电系统电能质量带来污染，如近年来快速发展的高铁牵引站、变频电器、电力电子设备等均对优质供电带来巨大挑战，严重者甚至引起设备损坏、跳闸甚至局部网络崩溃，降低了供电可靠性。因此



配网电能质量监测与治理应引起重视，使之成为优质供电的重要保障。

最后，无论供电或用电，安全是第一要务。除医务工作人员的专业救治外，电力专业人员和一般电力用户均应掌握正确的触电急救知识，发生触电后第一时间做紧急抢救，提高救治成功概率。

概要言之，供用电系统分布范围广泛、现场情况多样、运行环境复杂，是一个联系各行各业、千家万户的庞大网络和电力系统对外交互的纽带，与发、输电系统区别特征鲜明，其运行维护技术和经营管理理念近年来变化巨大。供用电系统一方面是电力技术创新和进步的重要领域，另一方面也是各国电力体制改革的关键环节之一，在工程技术实践、前沿科技跟踪和营销服务管理等方面均具有广阔的发展空间，需要科研、工程、技术技能、管理人员共同参与，推进其发展和进步。

城市供用电系统构成及特点

城市供用电系统主要包括 220kV 城市主干输电网、110kV 和 35kV 高压配电网、6~20kV 中压配电网和 380V/220V 民用低压配电网，各电压等级网络之间以变电站相连。

城市供用电系统一般归为配电网，传统意义的配电网主要包括 110、35kV 和 10kV 三个电压等级，110kV 一般用于中小电力系统的主干线或大型电力系统的二次配电网，35kV 较多用于大工业企业内部电网和农村电网。10kV 则是目前我国最普遍运用的城市中压配电网电压等级，往往通过环网构成配电网，深入各负荷点。

随着电力工业的发展和城市电网结构的变化，大电力系统主干线电压等级进一步提高，部分 220kV 线路也成为城区配电网的一部分，退而为二次网络电压。配电网电压等级的提高有利于提高配电能力，加强重负荷区域的供电保障。

当前，城市中压配电网负荷越来越重，且负荷严重不均匀，受季节性影响非常大。尤其是大城市的商业聚集区、居民聚集区，配电网过载现象日益严重，而限于繁华区域土地紧张和居民对变电站的正确认识尚有待深入，繁华区域新建变电站选址困难。在这种背景下，部分具备条件的地区开始进行 20kV 配网的建设和试运行，用于取代 10kV 配网。电压等级提高后，电力配送容量大幅增加，有效缓解负荷较重区域的过载问题。

城市供用电系统的构建主要包括网络结构的构成、接地方式和接线形式的选择。

第一节 城市电网的构成

图 2-1 是电力系统能量传输的简要过程，从发电厂经输电线路到达枢纽变电站、城市地区变电站。从地区变电站起，经各级配电网络、配电变压器到达各类用户，形成一个完整的城市供用电系统。

