

# 实用 配电网技术

● 李景禄 编著

S H I Y O N G   P E I D I A N W A N G   J I S H U



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书全面地、系统地介绍了配电网技术方面的内容,特别是近年来出现的新技术、新产品在配电网中的应用。重点讨论了配电网中性点接地方式、配电网自动跟踪消弧补偿装置,配电网接地选线、配电网过电压保护、配电网损耗及无功补偿。全书分十二章,包括:配电网规划设计、配电设备、配电网中性点接地方式、配电网电容电流测量、配电网消弧装置,配电网接地选线、配电网内过电压及其保护、配电网损耗及无功补偿、配电网供电可靠性与电压合格率、配电网继电保护、配电自动化。

本书可供电力部门相关专业技术人员使用,亦可作为高等院校电力工程专业的本科生和研究生的选修教材或参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

实用配电网技术/李景禄编著. —北京:中国水利水电出版社, 2006

ISBN 7-5084-3626-1

I. 实... II. 李... III. 配电系统—基本知识  
IV. TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 019238 号

|       |                                                                                                                                                                                                                           |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名   | 实用配电网技术                                                                                                                                                                                                                   |
| 作 者   | 李景禄 编著                                                                                                                                                                                                                    |
| 出版 发行 | 中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) |
| 经 售   | 全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                                                                                                                                                                        |
| 排 版   | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                                                                                                                           |
| 印 刷   | 北京市兴怀印刷厂                                                                                                                                                                                                                  |
| 规 格   | 787mm×1092mm 16 开本 24.75 印张 587 千字                                                                                                                                                                                        |
| 版 次   | 2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷                                                                                                                                                                                         |
| 印 数   | 0001—4000 册                                                                                                                                                                                                               |
| 定 价   | 47.00 元                                                                                                                                                                                                                   |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

随着国民经济的发展和社会进步，人们对电的依赖性越来越强，因而提高电网的安全运行水平，提高供电可靠性是电力系统的首要任务。配电网是电力系统的基础，直接与电力用户相联系，配电网的安全稳定运行与广大人民群众息息相关。特别是随着电力法的实施，确保配电网安全运行，提高供电可靠性，也就越来越重要，同时配电网的安全稳定运行，也直接影响到供电企业的直接经济效益和企业形象。然而，由于国家在配电网上欠账太多，配电网基础还比较薄弱。特别是农村电网存在问题较多，虽然经过“城乡电网改造”后情况有了较大的好转，但配电网的故障相对来说还比较多。还有许多问题需要不断地改进和完善，还有许多课题需要人们去研究。

“城乡电网改造”后，新的配电设备在电网中不断得到应用，如分段器、重合器、SF<sub>6</sub>断路器、真空断路器和箱式变得到大量应用；配电网的网络结构更加趋向合理；配电网无功优化逐步实施，并且逐步淘汰了高耗能的变压器；在一些大中城市逐步实现了配电网自动化，其自动化程度不断得到提高。

与输电网相比，由于配电网的绝缘水平较低，运行环境恶劣，网络结构复杂，防雷措施不完善，更容易受雷电的影响。配电网雷害事故居高不下，特别是雷击跳闸率高，极大地影响了配电网的供电可靠性。因而对配电网防雷问题进行研究，对配电网防雷措施进行治理和改进，提高配电网的耐雷水平，从而提高配电网供电可靠性仍然有许多工作要做。

配电网属于非有效接地系统，在该系统中弧光接地过电压、铁磁谐振过电压、工频过电压出现的几率相当高，发生过不少事故。配电网内过电压的产生和过电压幅值的高低与配电网中性点的接地方式密切相关，因而近年来国内对配电网的接地方式进行了大量的研究，特别是对配电网接地方式与内过电压水平、配电网接地方式与配电网供电可靠性的关系进行了广泛的研究，使配电网中性点接地方式更趋向于合理，更适合于我国国

情。特别是在 20 世纪 80 年代末，配电网自动跟踪补偿消弧装置和小电流接地选线的出现使配电网的内过电压问题、防雷问题得到了有效的治理，使配电网故障大幅度下降，供电可靠性得到了大幅度的提高。

作者从 20 世纪 80 年代起对配电网规划设计、配电设备、配电网运行维护、配电网防雷保护、内过电压治理，配电网无功优化、降损节能、配电网供电可靠性进行了长达 20 余年的系统研究，开发研制了 HXY 复合消谐装置、ZXB 系列自动跟踪补偿消弧装置、ZFX—60 智能复合型小电流接地选线装置、JKSC 自动无功跟踪补偿装置等产品。本书是作者对 20 余年来在配电网方面研究的总结，同时还采纳了近年来国内外在配电网方面的研究成果。

全书由长沙理工大学李景禄教授编著，并指导研究生万欣参与第一、第二章的资料收集、编写和校对；研究生孙春艳参与第七、第八章的资料收集、编写和校对；研究生胡涛参与第九、第十章的资料收集、编写和校对；研究生龙立宏参与第三、第四章的资料收集、编写和校对；研究生李志娟参与第十一章的资料收集、编写和校对；杨廷芳博士参与第十二章的资料收集、编写和校对工作。广东韶关电力公司李志强经理，浙江丽水电业局的杜晓平局长、杨成钢高级工程师为本书提供了部分技术资料，该书的出版还得到了长沙理工大学的资助，在此一并给予由衷的感谢。

