

超超临界火电机组丛书

电气设备与运行

主编 宋志明 李洪战

新 机组
新 材料
新 工艺
新 技术



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

超超临界火电机组丛书

电气设备与运行

主 编 宋 志 明 李洪战
副 主 编 霍 永 红
参 主 编 方 红 红
主 审 孟 强



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



本书是《超超临界火电机组丛书》的《电气设备与运行》分册。书中详细介绍了1000MW火力发电机组的发电机、变压器、高压开关电器、封闭母线、互感器、电气主接线和厂用电接线、配电装置、直流系统、继电保护以及自动装置的结构、性能、运行、维护等内容。

全书共11章，主要内容有：电力系统概述、1000MW同步发电机及其辅助系统、1000MW同步发电机的励磁系统、1000MW同步发电机的正常运行与维护、1000MW发电机的非额定运行与事故处理、电力变压器及运行、电气设备及系统、1000MW发电机—变压器组保护、1000MW发电机保护定值参数、变压器保护、自动装置等。

本书适合从事1000MW级超超临界及超临界火力发电机组的设计、安装、调试、运行、检修及管理工作的工程技术人员阅读，可作为发电厂生产人员的培训教材，也可供相关专业的人员及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气设备与运行/宋志明,李洪战主编. —北京:中国电力出版社,2008

(超超临界火电机组丛书)

ISBN 978-7-5083-6204-5

I. 电… II. ①宋…②李… III. 热电厂-电气设备-运行 IV. TM621.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第161086号

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008年2月第一版 2008年2月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 30.25印张 743千字

印数0001—3000册 定价60.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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

序

能源是人类经济发展、生活水平提高、文明进步的基础。人类通过对能源的大规模的利用，满足了社会不断发展和生活水平不断提高的需要。但能源利用过程中排放的污染物（粉尘、二氧化硫、氧化氮，碳氢化合物、微颗粒、温室气体等）也正在急剧破坏着地球的生态平衡和人类自身的生存环境。

目前，我国电力工业正向建设高效、节能、环保的能源洁净利用方式飞速发展，对煤炭的高效清洁利用的需求尤为突出，超超临界机组是实现高效大规模清洁利用煤炭的最重要手段之一。

目前，我国已有数台 1000MW 级超超临界机组正式投产，全国还有大量的 1000MW 级超超临界锅炉正在建设和筹建中。与成熟的亚临界电站锅炉相比，1000MW 级超超临界锅炉的初步运行已经出现了一些新现象和新问题，对机组的设计、运行优化、控制监测及污染防治都提出了新的更高的要求。因此，迫切需要与现场经验紧密结合，进行相关的研究归纳，为 1000MW 级超超临界锅炉的设计和运行优化提供理论和技术支持。

为帮助火电技术人员尽快掌握世界一流的超超临界发电技术，实现超超临界发电机组设计和制造国产化，提高火电制造业的国际竞争力，保证电力工业节能降耗和清洁生产，山东省电力学校与华电国际邹县发电厂合作，组织编写了《超超临界火电机组丛书》，为 1000MW 级超超临界火电机组的设计、制造、运行提供了有益的参考，对我国电力工业的可持续发展作出了重要贡献。

丛书紧密结合现场实际，内容翔实、数据充分，既可供高校师生和工程技术人员参考，也可为发电企业机组运行水平的提高提供有益帮助。因此，本丛书的出版发行，将为我国电力工业向超超临界大容量、高参数、高效节能、环境友好的新一代发电方式的前进发挥有益的推进作用。

于浙大求是园

于浙大求是园

2007 年 4 月 20 日

前言

目前,火电机组已向大容量、高参数、高效率的超超临界机组发展。超超临界发电技术是在超临界发电技术基础上发展起来的一种成熟、先进、高效的发电技术,可以大幅度提高机组的热效率,在国际上已经是商业化的成熟发电技术,在可用率、可靠性、运行灵活性和机组寿命等方面可以和亚临界机组相媲美。近十几年来,世界上许多发达国家都在积极开发和应用超超临界参数发电机组。随着超超临界火电机组的国产化,我国在今后新增的火电装机容量结构中必将大力发展超超临界火电机组。超超临界发电技术是我国电力工业升级换代,缩小与发达国家技术与装备差距的新一代技术。超超临界发电技术的发展,还将带动制造业、材料工业、环保工业和其他相关产业的发展,创造新的经济增长点,是电力工业可持续发展的战略选择。表 0-1 列出了超超临界发电机组和常规发电机组在热效率提高的幅度、燃料节约量、温室气体排放量减少方面的数据对比。从表 0-1 可知,超超临界发电机组具有无可比拟的优越性。

