

配电 系统

故障处理 自动化技术

袁钦成 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

配电系统故障处理 自动化技术

主 编 袁钦成
参编人员 吴尚洁 张忠华
 淡文刚 刘大祥



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了配电系统的网络结构特点、架空和电缆系统常用开关设备。在此基础上,重点介绍配电系统故障处理的自动化技术,包括故障发生瞬间的故障清除保护技术,重点介绍网络式保护技术;故障后的故障隔离、转供和恢复供电技术,重点介绍分布式智能技术;故障处理后的故障点指示和故障定位技术,重点介绍故障指示器技术和在此基础上结合 GSM 短信息通信技术及地理信息系统(GIS)技术而形成的故障自动定位系统。本书的最后部分介绍了配电自动化系统中涉及的自动化装置和通信技术及相关装置。

本书可作为电力系统供电部门的技术人员了解和学习配电系统故障处理自动化相关技术的参考书,也可供电力系统相关研究部门技术人员进行相关课题研究的参考用书,还可作为高等院校相关专业的本科和研究生学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

配电系统故障处理自动化技术/袁钦成主编. —北京:
中国电力出版社, 2007
ISBN 978-7-5083-4819-3

I. 配... II. 袁... III. 配电系统-故障修复-自
动化技术 IV. TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 109620 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.ccpp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 1 月第一版 2007 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 8.75 印张 209 千字

印数 0001—4000 册 定价 17.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序 言

随着国民经济的不断发展和人民生活水平的不断提高，人们对电力供应的质量和服務水平的要求也越来越高。配电系统在电力系统中处于系统末端，是电能输送的最后一个环节，直接承担着对用户的供电。配电系统的运行水平直接影响对用户的供电质量。近年来，我国配电系统的网络结构和设备质量都有较大提高，然而系统和设备的故障依然较多，故障处理技术和水平亟待提高。当前国内还没有一本著作系统地论述配电系统故障处理自动化技术，本书的出版发行填补了这方面的空白，是非常及时和受欢迎的。

本书作者多年从事配电系统的故障检测和配电自动化技术研究，在配电系统的网络保护、配电系统故障处理的分布式智能控制技术、配电系统的故障点自动定位技术方面做了很多具有开拓性、属于国内前沿的研究和开发工作。书中作者把配电系统故障处理分为三个阶段，并针对每个阶段碰到的问题和难点，提出了新颖的和有效的解决方案，其成果都在工程实际中得到了大量应用和验证。本书将这些成果进行系统整理和总结，并奉献给读者，相信一定能给广大电力研究部门的技术人员、高校相关专业的师生和电力运行部门技术人员在配电系统故障处理技术研究、学习和应用方面提供有益的帮助，并推动我国配电自动化和配电系统故障处理自动化技术的提高和发展。

中国电力科学研究院总工程师

中国科学院院士

周孝信

2006年6月

前言

传统的配电线路往往是辐射性结构，但是随着系统的发展，配电系统的网络结构更加复杂，在实际工作中，配电线路的故障处理问题也越来越复杂和困难。作者试图把这些年自己在配电系统保护和控制、配电自动化工程、配电系统故障检测方面的一些专门研究内容和实际工程体会进行总结，围绕配电系统故障处理自动化这个专题，奉献给读者一些研究心得和工程实施体会。

本书的读者应具有电力系统保护控制方面的基本知识，因此大学教科书里电力系统方面的基础知识本书不再叙述，读者对个别方面不熟悉的知识内容很容易在其他基础读物中获得。但为了本书的系统性，作者还是增加了一些有关配电网结构和开关设备方面的内容介绍以及自动化装置原理和通信技术的介绍。

本书由袁钦成教授主编并负责全书内容的修改、审定工作，吴尚洁工程师执笔第2章第5节及第3章部分的内容，淡文刚博士执笔第5章，张忠华高工执笔第6章，刘大祥高工执笔第1章第3节部分内容，其他章节由袁钦成教授执笔。感谢胡兆明教授协助审核了第1章第3节的内容，并提出了宝贵的建议。

本书涉及的网络式保护、分布式智能、故障自动定位等内容是作者多年的一些研究心得和工程体会。由于作者水平有限，肯定有很多不够全面、疏漏、甚至错误的地方，恳请读者批评指正。

作者

2006年6月于北京

目 录

序 言
前 言

绪 论

1

1 配电系统网络结构及设备

3

- 1.1 配电系统的接地方式 3
- 1.2 配电系统的电气网络结构及特点 6
- 1.3 配电系统的常用开关设备 9

2 配电系统的继电保护特点及其新技术

24

- 2.1 配电系统常用的继电保护及应用中存在的问题 24
- 2.2 网络式保护技术的概念 25
- 2.3 基于主从式通信网络的网络式保护技术 25
- 2.4 基于主从式通信网络的网络式保护技术的实际应用 27
- 2.5 基于对等式通信网络的网络式逻辑保护原理 30