因作者水平有限，书中难免存在缺点和错误，诚恳希望读者批评指正。

**作者**

2005 年 10 月

# 目 录

## 前言

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 绪论                      | 1   |
| 第一章 配电网规划与设计            | 6   |
| 第一节 配电网规划的主要原则          | 6   |
| 第二节 电力负荷预测              | 15  |
| 第三节 配电网的接线方式            | 19  |
| 第四节 配电网的规划设计            | 23  |
| 第五节 特殊用户的供电             | 26  |
| 第二章 配电设备                | 34  |
| 第一节 配电网开关设备             | 34  |
| 第二节 箱式变电站               | 57  |
| 第三节 配电变压器               | 67  |
| 第四节 避雷器                 | 92  |
| 第三章 配电网中性点接地方式          | 99  |
| 第一节 配电网中性点接地方式的分类及特点    | 99  |
| 第二节 中性点不接地系统            | 101 |
| 第三节 中性点经电阻接地            | 113 |
| 第四节 中性点经消弧线圈接地          | 123 |
| 第五节 配电网中性点接地方式的选择       | 131 |
| 第六节 中性点接地方式的综合比较        | 136 |
| 第四章 配电网电容电流计算与测量        | 141 |
| 第一节 配电网电容电流计算           | 141 |
| 第二节 单相金属接地电容电流测试法       | 144 |
| 第三节 中性点外加电容法测电容电流       | 146 |
| 第四节 偏置电容法测电容电流          | 149 |
| 第五节 关于电容电流测试方法的研究       | 151 |
| 第五章 配电网自动跟踪补偿消弧装置       | 157 |
| 第一节 自动跟踪补偿消弧装置          | 157 |
| 第二节 自动跟踪消弧装置的选型、安装和保护配置 | 164 |

|            |                                |            |
|------------|--------------------------------|------------|
| 第三节        | 自动跟踪补偿消弧装置在电网运行中存在若干问题分析 ..... | 169        |
| 第四节        | ZXB 系列自动跟踪补偿消弧装置 .....         | 177        |
| <b>第六章</b> | <b>配电网接地选线</b> .....           | <b>183</b> |
| 第一节        | 配电网接地选线的目的和主要形式 .....          | 183        |
| 第二节        | 零序电流选线法 .....                  | 186        |
| 第三节        | “零序导纳”选线法 .....                | 193        |
| 第四节        | 暂态电流选线法 .....                  | 197        |
| 第五节        | 谐波电流选线法 .....                  | 204        |
| 第六节        | 注入信号选线法 .....                  | 205        |
| 第七节        | 智能复合选线法 .....                  | 209        |
| <b>第七章</b> | <b>配电网防雷保护</b> .....           | <b>212</b> |
| 第一节        | 雷电对配电网的作用及危害 .....             | 212        |
| 第二节        | 配电线路的防雷保护 .....                | 218        |
| 第三节        | 配电所的防雷保护 .....                 | 221        |
| 第四节        | 配电变压器的防雷保护 .....               | 225        |
| 第五节        | 发电厂直配线路的防雷保护 .....             | 226        |
| 第六节        | 特殊用户的防雷保护 .....                | 230        |
| 第七节        | 接地装置 .....                     | 241        |
| 第八节        | 关于配电网防雷保护的分析与研究 .....          | 251        |
| <b>第八章</b> | <b>配电网内过电压及其防护措施</b> .....     | <b>255</b> |
| 第一节        | 配电网弧光接地过电压 .....               | 255        |
| 第二节        | 配电网线性谐振过电压 .....               | 260        |
| 第三节        | 配电网铁磁谐振过电压 .....               | 262        |
| 第四节        | 断线谐振过电压 .....                  | 269        |
| 第五节        | 传递过电压 .....                    | 271        |
| 第六节        | 定相过电压 .....                    | 275        |
| <b>第九章</b> | <b>配电网损耗及无功补偿</b> .....        | <b>278</b> |
| 第一节        | 配电网功率损耗与电能损失 .....             | 278        |
| 第二节        | 影响配电网线损的因素分析 .....             | 279        |
| 第三节        | 理论线损计算 .....                   | 283        |
| 第四节        | 降低线损的技术措施 .....                | 284        |
| 第五节        | 配电网的经济运行和管理 .....              | 291        |
| 第六节        | 无功优化及自动跟踪无功补偿装置 .....          | 295        |
| <b>第十章</b> | <b>配电网供电可靠性与电压合格率</b> .....    | <b>299</b> |
| 第一节        | 配电网的可靠性统计评价 .....              | 299        |
| 第二节        | 配电网可靠性的统计、分析与计算 .....          | 305        |

