

全国电力技能人员培训用书



全国电力继续教育规划教材

变电运行 (高压类)

全国电力继续教育规划教材编委会 组 编
张全元 赵连政 王永清 主 编
陈元建 李广渊 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



全国电力继续教育规划教材

变电运行 (高压类)

全国电力继续教育规划教材编委会 组 编

张全元 赵连政 王永清 主 编

陈元建 李广渊 副主编

李洪波 张希成 付连杰 寇太明 顾振江

尚润田 宋 巍 贺俊杰 张春江 周志茹 编 写

盖 晶 齐 赛 勾建军 郭 琦



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为全国电力继续教育规划教材。

全书共分十七章，主要内容包括基础知识、变压器、互感器、断路器、隔离开关、母线及接线方式、无功补偿装置、消弧线圈、过电压、站用电系统、典型保护配置、自动装置、五防系统、设备巡视、倒闸操作、事故处理和设备验收。本书最大的特点是专业内容理论简明、扼要，实际操作部分针对性强，所有操作项目紧密围绕现场实际。

本书不仅可作为新入职员工、转岗人员岗前培训教材，也可作为在职变电运行人员培训作业指导书。该书实用性强，通俗易懂，是变电运行技能培训理想的教材，同时还可作为电力工程类的大专院校现场技能学习的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

变电运行：高压类/张全元，赵连政，王永清主编；全国电力继续教育规划教材编委会组编. —北京：中国电力出版社，2013.9

全国电力继续教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4476 - 1

I. ①变… II. ①张… ②赵… ③王… ④全… III. ①高电压-变电所-电力系统运行-继续教育-教材 IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 108495 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 9 月第一版 2013 年 9 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 25.5 印张 617 千字
定价 60.00 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

全国电力继续教育规划教材编委会

主任 赵建国

副主任 张薛鸿 刘广峰 陶 明 文海荣 董传敏 朱光辉

张炯明 辛志杰 陈明祥 罗福书 赵文建 赵 斌

杨建华 张全元 李洪波

秘书长 刘克兴

委员 王立新 陈华贵 丁树文 章志刚 黄益华 李吉鹏

张红飞 罗红星 余建华 李建华 赵连政 李晓峰

高虹亮 马振良 王志平 时伟光 肖艳萍 郭 敏

徐 明 郜勇琴 王 宇 黄院臣 贺令辉 陈力耕

宋志明 霍永红 谢伟宏 孟应平 张永健 席晋鹏

常 湧 杨 龙 常 勇 周孝法 宋守信 王天君

李国胜 祝红伟

(排名不分先后)

出版说明

为贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要》（2010—2020）的精神，满足电力行业产业发展对高级管理人才、高技术技能型人才的需要，在中国电力企业联合会、国家电网公司的领导下，由中国电力出版社组织电力企业的资深专家、电力院校的知名教授、高级培训师，成立了全国电力继续教育规划教材编委会，启动了2010—2020年全国电力继续教育规划教材建设工作。通过统筹规划、专题研讨、集思广益、交流合作，经过两年时间的努力，完成了本套教材的编写工作。本套教材主要有以下特点：

（1）在内容设计上，以尽快培养宽口径复合型、技能型人才为原则，以使受训者拓宽、加深专业知识，了解技术与管理中的前沿内容，提升企业管理理念和技能；以专业理论为基础，国家专业技术规程、规范、标准为依据。涵盖电力专业技术、企业管理与执行、企业文化与团队建设、企业安全管理与监控等内容；突出新技术、新设备、新工艺、新方法，采用来自生产现场的第一手资料，并以理论与实践1:1的构架，形成了完整独特的培训教材体系。

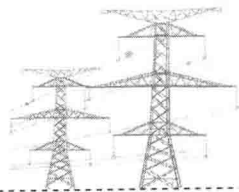
（2）在编写方式上，坚持少而精的原则，立足当前，着眼未来，内容的取舍取决于高技术技能型人才培养现在与未来的实际需求。做到结构清晰、重点突出，语言精炼、术语规范和标准化。教材以章节进行划分，每节按内容的走向分段落，每个段落形成一个版块，包括教学目标、任务准备、操作过程、技术标准、安全防范等环节，以便实现“教、学、做”一体化的传授模式。

（3）在传授的特点上，本套教材具有知识的系统性、连贯性、针对性；机能的实用性和可操作性等，由浅入深，从理论到实际地进行叙述，因此是电力企业高技术技能型人才继续教育、转岗、轮岗和新入职大学毕业生上岗培训首选的教科书，也是非电类专业优选的课外读物，是在职员工拓展专业知识、提升专业技术水平中具有指导性的培训教材，也是管理者继续教育不可缺少的参考资料。

本套教材的出版是贯彻落实国家人才队伍建设总体战略，实现电力企业高端管理和技能型人才培养的重要举措；是加快电力企业培训改革创新，全面提高培训质量的具体实践，必将对电力“一强三优”“一特四大”“三集五大”步伐起到积极的推动作用。