3 配电系统的馈线自动化技术

49

- 3.1 配电系统馈线自动化功能要求 49
- 3.2 配电系统故障后常用的故障处理方法 50
- 3.3 新型分布式智能处理方案 55
- 3.4 集中控制与分布式智能相结合的故障处理方案 68

4 配电系统的故障检测、指示及定位

69

- 4.1 故障检测、指示和定位的目的和意义 69
- 4.2 用于相间短路故障检测和指示的短路故障指示器 70
- 4.3 中性点非直接接地系统中单相接地故障的检测和指示 76

4.4 故障自动定位系统.....	87
-------------------	----

5 配电线路终端自动化装置(FTU)	100
---------------------------	------------

5.1 配电线路终端自动化装置的主要功能	100
5.2 配电线路终端自动化装置的原理	103

6 配电自动化系统中的通信技术	109
------------------------	------------

6.1 配电自动化通信系统概述	109
6.2 配电系统中的光纤通信技术	112
6.3 配电系统中的无线通信技术	117
6.4 配电系统中的电力载波通信技术	124
6.5 配电系统中的现场总线技术	127
6.6 推荐的配电自动化系统通信方案	130

参考文献.....	132
-----------	-----

“入局”与“出局”是电力系统运行中两个重要的概念。入局是指电力系统从外部电网接入，出局是指电力系统向外部电网输出。入局和出局的运行水平直接影响电力系统的供电质量和可靠性。因此，电力系统运行部门应加强对入局和出局的运行维护，确保电力系统的安全稳定运行。

绪 论

配电系统在电力系统中处于系统末端，是电能输送的最后一个环节，它直接承担着对用户的供电，因此配电系统的运行水平直接影响对用户的供电质量。一般配电系统电压等级为6~35kV，网络结构复杂，线路分支多，使用的配电设备种类多、型号不统一，设备质量参差不齐，再加上中国的配电系统采用中性点不直接接地方式，因此，故障处理复杂。长期以来运行部门对配电系统运行维护水平不高、故障处理技术有待提高，因此大多数供电部门供电质量、供电可靠性指标还不理想，离有关部门要求的99.99%可靠性指标还有差距。

近年来，电力系统采用配电自动化等新技术来提高配电系统的运行管理水平，不少供电部门进行了局部试点。但由于配电自动化技术尚不完全成熟，且配电自动化技术涉及的技术领域比较多，运行部门掌握的难度也较高，导致目前已经实施的配电自动化工程项目实际运行效果尚不够理想。目前，配电自动化技术应以实用为主，且不宜将系统设计得特别复杂，应尽量简化，以保证可靠性和实用性。

本书将重点关注配电系统的故障处理自动化技术。为了对配电系统的故障处理的过程有一个系统的、清晰的思路，我们把故障处理过程分为三个阶段：

(1) 故障处理的第一阶段：故障发生瞬间，故障的开断和清除。通常由高压断路器配合继电保护自动化装置在毫秒级内完成，一般如果继电保护速断动作，包括保护响应时间、断路器动作时间和故障点燃弧时间在内，整个故障持续时间在100ms左右；如果故障由过流保护动作跳闸，则故障持续时间在0.5~1s以内，特殊情况下稍长一些。但现在配电系统内特别是线路上有多级断路器串联安装运行，采用传统的电流保护原理的继电保护装置难以实现多个断路器互相有效配合，出现了保护的快速性与选择性的矛盾，一般出现故障后为保证故障的快速切除，都是让变电站出口保护先动作，扩大了停电范围，也没有充分利用多断路器级联的优点。本书第2章将进行详细讨论，提出网络式保护的概念，介绍了其技术原理，并分别介绍了基于主从式通信网络和基于对等式通信网络而采取的不同方案及应用实例，它将有效地解决保护的快速性和选择性的矛盾问题。在多级断路器串联运行的情况下，可保证总是离故障点最近的断路器速断跳闸。

(2) 故障处理的第二阶段：故障区段的隔离和非故障区域的恢复供电。持续时间一般是秒级至分钟。过去配电线路大都是辐射性结构，且线路上没有其他开关，因此故障被开断的同时故障区段也被隔离了。但现在配电线路往往采用环网供电或具有多电源供电结构的网络模式，因此故障后仅需要隔离故障区段，故障点前的非故障区段部分可以维持正常供电，故障点后的非故障区段可以通过转移供电方式由其他电源供电。这也是配电自动化技术重点关注的问题。本书的第3章将重点讨论故障隔离和非故障区段的恢复供电问题。与大多数技术文章关注的重点不同，本书不重点讨论故障转供的优化问题。故障隔离和转供阶段关注的重点应该是：停电时间最短、停电范围最小、可维持正常供电的区段最大，在这期间不需要重

点考虑网络优化,而只要考虑电压越限、功率越限的不等约束条件即可。因此,第3章在介绍了集中式故障处理技术以及以各种自动分断器、重合器为基础的就地式故障处理技术后,重点介绍基于分布式智能的故障隔离和转供技术的方案,以及集中控制与分布式智能相结合的故障处理方案。该方案可靠性更高、隔离故障和恢复供电需要的时间更短,而且可以适应各种网络结构、不同地区对自动化程度的不同要求;且随着自动化水平要求的提高,可以不断自动升级。