表 0-1 超超临界发电机组和常规发电机组节能和减排潜力的对比

1000MW 机组容量		常规对比机组	第一阶段	第二阶段	第三阶段
蒸汽 条件	压力 (MPa)	24.1	31.4	30.0	34.3
	温度 (°C)	538/566	593/593/593	630/630	649/593/593
热效率增加值 (%)		基准值	5.0	4.8	6.5
年节煤量 (t)		基准值	96000	95000	13400
CO ₂ 年减排量 (×10 ⁶ m ³)		基准值	117	112	152

发展超超临界机组,设计和制造还有许多关键技术问题有待解决,其中,开发热强度高、抗高温烟气氧化腐蚀和高温汽水介质腐蚀、可焊性和工艺性良好、价格低廉的材料是最关键的问题。在所选蒸汽参数下,应分析锅炉、汽轮机各部件所选用的材料、壁厚、用材量、造价、运行性能和技术经济;还应验证新材料的持久强度、蠕变强度、断裂韧性、低周疲劳特性、设计应用安全系数,热应力寿命损耗特性、工艺性等。

国内首批 1000MW 级超超临界火电机组引进技术国产化依托工程——华电国际邹县发电厂四期工程 2×1000MW 工程项目加快了 1000MW 级超超临界火电机组的国产化进程,全面提高了大型火电机组的设计、制造、运营水平。邹县发电厂的两台 1000MW 级超超临界燃煤凝汽式汽轮发电机组,是国内单机容量最大、运行参数最高的燃煤发电机组,被列为国家重点建设工程,其中 7 号机组从 2005 年 1 月 15 日开工建设至 2006 年 12 月 4 日投产发电仅用了 22 个月零 19 天。满负荷试运期间,7 号机组各项性能指标均达到优良标准,机组运行平稳,自动、保护、仪表投入率 100%,平均负荷率 100%。该机组的顺利投产,实现了“安全最好、质量最优、工期最短、造价最低”的工程建设目标。8 号机组将于 2007 年 7

月投产发电，届时邹县发电厂装机总容量将达到 4540MW，成为我国改革开放以来电力工业发展的窗口企业。

《超超临界火电机组丛书》的编写主要以华电国际邹县发电厂 1000MW 级超超临界机组的发电技术为主要内容，由山东省电力学校和华电国际邹县发电厂合作完成。《超超临界火电机组丛书》共分《锅炉设备与运行》《汽轮机设备与运行》《电气设备与运行》《热工自动化》四分册。《锅炉设备与运行》涵盖了 1000MW 级超超临界锅炉整体设计、燃烧系统、制粉系统、汽水系统、承压部件材料、焊接技术、除尘除灰设备、风烟系统、锅炉运行等内容；《汽轮机设备与运行》包括汽轮机本体、金属材料、热力系统及设备、凝汽设备及系统、主要水泵、汽轮机调节、保护及供油系统、辅助系统和汽轮机运行等内容；《电气设备与运行》主要包括同步发电机及其辅助系统、励磁系统、同步发电机的正常运行与维护、同步发电机的非正常运行与事故处理、电力变压器及运行、电气设备及系统、继电保护及运行、自动装置及运行等内容；《热工自动化》包括 1000MW 级超超临界机组控制系统硬件组成、1000MW 级超超临界机组控制与保护、现场总线技术在火电厂中的应用、1000MW 级超超临界机组仪表及执行机构、1000MW 级超超临界机组外围辅助车间控制等内容。

中国工程院院士岑可法教授高度关注《超超临界火电机组丛书》的出版发行，并欣然为之作序。

《超超临界火电机组丛书》由山东省电力学校校长张效胜、华电国际副总经理白桦（原邹县发电厂厂长）、邹县发电厂厂长李怀新出任编委会主任，由山东省电力学校副校长张伟和邹县发电厂副厂长李延群担任主编，其中《锅炉设备与运行》由山东省电力学校张磊、李广华主编，《汽轮机设备与运行》由山东省电力学校张磊、马明礼主编，《电气设备与运行》由山东省电力学校宋志明、李洪战主编，《热工自动化》由邹县发电厂张华、山东省电力学校孙奎明主编。全套丛书由山东省电力学校张磊统稿。

本丛书在编写过程中，中国东方电气集团公司、西北电力设计院、山东省电建一公司、山东省电建三公司、山东省电力研究院、山东省电力咨询院、中国电力科技网提供了大量的技术资料，给予了大力支持和热情帮助，在此表示诚挚的谢意。

