

国产600MW超临界火力发电机组技术丛书

# 电气设备及系统



陈启卷 主编

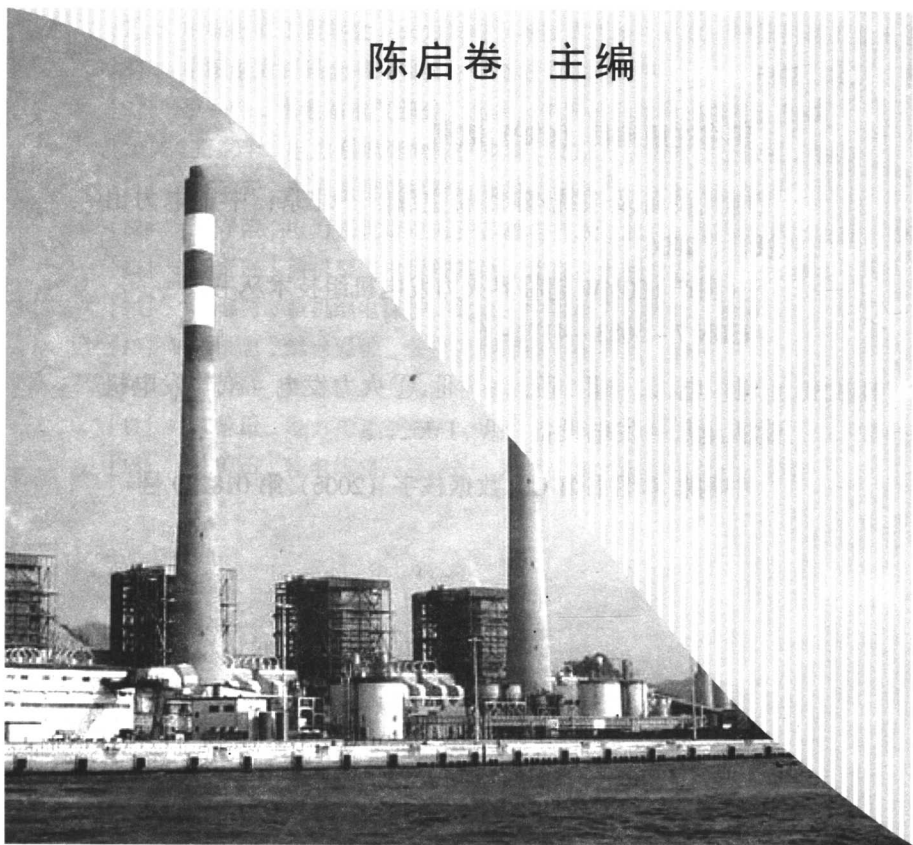


中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

国产600MW超临界火力发电机组技术丛书

# 电气设备及系统

陈启卷 主编



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

本书是《国产 600MW 超临界火力发电机组技术丛书》的《电气设备及系统》分册。书中详细介绍了 600MW 汽轮发电机、主变压器及高压厂用变压器、高压开关电器、主接线及厂用电接线、直流系统、继电保护以及自动装置的原理、结构、特性、运行、维护等。

本书适合从事国产 600MW 超临界火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修及管理工作的工程技术人员阅读，也可作为电厂生产人员的培训教材，亦可供有关专业人员以及高等院校相关专业师生参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电气设备及系统/陈启卷主编. —北京: 中国电力出版社, 2006

(国产 600MW 超临界火力发电机组技术丛书)

ISBN 7-5083-4171-6

I. 电... II. 陈... III. ①火力发电-汽轮发电机  
②火电厂-发电设备 IV. TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 018259 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2006 年 5 月第一版 2006 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 24.25 印张 550 千字

印数 0001—3000 册 定价 38.00 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)

## 作者简介：



陈启卷，浙江省浦江县人，1984年毕业于武汉水利电力大学，1996年获该校博士学位，现为

武汉大学动力与机械学院副院长、教授、博导。主要研究领域为发电过程控制、发电设备故障诊断理论和技术等，曾多次获得省部级科技进步奖，在核心刊物和国际会议上发表论文50多篇，并且主持完成十余个发电厂的300、600MW机组电气设备及系统系列培训教材工作。