(3) 故障处理的第三个阶段:故障点定位和排除故障。通常需要数十分钟至若干小时。高压输电系统的输电线路长,一般没有分支,可以采用故障测距的方法定位故障点。但配电系统线路结构复杂、分支多,输电系统采用的故障测距、定位方法一般在配电系统不适用。而配电系统的单相接地故障的检测和定位就更复杂了。本书第4章将介绍一种基于故障指示器的配电系统故障检测和定位技术,它在线安装,自动检测故障电流特征和接地信号电流,自动指示、自动复位,免维护,适用于在配电线路上大批量安装使用,可以大幅度减轻故障巡线强度,提高故障处理效率,缩短故障停电时间,提高了供电可靠性。针对中性点非直接接地的配电系统特点,分析了单相接地故障后的系统的变化特征,介绍了各种检测接地故障的方法,提出了一种被动式信号注入法实现单相接地故障检测的方案,该方案已用于工程实践。对于要求实现故障自动定位的场合,本书还介绍了一种基于故障指示器技术的故障点自动定位方法。与无线通信、GSM短消息、GPRS等通信方式相结合,还可以在控制中心的地理信息系统平台上直接定位故障点,使故障定位水平上升到更高阶段。我们也将第4章进行详细讨论。

第2、3、4章是本书的核心内容。为了更好理解故障处理自动化技术的原理,本书第1章介绍了配电系统的一般结构和常用开关设备,故障处理的第一和第二阶段正是在这样的网络结构和开关设备基础上进行的。而本书的第5和第6章还介绍了故障处理过程中需要涉及的自动化装置和通信系统。借助于这些自动化装置和通信系统,故障处理的自动化才得以实现,因此它也是本书不可缺少的内容。当然对于哪些非常熟悉自动化装置和通信系统原理及技术的读者来说,阅读本书的前4章已经可以了解本书的基本内容了。

■ 配电系统网络结构及设备 ■

1.1 配电系统的接地方式

电网中性点采用何种接地方式,是目前业界讨论较多的问题,认识也不尽一致。我国 110kV 等级及以上系统是中点有效接地系统,而配电网主要是非有效接地系统。电力系统的中性点接地方式是一个综合性的技术问题,要考虑电网的各种运行情况、供电可靠性要求、故障时的过电压、人身安全、对通信的干扰、对继电保护的技术要求、设备的投资等,是一个系统工程。

电力系统中性点接地方式主要是技术问题,但也是经济问题。在选定方案的决策过程中,应结合系统的现状与发展规划进行技术经济比较,全面考虑,使系统具有更优的技术经济指标,避免因决策失误而造成不良后果。

对于 110kV 及以上电网来说,如果采用中性点非有效接地方式,单相接地故障时,非故障相过电压可能会达到正常运行值的 3 倍以上,对电气设备绝缘的要求大大提高,设备制造成本显著增加,因此,一般都采用中性点直接接地方式。对于 66kV 及以下配电网(以下简称配电网)来说,额定运行电压相对较低,接地故障过电压的矛盾就不像在 110kV 及以上电网中那样突出,中性点直接接地的优势不明显,因此,有效接地与非有效接地这两种方式在实际工程中都有相当数量的应用。目前,美国、英国、新加坡、中国香港等地中压配电网中性点一般采用直接接地方式或经小电阻接地方式,主要考虑是单相接地故障时过电压小,继电保护容易配置。德国、法国、俄罗斯等欧洲国家以及日本等国主要采用小电流接地方式,主要是避免单相接地故障引起跳闸。我国配电网中性点主要采用非有效接地方式。电容电流比较小的网络,采用中性点不接地方式;在电缆架空线混合网络接地电流超过 10A 以及纯电缆网络接地电流超过 20A 时,一般采用谐振接地方式。

人们对配电网接地方式的认识,是随着电网规模及技术发展不断变化的。在电力系统发展的初期,电力系统的容量较小,当时人们认为工频电压升高是绝缘故障的主要原因,即使相电压短时间升高至 $\sqrt{3}$ 倍,也会威胁安全运行。为防止单相接地时相电压升高导致绝缘故障,电力设备的中性点最初都采用直接接地方式运行,在单相接地时瞬时跳闸切除故障。

随着电力系统的扩大,人们发现单相接地是出现概率最大的故障形式,而直接接地方式造成线路频繁跳闸而造成频繁的停电事故,于是,便将上述的直接接地方式改为不接地方式运行。尔后,由于工业发展较快,使电力传输容量增多,距离延长,电压等级逐渐升高,电力系统的延伸范围不断扩大。在这种情况下发生单相接地故障时,接地电容电流在故障点形成的电弧不能自行熄灭,同时,间歇电弧产生的过电压往往又使事故扩大,显著降低了电力系统的运行可靠性。为了解决这些问题,各国分别采取不同的解决途径。如德国、法国等采