由于水平所限，加之时间仓促，疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2007 年 6 月



本书前言

随着发电机组向大容量、高参数、高效率、低污染的超超临界机组的发展,中国电力工业也进入了大机组、大电厂、大电网、超高压、自动化和信息化的新时期。尽快掌握世界先进的超超临界发电技术,提高百万千瓦级超超临界发电机组的设计、制造、运行、维护及管理水平,成为电力工业相关生产人员、科研人员、管理人员及其他相关专业技术人员的迫切要求。在此背景下,我们以华电山东邹县发电厂 $2 \times 1000\text{MW}$ 发电机组相关资料以及机组安装、调试、运行、维护等过程的相关经验,编写了这本《超超临界火电机组丛书 电气设备与运行》。

本书以大量详实的技术资料为基础,紧密结合现场实际,经过精心归纳、整理和总结,全面介绍了 1000MW 火力发电机组的发电机、变压器、继电保护与自动装置以及其他电气设备和系统的性能、特点及运行维护知识,突出所涉内容的实效性、实用性,着重介绍了与该 1000MW 机组配套的新设备、新技术。全书逻辑性强,易于学习和掌握,是一本适合生产、科研、管理及其他工程技术人员使用的参考书。

本书由山东省电力学校高级讲师宋志明、李洪战主编,霍永红、方红担任副主编,山东源能热电公司马永参与编写。全书共分十一章,其中第一、六、七章由霍永红编写,第二、三、四章由李洪战编写,第五章由马永编写,第八、十一章由方红编写,第九、十章由宋志明编写。全书由李洪战统稿,由宋志明总统稿,霍永红、方红参与统稿,由华电邹县发电厂孟强担任主审。

本书编写过程中,得到了邹县发电厂李延群副厂长、孟强主任以及电气运行部方高原、翟保宏、刘国新、林西国等工程师的大力协助,并参阅了大量正式出版文献以及邹县发电厂、设备制造厂、西北电力设计院及电厂安装单位的大量技术资料,在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,且因时间紧迫,疏漏及错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2007年6月



目录

序

前言

本书前言

第一章 电力系统概述	1
第一节 电力系统的基本概念	1
第二节 电力系统的接线方式和额定电压	2
第三节 电力系统的中性点接地方式	5
第二章 同步发电机及其辅助系统	13
第一节 同步发电机的主要部件及主要参数	13
第二节 同步发电机的结构特点	17
第三节 同步发电机的冷却系统	28
第四节 同步发电机的密封油系统	43
第五节 同步发电机的运行监测与记录	50
第三章 同步发电机的励磁系统	54
第一节 励磁系统的作用与要求	54
第二节 几种典型的励磁方式	56
第三节 励磁调节器	60
第四节 电力系统稳定器 (PSS)	64
第五节 1000MW 发电机机端自并励励磁系统介绍	68
第四章 同步发电机的正常运行与维护	82
第一节 同步发电机的并网运行分析	82
第二节 同步发电机的安全运行极限	88
第三节 同步发电机的有功功率调节	91
第四节 同步发电机的励磁调节	94
第五节 发电机的启动与停机	98
第六节 同步发电机的运行维护与检修	105
第五章 发电机的非额定运行与事故处理	113
第一节 发电机的非额定运行	113
第二节 发电机的事故处理	127
第六章 电力变压器及运行	136
第一节 变压器概述	136
第二节 大型变压器的结构特点及性能	139

第三节	变压器的冷却系统·····	158
第四节	变压器的技术参数·····	162
第五节	变压器的正常运行与维护·····	167
第六节	变压器异常运行及事故处理·····	172
第七章	电气设备及系统 ·····	175
第一节	概述·····	175
第二节	高压断路器·····	179
第三节	高压隔离开关·····	195
第四节	封闭母线·····	200
第五节	互感器·····	205
第六节	电气主接线·····	220
第七节	厂用电接线·····	229
第八节	配电装置·····	254
第九节	直流系统·····	259
第八章	1000MW 发电机—变压器组保护 ·····	273
第一节	发电机—变压器组保护装置的配置要求·····	273
第二节	发电机—变压器组保护装置的主要功能·····	274
第三节	发电机—变压器组保护设置及出口动作方式·····	275
第四节	发电机保护动作与代号说明·····	278
第五节	发电机、变压器非电气量保护·····	282
第六节	发电机—变压器组保护运行·····	284
第九章	1000MW 发电机电气量保护定值参数 ·····	286
第一节	发电机差动保护·····	286
第二节	100%定子接地故障保护·····	290
第三节	失磁保护·····	299
第四节	发电机不对称过负荷保护（定时限负序保护 NPS-DT、 反时限负序保护 NPS-Inv）·····	307
第五节	过励磁保护·····	313
第六节	发电机过电压保护和定子匝间保护·····	319
第七节	逆功率和程序逆功率·····	327
第八节	发电机失步保护（滑极）·····	335
第九节	发电机低频率运行保护·····	343
第十节	突加电压保护·····	346
第十一节	TV 断线闭锁保护·····	349
第十二节	发电机转子接地保护·····	353
第十三节	发电机定子绕组对称过负荷保护·····	358
第十四节	发电机启停机保护·····	359
第十五节	发电机复合低电压过流（记忆）保护·····	365
第十章	变压器保护 ·····	369

