

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANLI XITONG WENTAI FENXI

电力系统 稳态分析

(第三版)

陈珩 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANLI XITONG WENTAI FENXI

电力系统 稳态分析

(第三版)

陈珩 编

陈怡 万秋兰 高山 修订



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Electrical Engineering

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。全书分三部分，分别讨论电力系统的基本概念、电力系统各元件的特性和数学模型（第一、二章），电力系统的潮流计算和控制（第三、四章），以及电力系统的运行调度和优化（第五、六章）。在取材方面，除力求讲清基本概念、基本理论之外，也注意介绍国内外先进科学技术和本学科发展方向，除尽量保证学科的系统性、完整性之外，也适当述及我国电力系统的现状和有关技术政策；除主要阐明运用电子计算机计算分析电力系统的原理外，也仍保留少量手算方法，并以较多例题比较它们的异同。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化专业教材，也可作为从事电力工程的技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统稳态分析/陈珩编；陈怡，万秋兰，高山修订. —3版. —北京：中国电力出版社，2007

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5542 - 9

I. 电... II. ①陈... ②陈... ③万... ④高... III. 电力系统稳定—分析—高等学校—教材 IV. TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 069753 号

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1985 年 5 月第一版

2007 年 6 月第三版 2007 年 6 月北京第二十四次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 413 千字

印数 24021—27020 册 定价 27.00 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

前 言

本书自第二版问世以来,又过去了12年。这期间,本书获得了国家优秀教学成果奖,但陈珩先师不幸西去,使我们深感悲痛。鉴于电力工业和电力系统的发展,教材必须作出相应的变化,因此出版社约请我们进行修订。在集体讨论的基础上,确定了修订原则:不作大的改动,只去掉了部分与现实发展不符的内容,同时增加了一些新的内容。具体体现在以下几方面:删去了第一章第二节;用新的第三章第三节“配电网潮流计算的特点”代替了原来的“电力网络的简化方法及其应用”;在第四章中增加了第六节“电力系统状态估计与最优潮流简介”;在第五章第二节中增加了“电力市场及其对电力系统经济运行的影响”。

我们期望,上述修改能适应新形势下的教学要求,同时衷心欢迎使用者提出宝贵意见。

修订者

2007年4月

第一版前言

本书是根据 1982 年 9 月高等学校电力工程专业教材编审委员会电力系统教材编审小组会议上审定的同名教学大纲以及同年 12 月电力系统教材编审小组扩大会议上制订的相应教材编写大纲编写的。仅需作以下几点说明：

教学大纲中规定“交流远距离输电的概念”和“直流输电的概念”为必修内容。但编写实践中发现，对初学者，这两部分似嫌过深，又因篇幅有限，将其删去。

教学大纲中虽未包括“支路追加法”，但教材编审小组扩大会议上多数与会者主张以小字纳入，编者接受了会议意见。

教学大纲中虽未包括“无功功率的最优补偿”，但编写过程中深感化少量篇幅予以讨论将是有益的，书中以小字对此问题作了简介。

本书初稿完成后，蒙上海交通大学黄家裕仔细审阅，并提出了不少宝贵意见和建议，得益匪浅，谨致谢忱。但因编者水平有限，书中错误和不妥之处仍在所难免，尚希广大读者不吝指正。

编者
1984 年 3 月

第三版前言

本书第一版出版至今已 10 年。10 年来,我国电力工业和电力系统的规模以及科学技术水平都有了突飞猛进的发展,这种发展理应在高等学校的教学中有所反映,修订本书已刻不容缓。修订本书过程中,恰逢新一届电力工程类专业教学指导委员会成立,并重新制订了对电力系统分析课程的基本要求,此次修订就是在 1994 年 4 月新制订的基本要求框架内进行的。

修订版与第一版的主要不同体现在以下几方面:

鉴于同名课程是电力系统及其自动化专业的第一门专业课程,有必要使学生在接触本专业之初,对我国电力工业和电力系统的现状以及相应的技术政策,对电力系统工程学科的内涵有一基本了解,修订版中增加了这些内容。诚然,随着时间的推移,这些内容需不断更新。讲授本课时,可依据我国电力工业信息研究部门已定期出版的有关资料,根据需要随时补充、修改。

鉴于计算机的使用已日益普及,修订版中扩充了有关计算机应用的篇幅并对原有编写顺序作了相应调整。诸如增加了稀疏技术的运用,并将各元件特性和数学模型集中阐述等。与此同时,对手算部分作了删节。

鉴于电力线路的结构和导线截面积的选择将以其他方式进行教学,故修订时大幅度地压缩了前者并全部删除了后者。

无疑,吐故纳新是修订任何书籍都自然遵循的原则,本书也不例外。本着这一原则,修订过程中删除了若干陈旧或不实用的内容,代之以有发展前景或更实用的内容。如删去了借串联补偿电容器调压、以节点阻抗矩阵法计算网损微增率等,引入了潮流的调整控制(灵活交流输电系统)、以转置雅可比矩阵法计算网损微增率等。目录中的“*”号为非必修内容。

