

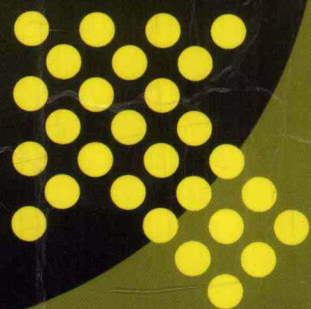
21世纪高等学校规划教材



DIANWANG JI BIANDIANZHAN YUNXING
FENXI YU FANGZHEN

电网及变电站运行 分析与仿真

李国庆 主 编
刘柏林 聂永辉 副主编



中国电力出版社

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

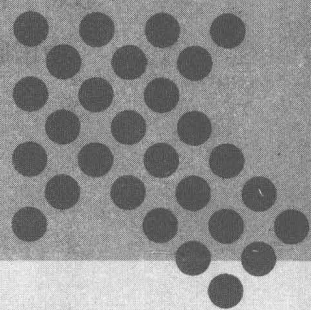
21世纪高等学校规划教材



DIANWANG JI BIANDIANZHAN YUNXING
FENXI YU FANGZHEN

电网及变电站运行 分析与仿真

主 编 李国庆
副主编 刘柏林 聂永辉
编 写 刘彦臣 王晓亮
主 审 王成山



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分为八章，主要内容包括电力系统基本知识、仿真系统介绍、仿真电网运行训练、变电站一次系统、变电站二次系统、变电站倒闸操作、典型事故处理、变电站设备巡视与缺陷处理。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化等专业的本科教材和实习教材，也可作为高职高专院校和函授相关专业的教材，同时可作为电网、变电站运行人员的培训教材和参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电网及变电站运行分析与仿真/李国庆主编. —北京:
中国电力出版社, 2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8878 - 6

I. 电… II. 李… III. 电力系统运行—高等学校—
教材 IV. TM732

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 084797 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 12 月第一版 2009 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 458 千字

定价 29.80 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

随着电网容量的不断增大和电压等级的不断提高,对电网及变电站运行技术的要求越来越高,同时也对电网运行的安全稳定问题提出了更加严峻的挑战。电力系统一旦发生故障而不能及时正确地处理,有可能会造成事故的扩大,酿成大面积停电,给社会造成严重影响。由于电力系统运行与分析涉及大系统理论、现代控制理论、计算机及通信技术等多学科的知识,运行中的操作及事故处理过程也相当复杂,对现场运行人员来说,没有一定的专业知识和运行经验的储备,当系统发生故障时就很难做出快速、准确的判断和处理。上述这些知识和经验的积累,如果只依赖实际现场的运行是难以完全做到的。电网及变电站运行仿真技术的发展为解决这一问题提供了良好的实践与训练平台。“多级电网、变电站联合仿真培训系统”是以一个包括省级、地区级、县级电网的三级虚拟电网和其中具有代表性接线方式及保护配置的变电站、集控站为模型,并考虑虚拟电网中其他变电站和集控站,采用数字仿真技术将电网仿真、电网调度自动化系统仿真、变电站仿真及变电站自动化系统仿真有机结合成一体化的综合仿真培训系统,实现了电网输变电运行生产的全范围、全过程的仿真。利用该仿真培训系统,可以使电网运行人员快速积累运行经验,有效提高操作水平及事故分析与决策能力,为确保电网的安全稳定运行奠定坚实的基础。

目前,国内尚无结合仿真培训系统全面介绍电网、变电站运行相关知识的实习(培训)教材。本书以此目的出发,结合“多级电网、变电站联合仿真培训系统”,介绍了电网、变电站从运行、倒闸操作到事故处理的全过程。全书在编写过程中力求突出以下特点。

(1) 本书对“多级电网、变电站联合仿真培训系统”的各部分进行翔实阐述,使读者能够较全面地了解该系统的功能、掌握系统的使用方法,进而达到模拟实际电网、变电站运行与培训的目的。

(2) 结合该仿真培训系统,介绍了电网、变电站及主要电气设备的构成、运行特性及工作原理。通过电网及变电站的模拟运行,使读者能够更直观、深刻地了解和掌握电网、变电站及主要电气设备的运行特性。通过仿真操作训练,使读者能更好地掌握和运用所学的专业理论知识,学以致用,提高实践能力和运行操作水平。

(3) 结合该仿真培训系统,根据电网不同运行方式和调度要求,详细介绍了现场运行操作、事故处理及分析的基本原则,并通过具体操作,能够真实再现事故发生、发展的全过程。

全书共分八章。第一章介绍了电力系统基本知识;第二章介绍了仿真系统的组成、功能和操作方法;第三章介绍了电网仿真的运行训练;第四、五章分别介绍了变电站一、二次系统;第六章详细介绍和分析了现场不同电压等级变电站的典型倒闸操作过程;第七章介绍了电力系统运行过程中典型故障的处理方法;第八章介绍了变电站巡视和设备缺陷处理的原则。