第一节	变压器保护配置简介.....	369
第二节	变压器保护 RET521 保护功能与参数	380
第三节	RET521 装置对于电力变压器的电压控制	400
第四节	厂用电系统继电保护.....	412
第十一章	自动装置	415
第一节	自动同期装置.....	415
第二节	厂用电切换装置.....	431
第三节	故障录波装置.....	451
第四节	自动调节励磁装置参数整定.....	456
附录一	发电厂主要设备应遵循的主要现行标准.....	465
附录二	系统故障时对发电机 95%定子接地保护的影响	467
附图 1	邹县发电厂全厂主接线图	470
附图 2	邹县发电厂全厂厂用电接线图	471
参考文献		472

第一章 电力系统概述

第一节 电力系统的基本概念

一、电力系统与电力网

电力系统是指由发电厂、变电站、输配电线路和用户在电气上连接成的整体。在发电厂中将一次能源转换为电能（又称二次能源），发电厂生产的电能需要输送给电力用户。在向用户供电的过程中，为了提高供电的可靠性和经济性，通过升、降压变电站和输电线路，将多个发电厂用电力网连接起来并联工作，向用户供电。

如果将汽轮机、水轮机、锅炉、水库、核反应堆等这些发电厂的动力部分包括在内，则构成动力系统。电力系统是动力系统的一部分。

电力网是由电力系统中除发电机和用电设备以外的部分，即由升、降压变电站和不同电压等级的输电线路以及相关输配电设备连接在一起构成，是电力系统的骨架部分。图 1-1 表示了电力系统基本概念的示意图。

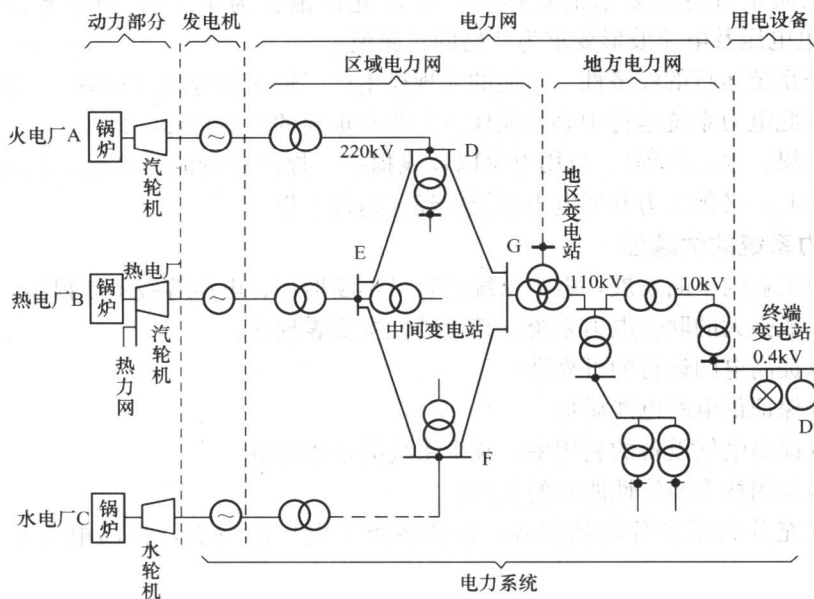


图 1-1 电力系统与电力网示意图

二、电能生产的特点

电能的生产与其他工业生产相比有着显著的特点。

1. 与国民经济各部门之间的密切联系性

由于电能的转换非常方便，且易于大量生产、集中管理、远距离输送和自动控制，因此在国民经济各领域应用广泛。电能供应的中断或不足，将直接影响各部门的生产、运行和人

民生活，这就要求电力系统的运行必须保证安全和具有足够的备用容量。

2. 电力系统电磁变化过程的瞬时性

电能的传播速度接近光速，电能从一处送到另一处所需的时间仅为千分之几秒甚至百万分之几秒。而短路过程、发电机稳定性的丧失，则在十分之几秒或几秒内发生，发电机、变压器、电力线路、电动机等元件的投入和退出都在一瞬间完成，也就是说电力系统从一种运行方式过渡到另一运行方式的过程非常短促。这就要求调整及切换速度非常迅速和灵敏，以防止短暂的过渡过程对电气设备产生危害，因此必须采用各种自动装置。

3. 电能的生产、输送、分配和使用的同时性

电能不能大量储存，在每一时刻，生产的电能和消费以及损耗的电能必须保持严格的平衡，电力系统的各个环节形成一个有机的整体，任一台发、供、用电设备发生故障，都将影响电能的生产 and 供应。