用谐振接地技术,使故障点残余电流很少,电弧易于熄灭,自动消除瞬间的单相接地故障,还可避免对通信线路的干扰。谐振接地概念最早是由德国电力专家彼得逊(Peterson)提出的,因此,消弧线圈又叫做彼得逊线圈。美国则采用了中性点直接接地和经低电阻、低电抗等接地方式,并配合快速继电保护和开关装置,瞬间跳开故障线路。这两种具有代表性的解决办法,对后来世界上许多国家的电力系统中性点接地方式的发展产生了很大的影响。

随着配电网规模的扩大以及电缆线路的大量使用,配电网电容电流进一步增大,使用固定调谐的消弧线圈不可能完全补偿电网电容电流,故障电弧难以自动熄灭。从避免长期接地过电压危害配电网绝缘出发,一些国家(如法国)逐渐将电缆网络的中性点谐振接地方式改为经小电阻接地。基于同样的考虑,我国一些电力专家主张在电缆网络里优先考虑使用经小电阻接地方式。20世纪80年代以来,我国沿海一些城市(如上海、广州、深圳等地)的部分电缆网络陆续采用了经小电阻接地方式。近年来,谐振接地方式又受到了电力工作者的重视。在我国,谐振接地的应用也愈来愈广泛。引起这一变化的主要原因是,电力市场化后,对供电可靠性提出了更高的要求,电力部门希望通过采用谐振接地方式,尽可能减少单相接地故障引起的供电中断。消弧线圈自动调谐装置的发明,也推动了谐振接地方式的应用,因为它能够自动跟踪电网电容电流的变化,使流过接地点的电流尽可能地小,故障电弧自动熄灭的可能性也大为提高。

我国配网通常采用以下几种接地方式。

1. 不接地——单相接地电流小于10A的系统

当中性点不接地系统发生单相接地时,无论是金属接地或不完全接地,三相系统的对称性仍保持不变,对电力用户的继续工作没有影响。但是中性点不接地系统发生单相接地时,不允许长期带电接地运行,这是因为非故障的两相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍,可能引起绝缘的薄弱环节被击穿,发展成为相间短路,使事故扩大。所以规程规定:中性点不接地系统发生单相接地时,继续运行的时间不得超过2h,并要加强监视。

单相接地时,所产生的接地电流,将在接地点形成电弧。这种电弧可能是稳定的或间歇性的。

当接地电流不大时,电弧在电流过零瞬间自行熄灭,接地故障随之消失,于是电网恢复正常运行。当接地电流很大(30A以上)时,将会形成持续性的电弧接地,如不及时消除,可能烧毁设备并导致相间短路事故。

在10kV和35kV电压等级的配电系统中,当单相接地电流小于10A时,可以采用中性点不接地方式。如不满足上述条件,则须采用其他接地方式。

2. 自动跟踪的消弧线圈接地方式

配电网中性点谐振(消弧线圈)接地是指配电网一个或多个中性点经消弧线圈与大地连接,消弧线圈的稳态工频感性电流对电网稳态工频容性电流调谐,故称谐振接地。目的是使接地故障点残余电流小,接地故障就可能自动清除。

消弧线圈是一个具有铁芯的可调电感线圈,它接于变压器或发电机的中性点与大地之间。当发生单相接地故障时,可形成一个与接地电流的大小接近相等、方向相反的电流,对接地电流起补偿作用,使接地点电流减小或近于零,从而消除了接地点的电弧及由它所产生的危害。此外,当电流过零时电弧熄灭之后,消弧线圈的存在还能减小故障相电压的恢复速度,从而减小电弧重燃的可能性。因此,中性点经消弧线圈接地的系统是确保安全运行

的有效措施之一。

3. 电阻接地方式——接地电容电流较大的电缆系统

配电网中至少有一个中性点接入电阻器，目的是限制接地故障电流。中性点经电阻器接地，可以消除中性点不接地和消弧线圈接地系统的缺点，既降低了瞬态过电压幅值，并使灵敏而有选择性的故障定位的接地保护得以实现。由于这种系统的接地电流比直接接地系统的小，故地电位升高及对信息系统的干扰和对低压电网的影响都会减弱。

电缆网络中性点采用小电阻接地的一个主要考虑，是电缆线路里故障大都是永久性的，即便是采用谐振接地，接地电弧也难以自行熄灭。

在中性点，采用比较小的电阻，其电阻值在几个欧姆到几十个欧姆，在发生单相接地故障以后，产生的接地电流达到几百安培或者几千安培，这样大的电流，对于保护来说已经很容易识别，所以，在城网中采用小电阻接地，利用零序保护，可以直接动作于保护而跳闸。这样，只要有故障，就可以进行跳闸保护。它所带来的缺点是：哪怕是瞬时性故障也会跳闸。对于中性点不直接接地系统，允许单相接地运行 2h，那么对于瞬时性故障可以不跳闸，但采用小电阻接地，不管是何种性质的故障，均采取的是跳闸保护。在有些城市经过统计，采用小电阻接地，跳闸率更高了。这是因为，一些瞬时性故障通过消弧线圈接地，可以自行消除故障，但采用小电阻接地后，只要有接地故障都要跳闸。这是小电阻接地的缺点。