但挂一漏万,修订后的本书仍难以尽善,错误和不妥之处仍在所难免,仍希广大读者不吝指正。

最后,借此修订版出版之机,编者谨向本书第一版广大读者,尤其是对其提出批评建议的读者,向不辞辛劳仔细审阅本书第一版和此次修订版初稿的上海交通大学黄家裕教授致以衷心的感谢。修订过程中,编者引用了水利电力信息研究所编辑出版,由孙嘉平、柳椿生主编的《中国电力工业 1993》一书部分内容,引用了东南大学李乃湖、刘中岳和已故张蔼乐老师未公开出版的论文。对这些作者的无私支持,谨致以衷心的感谢。

编者

1995 年 1 月

目 录

前言

第一版前言

第二版前言

第一章 电力系统的基本概念	1
第一节 电力系统概述	1
第二节 电力系统运行应满足的基本要求	5
第三节 电力系统的接线方式和电压等级	7
第四节 电力系统工程学科和电力系统分析课程	12
小结	14
第二章 电力系统各元件的特性和数学模型	15
第一节 发电机组的运行特性和数学模型	15
第二节 变压器的参数和数学模型	20
第三节 电力线路的参数和数学模型	26
第四节 负荷的运行特性和数学模型	54
第五节 电力网络的数学模型	60
小结	71
第三章 简单电力网络的计算和分析	73
第一节 电力线路和变压器运行状况的计算和分析	73
第二节 辐射形和环形网络中的潮流分布	82
第三节 配电网潮流计算的特点	99
第四节 电力网络潮流的调整控制	104
小结	109
第四章 复杂电力系统潮流的计算机算法	111
第一节 电力网络方程	111
第二节 功率方程及其迭代解法	123
第三节 牛顿—拉夫逊法潮流计算	129
第四节 PQ 分解法潮流计算	142
* 第五节 潮流计算中稀疏技术的运用	150
* 第六节 电力系统状态估计与最优潮流简介	165
小结	171

第五章 电力系统的有功功率和频率调整	173
第一节 电力系统中有功功率的平衡	173
第二节 电力系统中有功功率的最优分配	176
第三节 电力系统的频率调整	201
小结	218
第六章 电力系统的无功功率和电压调整	220
第一节 电力系统中无功功率的平衡	220
第二节 电力系统中无功功率的最优分布	227
第三节 电力系统的电压调整——电压管理和借发电机、变压器调压	236
第四节 电力系统的电压调整——借补偿设备调压和组合调压	244
小结	260
参考文献	262

第一章 电力系统的基本概念

本章介绍有关电力系统的基本知识和电力系统的基本情况。

第一节 电力系统概述

一、电力系统的形成和发展

1831年法拉第发现了电磁感应定律。在此基础上,很快出现了原始的交流发电机、直流发电机和直流电动机。由于当时发电机发出的电能仅用于电化学工业和电弧灯,而电动机所需的电能又来自蓄电池,电机制造和电力输送技术的发展最初集中于直流电。原始的电力线路使用的就是100~400V低压直流电。由于输电电压低,输送的距离不可能远,输送的功率也不可能大。

第一次高压输电出现于1882年。法国人M·德波列茨将位于弥斯巴赫煤矿的蒸汽机发出的电能输送到57km外的慕巴黑,并用以驱动水泵。当时他采用的发电机如图1-1所示,采用的电压为直流1500~2000V,输送的功率约1.5kW。这个输电系统虽规模很小,却可认为是世界上第一个电力系统,因为它包含了电力系统的各个重要组成部分,即发电、输电、用电设备。

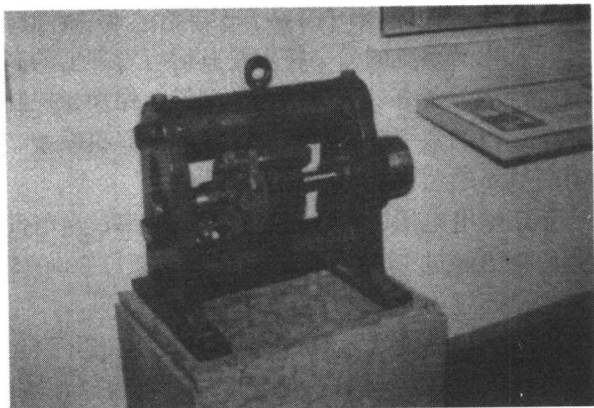


图1-1 第一个直流输电系统中使用的发电机^①

生产的发展对输送功率和输送距离提出了进一步要求,以致直流输电已不能适应。于是,1885年在制成变压器的基础上,实现了单相交流输电;1891年在制成三相变压器和三相异步电动机的基础上,实现了三相交流输电。