一般而言，城市电网可以分为城市输电网和城市配电网，输电网和配电网加上各类终端用户共同构成城市供用电系统^[1]。

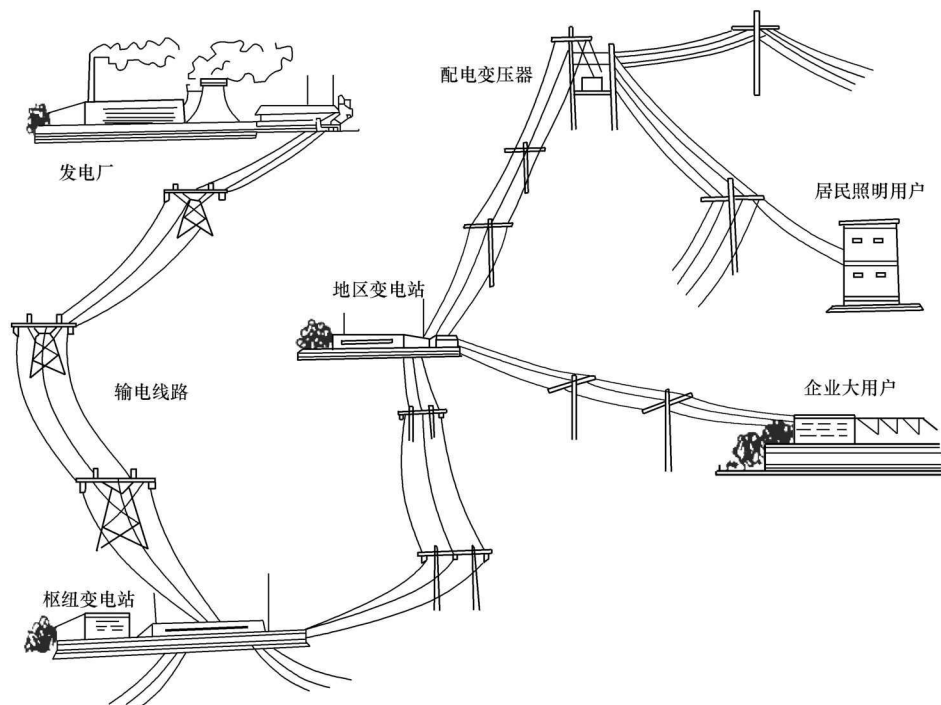


图 2-1 电力系统体系图

输电网，顾名思义用于从远方电源点向城市送电，在城市外围形成电网，甚至部分输电线路直接深入到城市内部的重负荷区域。目前大城市输电网一般采用 220kV 电压等级，在城市外围形成环网，再通过下一级的配电网逐级送到城市内部各类负荷点。图 2-1 中从地区变电站至配电变压器可以视为输电网。

配电网，用于向城市各级各类用户包括工业、商业、居民等配送电力，承接输电网。对于大城市，输电网与配电网区别明显，而对于中小城市尤其是小城镇，由于负荷相对较小，配电网直接进城，输电网与配电网的区别并不明显。

一般而言，配电网可以分为高压配电网、中压配电网、低压配电网。

高压配电网是输电网内一层的电网，通常包括 110、63、35kV 变电站和配电线路。国外一些大城市的配电电压等级可达 138~275kV。高压配电网相对于输电网和中低压配电网而言处于承前启后的地位，一方面应能接受输电网供给城市的全部电力容量；另一方面应具有合理的布点和结构，能满足中低压配电网所需要的全部电力负荷。地区非统调发电厂、热电厂及自备电厂均可作为地区输电网电源点。

随着经济发展和负荷的快速增长，为了提高输送能力，国内外一些特大型城市外围输电网电压等级已提高到 500kV 或 330kV，这样原有的 220kV 输电网降为高压配电网的一部分。我国一些大城市如京、津、沪、宁等地 220kV 变电站已大量深入市区负荷中心，逐步承担起为城市中心区负荷配电的任务，其功能性质已在发生变化。未来的发展趋势将大量以 220kV 或 110kV 变电站直配 20kV 线路，再通过 20kV 配变供给 380V/220V 居民用户。这样可以提高配电电压等级、简化电压级次、降低网络损耗，减少供用电成本。

因此输电网与高压配电网是就功能上相对而言的，不宜做按电压等级固定划分。

中压配电网是高压配电网以高压线路深入负荷中心经降压后形成的电网，我国中压配电网主要包括 20kV 和 10kV 配电线路和变电站、配电所。国外有 66、35kV 等电压等级。

低压配电网是指所有 380V/220V 直接向用户输电的网络，接线方式多为三相四线制，带中性线，具有多种安全接地方式。

第二节 中性点接地方式

通常所讲的中性点是指发电机或变压器的中性点。一般而言，有中性点不接地系统、中性点直接接地系统和中性点经消弧线圈接地系统三种配置方式。近年来，中性点经小电阻接地的运行方式也获得实际应用。

中性点直接接地或经小电阻接地的方式称为有效接地系统，由于接地故障发生时中性线电流较大，也称为大电流接地系统。

中性点不接地或经高阻抗接地，称为非有效接地系统，由于接地故障发生时流经中性线的电流较小，也称为小电流接地系统。

为了明确区分小电流接地系统与大电流接地系统，目前国际上一般采纳如下标准：

凡是系统零序电抗 X_0 与正序电抗 X_1 的比值 $X_0/X_1 \leq 3$ ，且零序电阻 r_0 与正序电抗 X_1 之比 $r_0/X_1 \leq 1$ 的系统为有效接地系统。