三、对电力系统运行的基本要求

根据以上这些特点，对电力系统运行的基本要求是：

(1) 保证对用户供电的可靠性。系统运行可靠性的破坏，将引起设备损坏或供电中断，以致造成国民经济各部门生产损失和人民生活受到影响，甚至发生设备和人身事故。

(2) 保证电能的良好质量。电压、频率和电压（电流）的波形是衡量电能质量的主要指标，正常运行中应保证各指标在允许的变化范围内。我国规定 10~35kV 及以上电压供电的用户和对电压质量有特殊要求的低压用户电压允许偏移为 $\pm 5\%$ ，频率允许偏差最大为 $\pm 0.5\text{Hz}$ ，供电电压及电流波形要求为严格的正弦波。

(3) 保证系统运行的经济性。电能的大规模生产、输送和分配过程中，一次能源的消耗相当可观，因此电力系统运行中必须抓住三个非常重要的经济指标，即每生产 1kWh 电能的能源消耗率（煤、水、油等）、自用电率以及线损率。提高运行的经济性，就是使上述指标达到最小。为此，必须大力开展电力系统的经济运行工作。

四、电力系统的优越性

随着电力工业的不断发展，电力系统的容量不断增加、电压等级不断提高、所跨的区域不断扩大，形成强大的联合电力系统。其优越性主要表现在：

(1) 可以提高电网运行的可靠性。

(2) 可以保证供电的电能质量。

(3) 可以提高电气设备的利用率，减少系统的备用容量。

(4) 可以采用技术经济性能好的大机组。

(5) 可以充分利用各种自然资源，发挥各类发电厂的特点，提高电力系统的整体经济性。

第二节 电力系统的接线方式和额定电压

一、电力系统的接线方式

1. 电力系统的接线图

电力系统的接线图有两种：电气接线图和地理接线图。电力系统的电气接线图如图1-1。在电气接线图上较详细地表示出电力系统各主要元件之间的电气联系，但不能反映各发电

厂、变电站的相对地理位置。电力系统的地理接线示意图如图 1-2 所示。在地理接线图上，各发电厂、变电站的相对地理位置，乃至各条线路的路径都按一定比例有所反映，但各元件之间的电气联系却往往难以表示。因此，这两种接线图常结合使用。

2. 各种接线方式的特点

电力系统的接线方式可分为有备用和无备用两类。无备用接线包括单回路放射式、干线式和链式网络，如图 1-3 所示。有备用接线包括双回路放射式、干线式、链式以及环式和两端供电网络，如图 1-4 所示。

无备用接线的主要优点在于简单、经济、运行方便，主要缺点是供电可靠性差。因此该方式的采用必须考虑所供负荷的可靠性要求以及能否采用自动重合闸等。

有备用接线中，双回路放射式、干线式、链式网络的优点在于供电可靠性和电能质量高，但所用设备多，接线复杂，投资加大。环式接线同样有较高的可靠性，但经济性有所提高，缺点是运行调度较复杂，故障影响范围大。两端供电网络的前提是必须有两个或两个以上的独立电源，而且它们与各负荷点的相对位置又决定了采用这种接线的合理性。