1891年在法兰克福举行的国际电工技术展览会上,在德国人奥斯卡·冯·密勒主持下展出的输电系统,奠定了近代输电技术的基础。这一系统起自劳芬镇,止于法兰克福,全长178km。设在劳芬镇的水轮发电机组,如图1-2所示,其功率为230kVA,电压为95V,转速为150r/min。升压变压器将电压升高至25000V,电功率经直径为4mm的铜线输送至法兰克福。在法兰克福,用两台降压变压器将电压降至112V。其中一台变压器供电给白炽灯,另一台给异步电动机,电动机又驱动一台功率为75kW的水泵。显然,这已是近代电力系统的雏形,它的建成标志了电力系统的发展取得了重大突破。

嗣后,三相交流制的优越性很快显示出来,使运用三相交流制的发电厂迅速发展,而直流制

^① 摘自慕尼黑德意志博物馆。

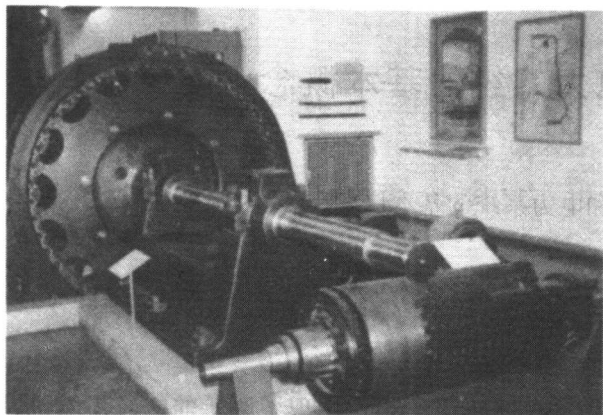


图 1-2 第一个三相交流输电系统中使用的发电机^①

不久便被淘汰。再稍后, 汽轮发电机组又取代了以蒸汽机为原动机的发电机组, 发电厂之间出现了并列运行, 输电电压、输送距离和输送功率不断增大, 更大规模的电力系统不断涌现。仅数十年, 在一些国家中甚至出现了全国性和跨国性的电力系统。

二、近代电力系统

与 100 余年前电力系统的雏形相比, 近代电力系统不仅在输电电压、输送距离、输送功率等方面有了千百倍的增长, 而且在电源构成、负荷成分等方面也有很大变化。在这些系统中, 不仅有燃烧煤、石油、天然气等利用化学能的火力发电厂, 利用水能的水力发电厂, 利用核能的原子能发电厂, 也还有利用太阳能、风能、潮汐能、地下热能等的发电厂。在负荷成分方面, 不仅有电动机、电灯, 还有相当比重的电热电炉、整流装置等。

近代电力系统的另一特点是其运行管理上的高度自动化。如今, 不仅组成电力系统的各环节都配备有日益数字化的测量、保护、控制装置, 而且不少电力系统还配有用以管理全系统运行的数字计算机系统。这种计算机系统, 称为能量管理系统。它与电力系统联机, 具有持续不断监视、控制后者的功能。

至于输电电压、输送距离和输送功率, 当前世界上输电线路的输电电压已超过 1000kV, 输送距离已超过 1000km, 输送功率已超过 5000MW。而个别跨国电力系统中发电设备的总容量则已超过 400GW。

值得一提的是, 为彻底解决同步发电机并列运行的稳定性问题, 进一步提高输送能力, 直流输电又重新被起用。但今日的直流输电, 输电电压已超过 $\pm 600\text{kV}$, 输送距离已超过 1000km, 输送功率已超过 3000MW, 与百余年前德波列茨的试验相比, 已有霄壤之别。

本书及其姊妹篇《电力系统暂态分析》中将涉及的电力系统就是这种近代电力系统。这种电力系统中各环节相互间的联系如图 1-3 所示。其中, 锅炉和反应堆分别将化学能和核能转化为热能, 汽轮机又将后者转化为机械能, 水轮机则直接将水能转化为机械能。发电机将机械能转化为电能, 而变压器和电力线路则变换、输送、分配电能, 电动机、电热电炉、电灯等消耗电能。在这些设备中, 电能又分别转化为机械能、热能、光能, 等等。

由此可见, 广义的电力系统应该是由锅炉、反应堆、汽轮机、水轮机、发电机等生产电能的设备, 变压器、电力线路等变换、输送、分配电能的设备, 电动机、电热电炉、电灯等各种消耗电能的设备, 以及未示于图 1-3 中的测量、保护、控制装置乃至能量管理系统所组成的统一整体, 是一个十分庞大而复杂的研究对象。