|             |                      |            |
|-------------|----------------------|------------|
| 第三节         | 配电系统可靠性准则及规定 .....   | 314        |
| 第四节         | 提高配电系统可靠性的措施 .....   | 318        |
| 第五节         | 配电网的电压质量管理 .....     | 322        |
| 第六节         | 配电网电压波动的影响及原因 .....  | 326        |
| 第七节         | 配电网谐波的产生及危害 .....    | 328        |
| 第八节         | 配电网谐波测量及抑制措施 .....   | 331        |
| <b>第十一章</b> | <b>配电网继电保护</b> ..... | <b>334</b> |
| 第一节         | 配电线路的电流保护 .....      | 334        |
| 第二节         | 配电线路自动重合闸 .....      | 349        |
| 第三节         | 配电线路的纵联开关保护 .....    | 355        |
| 第四节         | 配电所保护 .....          | 356        |
| <b>第十二章</b> | <b>配电网自动化</b> .....  | <b>368</b> |
| 第一节         | 配电网自动化简介 .....       | 369        |
| 第二节         | 馈线自动化 .....          | 373        |
| 第三节         | 变电站自动化 .....         | 377        |
| 第四节         | 用户服务自动化 .....        | 379        |
| 第五节         | 配电管理自动化 .....        | 381        |
| 第六节         | 配电网的通信系统 .....       | 382        |
| <b>参考文献</b> | .....                | <b>387</b> |

# 绪 论

## 一、配电网的发展

随着电力系统的发展及“城乡电网改造”，我国的配电网络迅速扩大，配电网技术有了长足的进步，彻底扭转了“重发、轻供、不管用”的旧观念。配电网的建设、管理和技术发展越来越受到重视，配电网新设备、新技术的应用，对网络建设、技术管理提升到了一个前所未有的高度。这对满足日益扩大的城乡人们生产、生活用电的需求，促进社会进步起了很大的作用。我国近年来配电网的发展主要体现在以下几个方面：

(1) 在城乡配电网的发展建设上，完善了变电站的布局和配电线路的建设，使电源和线路分布更趋向于合理。在城市电网发展了环网供电，对重要用户建设了双回路保证了供电的可靠性和灵活性。对农村电网国家投巨资增加了变电站，完善了配电线路、配电设备，大大地提高了通电率，满足了城乡人们的生产、生活用电需要。

(2) 对配电网中性点接地进行了广泛的研究和整改，使之更适应于配电网的发展。自20世纪末我国对配电网中性点接地方式进行了深入的研究，把中性点接地方式与我国的国情结合起来进行了全方位的研究。目前，我国中压电网的城市工矿企业的6~66kV送配电网络中的中性点多采用不接地方式或消弧线圈接地方式。近10年来在城网和少数的工矿企业送配电网络中也采用了电阻接地系统。在采用非有效接地的城网或工矿企业送配电网络中，系统的一相与地之间的任何接触都不会使负荷立即停电，这是一个无可争议的优点。当然这个优点的重要意义随着城网及工矿企业的类型的不同而有所不同，不同的中性点接地方式与网络中的各类电气设备的安全与否密切相关。对中性点不接地系统，其系统的相相间短路是通过相关导体的对地电容形成通道，总电流值等于非故障线路导体对地电容电流的总和；对谐振接地系统，其中性点通过消弧线圈（消弧电抗器）接地，其感抗值与输电线路的对地电容的容抗值相等或差值很小，线路对地间的分布电容电流由消弧线圈产生的电感电流来补偿，从而使电弧很小或熄灭。偶然的接地故障是不可避免的，而是否引起电气设备的故障或火灾，则直接与通过接地点的故障电流的大小有关。近年来国内兴起的自动跟踪消弧系统接地方式，可以自动清除95%以上架空线路和电缆线路的接地故障，对发生在该系统内的瞬间故障，也能作记忆、跟踪。这种接地方式在工矿企业和城网中发挥了很好的作用。在少数城网和企业中也采用了电阻接地系统，其继电保护的设计要求是使其线路保护装置无论对何种故障都能将故障线路从系统中断开。特别是对自动跟踪补偿消弧装置在配电网的运行，进行了大量的研究，并在配电网中得到大量采用，并逐步完善。对促进配电网的技术进步、过电压治理、提高配电网供电可靠性方面发挥了重要作用。

(3) 应用先进的配电设备和技术。在“城乡电网改造”中，配电设备向无优化、免维护、小型化和紧凑型方面发展。新的配电设备主要在三个方面得到迅速发展，一是更能适

应运行环境的要求；二是设备故障率和检修量越来越少，并逐步向免维护方向过渡，满足运行可靠性的要求，并把电力工作者从繁重的检修工作中解脱出来，有利于电力行业实现减人增效；三是有效降低了设备的运行维护成本。SF<sub>6</sub>开关、重合器、分段器、箱式变电站等新技术、新设备在配电网中广泛应用，对提高配电网运行的可靠性和灵活性方面起了较大的作用。

(4) 配电网的降损节能有了长足的进步。随着高能耗变压器的改造、节能产品的应用，以及对不合理的网络结构的治理、整改和无功优化、自动无功跟随器补偿装置的采用，较大地降低了配电网的损耗，提高了经济效益。

(5) 提高了电压质量。过去，由于电力发展落后，特别是配电网和配用电设备、技术落后，我们国家的一些电网，特别是农村电网的电压质量非常差，如 220V 的电压等级，用户的实际电压只有 100V 左右。同时，损耗也相当严重，有些地方 10kV 线损甚至达 50%，造成了电能的极大浪费。随着改革开放和城乡电网改造的实施，国家投入巨资对落后的电网进行了改造，完善了供、配电网的建设，淘汰了高耗能的供配电设备。并加强了运行维护和技术管理，使电能质量有了较大的提高，有效地降低了损耗。在城乡电网实现“同网、同价”受到了广大群众的欢迎。