## 编 委 会

主 任：那希志

副主任：胡念苏 廖树荣 朱志飞 杨 俊 刘克兴

委 员：(以姓氏笔划为序)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 毛慧和 | 王建梅 | 刘先斐 | 刘 勇 | 朱全利 |
| 陈启卷 | 陈志和 | 李正奉 | 李培元 | 肖大维 |
| 肖志怀 | 张世荣 | 张恒良 | 金振齐 | 周柏青 |
| 周济波 | 郑桂波 | 顾 昌 | 袁立宏 | 盛赛斌 |
| 喻红梅 | 蔡 锴 | 熊立红 | 樊天竞 |     |

# 前 言

火力发电采用大容量和超临界技术是提高发电机组经济性的有效途径,已经被世界先进国家广泛采用。我国也将超临界机组作为今后一个时期火电机组建设的重点之一,同时加快研究超临界机组制造和运行中的关键技术。随着国民经济的快速发展和人民生活水平的提高,我国电力工业也正以前所未有的速度发展。目前,一批国产超临界机组已经投产或正在兴建,这标志着我国火力发电设备的制造和运行水平都进入了一个新阶段。

为满足广大技术人员和现场生产人员了解国产 600MW 超临界火力发电机组的结构、系统、运行等知识的需要,我们组织人员编写了这套《国产 600MW 超临界火力发电机组技术丛书》。本丛书包括《锅炉设备及系统》、《汽轮机设备及系统》、《电气设备及系统》、《控制设备及系统》、《电厂化学设备及系统》、《燃料运输设备及系统》等六个分册。

本丛书可供从事 600MW 超临界火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员及管理人员阅读,也可作为现场运行、检修人员的培训教材,也可供高等院校相关专业师生参考。

《电气设备及系统》分册是本丛书的第三分册。全书详细介绍了 600MW 汽轮发电机、主变压器及高压厂用变压器、高压开关电器、主接线及厂用电接线、直流系统、继电保护以及自动装置的原理、结构、特性、运行、维护等。

本分册由武汉大学陈启卷主编,参加编写的人员有武汉大学的陈启卷(第一章)、赵勇飞和朱亚军(第二章)、马秀玲(第三章)、毛慧和(前言、第四、五、六章)以及肖志怀(第七、八章)。

本分册由武汉大学程远楚教授担任主审,对本书进行了认真的审阅,提出了很多宝贵的意见和建议,在此谨表示诚挚的谢意。

本分册在编写过程中,参阅了参考文献中列出的正式出版文献以及相关电厂、制造厂、设计院、安装单位和高等院校的技术资料、说明书、图纸等,特别在收集资料过程中得到华能沁北发电有限责任公司、大唐湖南湘潭发电有限责任公司、广东红海湾发电有限公司的大力支持,在此一并表示衷心感

谢。

由于编者水平所限和编写时间紧迫，疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

**编 者**

2006年2月

# 目 录

## 前言

## 第一章 概述 ..... 1

- 第一节 我国火电发展状况和趋势 ..... 1
- 第二节 电力系统的基本概念 ..... 3
- 第三节 电力系统的额定电压 ..... 5
- 第四节 电力系统的中性点接地方式 ..... 7
- 第五节 现代电力网 ..... 13

## 第二章 同步发电机及其运行 ..... 15

- 第一节 同步发电机的结构特点及性能 ..... 15
- 第二节 同步发电机的基本理论 ..... 49
- 第三节 同步发电机的励磁系统 ..... 57
- 第四节 同步发电机的运行 ..... 84
- 第五节 同步发电机的维护与检修 ..... 105

## 第三章 变压器及其运行 ..... 122

- 第一节 变压器的基本原理 ..... 122
- 第二节 变压器技术参数 ..... 123
- 第三节 变压器结构 ..... 128
- 第四节 变压器的主要附件 ..... 134
- 第五节 分裂绕组变压器 ..... 142
- 第六节 变压器的运行与维护 ..... 144

## 第四章 高压电器设备 ..... 156

- 第一节 高压断路器的灭弧原理 ..... 156

|     |                             |     |
|-----|-----------------------------|-----|
| 第二节 | 高压断路器概论 .....               | 170 |
| 第三节 | SF <sub>6</sub> 高压断路器 ..... | 176 |
| 第四节 | 高压断路器的操动机构 .....            | 185 |
| 第五节 | 互感器 .....                   | 198 |
| 第六节 | 隔离开关 .....                  | 204 |
| 第七节 | 封闭母线 .....                  | 206 |

---

## 第五章 电气主接线和厂用电接线 ..... 220

|     |                |     |
|-----|----------------|-----|
| 第一节 | 电气主接线 .....    | 220 |
| 第二节 | 电气主接线的运行 ..... | 227 |
| 第三节 | 厂用电接线 .....    | 233 |
| 第四节 | 厂用电系统的运行 ..... | 254 |