电力系统中, 由变压器、电力线路等变换、输送、分配电能设备所组成的部分常称电力网络, 即图 1-3 中虚线所框出部分。

^① 摘自慕尼黑德意志博物馆。

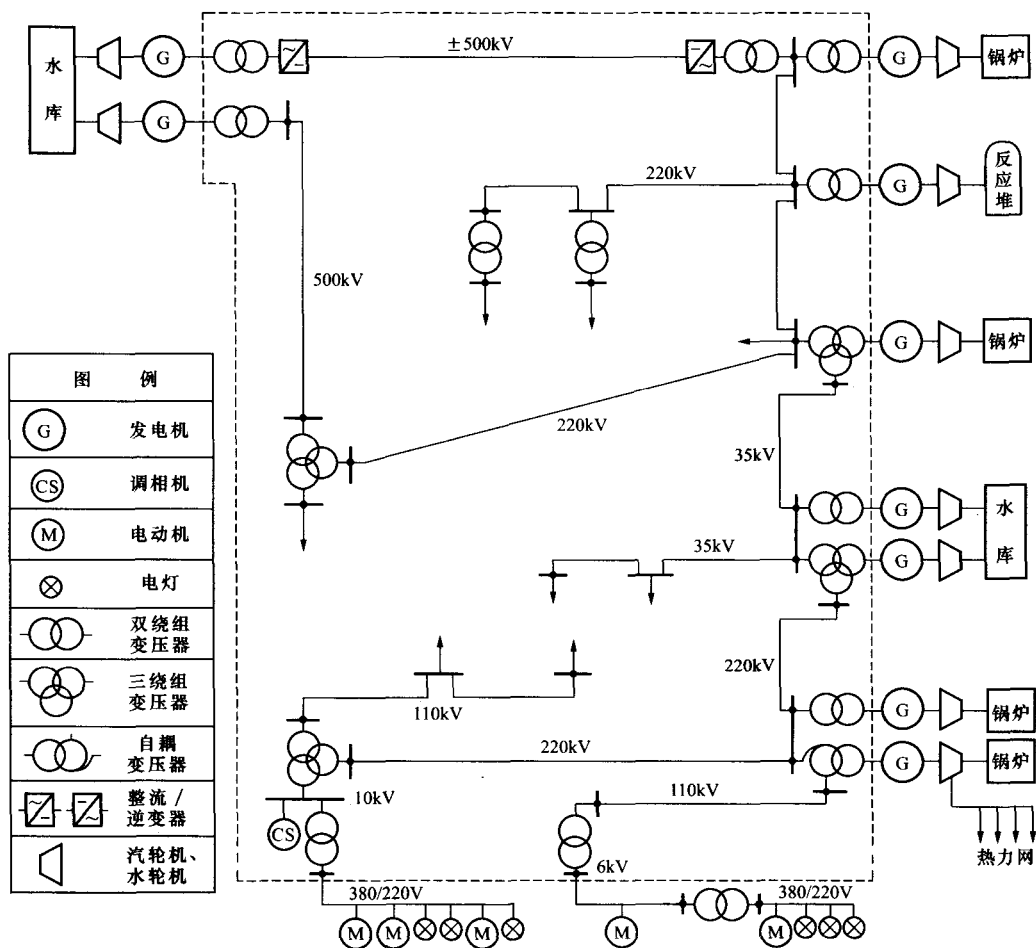


图 1-3 电力系统和电力网络示意图

三、电力系统的基本参量和结线图

对一个电力系统的初步认识往往应先了解其基本参量和结线图。描述一个电力系统的基本参量有总装机容量、年发电量、最大负荷、额定频率和最高电压等级，结线图则有地理结线图和电气结线图。分别简述如下：

(1) 总装机容量。电力系统的总装机容量指该系统中实际安装的发电机组额定有功功率的总和，以千瓦 (kW)、兆瓦 (MW)、吉瓦 (GW) 计。例如，1992 年底我国华东电力系统的总装机容量为 26703.6MW。

(2) 年发电量。电力系统的年发电量指该系统中所有发电机组全年实际发出电能的总和，以兆瓦·时 (MW·h)、吉瓦·时 (GW·h)、太瓦·时 (TW·h) 计。例如，1992 年华东电力系统的年发电量为 133.086TW·h。

(3) 最大负荷。最大负荷一般指规定时间，如一天、一月或一年内，电力系统总有功功率负荷的最大值，以千瓦 (kW)、兆瓦 (MW)、吉瓦 (GW) 计。

(4) 额定频率。按国家标准规定，我国所有交流电力系统的额定频率均为 50Hz。国外则有额定频率为 60Hz 或 25Hz 的电力系统。

(5) 最高电压等级。如图 1-3 所示，同一电力系统中的电力线路往往有几种不同电压

等级。所谓某电力系统的最高电压等级，是指该系统中最高电压等级电力线路的额定电压，以千伏 (kV) 计。例如，图 1-3 所示系统的最高电压等级为 500kV。

(6) 地理结线图。电力系统的地理结线图主要显示该系统中发电厂、变电所的地理位置，电力线路的路径，以及它们相互间的联结。因此，由地理结线图可获得对该系统的宏观印象。但由于地理结线图上难以表示各主要电机、电器间的联系，对该系统的进一步了解，还需阅读其电气结线图。华东电力系统的地理结线图如图 1-4 所示。