希望读者在使用这套教材的同时，能将教材中出现的不足和问题反馈给我们，以便进行完善和修订。

全国电力继续教育规划教材编委会



前 言

《变电运行（高压类）》是按照全国电力继续教育规划教材的八条指导原则进行编写的，教材体现了“一比例、二结合、三特性和四创新”的原则，即理论知识和实践内容上的比例为1:1；编写工作采取了校企结合，执行双主编制；教材充分体现了理论和实际相结合；在编写的过程中要做到有针对性、可操作性和最大限度地保证其实用性；在教材的内容结构上体现了新技术、新设备、新工艺和新方法。

本书共十七章，其内容有基础知识、变压器、互感器、断路器、隔离开关、母线及接线方式、无功补偿装置、消弧线圈、过电压、站用电系统、典型保护配置、自动装置、五防系统、设备巡视、倒闸操作、事故处理和设备验收。

本书由全国电力继续教育规划教材编委会组织编写，由电力系统部分培训单位和部分电力企业生产单位承担具体编写任务。其中第一章基础知识、第五章隔离开关、第六章母线及接线方式、第十章站用电系统由王永清编写；第二章变压器由李洪波、张全元编写；第三章互感器由寇太明编写；第四章断路器由赵连政编写；第七章无功补偿装置由李广渊编写；第八章消弧线圈、第十五章倒闸操作由付连杰、张希成编写；第九章过电压及限制措施、第十四章设备巡视、第十七章电气设备验收由张全元编写；第十一章典型保护配置由张希成编写；第十二章自动装置、第十三章“五防”系统由陈元建编写；第十六章事故处理由张全元、张希成编写。全书由湖北省电力公司检修分公司张全元统稿；其他编者参与了部分内容的编写。

本书最大的特点是专业内容理论简明、扼要，实际操作部分针对性强，所有操作项目紧密围绕现场实际。本书不仅是新入职员工、转岗人员岗前培训教材，也是在职变电运行人员培训作业指导书。该书实用性强，通俗易懂，是变电运行技能培训理想的教材，同时还可作为电力工程类的大专院校现场技能学习的参考书。

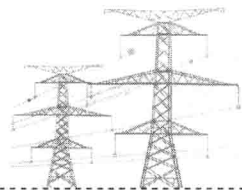
本书在编写过程中，得到了湖北省电力公司检修分公司、黑龙江省技能培训中心齐齐哈尔分部、冀北电力有限公司管理培训中心、辽宁省电力公司大连培训中心、冀北电力有限公司检修分公司、冀北电力有限公司廊坊供电公司、冀北电力有限公司承德供电公司的大力支持，在此一并表示衷心的感谢！

在编写本书时，参考了大量的相关书籍，在此对原作者表示深深的谢意！

由于编写经验和理论水平所限，书中难免出现错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2013年8月