## 二、配电网技术研究的主要问题及解决方法

经过这些年的发展，配电网虽然有了很大的发展，但仍有许多问题需要我们去研究探讨和解决。配电网技术研究的主要问题及解决方法有：

(1) 新设备应用中出现的问题。如设备小型化以后出现的过电压耐受问题；现场运行中发现新型的节能型配电变压器 S<sub>9</sub> 型的耐雷水平偏低，在雷电活动强烈的地区不能满足安全运行的需要，常常被雷电击毁。

(2) 配电网中性点接地方式的选择问题。我们国家过去一直采用配电网中性点对地绝缘，这种方式在电网规模较小时，由于结构简单、经济，可以带故障运行 2h，对提高配电网的供电可靠性具有积极的作用而被广泛采用。但是随着电网的发展，当电网电容电流大于 10A，发生单相接地时，接地电弧不能可靠熄灭，会发展为弧光接地过电压，激发铁磁谐振过电压或发展为相间短路等故障，因而这种接地方式也就不适应了。随后又出现了电阻接地、消弧线圈接地和自动跟踪消弧线圈接地，这几种接地方式各有优缺点和适用场所，但就某具体的电网如何选取合适的接地方式则需根据不同的情况进行具体的处理。新中国成立以来，城市配电网中性点大都采用不接地或经消弧线圈接地的运行方式，提高了城市配电网供电可靠性。运行经验证明：上述做法对以架空线路为主的配电网是十分适宜的。由于架空线路易受外力、雷击、树木和大风等影响而经常造成故障，若为相间接地故障，一般允许连续运行 2h 或更长一点时间，且由于消弧线圈的补偿作用，使故障点的电弧缩小，发生相间短路故障的机会也相对减少；即使发生短路故障引起线路跳闸，其中大部分属于瞬时性故障，一般均可借助自动重合闸的作用，而保证对用户的不间断供电（成功率平均为 70%~80%）。对电缆线路而言情况就大不相同了，因为电缆线路不管是单相或相间发生故障（发生瞬间故障的概率很低），都应停电找出故障点后进行检修。所以对电缆线路发生故障跳闸后，一般不允许重合送电，主要靠环网或双电源来保证对用户的不间断供电。

随着城市配电网的高速发展,网络结构开始发生很大的变化。特别是改革开放以来,城市配电网中电缆线路的比例逐年上升,使系统的电容电流数值大幅度增加;配电网中的谐振过电压频繁出现,曾引起一些电气设备绝缘损坏和避雷器爆炸等事故;有些城市高压架空配电线路发生一相断线事故,由于线路不跳闸,就有可能引起严重的人身触电伤亡事故等。针对以上情况,有些城市已先后将部分城市配电网(包括10kV、20kV、35kV以电缆为主的)中性点改为小电阻接地的运行方式,并紧密结合城市电网改造不断扩大应用范围,如北京、上海、天津、广州、苏州、深圳和珠海等城市,都已取得了一定的运行经验。但这并不是对消弧线圈作用的否定,相反国内还有很多单位下大力量研究以改进完善原有的各种中性点的接地运行方式,使之更加安全可靠。20世纪80年代以后,很多城市在消弧线圈接地系统中,还推广采用了自动选线装置,能及时将发生故障的线路自动寻找并切除,以保证系统正常运行。同时不少地区还开始推广采用自动跟踪、自动调谐(带电情况下调节消弧线圈分头)的消弧线圈接地系统,使配电网经常处在最佳补偿状态下运行。也有的地区由于系统电容电流较小,将配电网中性点由不接地改为高电阻接地的运行方式,这对降低内部过电压、减少产生谐振的可能性及提高供电可靠性等方面均有裨益,也已取得较为满意的效果。总之,以上配电网中性点的各种接地方式,是根据每个地区的具体情况,本着安全可靠和经济实用的原则及因地制宜的方针选择采用的。1997年原电力部颁布的电力行业标准DL/T620—1997中,已对此作出明确规定,并强调必须因地制宜,切不可实行一刀切,这是完全符合我国国情的一个标准。

(3) 配电网发生单相接地时,传统的查找故障线路的方法是由变电运行人员逐路的断开每路馈线,当断到某一线路时,接地信号消失,就认为某线路发生单相接地故障。这种方法因需对变电所的各路馈线逐一停电,极大地影响了供电可靠性,运行人员的操作劳动量大,而不符合现代电网的要求。为了解决这一问题,人们研究出了自动选线装置。早期的自动选线装置一般是对各馈线加装零序电流互感器,利用互感器检测发生单相接地故障的零序电流选出故障线路。这种方法简单、易行,基本上能满足选线的准确性。但是随着电网的发展,我国电力系统对配电网电容电流进行了全面治理,大多采用消弧线圈进行补偿。特别是大量的自动跟踪补偿消弧装置在电网中得到应用,由于对其结构进行了完善,使其可以工作在过补偿、欠补偿和全补偿三种状态,这对限制配电网过电压、促使接地电弧可靠熄灭起了很大的作用,但这也带来了一些不利的方面,即电网经自动跟踪补偿消弧装置补偿后,有时故障点的残流变得非常小,以至于线路的零序电流很小,小到不能满足电流互感器的灵敏度。那么基于零序电流选线的接地选线装置就选不出故障线路,如河南某变电站原来安装有基于零序电流选线的选线装置,后来由于变电站投运了ZXB系列自动跟踪补偿消弧装置,把接地残流补偿到非常小,原来的接地选线装置就不能正常工作。这就是说补偿电网,特别是经自动跟踪补偿消弧装置补偿的电网,对接地选线提出了新的要求。所以应把补偿电网的特点和要求进行深入的研究,找出适应于补偿电网的接地选线方式。