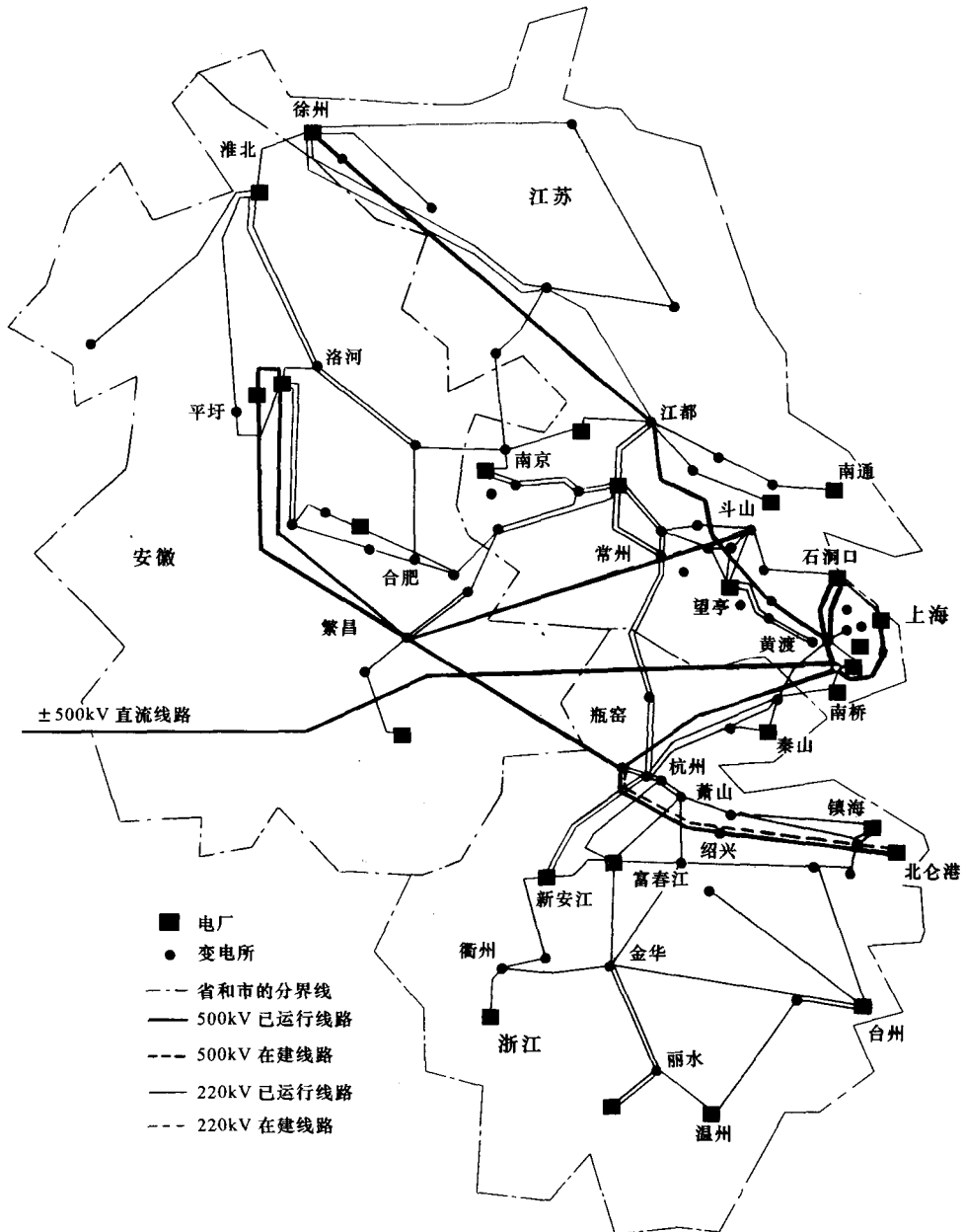


图 1-4 华东电力系统地理结线图

(7) 电气结线图。电力系统的电气结线图主要显示该系统中发电机、变压器、母线、断路器、电力线路等主要电机、电器、线路之间的电气接线。因此,由电气结线图可获得对该系统的更细致了解。但由于电气结线图上难以反映各发电厂、变电所、电力线路的相对位置,阅读电气结线图时,又常需参阅地理结线图。图 1-3 中,表示发电机、变压器、母线、电力线路相互联结的部分实际上就是一种简化的电气结线图。