---

## 第六章 直流系统 ..... 263

|     |                |     |
|-----|----------------|-----|
| 第一节 | 概述 .....       | 263 |
| 第二节 | 蓄电池的基础知识 ..... | 265 |
| 第三节 | 直流系统的运行 .....  | 271 |

---

## 第七章 微机保护装置 ..... 279

|     |                    |     |
|-----|--------------------|-----|
| 第一节 | 继电保护的目、任务与要求 ..... | 279 |
| 第二节 | 微机保护原理 .....       | 280 |
| 第三节 | 发电机微机保护 .....      | 283 |
| 第四节 | 变压器微机保护 .....      | 312 |
| 第五节 | 发电机变压器组微机保护 .....  | 318 |
| 第六节 | 输电线路保护 .....       | 322 |

---

## 第八章 自动装置 ..... 332

|     |                   |     |
|-----|-------------------|-----|
| 第一节 | 概述 .....          | 332 |
| 第二节 | 同步发电机的自动并列 .....  | 333 |
| 第三节 | 发电机自动励磁调节系统 ..... | 345 |
| 第四节 | 自动调频装置 .....      | 374 |

## 参考文献 ..... 379

# 第一章 概述

## 第一节 我国火电发展状况和趋势

经济的发展依靠能源。目前,对全球能源需求的预测是:首先,石油仍然是主要的初级能源,2025年将稍有下降,为38%。工业化国家和发展中国家石油消费量的差距将缩小。其次,天然气将成为增长最快的初级能源产品,到2005年,天然气所占的份额(以发热量计)将超过煤炭。天然气在整个能源消耗中的比例将从2002年的23%增加到2025年的28%。再次,由于经济性、安全性和核废料处理等方面的问题,核能发电量所占比例将下降,从2003年的19%下降到2025年的12%。但中国、印度、日本、韩国等亚洲国家的核发电能源将会有较多增加。另外,水力发电和其他可再生能源将缓慢增长,预计年增长率为1.9%。同时,世界电力消费量年均增长率预计为2.4%,年电力消费量从2003年的 $1.4 \times 10^{13} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 增加到2025年的 $2.47 \times 10^{13} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。发展中亚洲国家由于经济快速增长,电力消费量也将大幅度增加。预计,中国的电力消费量将在24年间增长3倍。最后,关于煤炭方面,在世界能源消费增长量中,中国和印度约占28%,两个国家煤炭消费增长量将会占全世界煤炭消费增长量的75%。2025年世界煤炭消费量在 $5.9 \times 10^9 \sim 8.8 \times 10^9 \text{ t}$ 之间。发展中亚洲国家煤炭消费将增加 $1.9 \times 10^9 \text{ t}$ 。另外,中国电力部门的煤炭耗用量将以每年4.2%的速度递增,这也预示着,中国需要大量投资用于火力发电厂和输变电系统的建设。

中国煤炭资源丰富,探明储量达 $4 \times 10^{12} \text{ t}$ ,现年开采量达 $1.4 \times 10^9 \text{ t}$ ,在一次能源中占70%,故火力发电在中国电源结构中始终占主要地位。

新中国成立后,大力发展电力工业。首先是恢复受战争破坏的工业基地的火电厂,如鞍山、锦西、阜新、抚顺、大同、太原等。在第一个五年计划期间,实行“建设火电站为主”的方针,至1957年末,全国火电装机已达3616MW,翻了一番。

为了发展我国发电设备制造业,在上海和哈尔滨分别建立了锅炉、汽轮机和电机制造厂,从捷克引进了6MW和12MW火电机组制造技术,从苏联引进了25MW和50MW火电设备制造技术。第一台国产6000kW火电机组于1956年4月在安徽淮南电厂发电投产;第一台国产12、25、50MW火电机组相继于1958年8月、1958年2月和1959年11月分别在