(4) 6~35kV属于中压网络,也是我们国家的主要配电网络,该网络由于网状的网络结构、且电网的绝缘水平较低,最容易发生雷害事故。据统计,在该电压等级的电网中,雷击跳闸率居高不下,且经常发生配电变压器、柱上开关、刀闸被雷击坏的事故。虽

然经过农网和城网改造后状况有所好转，但在防止雷害事故，特别是防止雷击跳闸事故方面并没有发生根本的好转。在雷电活动频繁的地区，雷害事故仍经常发生，极大地影响了中压电网的供电可靠性，影响了电网的安全稳定运行。因此，对中压网络的防护现状进行认真的分析和研究，找出雷害事故频发的原因，找出改进和完善措施是非常必要的。

(5) 内过电压保护。电力系统内部过电压是指电力系统中由于断路器操作、故障或其他原因，使系统参数发生变化，引起电网内部电磁能量的转化或传递所造成的电压升高。内部过电压的能量来源于电网本身，所以它的幅值与系统额定电压基本成正比，通常将系统最高运行相电压幅值的倍数，即内部过电压幅值与电网最高运行相电压幅值之比，称为内部过电压倍数  $K_n$ ，并用此表示内部过电压的大小。 $K_n$  与电网结构、系统中各个元件参数、中性点运行方式、故障性质及操作过程等因素有关。配电网的内过电压可分为两大类：因操作或故障导致电网中某处参数突变，使电网从某一稳态向另一新稳态过程过渡，从而产生的内过电压称操作过电压；因系统的电感电容参数不当，出现各种持续时间很长的谐振现象及其电压升高，这种内过电压称为暂时过电压。操作过电压的持续时间较短，一般在 0.1s（五个工频周期）以内。而暂时过电压基本上与电路的稳态相联系，具有一定的振荡频率，由于无阻尼或者弱阻尼，因此持续时间较长，常根据产生原因的不同分为工频电压升高及谐振过电压。

几种常见的内过电压为：

1) 间歇性弧光接地过电压。这种过电压出现在中性点不接地的电网中。由于此类电网在单相接地时允许工作两小时，因而电弧可能多次重燃、熄灭，会使线路上的电荷重新分配多次，且使中性点电位升高，从而形成过电压。根据文献记载，中性点不接地电网中的弧光接地过电压，包括间歇接地过电压在内，最高的一次为 3.4p. u.（p. u. 为额定相电压幅值），而峰值的持续时间小于 2ms。同时，超过 3.0p. u. 的概率仅为 2%~4%，超过 2.0p. u. 的概率却为 64%。该类过电压一般小于额定电压的 3.5 倍，但由于持续时间长、遍及整个电网，对线路或设备上的绝缘弱点会构成很大的威胁。对于此类过电压的具体内容，后文将会做详细分析。

2) 切小电感性电流过电压。小电感性负荷指空载变压器或电动机等。因为断路器的灭弧能力一般是按照切大电流设计的，其灭弧能力较强；而在切断小电流时就可能在电流过零前强制熄弧而造成截流。此时设备电感和电容中储存的能量相互转换而形成振荡，由于对地杂散电容较小，当全部能量转换为电场能时，就会出现幅值极高的过电压。

3) 开断电容性电流过电压。电容性电流是指流过电容器、电缆或空载长线的电流。在断路器开断过程中，若断口上的恢复电压上升速度超过其介质强度的上升速度，就会造成断路器的重燃。这时，若其断口两端电压极性相反，重燃后就会由于电源继续提供能量而使振荡充分发展，从而产生过电压。

4) 合空载长线过电压。合空载线路是电网中常见的操作。在合空载线路操作中，重合闸过电压往往更严重。因为当线路残余电压与电源极性相反时，会使振荡过程加剧。考虑到空载长线的电容效应，合空载长线过电压可能达到额定电压的  $\sqrt{3}$  倍。

配电网属于中性点非有效接地系统，在该系统中内过电压的水平较高，而最频繁发生的要算是弧光接地过电压和铁磁谐振过电压。当电网电容电流大于 11.4A 时，一旦电网

发生单相接地，就不能可靠地熄弧，一般会在电流过零时熄弧、在峰值附近重燃，产生间歇性的电弧接地，由于电网是由电感和电容组成的网络，间隙性的熄弧与重燃就会引起电磁能的强烈振荡，产生弧光接地过电压。在配电网中普遍使用铁磁式电压互感器，有相当一部分电压互感器的铁芯容易发生磁饱和，在一定的激发因素作用和网络参数配合下容易产生铁磁谐振过电压。铁磁谐振过电压可达  $3.0u_\phi$  ( $u_\phi$  为相电压)，会使电网的绝缘弱点击穿，使电压互感器烧毁，造成电网故障。因而对配电网主要的内过电压进行研究，通过研究找出限制内过电压的方法非常必要。