目 录

出版说明

前言

| | |
|-------------------------------|-----|
| 第一章 基础知识 | 1 |
| 第一节 电力系统的发展 | 1 |
| 第二节 电力系统中性点的运行方式 | 4 |
| 第三节 电力系统事故 | 9 |
| 第四节 电能质量的调整及经济运行 | 17 |
| 第二章 变压器 | 23 |
| 第一节 基础知识 | 23 |
| 第二节 基本结构 | 36 |
| 第三节 干式变压器 | 57 |
| 第四节 接地变压器 | 62 |
| 第五节 运行维护 | 66 |
| 第三章 互感器 | 73 |
| 第一节 互感器的基础知识 | 73 |
| 第二节 电流互感器 | 74 |
| 第三节 电压互感器 | 85 |
| 第四节 运行注意事项 | 98 |
| 第四章 断路器 | 103 |
| 第一节 断路器的基础知识 | 103 |
| 第二节 断路器的结构 | 106 |
| 第三节 SF ₆ 断路器 | 109 |
| 第四节 瓷柱式断路器 | 113 |
| 第五节 GIS 组合电器 | 115 |
| 第六节 PASS | 121 |
| 第七节 真空断路器 | 122 |
| 第八节 断路器的操动机构 | 126 |
| 第九节 运行注意事项 | 134 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 第五章 隔离开关 | 137 |
| 第一节 基础知识..... | 137 |
| 第二节 结构..... | 139 |
| 第三节 运行注意事项..... | 144 |
| 第六章 母线及接线方式 | 147 |
| 第一节 变电站母线的基本知识..... | 147 |
| 第二节 一次主接线及运行方式..... | 154 |
| 第七章 无功补偿 | 158 |
| 第一节 基础知识..... | 158 |
| 第二节 电容器..... | 161 |
| 第三节 电容器、电抗器运行注意事项..... | 167 |
| 第八章 消弧线圈 | 171 |
| 第一节 基础知识..... | 171 |
| 第二节 消弧线圈结构..... | 173 |
| 第三节 运行注意事项..... | 175 |
| 第九章 过电压及限制措施 | 178 |
| 第一节 过电压基础知识..... | 178 |
| 第二节 变电站防过电压措施..... | 185 |
| 第三节 变电站接地装置..... | 192 |
| 第四节 氧化锌避雷器的运行维护..... | 197 |
| 第十章 站用电系统 | 198 |
| 第一节 站用交流系统..... | 198 |
| 第二节 直流系统..... | 200 |
| 第三节 站用交直流一体化电源系统..... | 205 |
| 第四节 直流系统运行与维护..... | 213 |
| 第十一章 典型保护配置 | 219 |
| 第一节 220kV 输电线路保护配置 | 219 |
| 第二节 母线保护配置..... | 229 |
| 第三节 变压器保护配置..... | 239 |
| 第四节 断路器保护配置..... | 249 |
| 第五节 电容器保护配置..... | 253 |
| 第六节 站用变压器保护配置..... | 258 |
| 第十二章 自动装置 | 261 |
| 第一节 故障录波器..... | 261 |
| 第二节 安全稳定控制装置..... | 267 |
| 第三节 备自投装置..... | 274 |
| 第四节 同期装置..... | 276 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 第十三章 “五防”系统 | 279 |
| 第一节 常规防误闭锁装置 | 279 |
| 第二节 微机防误闭锁装置 | 282 |
| 第三节 防误闭锁装置的运行管理 | 286 |
| 第十四章 设备巡视 | 289 |
| 第一节 设备巡视规定 | 289 |
| 第二节 设备巡视项目 | 291 |
| 第十五章 倒闸操作 | 311 |
| 第一节 基本知识 | 311 |
| 第二节 变电站倒闸操作 | 318 |
| 第十六章 事故处理 | 332 |
| 第一节 事故处理的原则 | 333 |
| 第二节 变电站典型案例分析 | 348 |
| 第十七章 电气设备验收 | 371 |
| 第一节 电气设备验收的规定 | 371 |
| 第二节 新设备验收 | 372 |
| 第三节 设备检修后验收 | 382 |
| 参考文献 | 393 |

第一章 基础知识

第一节 电力系统的发展

一、电力系统的构成及功能

在电力生产中，发电厂把其他形式的能量转换为电能，电能经过变压器和不同电压等级的输电线路被输送并分配给用户，再通过各种用电设备转换成适合用户需要的其他形式的能。这种由生产、输送、分配和使用电能的各种电气设备连接在一起而组成的整体，称为电力系统。如果把火电厂的汽轮机、锅炉、供热系统和热用户，水电厂的水轮机和水库，核电厂的反应堆和汽轮机等动力部分也包括进来，就称为动力系统。电力系统中输送和分配电能的部分称为电力网，它包括升降压变压器、换流站和各种电压等级的交直流输电线路。由输电线路和连接这些电力线路的变电站所组成的统一体，称为输电网，它的作用是将发电厂的电能送往负荷中心。由配电线路和配电站组成的统一体，称为配电网，它的作用是将负荷中心的电能分配到各配电站后，再将电能送往各用户。根据电压等级的高低，电力网分为特高压输电网、超高压输电网、高压输电网和配电网，其电压等级的划分情况如表 1-1 所示。

表 1-1 电力网电压等级的划分情况

| 输电网 | 电压等级 (kV) | 配电网 | 电压等级 (kV) |
|-------|-----------------------|------|------------|
| 特高压输电 | 1000、±800、±1100 | 高压配电 | 35、63 (66) |
| 超高压输电 | 330、500、750、±500、±600 | 中压配电 | 3、6、10、20 |
| 高压输电 | 110、220 | 低压配电 | 0.38、0.22 |

电力系统中各类设备之间的连接状况，可以用电力系统接线图来表示，如图 1-1 所示。图 1-1 同时表明了动力系统、电力系统和电力网三者之间的关系。

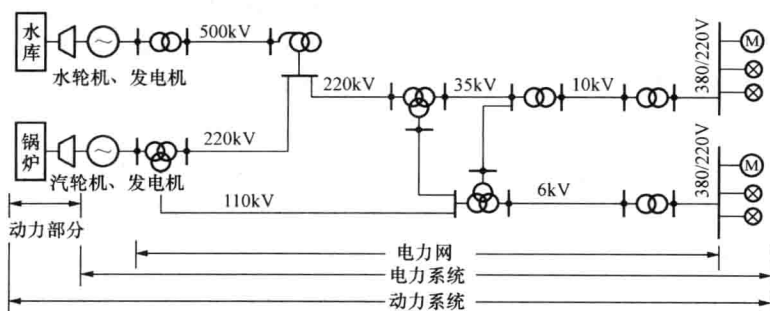


图 1-1 动力系统、电力系统和电力网

二、电网发展的特点

我国电网经历了省级电网、区域电网、区域电网互联并初步形成全国互联电网三个阶

段。随着用电量不断增长，大型水电、火电和核电等的建设，地区间电源与负荷的不平衡以及经济调度的需要，必须加快电网建设、扩大电网规模，电网电压等级也随之逐步提高，从最初较低的6~10kV经历35、110（66）kV和220kV，发展到超高压的330、500kV和750kV，直至目前的交流1000kV、直流±800kV特高压。变电站也实现了从多人值守—少人值守—无人值守，智能电网的建设，对运行人员提出了更高的要求。