本书由东北电力大学李国庆担任主编并负责全书的统稿,刘柏林、聂永辉担任副主编,

刘彦臣、王晓亮为参编。书中第一、四章由聂永辉编写，第二章由刘彦臣编写，第三、由李国庆编写，第五、七章由刘柏林编写，第八章由王晓亮编写。

全书由天津大学王成山教授主审并提出了很多宝贵的意见。本书在编写过程中得到京科东电力控制系统有限责任公司和学校许多教师的大力帮助和支持，也参考了许多资料。在此一并表示衷心的感谢。

由于现场运行经验不足，加之水平有限，欠妥之处在所难免，请读者批评指正。

编 者

2008 年 9 月

目 录

前言

第一章 电力系统基本知识	1
第一节 电力系统的组成及特点.....	1
第二节 发电厂和变电站的类型及设备.....	3
第三节 电力系统的接线方式和电压等级.....	7
第四节 电力系统稳态分析与计算	10
第五节 电力系统暂态分析与计算	25
第六节 电力系统中性点运行方式	38
第二章 仿真系统介绍	42
第一节 仿真系统功能介绍	42
第二节 仿真系统硬件构成	43
第三节 仿真系统使用说明	44
第三章 仿真电网运行训练	57
第一节 仿真电网潮流分布	57
第二节 仿真电网有功功率平衡及频率调整	63
第三节 仿真电网无功平衡与电压调整	66
第四节 仿真电网暂态稳定性验证	71
第五节 电网故障示例	74
第四章 变电站一次系统	76
第一节 电气主接线	76
第二节 变压器	84
第三节 断路器	87
第四节 其他主要电气设备	90
第五节 仿真变电站一次系统介绍	97
第五章 变电站二次系统	117
第一节 二次回路的基本概念.....	117
第二节 变电站的操作电源及绝缘监察.....	119
第三节 断路器的控制回路.....	123
第四节 中央信号回路.....	129
第五节 同期回路.....	134
第六节 输电线路的继电保护.....	139
第七节 变压器的继电保护.....	145
第八节 母线保护.....	153

第九节	仿真变电站二次系统介绍	155
第六章	变电站倒闸操作	193
第一节	倒闸操作的基本概念	193
第二节	倒闸操作的技术要求	194
第三节	母线倒闸操作	198
第四节	线路倒闸操作	213
第五节	变压器倒闸操作	219
第六节	典型接线变电站操作票	224
第七章	典型事故处理	245
第一节	事故处理原则	245
第二节	事故预想与事故处理	247
第三节	变电站常见异常处理	269
第八章	变电站设备巡视与缺陷处理	275
第一节	变电站设备巡视检查	275
第二节	变电站缺陷	279
参考文献		292

第一章 电力系统基本知识

第一节 电力系统的组成及特点

一、电力工业的发展概况

电力工业是国民经济最重要的组成部分，它是指把自然界提供的一次能源（包括煤炭、石油、天然气、水能、核能、风能、地热能 and 潮汐能等）转换成生产、生活中广泛使用的电能过程中的相关产业。在现代社会中，电力已经成为工业、农业、交通和国防各行各业不可缺少的动力，而且和广大人民群众生活密切相关。世界各国的发展表明，国民经济每增长 1%，电力工业要相应增长 1.3%~1.5%，才能为国民经济快速稳定增长提供足够的动力。因此，电力工业是国民经济发展的基础产业，没有电力工业的先行，就没有国民经济快速稳定的增长。

我国电力工业发展速度很快，目前已开始进入大电网、大机组、超（特）高压交直流输电等新技术发展的新阶段。截至 2007 年底，全国的装机容量已经达到 71 329 万 kW（其中火电 55 442 万 kW、水电 14 526 万 kW、核电 885 万 kW），年增长 14.36%；年发电量达到 32 559 万 kW·h，年增长 14.44%。装机容量和发电量已由解放时世界的第 25 位跃升为仅次于美国的第 2 位。预计到 2020 年，我国电力装机容量将达到 95 000 万 kW。目前，一大批 500kV 交流输电线路和直流 ±500kV 输电线路已经投入运行，750kV 输电线路已经带电试运行，交流 1000kV 和直流 ±800kV 特高压输变电工程已经列入“十一五”规划。全国已经形成南方、东北、西北、华北、华中、华东六个大跨省区域电网以及山东、福建、海南、新疆、西藏和台湾六个独立省（自治区）电网。从 1998 年后，国家又投入巨资对城乡配电网进行了改造，大量的新设备、新技术、新工艺投入使用。这些措施都为国民经济的快速和可持续发展以及人民生活水平的提高起到了积极的推动作用。

二、电力系统的组成

由于电能的生产和消费是一个能量的不断转换过程，为了便于电能的转换，发电厂宜建设在一次能源所在地，而一次能源所在地和电能用户所在地通常有相当远的距离。例如，水利资源集中在水流落差比较大的偏远山区，煤炭和石油资源集中在矿区，而电能用户一般都集中在大、中城市和负荷集中的大工业区，与一次能源产地相距甚远。虽然火力发电厂也可以建设在负荷中心附近，但是高昂的燃料运输成本和严重的环境污染是人们无法接受的。因此，必须建设升压变电站和输电线路，将地处偏远地区的发电厂发出的电能输送到负荷中心来，再经过降压变电站降压和配电网配送，最后将电能提供给广大用户。