重庆、闸北、辽宁电厂发电投产，从此结束了我国自己不能制造发电设备的局面。

在此基础上，我国开始自行设计制造了 100、125、200、300MW 火电机组成套设备，第一台国产机组分别在 1967 年 2 月、1969 年 9 月、1972 年 2 月和 1974 年 11 月在高井、吴泾、朝阳、望亭等电厂发电投产。1978 年 12 月，中共十一届三中全会制定了以经济建设为中心和改革开放的方针政策，电力工业率先从美国引进 300MW 和 600MW 大型火电设备制造技术和大型燃煤电厂设计技术。第一台引进型国产 300MW 火电机组于 1987 年 6 月在山东石横电厂发电投产，第一台引进型国产 600MW 火电机组于 1989 年 11 月在安徽淮南平圩电厂发电投产。第一台国产 6MW 机组和第一台国产 600MW 机组在同一城市淮南投产，单机容量增长了 100 倍，这是历史的巧合，也反映了中国火力发电迅速发展的历程。

在改革开放方针指引下，电力工业不仅从美、英、法、德、意、加等西方国家引进设备、引进技术、引进资金、引进人才，也从日、俄、罗、捷等国引进设备，兼包并容，不拘一格，百花齐放，取长补短，使发电设备得以更新换代，技术水平有了很大提高。1998 年末，全国 300MW 级（包括 320、330、350、360MW）的火电机组已投产 190 台，600MW 级（包括 500MW 和 660MW）的火电机组已投产 20 台；总容量在 1000MW 以上的大型火电厂已达 55 个，全国火电装机总容量已达  $2.1 \times 10^5$  MW，为 1949 年的 124.5 倍，占总装机容量的 75.49%。目前，已建成的最大火电厂为广东沙角总厂（包括 A、B、C 三电厂，总容量达 3880MW）和山东邹县电厂（总容量 2400MW）；在建最大火电厂为福建漳州后石电厂，规划容量 6000MW；在建和筹建的最大火电单机容量为辽宁绥中电厂的 800MW 机组和上海外高桥电厂的 900MW 机组。

火电机组参数由中低压、高压、超高压发展为亚临界、超临界；机组容量从 6MW 发展到已投运的 660MW，火电厂效率和各项技术经济指标、可靠性指标均有很大提高。1998 年火电设备平均利用小时为 4811h，发电标准标耗为 373g/(kW·h)，供电标准标耗为 404g/(kW·h)，厂用电率为 7.71%。300MW 等级火电机组的等效可用系数（EAF）达 87.04%，等效强迫停运率（EFOR）为 3.26%，平均连续可用小时（CSH）为 1105.32h，无故障工作小时（MTBF）达 1808.22h。

新中国成立后的 50 年，火电发展最快的是改革开放后的 20 年。至 1979 年全国火电装机容量为 43900MW，至 1998 年全国火电装机容量达  $2.1 \times 10^5$  MW，即 80% 是在后 20 年安装投产的。1979 年，全国 300MW 及以上火电机组仅 6 台，600MW 机组没有，百万千瓦以上的火电厂只有 1 个。可见 20 世纪 80 年代开始的近 20 年，中国火电发展突飞猛进，举世瞩目。

全面建设小康社会，必须有充足、可靠的电力供应。目前出现的部分省市不同程度的拉闸限电情况，说明电力总供给不能满足电力总需求的基本矛盾又开始突出起来，解决的办法只有加快发展。走新型工业化道路，实现可持续发展必须依靠清洁能源。因此，加快电力发展，必须提高能源转换和利用效率，减少环境污染。同时我国又是一个人均水资源相对匮乏的国家（人均 2200m<sup>3</sup>/年），只相当于世界人均占有水资源的 1/4，预测到 2030 年人均用水量将接近世界用水的紧张线（1700m<sup>3</sup>/年），全国需水量已接近可利用水量的极限。发展火力发电必须高度重视节约发电用水的问题。因此“节能、环保、节水”已成为

21 世纪中国火力发电特别是燃煤发电的主题,同时也是火力发电领域的科技工作者面临的必须解决的技术难题。

我国的一次能源结构决定了我国发电必然以煤电为主的基本格局,这是长期难以改变的,这也是我国和国际一次能源利用的主流不同的显著特征。2002 年底我国燃煤火力发电装机容量占全国总装机容量的 74.5%,发电量占全国总发电量的 80% 以上。按照党的十六大提出的到 2020 年全国 GDP “翻两番”的要求,届时全国总装机容量将达到  $9 \times 10^5 \sim 9.5 \times 10^5 \text{ MW}$ ,发电量将达到  $4.2 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$  左右,其中火电装机比重仍然占 70% 左右。按此估算,今后 18 年将投入  $3.5 \times 10^5 \text{ MW}$  左右的火电机组,占到当时火电总装机容量的近 60%,成为中国火电的主体。这些新投产的机组在技术上必须有所创新才能达到高效、低污染和节水的要求。要实现这一目标,火力发电无疑肩负着重要的任务并应当而且必须作出应有的贡献。