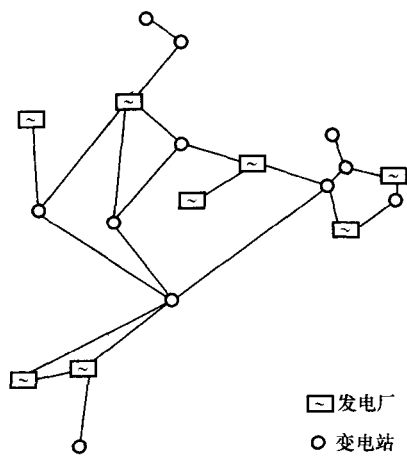


图 1-2 电力系统的地理接线示意图

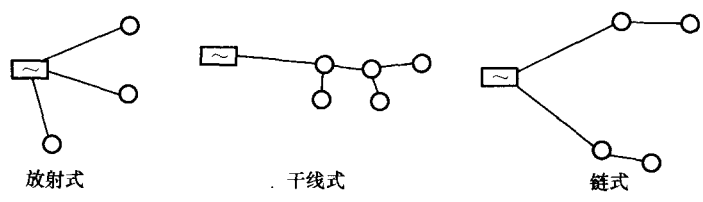


图 1-3 无备用接线方式

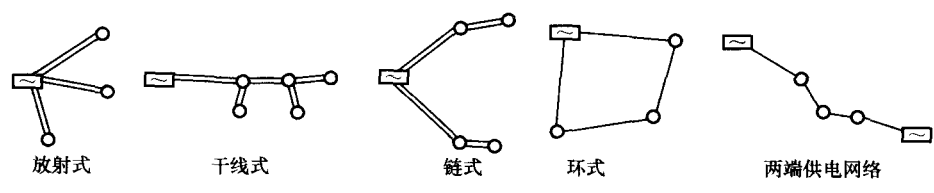


图 1-4 有备用接线方式

电力系统接线方式的确定，须建立在技术、经济性能科学比较的基础上。所选方式除了保证供电的可靠性、经济性和良好的电能质量外，还应保证运行操作的安全性和灵活性。

二、电力系统的额定电压

1. 额定电压等级

我们知道，当输送功率一定时，输电电压越高，电流越小，导线等电气设备的投资越小。但电压越高，对电气设备绝缘的要求也越高，投资又有所加大。因此，为了便于实现电气设备选择、制造和使用的标准化、系列化，我国规定了标准电压（即额定电压）等级系

列。在设计时，应选择最合理的额定电压等级，而不是任意选择。

所谓额定电压，是指电气设备长期、连续正常工作的最高电压，在此电压下长期工作能获得最佳的经济、技术性能。

我国规定的额定电压等级可分为三类，分别如表 1-1~表 1-3 所示。

第一类是 100V 及以下的电压等级，主要用于安全动力、照明、蓄电池及其他特殊设备。

第二类是 100~1000V 之间的电压等级，它的应用最广、数量最多，如电动机、工业、民用、照明、普通电器、动力及控制设备等均采用此类电压。

表 1-1 第一类额定电压 (V)

直 流	交 流	
	单 相	三 相
6		
12	12	
24	36	
48		36

表 1-2 第二类额定电压 (V)

用电设备			发 电 机		变 压 器			
直 流	三相交流		直 流	三相交流	单 相		三 相	
	线电压	相电压			一次绕组	二次绕组	一次绕组	二次绕组
110			115					
	(127)			(133)	(127)			
						(133)	(127)	(133)
		127	230	230	220			
220	220					230	220	230
		220	400	400	380			
	380						380	400
440								

表 1-3 第三类额定电压 (kV)

用电设备	交流发电机	变 压 器		用电设备	变 压 器	
		一次绕组	二次绕组		一次绕组	二次绕组
3	3.15	3 及 3.15 *	3.15 及 3.3	(60)	(60)	(66)
6	6.3	6 及 6.3 *	6.3 及 6.6	110	110	121
10	10.5	10 及 10.5 *	10.5 及 11	(154)	(154)	(169)
	13.8	13.8		220	220	242
	15.75	15.75		330	330	363
	18	18		500	500	550
35		35	38.5	750	750	825

第三类是 1000V 及以上的电压等级。电力系统的发、供、输、配、用电都采用这个电压等级。

由表可见，同一电压等级下，各用电设备的额定电压不尽相同，故可分为用电设备、电

力网、发电机和变压器等四种额定电压。现以图 1-5 为例说明各设备的额定电压。

2. 电力网和用电设备的额定电压

设发电机在额定电压下运行，给电力网 AB 部分供电。由于线路有电压损失，所以负荷 1~5 点所受的电压各不相同，线路首端电压 U_a 大于末端电压 U_b 。若负荷沿线路分布均匀，则电压沿线路分布情况大致如图中斜线 ab 所示。各处用电设备所受的电压不同，也不可能按上述分布电压制造，而且电力网各点的电压也是经常变化的，

所以用电设备的额定电压只能力求接近于实际工作电压。通常用线路首、末端电压的算术平均值 $\frac{(U_a + U_b)}{2}$ 作为用电设备的额定电压，这个电压也即是该电力网的额定电压，用电设备的额定电压就等于其所在电力网的额定电压。

目前，我国电力网的额定电压等级有 0.4、3、6、10、35、60、110、220、330、500、750kV 等。

3. 发电机的额定电压

发电机往往接在线路的始端，而一般电力网的线路电压损失为 10%，考虑到一般用电设备的允许电压偏移为 $\pm 5\%$ ，这就要求线路始端电压为额定值的 105%，从而保证末端不低于额定值的 95%，因此发电机的额定电压比其所在电力网的额定电压高出 5%。

目前，我国发电机的额定电压范围为：6.3~10.5kV（100MW 及以下小容量机组）、13.8kV（135MW 级的汽轮发电机及 72.5MW 的水轮发电机）、15.75kV（200MW 的机组）、18kV 及以上（300MW 及以上大型发电机组）。

4. 变压器的额定电压

变压器一次侧接电源，相当于用电设备，二次侧向负荷供电，又相当于发电机。因此变压器一次侧额定电压应等于用电设备的额定电压（直接和发电机相连的变压器一次侧额定电压应等于发电机的额定电压），二次侧电压应较线路的额定电压高出 5%。但又因变压器二次侧电压规定为空载时的电压，而额定负荷下的变压器内部压降为 5%。为使正常运行时变压器二次侧电压较线路额定电压高 5%，变压器二次额定电压应较线路额定电压高出 10%。只有漏抗较小的、二次侧直接与用电设备相连的和电压特别高的变压器，其二次侧额定电压才较线路的额定电压高出 5%。