(6) 配电网的降损节能问题。配电网的损耗在整个电网的损耗中所占比例甚大，由于损耗还往往伴随着电压质量的下降，特别是在农村电网，配电网的损耗尤其突出。因而在配电网中如何有效地降低损耗，提高电压质量直接关系着供电企业的效益。

(7) 配电自动化包括配电网、变电站和用户在内的运行、监控和管理自动化，是配电网技术进步的主要体现，也是电力企业实现“减人增效”，提高技术水平的主要方向。对配电自动化的研究是全国电力企业不断追求的目标，正在全国广泛的展开，具有十分广阔的前景。

# 第一章 配电网规划与设计

## 第一节 配电网规划的主要原则

城市电网规划以城市总体规划为依据,强调其整体及长期的合理性和适应性。一些影响整个电网结构的技术原则,如电压等级、可靠性、变压器负载率、变电所最佳容量、一次接线方式和电网允许短路容量等,都应遵循既定“原则”,同时在具体条件下应有适当的灵活性。因为我国城市规模 and 经济发展程度相差悬殊,情况各有不同,另外,技术原则本身也受时间、地域、社会经济、科学文化和电力工业状况诸因素的影响和制约,所以,要强调“原则”,但要把“原则”看成随时代而进步、发展的结果。这点应是讨论下面各条原则的出发点。

### 一、城市电网电压等级

目前,我国省会城市和沿海大中城市基本上已建成 220kV 超高压外环网或双网,经过多年的改造,基本上形成了 220/110 (66) /10/0.38kV 或 220/35/10/0.38kV 四级输配电电压,一般称 220kV 为送电电压,110、66、35kV 为高压配电电压,10kV 为中压配电电压,380/220V 为低压配电电压。各级电压电网的功能因城市规模不同而异。

电压等级是根据技术经济综合论证确定的,它和国家的经济发展,尤其是电气设备制造技术水平密切相关。由于城市经济的迅速发展,电力负荷大幅度上升,有的城市负荷密度已达 3~4 万 kW/km<sup>2</sup>,个别小区高达几十万 kW/km<sup>2</sup>。所以,增大配电网容量是目前城网的突出任务,其中提高城网配电电压成为大家关注的问题。

尽量简化城网的变压层次,有利于提高电网运行的经济效益和可靠性。同一电网各级电压要匹配合理,相邻两级电压差不应太小,此外还要考虑变压器容量大小的协调,以免上一级变电站因容量太大而使低压侧出线多而发生困难。

### 二、供电配电系统的可靠性

供、配电可靠性是指对用户连续供电的可靠程度。在城网规划中,应从满足电网供电安全和满足用户用电要求两方面来考虑。

(1) 我国规定城市配电网必须满足“N-1”准则,具体是:

1) 高压变电所中失去任一回进线或一组降压变压器时,必须保证向下一级配电网供电。

2) 高压配电网中一条架空线或一条电缆,变电所中一组降压变压器发生故障停运时,在正常情况下,除故障外处不停电,不得发生电压过低,不允许设备过负荷,在计划停运情况下,又发生故障停运时,允许部分停电,但应在规定时间内恢复供电。

3) 低压电网中当一台变压器或电网发生故障时,允许部分停电,但应尽快将完好的区段在规定时间内切换至邻近电网恢复供电。

(2) 对满足用户用电程度的规定是:

- 1) 两回路供电的用户, 失去一回路后, 应不停电。
- 2) 三回路供电的用户, 失去一回路后, 应不停电, 再失去一回路后, 应满足 50%~70% 用电。
- 3) 一回路和多回路供电的用户电源全停电时, 恢复供电的目标时间为一回路故障处理时间。
- 4) 开环网络中的用户, 环网故障时需通过电网操作恢复供电的, 其目标时间为操作所需时间。

确定具体目标时间原则是: 负荷愈大的用户, 目标时间应愈短, 可分阶段规定目标时间。

考虑到我国各地区电网情况差别较大, 以上规定中没有统一的量化标准。实际上, 许多城网已按量化指标进行考核评估, 如配电网的可靠性评估指标有:

$LSC_N$ ——电源及输电设备全部正常时电网供电能力, MW;

$FTR$ ——电网储备系数  $FTR = \frac{LSC_N - L_{max}}{L_{max}}$ ,  $L_{max}$  为电网最大预测负荷;

$LOLE$ ——电网缺电时间期望值, 天/年;

$EENS$ ——电网电量不足期望值, kWh/年;

$FLOL$ ——电网缺电频率, 次/年。

(3) 配电网可靠性的评估指标有:

1) 各负荷点、馈线、变电所及系统的缺电时间期望值  $LOLE$ 、电量不足期望值  $EENS$ 。

2) 与用户有关的系统平均断电频率 [ $SAIFI$ , 次/(户·年)]、系统年平均断电时间 [ $SAIDI$ , h/(户·年)]、用户平均断电频率 [ $CAIFI$ , 次/(户·年)]、平均供电可用率 ( $ASAI$ , %) 和平均电量不足 [ $AENS$ , kWh 次/(户·年)]。

由于资金短缺、缺乏远景规划等原因, 我国城网建设普遍滞后于经济发展, 也滞后于电源建设。设备陈旧、供电容量不足、网架结构不合理, 导致事故率高, 可靠性指标低。

做好城网网架结构是提高供电质量的根本性措施。通常, 在确定网架方案时不仅要校验“N—1”准则, 还应按送、配电网络分别计算其它可靠性指标, 根据计算结果来修改接线方式和网架结构, 使规划网架能达到较高的可靠性指标。