中国火电发展,虽然取得了辉煌成绩,但和世界先进水平仍有很大差距。如煤耗比世界先进水平高约  $80 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ;电力可靠性指标比国际先进水平差距也较大;电厂用人多,劳动生产率低;火电厂脱硫、脱硝装置正在起步应用,环保形势仍然严峻。要赶上世界先进水平,任重而道远。

## 第二节 电力系统的基本概念

### 一、电力系统与电力网

发电厂(简称电厂)将一次能源转变成电能,这些电能需要通过一定方式输送给电力用户。由发电厂、升压和降压变电站、送电线路以及用电设备有机连接起来的整体,称为电力系统。

电力系统加上发电机的原动机(如汽轮机、水轮机)、原动机的动能部分(如热力锅炉、水库、核电站的反应堆)、供热和用热设备,则称为动力系统。

在电力系统中,由升压、降压变电站和各种不同电压等级的输电线路连接在一起的部分称为电力网。

### 二、电力生产的特点

电能的生产与其他工业生产相比有着显然不同的特点。

(1) 电能不能大量储藏。电力系统中负荷的多少,决定于用户的需要,电能的生产和消费必须时时刻刻保持平衡。电能的生产、分配和消费过程的同时性,使电力系统的各个环节形成了一个紧密的有机联系的整体,其中任一台发、供、用电设备发生故障,都将影响电能的生产 and 供应。

(2) 电力系统的电磁变化过程非常迅速。电力系统中,电磁波的变化过程只有千分之几秒,甚至百万分之几秒;而短路过程、发电机运行稳定性的丧失则在十分之几秒或几秒内发生。为了防止某些短暂的过渡过程对系统运行和电气设备造成危害,要求调整及切换操作非常迅速和灵敏,显然,靠手动操作不能获得满意的效果,甚至是不可能的,因此必须采用各种自动装置。

(3) 电力工业和国民经济各部门之间有着极其密切的关系。电能供应不足或中断,将直接影响国民经济各个部门的生产和运行,也将影响人们的正常生活,因此要求电力工业必须保证安全生产和成为国民经济中的先行工业,必须有足够的负荷备用容量,以满足日益增长的负荷需要。

### 三、电力系统的运行要求

电力系统的运行必须满足下列基本要求。

(1) 保证对用户供电的可靠性。系统运行可靠性的破坏,将引起系统设备损坏或供电中断,以致造成国民经济各部门生产和运行停顿和人民生活秩序的破坏,甚至发生设备和人身事故。

电力用户对供电可靠性的要求并不一样,即使一个企业中各个部门或车间,对供电持续性的要求也有所差别。根据对供电持续性的要求,可把用户分为三级。

一级负荷:如停止供电,将会危害生命、损坏设备、产生废品和使生产过程混乱,给国民经济带来重大损失,或者使市政生活发生重大混乱。

二级负荷:如停止供电,将造成大量减产,城市大量居民的正常活动受到影响。

三级负荷:指所有不属于一级及二级的负荷,如非连续生产的车间及辅助车间和小城镇用电等。

对于一级负荷,至少要由两个独立电源供电,其中每一电源的容量,都应在另一电源发生故障时仍能完全保证一级负荷的用电;对于三级负荷,不需要备用电源;对于二级负荷是否需要备用电源,要进行技术经济比较后才能确定。

(2) 保证电能的良好质量。即要求供电电压(或电流)的波形为较严格的正弦波,保证系统中的频率和电压在一定的允许变动范围以内。我国规程规定: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 $\pm 5\%$ ,频率允许偏移为 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

(3) 保证运行的最大经济性。电力系统运行有三个主要经济指标,即生产每 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 电的能源消耗(煤耗率、油耗率、水耗率等)生产每 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 电的自用电(自用电率)以及供配每 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 电在电力网中的电能损耗(线损率)。提高运行经济性,就是在生产和供配某一定数量的电能时,使上述三个指标达到最小。为了实现电力系统的经济运行,必须对整个系统实施最佳经济调度。

### 四、电力系统的效益

电力系统在技术和经济上都可以收到很大的效益,主要有:

(1) 减少系统的总装机容量。由电力系统供电的各用户的最大负荷并不是同时出现的,因此,系统中综合最大负荷总是小于各用户最大负荷的总和。由于系统综合最大负荷的降低,也就可以相应地减少系统的总装机容量。