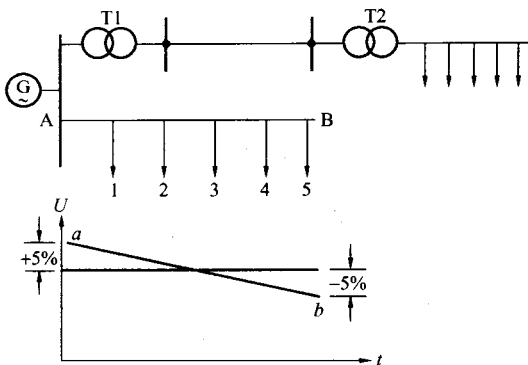


图 1-5 额定电压的解释图

第三节 电力系统的中性点接地方式

电力系统的中性点是指三相系统作星形连接的发电机和变压器的中性点。中性点采用不同的接地方式，对电力系统的供电可靠性、设备绝缘水平、对通信系统的干扰、继电保护的動作特性等都有着直接的影响，因此选择电力系统中性点的运行方式是一个综合性的问题。

目前,我国电力系统常见的中性点运行方式(即接地方式)可分为两个类型:中性点非有效接地方式(或称小接地电流系统)和中性点有效接地方式(或称大接地电流系统)。其中非有效接地又包括中性点不接地、经消弧线圈接地和经高阻抗接地;而有效接地又包括中性点直接接地和经低阻抗接地。其中应用最广泛的是中性点不接地、经消弧线圈接地和直接接地,下面分别加以说明。

一、中性点不接地的三相系统

电力系统运行时,三相导体之间和各相导体对地之间,沿导体全长均匀分布着电容,这些电容在电压的作用下将引起附加的电容电流。图 1-6 (a) 为中性点不接地系统正常运行时的电路图,图中断路器 QF 运行时处于合闸状态。因各相导体间的电容及所引起的电容电流较小,其影响在此忽略不计。同时,为了简化讨论,假设三相系统完全对称,各相对地电容完全相等。

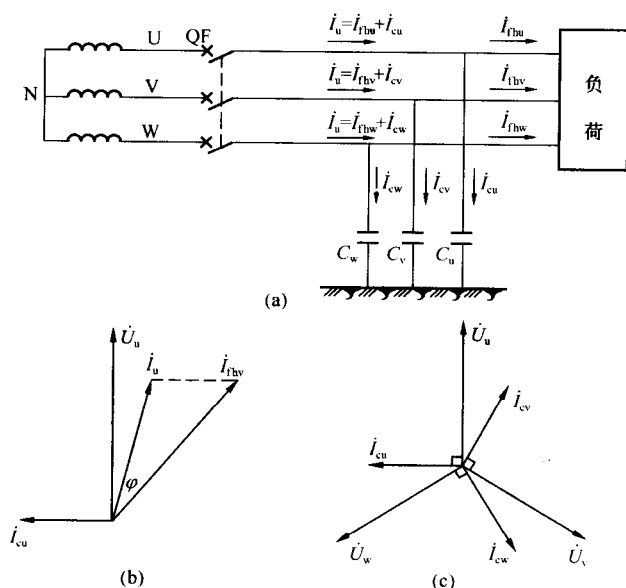


图 1-6 中性点不接地三相系统的正常运行情况

(a) 电路图; (b)、(c) 相量图

在正常工作状态下,由图可知,电力系统的中性点 N 对地电压 $\dot{U}_n = 0$, 各相对地电压 $\dot{U}_{ud}$ 、 $\dot{U}_{vd}$ 、 $\dot{U}_{wd}$ 是完全对称的,即分别等于各自的相电压 $\dot{U}_u$ 、 $\dot{U}_v$ 、 $\dot{U}_w$ 。在此对地电压作用下,各相对地电容电流 $\dot{I}_{cu}$ 、 $\dot{I}_{cv}$ 、 $\dot{I}_{cw}$ 大小相等,相位互差 120° , 如图 1-6 (c) 所示。各相对地电容电流之和为零,所以大地中没有电容电流流过。各相电源电流 $\dot{I}_u$ 、 $\dot{I}_v$ 、 $\dot{I}_w$ 应为各相负荷电流 $\dot{I}_{flu}$ 、 $\dot{I}_{fuv}$ 、 $\dot{I}_{fhw}$ 与对地电容电流 $\dot{I}_{cu}$ 、 $\dot{I}_{cv}$ 、 $\dot{I}_{cw}$ 的相量和,如图 1-6 (b) 所示,图中仅画出 U 相的情况。