我国目前发展的智能电网，是以坚强网架为基础，以信息通信平台为支撑，以智能控制为手段，实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合。智能的基本特征是能够实现信息化、数字化、自动化和互动化。目前，我国大电网安全运行控制能力和调度技术装备水平居于国际领先地位；形成了以光纤通信为主，微波、载波等多种通信方式并存的通信网络格局，以SG186工程为代表的国家电网信息系统建设取得阶段性成果。

未来电网将朝着以交流特高压为骨干网架、各级电网协调发展、强交强直、智能化的方向发展。

随着自动化程度的提高，现代大电网呈现出以下特点：①主网架电压等级越来越高；②各电网之间联系较强；③电压等级简化和供电电压提高；④具有足够的调峰、调频、调压容量，能实现自动发电控制（AGC）；⑤具有较高的供电可靠性；⑥具有相应的安全稳定控制系统；⑦具有高度自动化的监控系统和电量自动计量系统；⑧具有高度现代化的通信系统；⑨具有适应电力市场运营的技术支持系统；⑩有利于各种能源的合理利用；⑪具有高素质的职工队伍。

三、变电站的作用

变电站是电力系统中变换电压、接受和分配电能、控制电力的流向和调整电压的电力设施，它通过其变压器将各级电压的电网联系起来，在电力系统中，变电站是输电和配电的集结点。变电站的分类如下所述。

1. 按照变电站在电力系统中的地位和作用划分

（1）系统枢纽变电站。枢纽变电站位于电力系统的枢纽点，它的电压等级通常是系统最高输电电压，目前电压等级有220、330、500kV和1000kV，枢纽变电站连成环网，全站停电后，将引起系统解列，甚至整个系统瘫痪，因此对枢纽变电站的可靠性要求较高。枢纽变电站的主变压器容量大，供电范围广。

（2）地区一次变电站。地区一次变电站位于地区网络的枢纽点，是与输电主网相连的地区受电端变电站，任务是直接从主网受电，向本供电区域供电。全站停电后，可引起地区电网瓦解，影响整个区域供电。地区一次变电站的主变压器容量较大，出线回路数较多，对供电的可靠性要求也比较高。

（3）地区二次变电站。地区二次变电站由地区一次变电站受电，直接向本地区负荷供电，供电范围小，主变压器的容量与台数根据电力负荷而定。全站停电后，只有本地区中断供电。

（4）终端变电站。终端变电站在输电线路终端，接近负荷点，经降压后直接向用户供电，全站停电后，只是终端用户停电。

2. 按照变电站安装位置划分

（1）室外变电站。室外变电站除控制、直流电源等设备放在室内，变压器、断路器、隔离开关等主要设备均布置在室外。这种变电站建筑面积小，建设费用低，电压等级较高的变

电站一般采用室外布置。

(2) 室内变电站。室内变电站的主要设备均放在室内，减少了总占地面积，但建筑费用较高，适宜市区居民密集地区，或位于海岸、盐湖、化工厂及其他空气污秽等级较高的地区。

(3) 地下变电站。在人口和工业高度集中的大城市，由于城市用电量，建筑物密集，将变电站设置在城市大建筑物、道路、公园的地下，可以减少占地面积，尤其随着城市电网改造的发展，位于城区的变电站乃至大型枢纽变电站将更多地采用地下变电站。这种变电站多数为无人值班变电站。

3. 按照值班方式划分

(1) 有人值班变电站。大容量、重要的变电站大都采用有人值班变电站。

(2) 无人值班变电站。无人值班变电站的测量监视与控制操作都由调度中心进行遥测、遥控，变电站内不设值班人员。

4. 根据变压器的使用功能划分

(1) 升压变电站。升压变电站是把低电压变为高电压的变电站，例如在发电厂需要将发电机出口电压升高至系统电压，就是升压变电站。

(2) 降压变电站。与升压变电站相反，降压变电站是把高电压变为低电压的变电站。在电力系统中，大多数的变电站是降压变电站。

四、集控站

集控站是电网运行的重要部分。集控站系统建立在调度系统与变电站之间，对多个无人值班变电站进行集中监视和控制；它在局部电网的层次上，对所辖变电站进行更高层次的综合控制和管理。除远程 SCADA 功能外，它能利用集中起来的各种细节信息进行决策、分析、处理，擅长处理细节问题，是地区调度自动化系统的前级智能信息处理节点。