为了保证对用户可靠地供电,无论是孤立电站还是电力系统,都需要检修和事故备用容量,在孤立电站中,备用容量不应小于电厂最大机组容量(可能达到电站总容量的30%~40%)。而在电力系统中,所有发电厂连接在一起并列运行,备用容量只需系统总容量的20%,其中:负荷备用容量2%~5%,事故备用容量10%左右,检修备用容量

8%左右。显然,此时电力系统的备用容量比各孤立电站备用容量的总和为少,即总装机容量又可以减少。

(2) 可以装设大容量机组。组成电力系统后,由于总负荷的增大,因此可以装设大容量机组。大容量机组效率高,每千瓦投资以及维护费用都比多台小机组经济得多。但是,电力系统中所采用的最大机组容量,以不超过总装机容量的15%~20%为宜。

(3) 能够充分利用动力资源。建成电力系统后,就可以将发电站建造在动力资源产地,如在煤矿附近建立巨型坑口电厂,在水能资源集中的地方建立大型水力发电厂等。同时,有些形式的电站,如热电厂、水电厂、风力电厂、原子能电厂等,如果不与系统并列,就很难保证持续正常供电以及发挥其最佳经济效益。例如,热电站的抽汽机组的出力是由热负荷确定的,而热负荷与电负荷的需要往往不能互相配合。一般在夏季丰水期,水量多而用电量较少;冬季枯水期,水量少而用电量反而多,因此,就可能由于水库调节库容不够而弃水,或出现对电力负荷不能保证供应的情况。如果把水电站连接在电力系统中,由于有火电站和其他形式电站的互相配合和调节,水能资源就能得到充分利用,供电也能得到保证。

(4) 提高供电可靠性。在电力系统中,由于是多电源联合供电,机组的台数较多,即使个别机组或电源发生故障,其他机组或电源仍可以在出力允许的情况下多带负荷,因此可以提高供电可靠性。

(5) 提高电能质量。电能质量用频率和电压来衡量,其数值应根据规程要求保持在一定的允许变动范围内。由于电力系统容量大,因而负荷波动时所引起的频率和电压波动就会减小,电能质量可以提高。

(6) 提高运行的经济性。建立电力系统后,除了充分利用动力资源可以提高运行的经济性外,在系统中还可以经济合理地分配各发电站或各机组的负荷,使运行经济、效率高的机组多带负荷,效率低、发供电成本高的机组少带负荷,以降低电能的生产成本。

### 第三节 电力系统的额定电压

#### 一、额定电压等级

为了便于电器制造业的生产标准化和系列化,国家规定了标准电压等级系列。在设计时,应选择最合适的额定电压等级。所谓额定电压,就是某一受电器(电动机、电灯等)、发电机和变压器等在正常运行时具有最大经济效益的电压。

我国规定了电力设备的统一电压等级标准,如表1-1。

表 1-1 交流额定电压等级 (kV)

| 受电器额定电压 | 发电机额定电压 | 变压器额定电压   |            |
|---------|---------|-----------|------------|
|         |         | 一次绕组      | 二次绕组       |
| 0.22    | 0.23    | 0.22      | 0.23       |
| 0.38    | 0.40    | 0.38      | 0.40       |
| 3       | 3.15    | 3 及 3.15* | 3.15 及 3.3 |

续表

| 受电器额定电压 | 发电机额定电压 | 变压器额定电压    |           |
|---------|---------|------------|-----------|
|         |         | 一次绕组       | 二次绕组      |
| 6       | 6.3     | 6 及 6.3*   | 6.3 及 6.6 |
| 10      | 10.5    | 10 及 10.5* | 10.5 及 11 |
| 35      | 13.8    | 35         | 38.5      |
| 110     | 15.75   | 110        | 121       |
| 220     | 18.0    | 220        | 242       |
| 330     | 20.0    | 330        | 363       |
| 500     |         | 500        | 550       |
| 750     |         | 750        | 825       |