若发生了单相接地故障,上述情况将会发生明显的变化。图 1-7 为假设 W 相发生了完全接地时的情况。

当 W 相发生完全接地时,故障相对地电压为零,即 $\dot{U}'_{wk} = \dot{U}'_n + \dot{U}_w = 0$, 于是有 $\dot{U}'_n = -\dot{U}_w$ ($\dot{U}'_n$ 为故障后中性点对地电压)。

上式表明,当 W 相完全接地时,中性点对地的电压不再为零,而上升到相电压,且与接地相的电源电压相位相反。于是非故障相 U 相和 V 相的对地电压分别为

$$U \text{ 相对地电压 } \dot{U}'_{uk} = \dot{U}_u + \dot{U}'_n = \dot{U}_u - \dot{U}_w$$

$$V \text{ 相对地电压 } \dot{U}'_{vk} = \dot{U}_v + \dot{U}'_n = \dot{U}_v - \dot{U}_w$$

各相对地电压的相量图如图 1-7 (b) 所示, $\dot{U}'_{uk}$ 和 $\dot{U}'_{vk}$ 之间的夹角为 60° 。此时, U、W 相间电压为 $\dot{U}'_{uk}$, V、W 相间电压为 $\dot{U}'_{vk}$, 而 U、V 相间电压等于 $\dot{U}'_{uv}$ 。于是,从图中可以

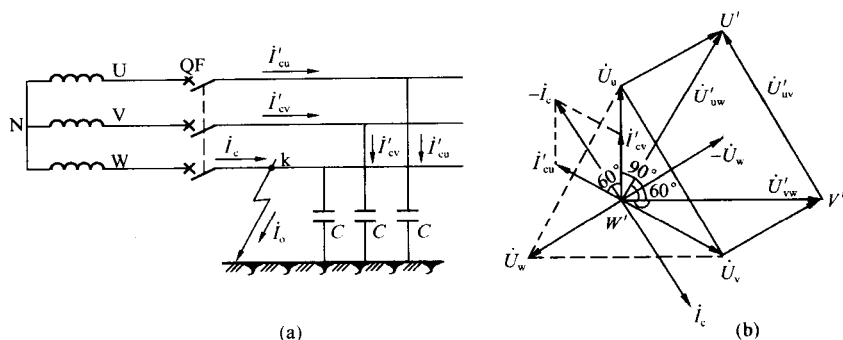


图 1-7 中性点不接地三相系统单相接地
(a) 电路图；(b) 相量图

得知，当 W 相完全接地时，故障相电压为零，非故障相对地电压升高到 $\sqrt{3}$ 倍相电压，三线的电压仍然保持对称且大小不变。因此，对电力用户接于线电压的用电设备的工作没有影响，不必立即中断对用户供电。

由于 U、V 两相的对地电压由正常时的相电压变为故障后的线电压，非故障相的对地电流的有效值也增大到正常时相电压 U_ϕ 的 $\sqrt{3}$ 倍，即

$$I'_{cu} = I'_{cv} = \sqrt{3}\omega C U_\phi \quad (1-1)$$

而故障相对地电容被短接，W 相对地电容电流为零。此时，三相对地电容电流之和不再为零，大地中有电流流过，并通过接地点形成回路，如图 1-7 (a) 所示。如选择电流的参考方向为从电源到负荷的方向及线路到大地方向，则 W 相接地点的电流（简称为接地电流）为

$$I_c = -(I'_{cu} + I'_{cv}) \quad (1-2)$$

可见单相接地时故障相流过大地的电流为电容电流，其有效值大小为 $3\omega C U_\phi$ ，等于正常时一相对地电容电流的 3 倍。其数值与电网的电压、频率和一相对地电容有关，而对地电容又与线路的结构（电缆线路或架空线路）、布置方式和长度以及其他因素有关。实用中可按下列经验公式进行估算

$$\text{对架空线路} \quad I_c = \frac{UL}{350}$$

$$\text{电缆} \quad I_c = \frac{UL}{10}$$

式中 I_c ——接地电流，A；

U ——系统额定电压，kV；

L ——线路总长，km。

由变电站配电装置及变压器绕组增加的一相接地电容电流，用电网一相接地电容电流的附加比例估算。而发电机的一相接地电容电流可用 $I_c = 0.544U_N C_G$ 来进行估算， U_N 为发电机额定电压， C_G 为发电机一相对地电容，其值由制造厂提供或通过试验取得。

以上分析是完全接地的情况。当发生不完全接地时，即通过一定的电阻接地，接地相对地电压大于零而小于相电压，未接地相对地电压大于相电压而小于线电压，中性点对地电压