随着技术的进步和人员素质的提升，集控站运行模式将向调控一体化方向发展。所谓“调控一体化”，即采取电网调度监控中心和运维操作站的管理模式，电网调度与变电监控一体化设置。调度监控中心主要承担电网调度、变电站监控及遥控操作等职责；运维操作站主要负责调度指令的分解、变电站倒闸操作、运行巡视等站内工作，两者各司其职又紧密配合。

五、电磁环网的基本概念及特点

两条或两条以上不同电压等级的输电线路，通过变压器的磁回路或电与磁的回路连接而构成的环网，叫做电磁环网。

电磁环网对电网运行主要有以下弊端：

(1) 易造成系统热稳定破坏。如果在主要的受端负荷中心，用高低压电磁环网供电而又带重负荷时，当高一级电压线路断开后，所有原来带的全部负荷将通过低一级电压线路（虽然可能不止一回）送出，容易出现超过导线热稳定电流的问题。

(2) 易造成系统动稳定破坏。正常情况下，两侧系统间的联络阻抗将略小于高压线路的阻抗。而一旦高压线路因故障断开，系统间的联络阻抗将突然显著地增大（突变为两端变压器阻抗与低压线路阻抗之和，而线路阻抗的标么值又与运行电压的平方成正比），因而极易超过该联络线的暂态稳定极限，可能发生系统振荡。

(3) 不利于经济运行。电磁环网的两个电压等级线路的自然功率值相差极大，同时电压

高的线路的电阻值也远小于电压低的线路的电阻值。在环网运行情况下，许多系统的潮流分配难于达到最经济。

(4) 需要装设高压线路因故障停运后联锁切机、切负荷等安全自动装置。实践说明，安全自动装置本身拒动、误动将影响电网的安全运行。

一般情况下，往往在高一级电压线路投入运行初期，由于高一级电压网络尚未形成或网络尚不坚强，需要保证输电能力或为保重要负荷而又不得不电磁环网运行。随着网络的逐渐坚强，电网将逐渐实行解环运行。

第二节 电力系统中性点的运行方式

电力系统中性点是指三相绕组作星形连接的变压器和发电机的中性点。电力系统中性点与大地间的电气连接方式，称为电力系统中性点接地方式（或中性点运行方式）。

中性点接地方式可划分为两大类：一类为大电流接地方式，包括中性点直接接地和中性点经低阻接地；另一类为小电流接地方式，包括中性点不接地、经高阻接地、经消弧线圈接地。

一、中性点不接地系统

1. 正常运行情况

中性点不接地又叫做中性点对地绝缘。在中性点不接地系统中，中性点对地的电位是不固定的，在不同的情况下，它可能具有不同的数值。中性点对地的电位偏移称为中性点位移。

电力系统正常运行时，三相导线之间和各相导线对地之间，沿导线的全长存在分布电容，各相导线间的电容及其所引起的电容电流较小，故可以不予考虑。各相导线对地之间的分布电容，分别用集中的等效电容 C_A 、 C_B 、 C_C 表示，如图 1-2 (a) 所示。电力系统正常运行时，若三相导线经过完全换位，一般认为三相系统是对称的，则各相的对地电容相等，即三相电路对称，中性点没有位移，电位为零。各相的对地电压分别为电源各相的相电压，各相对地电容电流的有效值也相等，即

$$I_{CA} = I_{CB} = I_{CC} = \omega C U_{ph} \quad (1-1)$$

式中， U_{ph} 为电源的相电压； ω 为角频率； C 为相对地电容。

在对称电压的作用下，各相的对地电容电流大小相等、相位相差 120° ，如图 1-2 (b) 所示。各相对地电容电流的相量和为零，所以大地中没有电容电流流过。此时，各相电流为各相负荷电流与相对应的对地电容电流的相量和，如图 1-2 (c) 所示，图中仅画出 A 相的情况。

2. 单相接地故障

中性点不接地的电力系统中，当由于某种原因发生单相接地故障时，情况将发生明显变化。如图 1-3 所示，当 A 相发生完全接地，接地处的电阻等于零时，故障相的对地电压降为零。中性点对地电压与接地相的相电压大小相等、方向相反，中性点对地的电压由零升高为相电压，非故障相的对地电压由相电压升高到线电压，即为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，其相位差由 120° 变为 60° ；线间电压保持不变。