事实上，电缆网络里相当一部分故障是发生在电缆本体以外（如在用户变压器处）的瞬时性故障。对实际接地故障分析表明，电缆内部接地故障的电弧也有可能自动熄灭，从而维持一段时间的正常供电。因此，中性点采用非有效接地方式，可以避免不必要的供电中断。据我国沿海某城市供电局对一变电站的统计数据，配电网中性点改造为经小电阻接地之后 3 年中，10kV 线路共跳闸 136 次，平均每年 46 次；而在改造之前的 2 年中，10kV 线路共跳闸 53 次，平均每年才 27 次。可见，中性点采用非有效接地方式时，10kV 线路平均每年的跳闸次数远小于采用小电阻接地方式。

下面介绍的消弧线圈接地和中电阻并联可控接地的智能接地方式，可以将消弧线圈接地方式和小电阻接地方式的优点结合起来，并且可以避免两者的缺点。

4. 消弧线圈接地和中电阻并联可控接地的智能接地方式

消弧线圈的最大优点就是能消除瞬时性故障，很多故障不需要处理，就可以自动熄弧了。那么小电阻的优点是什么呢？有故障就可以跳闸进行保护，不至于带来后患。若采取消弧线圈并联一个智能的接地电阻，当发生单相接地，若是瞬时性的故障时，通过消弧线圈可以自动处理了，自动消除故障了。若故障持续时间达到几十秒，那么靠消弧线圈是不能熄弧了，说明这是一个永久性故障，就只能采取开断故障线路。采用消弧线圈接地方式是无法跳开故障的，若投入一个中电阻，当单相接地产生时，通过中电阻可以产生一个几十安培的接地故障电流，并不像小电阻接地时产生那样大的接地电流，虽然对安全有点影响，投上一个中电阻，产生几十安培的电流，这个电流足可以让继电保护或者故障指示器检测出来，这样就可以快速地动作于跳闸，或者动作于选线，或者动作于现场的故障定位，这样处理故障就只需要几秒钟的时间。如果两者结合起来，对于瞬时性故障可以自动消弧，永久性故障可以在很短的时间内消除故障，这样就可以将两种接地方式的优点很好地结合在一起了。

对于已经建立了消弧线圈的接地系统，只要在旁边并联一个中电阻，这个方法不是很难。在后面还会介绍，利用这个接地方式，可以把接地选线、故障定位、故障点指示结合在

一起,投资也不是很高。

至于每个系统,应该用什么方法,没有一个绝对的要求。

小结

配电网中性点接地方式的选择是综合性的技术问题。中性点不接地、谐振接地、电阻接地各有其优缺点,应结合电网具体条件,通过技术经济比较确定,每种中性点接地方式的系统具有各自的优点。在同一城市同级标称电压,多种中性点接地方式的系统共存。那种按电压等级“一刀切”决定中性点接地方式是不对的。因每种中性点接地方式的系统具有各自的缺点(弊端),所以,在选择时必须从具体实际出发,权衡利弊,合理选取。如:架空线路的小电网,即网络电容电流小,可选用中性点不接地或中性点经高阻电阻器接地系统。架空线路的大电网,即网络电容电流较大,可选用中性点谐振接地系统。

城市电缆配电网、网络结构好,可选用中性点中值或低值电阻器接地系统。若要求补偿网络电容电流限制接地故障入地电流,可选用中性点经中值电阻器与消弧线圈并联的接地方式。近年来,消弧线圈自动跟踪技术及自动选线技术发展迅速,消弧线圈接地的一些弊病也逐渐得到解决。随着消弧线圈技术的改进,它的应用将会愈来愈广泛。

消弧线圈并联电阻的方式是中性点接地方式的一种新途径,国内已在这方面开始研究并有少数在配电网应用。在第4章将进一步阐述利用短时间中阻接地进行单相接地故障选线和故障定位的研究成果。

1.2 配电系统的电气网络结构及特点

10kV 配电系统的接线方式主要有以下几种:放射式、干线式、链式及环网接线。以往采用放射式和干线式配电系统较多,而且进出线大部分是架空线,开关设备多数为空气绝缘的真空断路器或少油断路器,不仅故障多,运行成本高,如果发生故障,将引起长时间、大面积停电。随着我国城市建设的发展,用电负荷迅速增加,对配电系统和可靠性的要求不断提高,放射式和干线式配电系统已很难适应发展的需要。在国外,环网配电系统已得到普遍采用,我国从20世纪80年代开始在沿海大、中城市推广10kV环网配电系统,城市新建10kV配电系统普遍采用环网配电系统,现有的城市10kV配电系统也正在逐步改造成环网配电系统。