### 三、降压变压器负荷率取值

变压器负荷率又称运行率, 是影响变压器容量、台数和电网结构的重要参数。其值为

$$T = \frac{\text{变压器实际最大负荷(kVA)}}{\text{变压器额定容量(kVA)}} \times 100\% \quad (1-1)$$

国内和国外对  $T$  的取值大小有两种观点和两种做法, 一种认为  $T$  值取得大为好, 下称高负荷率; 另一种则相反, 称为低负荷率。下面就这两种观点分别进行讨论分析。

#### (一) 高负荷率

$T$  的具体取值和变电所中变压器台数  $N$  有关, 当  $N=2$  时,  $T=65\%$ ;  $N=3$  时,

$T=87\%$  (近似值);  $N=4$  时,  $T=100\%$  (近似值)。

根据变压器负荷能力中的绝缘老化理论, 允许变压器短时间过负荷而不会影响变压器的使用寿命, 大体取过负荷倍数为 1.3 时, 延续时间 2h。按“ $N-1$ ”准则, 当变电所中有一台变压器因故障停运时, 剩余变压器必须承担全部负荷而过负荷运行, 过负荷率为 1.3。所以, 不同变压器台数的  $T$  值不同, 台数增多,  $T$  值增大。

提高  $T$  值能充分发挥电网中设备的利用率, 减少电网建设投资, 降低变压器损耗。

变压器取高负荷率时, 为了保证系统的可靠供电, 在变压所的低压侧应有足够容量的联络线, 在 2h 之内经过操作把变压器过负荷部分通过联络线转移至相邻变电所。联络线容量为

$$L = (K - 1)P(N - 1) \quad (1-2)$$

式中  $K$ ——变压器短时过负荷倍数;

$P$ ——单台变压器额定容量;

$N$ ——变电所中变压器台数。

## (二) 低负荷率

变压器负荷率  $T$  的取值和变电站中变压器台数  $N$  的关系是:  $N=2$  时,  $T=50\%$ ;  $N=3$  时,  $T=67\%$  (近似值);  $N=4$  时,  $T=75\%$ 。

这种观点与前者截然不同, 当变电所中有一台变压器因故障停运时, 剩余变压器承担全部负荷而不过负荷, 因此无需在相邻变电所的低压侧建立联络线、负荷切换操作都在本变电所内完成。香港和日本东京的城网中降压变压器均取低负荷率。

对变压器负荷取值的不同看法产生了设计观念和对经济评价准则上的差别。20 世纪 90 年代初, 我国个别城市主张采用低负荷率。为了使论证的计算方案具有可比性、普遍性和尽可能与实际电网接近, 取计算方案的电网覆盖面积为  $100\text{km}^2$  的方形, 内有两个电源, 供电区的负荷密度分别取 1 万, 1.5 万, 2.0 万, 2.5 万, ..., 5 万  $\text{kW}/\text{km}^2$  各负荷水平, 计算网络包括两级电压, 上下两级变压器不同负荷率和不同变压器台数的组合方案见表 1-1, 采用静态优化模型, 共算了 360 多个方案, 各个计算网络的可靠性指标靠近。

表 1-1 变 压 器 组 合 方 案

| 变电站中主变压器台数 |       |      | 变 压 器 负 荷 率 |       |      |       |       |      |       |       |      |       |       |      |
|------------|-------|------|-------------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| 220kV      | 110kV | 35kV | 1           |       |      | 2     |       |      | 3     |       |      | 4     |       |      |
|            |       |      | 220kV       | 110kV | 35kV | 220kV | 110kV | 35kV | 220kV | 110kV | 35kV | 220kV | 110kV | 35kV |
| 2          | 2     | 2    | 低           | 低     | 低    | 低     | 高     | 高    | 高     | 低     | 低    | 高     | 高     | 高    |
| 2          | 3     | 3    | 低           | 低     | 低    | 低     | 高     | 高    | 高     | 低     | 低    | 高     | 高     | 高    |
| 3          | 3     | 3    | 低           | 低     | 低    | 低     | 高     | 高    | 高     | 低     | 低    | 高     | 高     | 高    |
| 3          | 4     | 4    | 低           | 低     | 低    | 低     | 高     | 高    | 高     | 低     | 低    | 高     | 高     | 高    |
| 4          | 4     | 4    | 低           | 低     | 低    | 低     | 高     | 高    | 高     | 低     | 低    | 高     | 高     | 高    |

以上是按新建电网进行计算比较的, 在实际上会遇到另一种情况, 即对已运行的变电

所增容扩建，对网架不需要作重大改变，只需增加变电所容量（加大单台变压器容量或增加变压器台数）和相应的配电线路。针对这种情况也作了各种方案，进行计算比较。经过大量计算后可归纳出以下几点：

(1) 关于投资。按新建电网计算，高负荷率时的电网总投资比低负荷率的总投资节省，35kV 电网平均相差 10%，220kV 电网平均投资相差不到 5%。按变电所增容扩建计算，既有高负荷率时电网投资比低负荷率的投资省的，也有低负荷率时电网投资比高负荷率的投资省的情况，这取决于变电所中变压器的台数，有 3 台变压器时出现后一种情况。大量的计算数据证明了在大多数（不是全部）情况下高负荷率比低负荷率有较高的经济效益，这正是许多人主张取高负荷率的理由。