当 A 相发生完全接地故障时，该相对地电容被短接，A 相对地电容电流为零，由于非

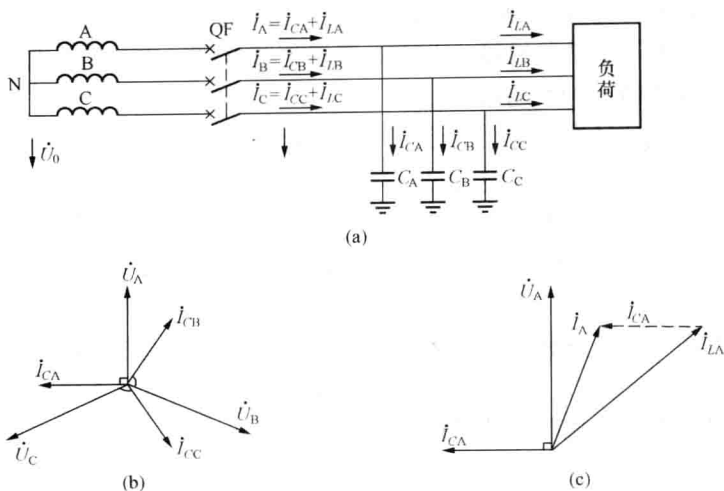


图 1-2 中性点不接地系统正常运行情况

(a) 电路图；(b)、(c) 相量图

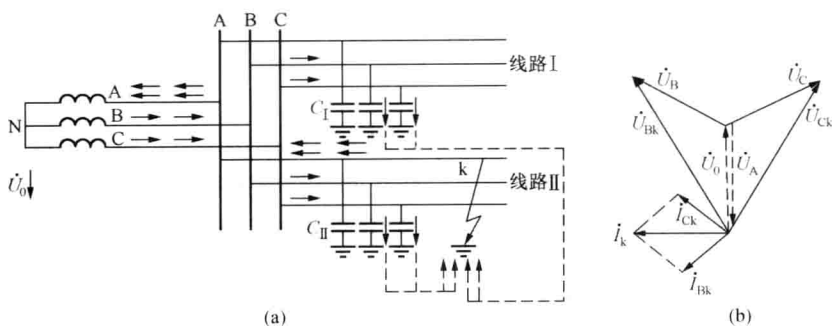


图 1-3 中性点不接地系统发生单相接地时电容电流的分布和相量图

(a) 单相接地时电容电流的分布；(b) 相量图

故障 B、C 两相对地电压升高为线电压，则非故障相对地的电容电流也相应增大 $\sqrt{3}$ 倍，分别超前相应的相对地电压 90° ，此时三相对地电容电流之和不为零，大地中有电容电流流过，并通过接地点形成回路。流过接地点的电流为所有线路（包括故障线路和非故障线路）的接地电容电流总和，并超前零序电压 90° 。短路点接地电流的有效值为

$$I_k = I_{C\Sigma} = 3\omega(C_I + C_{II})U_{ph} \quad (1-2)$$

式中， U_{ph} 为电源的相电压； ω 为角频率； C_I 、 C_{II} 分别为线路 I 和线路 II 的相对地电容。

以上分析的是完全接地时的情况。当发生不完全接地时，接地电阻不为零，故障相对地电压大于零而小于相电压，非故障相的对地电压大于相电压而小于线电压，中性点电压大于零而小于相电压，线电压仍保持不变，此时的接地电流要比完全接地时小一些。

由于发生完全接地时，非故障相对地电压升高为线电压，因此，电力系统的绝缘水平需要按线电压考虑，从而增加了投资。

单相接地故障时，由于线电压保持不变，对接于线电压的用电设备的工作并无影响，用户可继续运行，提高了供电可靠性。理论上长期带单相接地故障运行不会危及电网绝缘，实

实际上是不允许过分长期带单相接地运行的，为了防止事故扩大，在绝缘监察装置发出信号后，运行人员应尽快查清并消除故障，并重点监视消弧线圈、电压互感器、避雷器等设备，一般允许带一点接地故障运行不超过 2h。

单相接地时，在接地处有接地电流流过，会引起电弧，此电弧的强弱与接地电流的大小成正比。当接地电流不大时，交流电流过零时电弧将自行熄灭，接地故障随之消失，电网即可恢复正常运行；当接地电流超过一定值时，如：10kV 电网中接地电流大于 30A，将会产生稳定的电弧，形成持续的电弧接地，高温的电弧可能损坏设备，甚至可能导致相间短路；接地电流小于 30A 而大于 5~10A 时，有可能产生一种周期性熄灭与复燃的间歇性电弧，间歇电弧将可能使电网中的电感和电容形成振荡回路而产生弧光过电压，从而危及电气设备绝缘。当接地电流超过规定值时，通常采用中性点经消弧线圈接地或直接接地的运行方式。

二、中性点经消弧线圈或高阻抗接地系统

中性点不接地系统，具有单相接地故障时可继续给用户供电的优点，即供电可靠性比较高，但当接地电流较大时电弧不能自行熄灭，则将造成危害。为了克服这一缺点，3~63 (66)kV 系统中，当单相接地故障电流超过规定值时，应采取减小接地点的接地电流。这时可采用中性点经消弧线圈接地的方式，在发生单相接地故障时，接地处流过一个与容性接地电流相反的感性电流，即消弧线圈对接地电流起补偿作用，使接地点处的电弧能自行熄灭。