高压系统一般通过发电机、变压器中性点实现系统接地。发电机定子绕组一般采用 Y 接法，可以消除三的整数倍谐波。其中性点一般不接地或经过避雷器接地，避雷器内部有气隙，用于防护定子绕组过电压，正常运行时气隙不会被击穿，等同中性点不接地。

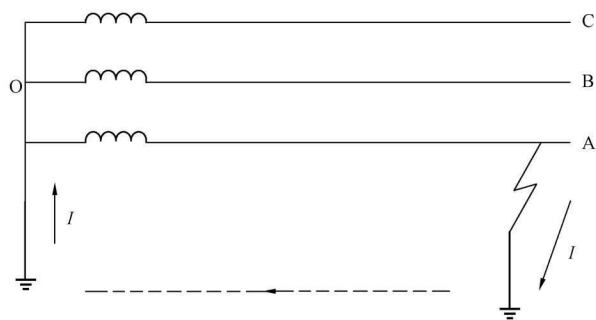


图 2-2 中性点直接接地系统运行方式图

一、中性点直接接地系统

我国 110kV 及以上电压等级系统和 380/220V 低压系统一般采用中性点直接接地系统。

110kV 及以上系统的常用接地方式如图 2-2 所示。

当发生单相接地故障如 A 相接地时，A 相通过回路→接地故障点→大地→中性点接地点→回路的途径构成闭合电路，这个回路阻抗很小。由于接地故障后故障相甩开了负荷，仅包含导线和大地，阻抗很小，导致单相短路电流远远大于正常运行电流，故障相接地选线较为明确，从而使保护装置可以准确地进行故障状态判断，之后迅速切除故障线路，同时中断供电。也就是说，发生故障后会立即中断供电，导致供电可靠性下降。

为了提高供电可靠性，针对中性点直接接地系统，往往配置重合闸装置，根据厂站实际运行情况可以采用单相重合闸、三相重合闸、综合重合闸。单相重合闸是指发生单相接地故障时，在正确选择故障相的前提下保护装置切除故障相，随即对故障相重合闸，合闸成功则



继续运行。如果出现永久性单相接地故障重合闸不成功，而系统又不允许长期缺相运行，则三相切除排查故障。三相重合闸是指发生单相故障后直接切除三相再进行三相同时重合闸。综合重合闸是指发生单相故障时切除故障相再进行单相重合闸，发生相间故障时同时切除三相进行三相重合闸。

电力系统中的接地故障大部分是单相故障且并非永久性故障，重合闸后大部分故障可以消除。因此采用重合闸装置后有效弥补了中性点直接接地系统供电可靠性低的问题。

中性点直接接地系统在发生单相接地故障时，由于中性点直接接地，其电位强制为地电位，所以其他两个正常运行相对地电压并不会改变，不存在故障时抬高电压造成绝缘损坏问题。一次设备只需考虑正常运行电压的绝缘要求，有利于节约投资。

因此中性点直接接地系统优点是便于保护装置接地选线、绝缘要求低，缺点是故障时容易造成停电，供电可靠性低。如果备用电源点较为充足，网络大量实现环网供电，则发生故障时不必单纯依靠带故障挂网运行来保证不停电，选用这种中性点接地方式较为可行。

二、中性点不接地系统

对于中性点不接地系统，尽管线路与地之间没有直接的导体连接，但由于一次线路对地之间存在电容效应，因此仍有电容电流存在。中性点不接地系统运行方式见图 2-3。

当系统正常运行时，三相接近平衡，三相对地电容可视为对称负荷，中性点电位为零。如果用中性线将中性点与地连接起来，则中性线流经电流为零。此时每相对地电容电流均超前于相电压 90° 。