注 表中所列数值均为线电压。

\* 适用于升压变压器。

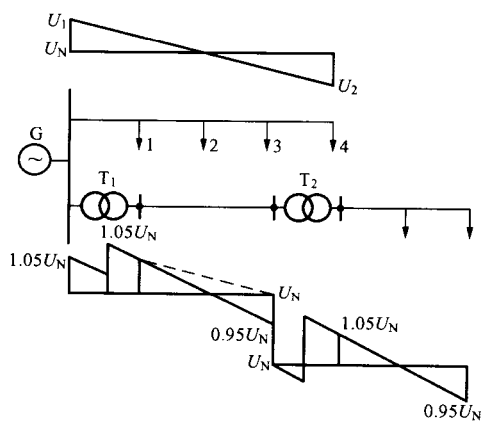


图 1-1 电力网中电压的变化

电力网中各点的电压是不同的,其变化情况如图 1-1 所示。

设供电给电力网的发电机 G 是在电压  $U_1$  下运行的,由于线路中有电压降落,对于由发电机直接配电的部分,线路始端电压  $U_1$  大于末端电压  $U_2$ 。为便于讨论,设直线  $U_1$ 、 $U_2$  (实际应为折线) 代表电压的变化规律,受电器 1~4 将受到不同的电压。而受电器是按标准化生产的,不可能按照图示各点的不同电压来制造电器,而且电力网中各点的电压,也并不是恒定的。为了使所有受电器的实际端电压与它的额定电压之差最小,显然应该采取一个中间值,即取  $U_N = (U_1 + U_2)/2$  来作为受电

器的额定电压。该电压也就规定为电力网的额定电压。

如果认为用电设备一般允许电压偏移  $\pm 5\%$  而沿线的电压降一般为  $10\%$ , 这就要求线路始端电压为额定值的  $105\%$ , 以使其末端电压不低于额定值的  $95\%$ 。发电机接于线路始端,因此,发电机的额定电压取为电力网额定电压的  $105\%$ 。

## 二、变压器额定电压的确定

接到电力网始端即发电机电压母线的变压器 (如图 1-1 中的  $T_1$ ), 由于发电机电压一般比电力网额定电压高  $5\%$ , 且发电机至该变压器间的连线压降较小, 为使变压器一次绕组电压与发电机额定电压相配合, 可以采用高出电力网额定电压  $5\%$  的电压作为该变压器一次绕组的额定电压。接到电力网受端的变压器 (如图 1-1 中的  $T_2$ ), 其一次绕组可以当做受电器看待, 因而其额定电压取与受电器的额定电压即电力网额定电压相等。

由于变压器二次绕组的额定电压, 是指变压器空载情况下的额定电压。当变压器带负载运行时其一、二次绕组均有电压降, 二次绕组的端电压将低于其额定电压, 如按变压器

满载时一、二次绕组压降为 5% 考虑, 为使满载时二次绕组端电压仍高出电力网额定电压 5%, 则必须选择变压器二次绕组 (如图 1-1 中的  $T_1$ 、 $T_2$ ) 的额定电压比电力网额定电压高出 10%。

当电力网受电端变压器供电的线路很短时, 如排灌站专用变压器, 其线路压降很小, 也可采用高出电力网额定电压的 5% (如 3.15、6.3、10.5kV), 作为该变压器二次绕组的额定电压。

由于电力网中各点电压是不同的, 而且随着负荷及运行方式的变化, 电力网各点的电压也要变化。为了保证电力网各点的电压在各种情况下均符合要求, 变压器均有用以改变变压比的若干分接头的绕组 (一般为高、中压绕组)。适当地选择变压器的分接头, 可调整变压器的出口电压, 使用电设备处的电压能够接近它的额定值。无激磁调压变压器高压 (或中压) 绕组的分接头为  $U_N \pm 5\%$  或  $U_N \pm 2 \times 2.5\%$ 。有载调压变压器高压绕组的分接头为  $U_N \pm 3 \times 2.5\%$  或  $U_N \pm 4 \times 2\%$ 。

#### 第四节 电力系统的中性点接地方式

电力系统的中性点 (实际上是指电力系统中发电机、变压器的中性点) 接地或不接地是一个综合性的问题, 中性点接地方式对于电力系统的运行, 特别是对发生故障后的系统运行, 有多方面的影响, 所以在选择中性点接地方式时, 必须考虑许多因素。

电力系统中性点接地方式有两大类: 一类是中性点直接接地或经过低阻抗接地, 称为大接地电流系统; 另一类是中性点不接地、经过消弧线圈或高阻抗接地, 称为小接地电流系统。其中运用最广泛的是中性点不接地、中性点经过消弧线圈接地和中性点直接接地等三种方式。