1. 消弧线圈的工作原理

消弧线圈，其实就是一个电抗线圈。中性点经消弧线圈接地后，能有效地减小单相接地故障时接地处的电流，迅速熄灭接地处电弧，防止间歇性电弧接地时所产生的过电压，所以广泛应用于电压为 3~63 (66) kV 系统。一般规定在单相接地电流超过下列数值时，中性点应装设消弧线圈：

| | |
|------------------|--------|
| 3~6kV 系统 | 30A 以上 |
| 10kV 系统 | 20A 以上 |
| 35~63 (66) kV 系统 | 10A 以上 |

图 1-4 所示为中性点经消弧线圈接地系统，正常时，中性点的对地电压为零，消弧线圈中没有电流流过；当系统发生单相接地故障时，如 A 相发生完全接地时，中性点对地电压值为相电压，消弧线圈在中性点电压的作用下，有一个电感电流 I_L 通过，此电流通过接地点形成回路，所以接地点的电流为电容电流 I_C 与电感电流 I_L 的相量和，如图 1-4 (a) 所示。电容电流 I_C 超前零序电压 90° ，电感电流 I_L 滞后零序电压 90° ，两者的方向相反，如图 1-4 (b) 所示，在接地处互相抵消，称为电感电流对电容电流的补偿。因此，接地点的电流比电网接地电容电流的总和要小得多，消弧线圈起到了补偿作用，接地点的电流被称为残余电流。所以，只要适当选择消弧线圈的匝数，就可使接地点的电流变得很小，从而消除了接地处的电弧以及由它所产生的危害。

中性点经消弧线圈接地的系统和中性点不接地的系统一样，发生单相完全接地时，全系统接地相对地电压为零，未故障相的对地电压升高为线电压。

2. 消弧线圈的补偿方式

用补偿度（也称调谐度） $k = \frac{I_L}{I_C}$ 或脱谐度 $v = 1 - k = \frac{I_C - I_L}{I_C}$ 表明单相接地故障时消弧线

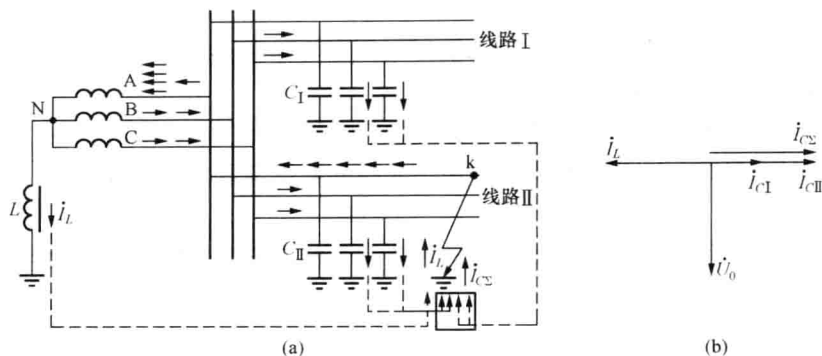


图 1-4 经消弧线圈接地系统单相接地时电容电流的分布和相量图

(a) 单相接地时电容电流的分布; (b) 相量图

圈的电感电流 I_L 对接地电流 I_C 的补偿程度。根据电感电流对接地电流的补偿程度不同，有全补偿、欠补偿和过补偿三种补偿方式。

(1) 全补偿。全补偿是使电感电流的大小等于接地电容电流，即 $I_L = I_C$ ，亦即 $1/\omega L = 3\omega C$ ，接地处电流为零。从消弧角度来看，完全补偿方式十分理想，但实际上却存在着严重问题。因为正常运行时，在某些条件下，如线路三相对地电容不完全相等或断路器三相触头合闸时同期性差等，在中性点与地之间会出现一定的电压，此电压作用在消弧线圈通过大地与三相对地电容构成的串联回路中，因此时感抗 X_L 与容抗 X_C 相等，满足谐振条件，形成串联谐振，产生谐振过电压，危及系统的绝缘，因此，在实际中通常不采用完全补偿方式。

(2) 欠补偿。欠补偿是使电感电流的大小小于接地的电容电流，即 $I_L < I_C$ ，亦即 $1/\omega L < 3\omega C$ ，系统发生单相接地故障时接地点还有容性的未被补偿的电流 $(I_C - I_L)$ 。在这种方式下运行时，若部分线路停电检修或系统频率降低等原因都会使接地电流 I_C 减少，又可能出现全补偿的情形，产生满足谐振的条件，变为全补偿。因此，装在变压器中性点的消弧线圈一般不采用欠补偿方式。