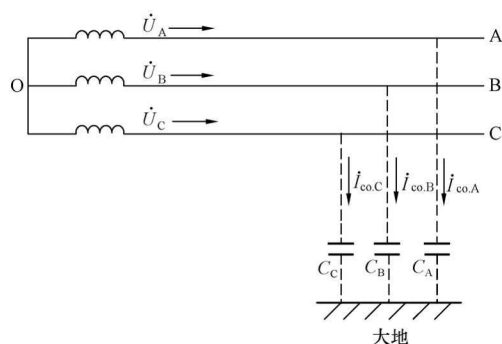


图 2-3 中性点不接地系统正常运行方式图

中性点不接地系统正常运行时的相量图如图 2-4 所示。

当 C 相发生接地故障时（其余两相发生接地故障类似分析），C 相电位变为地电位，C 相对地电压 $U_{C'}$ 变为零。此时中性点电位设为 $U_{O'}$ ，地电位为 U_O ，如图 2-5 所示。

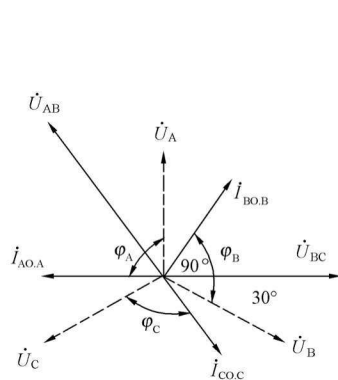


图 2-4 中性点不接地系统正常运行时相量图

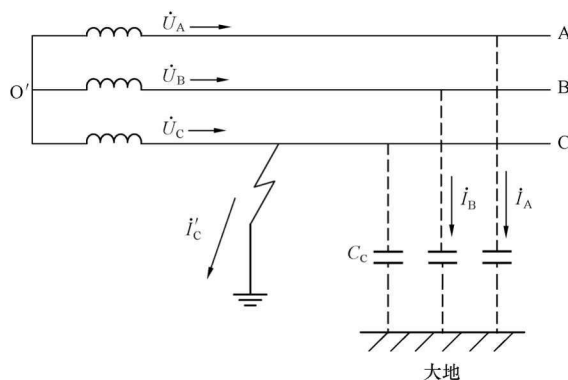


图 2-5 中性点不接地系统故障时运行方式图

根据相量形式的基尔霍夫电压定律，针对 C 相列电压回路等式见式（2-1）

$$-\dot{U}_C + \dot{U}_{C'} + \dot{U}_{OO'} = 0 \quad (2-1)$$

所以有

$$\dot{U}_{OO'} = \dot{U}_C = -\dot{U}_{O'O}$$

根据相量形式的基尔霍夫电流定律，针对 A、B、C 与地之间列等式 (2-2)

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_{C'} = 0 \quad (2-2)$$

$$\dot{I}_{C'} = -(\dot{I}_A + \dot{I}_B) \quad (2-3)$$

此时故障相 C 相的对地电流全部由短路点注入大地，由于对地电位已为零，不再由对地电容泄放电流，用 $\dot{I}_{C'}$ 表示。

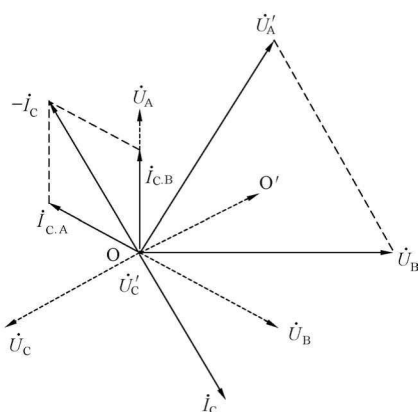


图 2-6 中性点不接地系统故障状态下相量图

而两个正常运行相 A 相与 B 相相对故障后新的中性点电位 $U_{O'}$ 仍不变，当由于故障后新的中性点电位已不再是地电位，因此正常相与地电位之间的电压已变化，作相量图如图 2-6 所示。

由相量图可见

$$I_C = \sqrt{3} I_{C,A} = \sqrt{3} \frac{U'_A}{X_C} = \frac{3U_A}{X_C} = 3I_{CO} \quad (2-4)$$