1.2.1 中压电缆网络接线

中压电缆网络接线方式有单电源辐射接线、双电源手拉手环网接线、三电源手拉手环网接线、四电源手拉手环网接线、4×6网络接线和多回路平行式接线(开闭所接线)。

1. 双电源手拉手环网接线

双电源手拉手通过一个联络开关,将来自不同变电站或相同变电站不同母线的两条馈线连接起来。任何一个区段故障,隔离区段故障后,合上联络开关,将负荷转供到相邻馈线,完成转供,可靠性为 $N-1$,设备利用率为50%。适用于三类用户和供电容量不大的二类用户,接线方式见图1-1和图1-2。

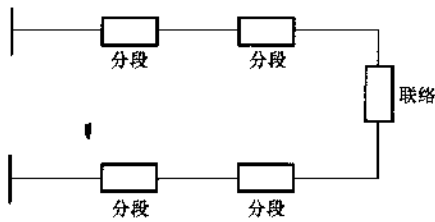


图 1-1 架空线路手拉手双电源网络

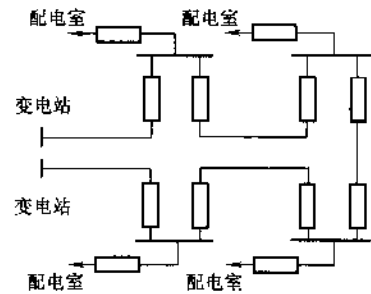


图 1-2 电缆系统双电源手拉手环网

2. 三电源手拉手环网接线

三电源手拉手环网由三条馈线供电，每个馈线间设一个联络开关，馈线可来自不同变电站或同一变电站的不同母线。只要故障区段没有连接联络开关，就存在两条转供路径，可保证两个故障同时发生时的负荷转供（ $N-2$ ），否则有一条转供路径（ $N-1$ ）。综合可靠性 $N-1$ ，设备利用率 67%。适用于供电容量较大但个数多的二类用户，其接线方式见图 1-3。

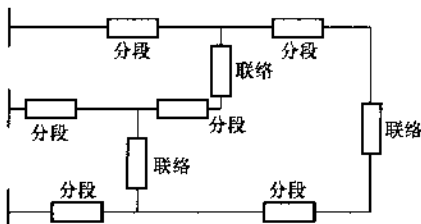


图 1-3 三电源手拉手网络

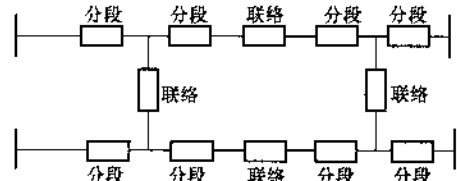


图 1-4 四电源井字供电网络

3. 四电源井字形环网接线

四电源井字形环网在双电源手拉手环网的基础上增加两条馈线的联络，形成一个“井”字形网络，也可以看成是在三电源手拉手环网的基础上增加一条馈线。四条电源供电，可来自两个变电站不同母线的两条馈线或四个变电站出线，可靠性和设备利用率与三电源手拉手环网相同，适用于供电容量较大且个数较多的二类用户和供电容量小且个数不多的一类用户。其接线方式见图 1-4。

4. 4×6 网络接线

该接线方式有 4 个电源点，6 条手拉手线路组成，任何两个电源点间都存在联络或可转供通道。当任意两个元件发生故障仍能保证正常供电，可靠性指标达到 $N-2$ ，负荷转移率降为 1/3。

4×6 网络接线由于在网络设计上的对称性和联络上的完备性，在节省投资、提高可靠性、降低短路容量和网损、均衡负载和提高电能质量等方面具有优越

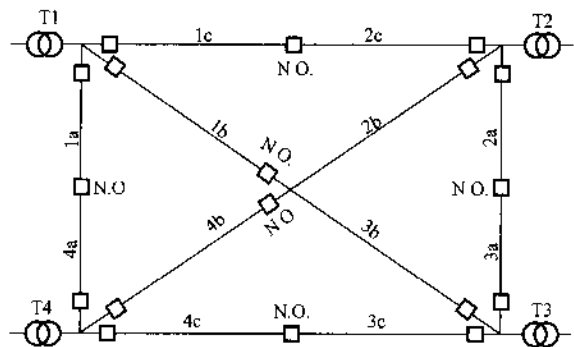


图 1-5 4×6 网络接线

性。其接线方式见图 1-5。

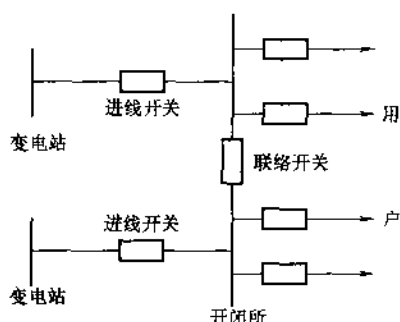


图 1-6 多路平行供电

5. 多回路平行线式接线

多回路平行供电类似于我国广泛采用的开闭所模式，由两路或三路电源供电，采用一供一备、两供一备或多供一备方式，适用于 10kV 大用户末端集中负荷。这些回路可以来自不同变电站的 10kV 母线，也可以来自同一变电站的不同 10kV 母线段，具有较高的供电可靠性。其接线方式见图 1-6。