(3) 过补偿。过补偿是使电感电流的大小大于接地的电容电流，即 $I_L > I_C$ ，亦即 $1/\omega L > 3\omega C$ ，系统发生单相接地故障时接地点还有过剩的感性电流 $(I_L - I_C)$ 。这种补偿方式没有上述缺点，因为当接地电流减小时，感性的补偿电流与容性接地电流之差更大，不会出现完全补偿的情形，即使将来电网发展使电容电流增加，由于消弧线圈选择时还留有一定的裕度，可以继续使用，故过补偿方式得到广泛应用。

消弧线圈一般采用过补偿方式，脱谐度通常为 $5\% \sim 20\%$ 。与中性点不接地系统一样，中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时，允许运行不超过 2h。

在正常运行时，如果中性点的位移电压过高，即使采用了消弧线圈，在发生单相接地时，接地电弧也难以熄灭。因此，要求中性点经消弧线圈接地的系统，在正常运行时其中性点的位移电压不应超过额定相电压的 15% ，接地点的最大残流值不能超过 5A，否则接地处的电弧不能自行熄灭。

3. 中性点经消弧线圈接地系统的特点

(1) 发生单相接地时，消弧线圈产生的电感电流补偿接地而形成的电容电流，使接地电

流减小。

(2) 在有消弧线圈补偿后, 熄弧后的恢复电压要经过许多工频周期才会上升到最大值, 使得故障相接地电弧两端的恢复电压速度降低。

(3) 由于电感电流的滞后性, 使得电弧间歇接地过电压仍然会短时存在。

(4) 电网的参数随时变化, 如果调整消弧线圈的补偿容量响应速度较慢, 仍然会造成过电压的出现。

(5) 对全电缆出线的配电变电站, 接地故障通常都为永久性故障, 中性点安装消弧线圈已失去意义。

4. 经高阻抗接地方式

为了消除中性点经消弧线圈接地系统的缺陷, 可采用中性点经阻抗接地方式; 当接地电流大于规定值时, 采用低电阻接地方式; 当接地电容电流小于规定值时, 采用高电阻接地方式。

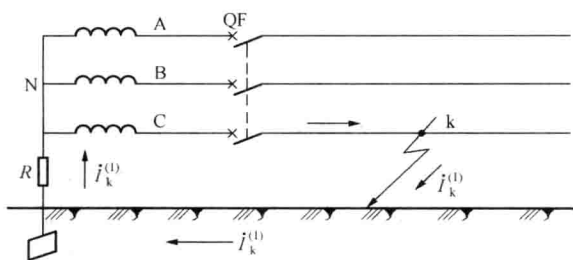


图 1-5 中性点经低电阻接地原理接线

以电缆为主体的 35、10kV 城市配电网, 可采用低电阻接地方式, 其原理接线如图 1-5 所示。所接的接地电阻的大小必须根据电网的具体情况, 综合考虑限制过电压倍数、继电保护的灵敏度、对通信的影响、人身安全等因素。

发电机—变压器组单元接线的 200MW 及以上发电机, 当接地电流超过允许值

时, 常采用中性点经接地变压器接地。通过二次侧接有电阻的接地变压器接地, 实际上就是经高电阻接地, 其原理接线如图 1-6 所示。发电机中性点经高电阻接地后, 可达到: ①限制过电压不超过 2.6 倍额定相电压; ②限制接地故障电流不超过 10~15A; ③为定子接地保护提供电源, 便于检测。

较小城市的配电网一般以架空线路为主, 除采用中性点经消弧线圈接地方式外, 还可考虑采用经高阻抗接地方式 (单相接地时不跳闸, 可以继续运行较长时间), 以降低设备投资、简化运行工作并维持适当的供电可靠性。

三、中性点直接接地或经小电阻接地系统

随着电力系统输电电压等级的增高和输电距离的不断增长, 单相接地电流也随之增大, 中性点不接地或经消弧线圈接地的运行方式已不能满足电力系统正常、安全、经济运行的要求。为了解决高压电网发生单相接地时电弧不能熄灭的问题, 目前我国 110kV 及以上的系统广泛采用中性点直接接地的运行方式。

中性点直接接地时, 中性点与大地之间的电位相同, 发生单相短路时, 故障相的对地电

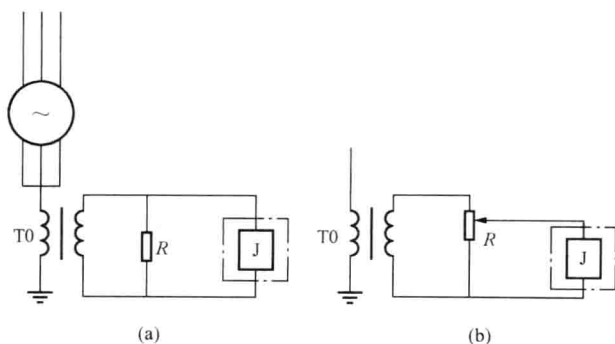


图 1-6 中性点经高电阻接地的三相系统
(a) 原理接线; (b) 电阻中增加分压抽头接线