式中 I_{CO} ——正常运行时的对地电容电流值，三相平衡时各相值相等。

可见，单相接地时接地点的电容电流是正常运行时一相对地电容电流的 3 倍。正常运行时单相对地电容电流则由电网电压水平、频率和相对地间电容值共同决定。

从以上分析可以看到，中性点不接地系统发生单相接地故障时，接地故障相变为地电位，其余两相对地电位升为正常时相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，中性点电位升高，但三相之间的相对关系没有变化，只要正常相线路的绝缘能够承受 $\sqrt{3}$ 倍相电压，则三相用电设备没有受到影响，仍可继续运行。按规程规定，这种情况允许运行 2h。在这段时间内，可以查找并消除故障，不会造成中止供电。从而提高了供电可靠性。但是由于中性点不接地系统故障相电流相对于正常运行时并不是急剧增加，与地之间形成的是一个微小电流回路，不像中性点直接接地系统那样可以立即明确判断出故障相。对于故障选线的判断不容易。往往采用人工巡线、试拉闸的方式寻找故障相。寻找故障相困难时可以暂时将负荷转移到备用电源上去。

因此中性点不接地系统的优点是提高了供电可靠性，同时由于接地电流较小，跨步电压也较小。其缺点是对线路绝缘要求提高，且故障选线困难。

三、中性点经消弧线圈接地系统

对于小电流接地系统，当中性点不接地时，短路点将流经电容电流，随着电力网络的延伸，这个电容电流可能很大，在接地点产生断续电弧且不能自行熄灭，会产生周期性熄灭、重燃。又由于输电线路中除对地呈现容性外，线路本身既有电阻分量又有电感分量，因此在参数匹配时，可能在故障电流回路中形成 R—L—C 谐振回路，与断续电弧相互作用，从而使线路上出现过电压，最高可达相电压的 2.5~3 倍。而小电流接地系统的线路绝缘一般考



考虑按线电压设计。弧光过电压可能导致绝缘薄弱点击穿，将故障扩大为相间短路甚至三相短路故障。

为了避免在接地点产生电弧，应设法将接地电流限制在最小起弧电流之内，这样电弧不会发生，从而避免谐振过电压。

中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时的系统运行方式示意参见图 2-7。

对中性点 O' 运用基尔霍夫电流定律，列出等式

$$-j\omega C \cdot \dot{U}_A - j\omega C \cdot \dot{U}_B - \frac{1}{j\omega L} \cdot \dot{U}_{O'} = \dot{I}_C \quad (2-5)$$

又由图 2-7 可知

$$\dot{U}_C = -(\dot{U}_A + \dot{U}_B) \quad (2-6)$$

$$\dot{U}_C = -\dot{U}_{O'} \quad (2-7)$$

代入式 (2-5) 有

$$j\omega C \cdot \dot{U}_C + \frac{1}{j\omega L} \cdot \dot{U}_C = \dot{I}_C \quad (2-8)$$

$$\dot{I}_C = \left(j\omega C - j\frac{1}{\omega L} \right) \dot{U}_C \quad (2-9)$$

可见，加装消弧线圈后，接地点对地分量除了电容电流分量外，增加了电感电流分量，且产生的感性电流分量与容性电流分量方向相反，互相补偿。当感性电流与容性电流之差小于最小起弧电流时，电弧不会发生，从而避免谐振过电压。

消弧线圈实际上是带气隙铁芯的线性感性电感线圈，电阻很小，感抗很大，属非有效接地，归类于小电流接地系统。发生单相接地时，未接地相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，允许三相继续运行 2h。

中性点加装消弧线圈进行补偿，有过补偿和欠补偿两种方式。实际运用中一般运用过补偿，即补偿后接地电流已变为感性电流，这样完全避免了谐振可能。而欠补偿接地电流仍为容性，与线路仍可能形成 R、L、C 谐振回路。

综上所述，中性点非有效接地系统对线路绝缘要求较高，当电压等级较高时，由于提高绝缘等级增加的费用过大。因此对于 110kV 及以上电压等级电网一般采用中性点有效接地方式。而对于 35kV 及以下电网，由于提高绝缘等级产生的费用增加相对数额要小，因此在网络结构、备用电源不够、供电可靠性不能保证时，选择中性点非有效接地系统，单相故障时可以继续挂网运行若干时间用于故障排查和恢复。当 35kV 及以下配电网结构日益完备、实现环网供电后，可以采取中性点直接接地系统简化保护配置，提高故障选线准确性。我国目前 35kV 及 10kV 多采用中性点非有效接地系统。20kV 配网在部分地区已开始投入试运行，中性点非有效接地方式、经小电阻接地方式均为试用。我国的 380V/220V 低压供用电