1.2.2 中压架空线网络接线

由于城市中压网络将逐步电缆化，因此，对暂时需要采用架空线路的网络，其接线方式应简洁并易于实现电缆化改造。可采用柱上负荷开关（或断路器）将线路进行适当分段（3 分段）和联络（闭式环网），其接线方式可采用双电源手拉手环网接线、三电源手拉手环网接线、四电源手拉手环网接线。

架空线路分段原则。如图 1-7 所示，通常架空线，最节省的办法是，设置一个联络开关，在两侧各加一个分段开关，在任何一段出现故障时，停电的线段只有 1/2，保证供电率可以达到 50%，见图 1-7 中最上面的接线。如果在联络开关两侧各加两个分段开关，为三分段线路。如图 1-7 中间的接线，当任何一段停电时，停电的线段为 1/3，可继续供电的线段为 2/3，保证供电率可以达到 66.7%。可以看出，通过增加一台开关，供电从 50% 增加到了 66.7%。若再增加一台开关，线段变为三台开关四分段，如图 1-7 最下面的接线。这时，每一段平均供电率为 25%，也就是说，如果有故障时，停电区段为 25%，保证有 75% 的线段能正常供电。以此类推，可以想到，如果再加一台开关，故障时供电范围可保证到 80%。显然，再增加开关，提高供电率提高的已不是很多了，已没有任何意义了。一般推荐前面的两种方式。

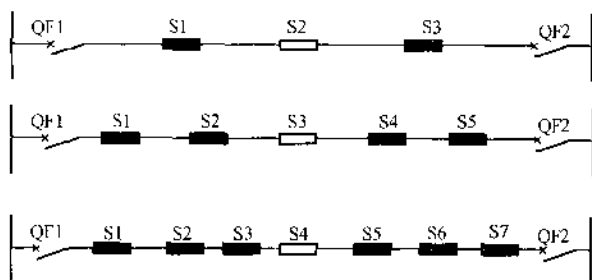


图 1-7 架空线路网络接线

1.2.3 配网接线原则和城网接线特点

1. 配网接线原则

一般应优先使用简化的接线方式。出线负载率低于 50% 时优先考虑双电源手拉手环网接线，负载率高于 50%、低于 67% 时优先考虑三电源环网和四电源 # 字环网接线，高于 67%、低于 75% 时考虑 4×6 接线，高于 75% 时应考虑分成两个环供电。由于大多数线路负载率低于 50%，因此手拉手双电源环网是最常见的模式。

环网配电系统之所以得到认可和应用，是因为它具有以下突出的优点：①可简化线路，方便管理；②系统改造和发展灵活；③供电可靠性较放射式和干线式高；④与配电自动化配合，可大大缩短故障时间。因此，环网接线是 10kV 配电系统的发展方向。

城市电网(含配电网)及农村电网在进行改造和建设时,对配电网 10kV 网络结构按 N-1 供电可靠性准则,应逐步由辐射型供电网络改造为“手拉手”环网供电开环运行模式。同时,对 10kV 馈电线路、分段开关、联络开关、环网柜等配电设备进行改造更新,为实施城市配电自动化(DA)打下了良好的基础。

2. 城市电网的特点

目前,我国城市电网具有以下特点:

(1) 简化电压等级。现有城市电网的电压等级较多:① 高压输电电压,大城市为 220kV,中小城市为 110kV;② 高压配电电压 110kV、63kV、35kV;③ 中压配电电压 10kV;④ 低压配电电压 380V/220V。

以上电压等级为 6 个,具体到每个城市,一般要简化到 4 个。例如,南方某城市:220kV 35kV—10kV—380V/220V,东北某城市:220kV 63kV—10kV—380V/220V。在以上电压等级中,10kV 作为中压配电电压和 380V/220V 作为低压配电电压为城网普遍采用。

(2) 高压直接进入市区,深入负荷中心。高压直接进入市区,深入负荷中心,可以减少线路损耗,提高供电质量。随着城市高楼大厦的崛起,生活小区的形成及生产的集团化和规模化,需要高压送电给负荷中心。《电力供应与使用条例》规定,一般送电容量超过 160~250kVA 采用 6kV 送电电压给负荷中心,送电容量 315kVA 以上采用 10kV 送电电压给负荷中心。

(3) 在城乡电网改造和建设中,推行环网供电。采用电缆,走地下,呈环路,可以减少供电的中断,同时大大减少了临时性故障。城网的电压等级为 10~220kV,建筑用电设施的电压等级一般为 10~35kV。在城网中,由于高压直接进入市区,深入负荷中心,因而高压开关的使用量增加,而且要求采用占地面积小、安全可靠且无油的电气设备。在城网建设与改造中,因推行环网供电,环网供电单元配电设备应运而生。