第二节 电力系统运行应满足的基本要求

对近代电力系统有一初步认识后,就可对这一始终处于运动之中、富有活力的研究对象如何运行的问题,作一初步探索。而在此之前,需先对电能生产、输送、消费的特点作一说明。

一、电能生产、输送、消费的特点

电能也是商品,和其他商品一样,也有其生产、输送和消费。但电能及其生产、输送和消费,却有极明显的特殊性。

1. 电能与国民经济各个部门之间的关系都很密切

由于电能与其他能量之间转换方便,宜于大量生产、集中管理、远距输送、自动控制,使用电能较其他能量有显著优点,各部门都广泛使用电能。电能供应的中断或减少将影响国民经济的各个部门。

2. 电能不能大量储存

电能的生产、输送和消费实际上是同时进行的,即发电设备任何时刻生产的电能必须等于该时刻用电设备消费与输送中损耗电能之和,而且这一数值还随时间不断变化。

3. 生产、输送、消费电能各环节所组成的统一整体不可分割

由于电能不能大量储存,必须保持电能生产、输送、消费流程的连续性,由这些环节组成的统一整体——电力系统,是不可分割的。

4. 电能生产、输送、消费工况的改变十分迅速

发电机、变压器、电力线路、用电设备的投入或退出都在一瞬间完成,且电能从一处输送至另一处所需的时间以 $10^{-3} \sim 10^{-6} \text{ s}$ 计,所以电能生产、输送、消费工况的改变十分迅速。

5. 对电能质量的要求颇为严格

电能质量的好坏指电源电压的大小、频率和波形能否满足要求。电压的大小、频率偏离要求值过多或波形因谐波污染严重而不能保持正弦时,都可能导致产生废品、损坏设备,甚至大面积停电。因此,对电压大小、频率的偏移以及谐波分量都有一定限额。而且,由于系统工况时刻变化,这些偏移量和谐波分量是否总在限额之内,需经常监测,要求颇严。

二、对电力系统运行的基本要求

根据电能生产、输送、消费的特殊性,对电力系统的运行有如下三点基本要求。

1. 保证可靠地持续供电

供电的中断将使生产停顿、生活混乱,甚至危及人身和设备安全,形成十分严重的后果。停电给国民经济造成的损失远远超过电力系统本身的损失。因此,电力系统运行首先要满足可靠、持续供电的要求。

电力系统中的事故将造成计划外的供电中断。形成事故的原因很多,某电力系统的统计资料表明,稳定性破坏事故的直接原因中,设备质量差引起的占32%,自然灾害引起的占16.6%,继电保护误动作引起的占13.2%,人员过失引起的占17%,运行管理水平低引起的占21.2%。因此,减少这种系统性事故也应从多方面着手。防止设备事故的对策在于严密监视设备的运行,及时、认真地维修,防患于未然。为不致产生人为事故,则要求运行人员不断提高技术水平,严肃、认真地工作,而在个别元件发生事故时,能迅速、正确地处理事故。此外,完善电力系统的结构,提高其抗扰动能力;采用计算机监视、控制电力系统的运行等都是重要的技术措施。

虽然保证可靠供电是对电力系统运行的首要要求,但并非所有负荷都绝对不能停电。一般,可根据经验,按对供电可靠性的要求将负荷分为三级:

(1) 第一级负荷。对这一级负荷中断供电,将造成人身事故、设备损坏,将产生废品,使生产秩序长期不能恢复,人民生活发生混乱等。

(2) 第二级负荷。对这一级负荷中断供电,将造成大量减产,将使人民生活受到影响等。

(3) 第三级负荷。所有不属于第一、二级的负荷,如工厂的附属车间、小城镇等。

此外,还有为数极少或持续时间很短的特殊重要负荷要求绝对可靠地不间断供电。

对第一级负荷要保证不间断供电;对第二级负荷,如有可能,也要保证不间断供电。

长期以来,对供电可靠性的分析就是上述以经验为基础的定性分析,只是近年来才开展以概率统计为基础的定量分析研究。目前,这种研究正在继续深入,部分成果已用于生产。

2. 保证良好的电能质量

如上所述,电能质量包含电压质量、频率质量和波形质量三个方面。电压质量和频率质量一般都以偏移是否超过给定值来衡量,例如给定的允许电压偏移为额定值的 $\pm 5\%$,给定的允许频率偏移为 $\pm 0.2 \sim 0.5 \text{ Hz}$ 等。波形质量则以畸变率是否超过给定值来衡量。所谓畸变率(或正弦波形畸变率),是指各次谐波有效值平方和的方根值与基波有效值的百分比。给定的允许畸变率常因供电电压等级而异,例如,以380、220V供电时为5%,以10kV供电时为4%,等等。所有这些质量指标,都必须采取一切手段予以保证。

对电压和频率质量的保证,我国电力工业部门多年来早已有要求,并已将其作为考核电力系统运行质量的重要内容之一。在当前条件下,为保证这些质量指标,必须做到大量增加系统中无功功率、无功功率的电源,充分发挥现有电源的作用,合理调配用电、节约用电,不断提高系统的自动化程度等。