(2) 低负荷率时的电网网损比高负荷率时小 5%~15%。

(3) 低负荷率平时的电网供电可靠性高于高负荷率的可靠性。如当一台变压器故障时，只要在本变电所内进行转移负荷操作，无需求助于临近变电所，故称为纵向备用，也不会因外部转移负荷有困难而延长停电时间。而且，误操作事故率高于设备事故率。

(4) 高负荷时，需要在变电所之间建立联络线，以备必要时转移负荷，其容量按式 (1-2) 计算，若变电所容量为  $3 \times 24$  万 kVA，变压器过负荷倍数为 1.3，则联络线的通道要比征用一个变电所址困难得多。所以城市规划部门很赞成变压器取低负荷率。

(5) 低负荷率时，电网有更强的适应性和灵活性，对于经济发展迅速、人口密度大和用电标准高的城市是可取的。

(6) 高负荷密度城市取高负荷率时经济优势逐渐减弱，也说明高负荷密度区宜建大容量变电所。

(7) 变压器取低负荷率是简化网络接线的必要条件，对城网自动化有利。

由于我国各城市的具体情况相差甚远，社会经济发展程度不同，原有电网基础也不同，同时人们对经济性和可靠性的评估准则也不尽相同，不能对负荷率的两种取值哪种优、哪种劣简单下结论。可参考上述分析，结合本地区实际条件，因地制宜。在我国，降压变压器取低负荷率还是新观念，需要在实践中加以验证。

#### 四、变电所最佳容量及变压器台数

变电所容量和变压器台数是影响城网结构、可靠性和经济性的又一个重要因素。变电所容量和变压器台数不同，网内变电所总数、变电所的主接线形式和系统的接线方式也就不同，也必然对电网的经济性和可靠性产生不同影响。

##### (一) 国外情况

变压器容量和一次侧电压有密切关系，也即变电所容量和它所在电网功能相适应。据 15 个国家统计，输送电系统中的单台变压器变化范围很大，如 40kV 电压的电网中变压器容量为 240MVA~770MVA，而送配电系统的单台变压器容量变化范围要小得多。用另一个概念来说，即电压等级高，变电所密度低，变压器容量大；电压等级低，变电所密度高，变压器容量小。

另外，还有一些因素影响变压器容量大小的选择，如单位容量 (MVA) 费用、系统短路容量、运输条件和安装环境等。

变电所密度和容量还与负荷密度及其增长率、变压器的负荷率等因素有关，高负荷密

度地区需要建造多而大的变电所，这是众所周知的。负荷增大速度是选择变电所容量的重要依据。国外普遍掌握的原则是：开始阶段，负荷密度小时多用较大容量变压器。若变压器低负荷率运行，单位变电容量（MW）费用大于高负荷率运行变压器；若用小容量变压器，提高变压器负荷率，能降低成本。选择大容量还是小容量变压器，关键看负荷增长率，负荷增长大的地区若选用小容量变压器，必然很快被大容量变压器所取代，是不经济的。

## （二）论证计算

供电容量不足几乎是当前我国所有城网都存在的问题，增加降压容量是解决供需矛盾的有效措施。在具体实施时可采用不同方式增容，多布点，多建新的降压站，也可采取增加布点和扩容相结合的方法。但是，布多少点为合适，变电所扩建到多大规模，几台变压器为最好，迫切需要一个科学的回答。下面将对论证的基本思路及以上参数的计算进行简单地介绍。

### 1. 基本思路

假如要对某城网 220kV 系统增容，所选变电所规模大或小将直接影响该级电压变电所的数量和变压器的台数，从而影响该级电压电网连接；同时，上一级电压的这种决策差异必然导致下一级 110kV（或 35kV）电网中变电所数量、变压器容量和台数以及电网接线的变化。这个简单明了的例子说明变电所规模受众多因素的影响和制约，这就要求我们必须从整体角度来考察变电所的作用和效果，变电所最佳容量和最佳变压器台数取决于许多因素，而不是简单的单一参数。

### 2. 几个参数计算

模型应忠实地表达上述基本思路，把有关的因素尽可能多地反映在模型里，使求得的了解更接近实际。

（1）电路电压降。一条线路被负荷支线分成几段时全线电压降为

$$\Delta U = \sqrt{3} \sum_{i=1}^n (iR \cos \varphi + iX \sin \varphi) (V) \quad (1-3)$$

其中百分数为

$$U(\%) = \sqrt{3} \sum_{i=1}^n (iR \cos \varphi + iX \sin \varphi) \frac{100}{U \times 100} \\ = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i L_i) (R \cos \varphi + X \sin \varphi)}{10U^2} \quad (1-4)$$

式中  $R, X$ ——单位长度线路的电阻和电抗， $\Omega/\text{km}$ ；

$U$ ——线路电压，kV；

$L_i$ ——线路第  $i$  段的长度，km；

$S_i$ ——通过第  $i$  段线路的电力负荷，kVA；

$\cos \varphi$ ——负荷功率因数。

定义线路电压降为 1% 时的负荷矩为  $H$ ，即