##### 一、中性点不接地系统

电力系统的每一相对地都有电容, 它们分布在整个输电线路上和电气设备中, 为了使讨论简化, 设三相系统是完全对称的, 并将分布的相对地电容用集中在线路中央的电容  $C$  来代替, 如图 1-2 所示。因为在中性点不接地系统中发生一相接地时, 电力系统相间电压并不改变, 因而相间电容所引起的电容电流也不会改变, 所以可以不予讨论。

在正常工作状态下, 电网各相对地的电压  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$  是对称的, 并且在数值上等于

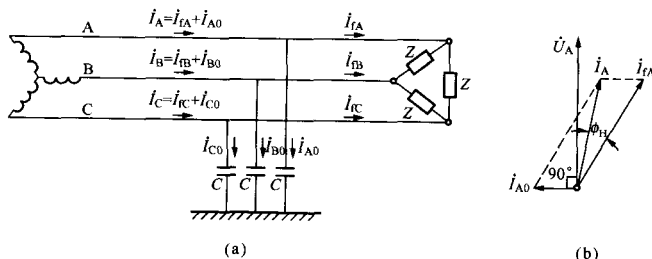


图 1-2 中性点不接地的三相系统 (正常工作状态)

(a) 电流分布; (b) A 相电流、电压相量关系

电网的相电压, 电源各相中的电流  $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 、 $\dot{I}_C$  分别等于负荷电流  $\dot{I}_{fA}$ 、 $\dot{I}_{fB}$ 、 $\dot{I}_{fC}$  和各相对地的电容电流  $\dot{I}_{A0}$ 、 $\dot{I}_{B0}$ 、 $\dot{I}_{C0}$  的相量和, 见图 1-2 (a)、(b)。此时三相电容电流  $\dot{I}_{A0}$ 、 $\dot{I}_{B0}$ 、 $\dot{I}_{C0}$  的相量和等于零, 流经地中的电流为零。中性点对地电压  $\dot{U}_0 = 0$ 。因此, 这种电网在正常运行时, 中性点接地与否对系统运行无任何影响。但如果发生一相接地, 情况将发生明显的变化。

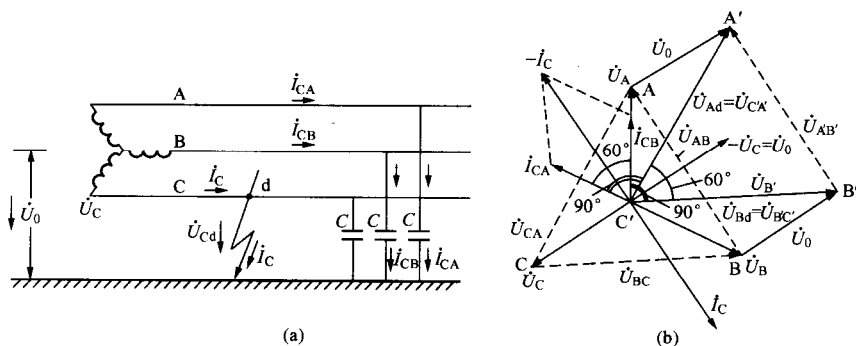


图 1-3 中性点不接地的三相系统 (C 相接地)

(a) 电流分布; (b) 相量关系

图 1-3 表示当 C 相在 d 点发生金属性接地时的情况。接地后故障点 d 的电压为零, 即  $\dot{U}_{Cd} = 0$ 。这时, 按故障相条件, 可以写出电压方程式

$$\dot{U}_C + \dot{U}_0 = \dot{U}_{Cd} = 0 \quad (1-1)$$

式中:  $\dot{U}_C$  为 C 相电源电压;

$\dot{U}_0$  为中性点对地电压。

所以

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_C \quad (1-2)$$

上式表明, 当发生 C 相金属性接地时, 中性点的对地电压不再为零, 而是  $-\dot{U}_C$ 。于是 A、B 相的对地电压相应地为

$$\dot{U}_{Ad} = \dot{U}_A + \dot{U}_0 = \dot{U}_A - \dot{U}_C$$

$$\dot{U}_{Bd} = \dot{U}_B + \dot{U}_0 = \dot{U}_B - \dot{U}_C$$

而且

$$\dot{U}_{C'A'} = \dot{U}_{Ad} = \sqrt{3} \dot{U}_C e^{-j150^\circ}$$

$$\dot{U}_{B'C'} = \dot{U}_{Bd} = \sqrt{3} \dot{U}_C e^{j150^\circ}$$

$$\dot{U}_{A'B'} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \sqrt{3} \dot{U}_C e^{-j90^\circ} \quad (1-3)$$