在我国,对波形质量的要求只是在系统中谐波污染日益严重的情况下才开始注意的,有关规定还有待继续完善。所谓保证波形质量,就是指限制系统中电流、电压的谐波,而其关键则在于限制各种换流装置、电热电炉等非线性负荷向系统注入的谐波电流。至于限制这类谐波电流的方法,则有更改换流装置的设计、装设滤波器、限制不符合要求的非线性负荷的接入等。

3. 保证系统运行的经济性

电能生产的规模很大,消耗的一次能源在国民经济一次能源总消耗中占的比重约为1/3(见图1-6),而且电能变换、输送、分配时的损耗绝对值也相当可观。因此,降低每生产一度电所消耗的能源和降低变换、输送、分配时的损耗,有极重要的意义。在这一方面,又

有两个考核电力系统运行经济性的重要指标，即煤耗率和线损率。所谓煤耗率，是指每生产 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电能所消耗的标准煤重，以 $\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 为单位，而标准煤则是指含热量为 $29.31\text{MJ}/\text{kg}$ 的煤。所谓线损率或网损率，是指电力网络中损耗的电能与向电力网络供应电能的百分比。

为保证系统运行的经济性，应开展系统经济运行工作，使各发电厂所承担的负荷能合理分配。例如，使水力发电厂能充分利用水能，避免弃水；使火力发电厂中经济性能好的多发，差的少发电，并避免频繁开停机组；使功率在系统中合理分布以降低电能变换、输送、分配中的损耗，等等。

除此而外，环境保护问题日益为人们所关注。不久，对电能生产过程中的污染物质——飞灰、灰渣、废水、氧化硫、氧化氮等——排放量的限制，也将成为对电力系统运行的基本要求。

可以想见，根据对电力系统运行的基本要求，最好将单一系统联合，组成联合电力系统。这样，可大大提高供电的可靠性，减少为防止设备事故引起供电中断而设置的备用容量；可更合理地调配用电，降低联合系统的最大负荷，提高发电设备的利用率，减少联合系统中发电设备的总容量；可更合理地利用系统中各种类型的发电厂，从而提高运行的经济性。同时，由于个别负荷在系统总负荷中所占比重的减小，其波动对系统电能质量的影响也将减小。联合电力系统容量很大，个别机组的开停甚至故障，对系统的影响将减少，从而可采用大容量、高效率的机组。

第三节 电力系统的结线方式和电压等级

一、几种典型结线方式的特点

现实生活中的电力系统结线往往十分复杂。但仔细分析这些地理结线图又可发现，尽管十分复杂，却可将它们看作是若干个简单系统的复合。尤其是这些系统中的 500kV 或 330kV 网络，由于它们本身结线简洁，更易于分解。分解所得的简单系统，大致可分为无备用和有备用结线两类。无备用结线包括单回路放射式、干线式和链式网络，如图 1-5 所示。有备用结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 1-6 所示。