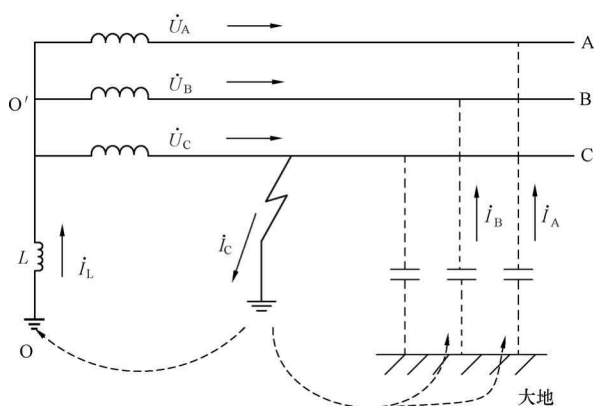


图 2-7 中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障示意图

系统一般采用三相四线制，中性线作为用电设备流经路径的一部分，同时也直接接地。

第三节 城市供用电系统接线方式

不同电压等级的供用电设施应根据实际需要选择合适的接线方式，报经供电企业审核计算通过方可建设。

一、电气接线方式选择的基本要求

电力系统的接线方式直接影响线路的输送能力、输送方式、设备投资费用、系统运行可靠性和电能损耗等主要经济、技术、安全指标，应综合考虑电源数、电源位置与性质、负荷大小、负荷点数、分布位置、可靠性要求等关键因素，结合系统实际需要慎重选择。必须考虑如下基本要求。

(1) 系统运行可靠性。因各类负荷重要程度和对可靠性要求不同，相应备选的接线方式也不同。一般而言，单母线、单电源点的接线方式可靠性相对不高。为提高某电气接线方式的运行可靠性，可以设计成环网供电的方式，也可以设置备用电源线路、备用变压器、发电机等备用设备来保证工作电源故障时立即切换备用设备恢复供电。

(2) 运行方式的灵活性。一个合理的运行方式应能适应各类特殊情况下可能的运行方式要求，适用电源供电能力和负荷变化的需要，并能适用供用电设施电气检修的需要，保证检修状态下不正常运行方式下系统仍能保持对应负荷等级足够的可靠性，将符合电能质量要求的电能送给电力用户。

(3) 安全性。电力网供用电系统接线方式必须保证在任何可能的运行方式及检修方式下运行人员的和设备的安全性。

(4) 经济性。某种接线方式的经济性包括最少的建设投资和最低的年运行费用。两者不能兼顾时，使其总的经济效益为最优。

典型的经济性指标如线路损耗，为降低线路损耗，可采用简化接线方式、减少电压层次、高电压深入负荷中心供电等措施。

(5) 可扩展性。随着社会经济的发展，用电负荷日益增加，供用电系统承担的压力越来越大，在设计接线方式时应考虑 5~10 年的发展情况，便于扩建、增容。

二、城市高压输电网的接线方式

为了提高供电可靠性，一般而言，输电网应有两个以上向城市电网直接供电的电源点，且容量相对分散，不宜过于集中，分层分区供电，防范大面积停电。各电源点之间应加强电气网络联系，城市电网的受电点应尽量靠近负荷中心，甚至深入市区重负荷区域。

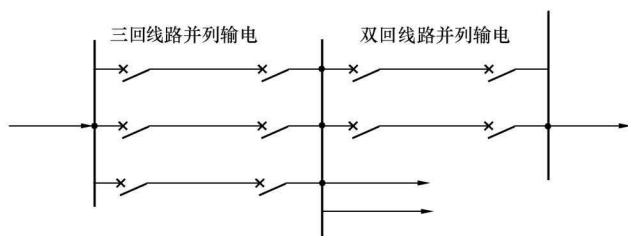


图 2-8 多回线路并列送电示意图

高压输电网的接线方式有双回线路并列、三回线路并列或多回线路并列、环式等。应根据电源点地理位置分布和各受电点负荷情况确定，如图 2-8、图 2-9 所示。

应合理把握送电可靠性与设备利用率之间的关系，两者往往呈现