(4) 开关设备户外式、小容量、小型化。

1) 户外式。高压开关为户外式,如 SF₆ 断路器或重合器、分段器,用 SF₆ 气体既灭弧又绝缘,而真空断路器或重合器、分段器用真空灭弧,外绝缘用油、SF₆ 或空气作绝缘,可节约面积和造价。

2) 小容量。配网用的高压开关容量较低,一般额定短路开断电流为 16~20kA。

3) 小型化。架空线路多装在户外柱上,要求结构紧凑、性能好、可靠性高、环境适应性强。如户外柱上 SF₆ 断路器,为三相共箱式,采用旋转式灭弧,结构简单、体积小、寿命长。又如真空断路器,亦采用三相共箱式真空灭弧,并采用 SF₆ 或油、干燥空气绝缘。

1.3 配电系统的常用开关设备

1.3.1 架空系统常用开关设备及其典型应用方案

架空系统的配电开关设备习惯上称为柱上配电开关设备,是指在 12kV 及以下电压等级,在户外架空线路上装设的具有控制、保护和隔离电源等功能的开关设备,能够耐受风、雨、雪、淀积的尘埃、凝露、冰和白霜等的作用。主要包括断路器、负荷开关、隔离开关、

熔断器、自动重合器、分段器、配电自动化开关等。除了前述的开关设备外，习惯上还应该包括各种配套的控制和测量设备，都称为柱上配电开关设备。其特点主要有：

(1) 控制作用：指可以根据电网运行需要，把一部分电力设备或线路投入或退出运行。

(2) 保护作用：指能够在电力设备或线路发生故障时将故障部分从电网快速切除，保证电网中无故障的部分正常运行。

(3) 配电自动化功能：自动化柱上配电开关设备除了控制和保护功能外，还可以实现对数据采集、运行监控、远方操控等复杂功能，从而达到减少故障停电范围，提高供电可靠性的目的。

在 12kV 配电系统中，柱上配电开关设备由于其结构简单、操作方便以及可以实现分散式的控制和保护的特点，已经得到了广泛的应用。在与就地监控终端装置（FTU）等相关的系统软硬件配合使用后，还可以实现复杂的功能：①可以组成智能化的配电开关，实现对线路的故障定位、隔离和自动恢复供电等功能，减少故障的停电范围，提高供电的可靠性；②可以实现与中央变电站之间对线路的电流、电压和开关的工况等信息的传递，并可实现遥控、遥信、遥测、遥调等四遥功能，实现区域配网自动化功能；③分散的系统保护功能，可以配用定时限或反时限电流保护，而且一般都具有直流蓄电池作为后备电源，在线路停电期间仍能保证控制器正常工作。

一、交流高压断路器及交流高压自动重合器

1. 交流高压断路器

交流高压断路器是指在架空线路上能够关合、承载、开断运行回路的正常电流，也能够在规定时间内关合、承载及开断规定过载（包括短路电流）的开关设备。

柱上断路器在线路过载（短路）时，通过保护装置的动作可以自动地将电路迅速开断，而关合可以依靠人力或其他动力进行。在用于配电网时，多要求具备自动重合闸功能，有时还要求具备开合电容器组和电缆充电电流的功能。

按断路器的灭弧原理来划分，柱上断路器主要有油断路器、真空断路器、SF₆断路器等；按绝缘介质划分，柱上断路器可以分为空气绝缘、油绝缘、气体（SF₆、N₂）绝缘、固体绝缘断路器等；按操动机构来划分有手动机构、电动机构、电磁机构和永磁操动机构断路器；从外观上来划分，可以分为三相共箱式结构和三相分体式结构。

12kV 柱上断路器。国内柱上户外断路器在 20 世纪 50~70 年代采用仿苏多油断路器为主。80 年代以后，随着技术水平和经济实力的提高，多油断路器已经不能满足要求，于是发展了 LW3 等 SF₆断路器，从技术性能到开断能力都有了质的提高。从 90 年代开始，出现了柱上真空断路器，已经取代了 SF₆断路器并成为市场的主流产品。

近年来，随着国家城、农网改造的进行，户外柱上断路器/重合器发展很快，有如下几点技术进步：①操动机构的设计与本体基本做到了一体化设计，操动机构与开关本体的特性匹配有了很大的进步；②新型绝缘材料的应用已经基本上做到了与世界同步，尤其是专门用于户外的进口憎水环氧树脂已经在国内的产品上得到广泛应用；③专门用于户外的永磁机构，已经在国内的产品中得到应用；④通过数字式焊接装置，箱体的焊接工艺已经达到比较高的水准，因此，出现了许多的 SF₆绝缘的三相共箱式断路器。与国外不同，国内的户外柱上断路器基本上是以真空断路器为主，占领了绝大多数市场；SF₆断路器以 LW3 为代表，在南方湿热地区有一定的销量，操动机构目前以弹簧操动机构和手动操动机构为主。另外，