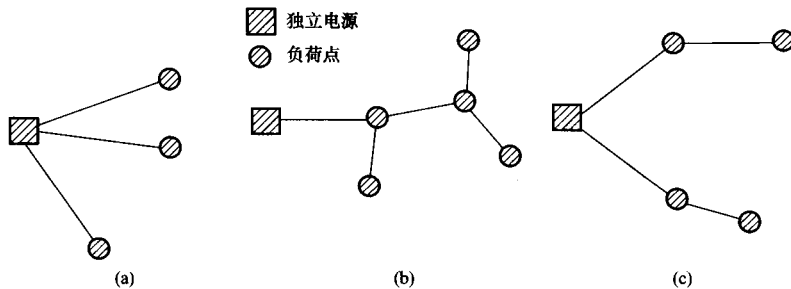


图 1-5 无备用结线方式

(a) 放射式；(b) 干线式；(c) 链式

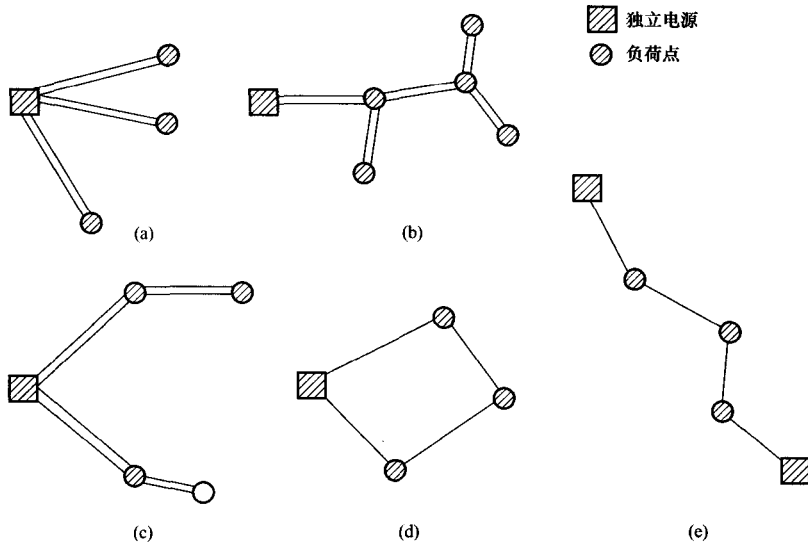


图 1-6 有备用接线方式

(a) 放射式; (b) 干线式; (c) 链式; (d) 环式; (e) 两端供电网络

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，这种接线不适用于一级负荷占很大比重的场合。但在一级负荷的比重不大，并可为这些负荷单独设置备用电源时，仍可采用这种接线。这种接线方式之所以适用于二级负荷是由于架空电力线路已广泛采用自动重合闸装置，而自动重合闸的成功率相当高。

有备用接线中，双回路的放射式、干线式、链式网络的优点在于供电可靠性和电压质量高，缺点是可能不够经济。因双回路放射式接线对每一负荷都以两回路供电，每回路分担的负荷不大，而在较高电压级网络中，往往由于避免发生电晕等原因，不得不选用大于这些负荷所需的导线截面积，以致浪费有色金属。干线式或链式接线所需的断路器等高压电器很多。有备用接线中的环式接线有与上列接线方式相同的供电可靠性，但却较它们经济，缺点为运行调度较复杂，且故障时的电压质量差。有备用接线中的两端供电网络最常见，但采用这种接线的先决条件是必须有两个或两个以上独立电源，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。

接线方式需经仔细比较后方能确定。所选接线除保证供电可靠、有良好的电能质量和经济指标外，还应保证运行灵活和操作时的安全。

二、不同电压等级的适用范围

1. 电力系统的额定电压等级

近代电力系统中，各部分电压等级之所以不同，是因三相功率 S 和线电压 U 、线电流 I 之间的关系为 $S = \sqrt{3}UI$ 。当输送功率一定时，输电电压愈高，电流愈小，导线等载流部分的截面积愈小，投资愈小；但电压愈高，对绝缘的要求愈高，杆塔、变压器、断路器等绝缘的投资也愈大。综合考虑这些因素，对应于一定的输送功率和输送距离应有一最合理的线路电压。但从设备制造角度考虑，为保证生产的系列性，又不任任意确定线路电压。另外，规定的标准电压等级过多也不利于电力工业的发展。考虑到现有的实际情况和进一步的发展，我国国家标准规定的标准电压（又称额定电压）如表 1-1 所示。选择电力线路电压时，只

能选用国家规定的电压等级。

表 1-1

额定电压等级

(kV)

用电设备额定线电压	交流发电机电压	变压器线电压	
		一次绕组	二次绕组
3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
	15.75	15.75	
35		35	38.5
(60)		(60)	(66)
110		110	121
(154)		(154)	(169)
220		220	242
330		330	345 及 363
500		500	525 及 550

现将表中用电设备、发电机、变压器的额定电压之所以不一致，以及它们与线路额定电压之间的关系说明如下。

经线路输送功率时，沿线路的电压分布往往是始端高于末端。例如，图 1-7 中，沿线段 ab 的电压分布可能如直线 U_a-U_b 所示。从而，图中用电设备 1~7 的端电压将各不相同。所谓线路的额定电压 U_N 实际就是线路的平均电压 $(U_a+U_b)/2$ ，而各用电设备的额定电压则取与线路额定电压相等，使所有用电设备能在接近它们的额定电压下运行。

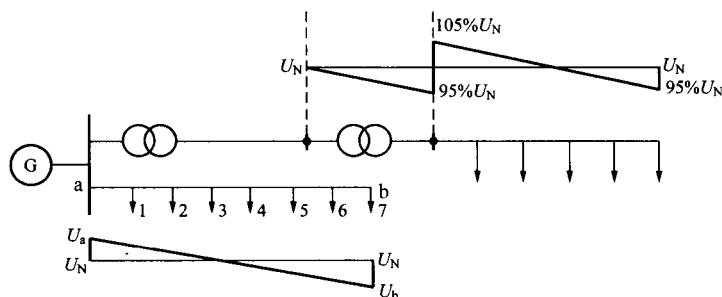


图 1-7 电力网络中的电压分布

由于用电设备的容许电压偏移一般为 $\pm 5\%$ ，而沿线路的电压降落一般为 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% 。发电机往往接在线路始端，因此，发电机的额定电压为线路额定电压的 105% 。

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额定电压（直接和发电机相联的变压器一次侧额定电压应等于发电机额定电压），二次侧电压应较线路额定电压高 5% 。但又因变压器二次侧电压规定为空载时的电压，而额定负荷下变压器内部的电压降落约为 5% 。为使正常运行时变压