如图 1-1 所示，由发电厂中的电气部分、各类变电站、输配电线路及各种类型的用电设备组成的统一整体称为电力系统。电力系统中各种类型的变电站及输配电线路组成的统一整体，称为电力网，简称电网。如果将各种类型发电厂的原动力部分，如水力发电厂的水库和水轮机、火力发电厂的锅炉和汽轮机、核电厂的核岛（反应堆、汽轮机）等考虑进去，它们与电力系统所组成的统一整体，称为动力系统。

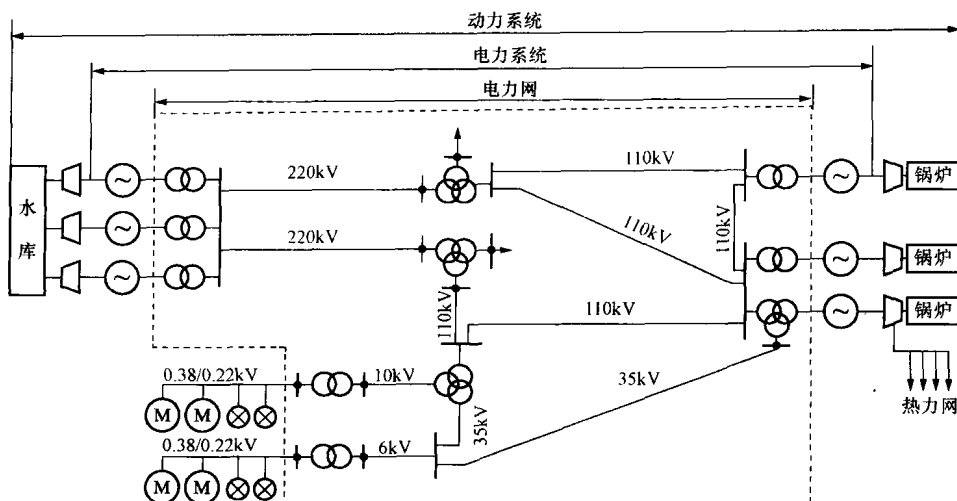


图 1-1 动力系统、电力系统及电力网示意图

三、电力系统的特点

电力系统的规模越来越大，输电距离也越来越远，已经出现了大型的跨国、跨区域互联（联合）电力系统。互联电力系统具有如下优点。

- (1) 提高了供电可靠性；
- (2) 提高了供电的电能质量；
- (3) 可以减少系统的备用容量，提高设备利用率；
- (4) 便于安装大机组，且机组容量越大，技术经济效益越好；
- (5) 可以合理利用动力资源，提高了系统运行的经济性。

虽然互联电力系统具有上述优点，但是随着系统规模的不断扩大，故障影响和波及的范围也在扩大，系统的短路容量也在增大，对电气设备开断短路电流的能力也提出了更高的要求，这也正是互联电力系统需要解决的问题。

电力系统运行的特点，概括起来有以下几个方面。

(1) 发供用电的连续性。现阶段电能尚不能大量地、廉价地储存，发、变、输、配电以及用电几乎同时完成。其中任一环节出现故障，必将影响电力系统的运行。因此，必须努力提高系统各环节运行的可靠性，以保证电力系统的安全、经济、连续、可靠运行和对用户的不间断供电。

(2) 与国民经济关系密切。电力工业与国民经济、人民生活息息相关，是国民经济发展的动力和基础，是人民生活的必需品。电力供应的中断或不足，将直接影响到社会生产、人民生活 and 国民经济的方方面面。

(3) 过渡过程的短暂性。电力系统中发电机、变压器、线路等元件的投入和切除要求非常迅速，由此而引起的系统电磁、机电暂态过程是非常短暂的。因此，正常和故障情况下所进行的调整和切换操作非常迅速，必须依赖自动化程度高和动作可靠的继电保护设备及自动装置来完成，同时还需要大量的、高素质的专门人才来加以控制。

四、对电力系统的基本要求

根据电力系统运行的特点，对电力系统的基本要求主要有以下几个方面。

(1) 保证电力系统运行的安全稳定性。一个安全稳定的系统应具有承受一定程度的干扰和事故的能力, 即当出现预计的干扰或事故时, 系统凭借本身的能力(合理的备用和网架结构)、继电保护及安全自动装置等的作用, 以及运行人员的控制操作, 仍能保证稳定运行, 不发生或不轻易发生大面积停电的系统瓦解事故。因此, 首先要提高系统的运行和管理水平, 防止发生误操作和不必要的人为操作失误使事故扩大化; 其次要加强对设备自身的安全运行检查; 最后要加强和完善电网本身的结构, 增加备用容量和采用必要的自动化设备。

(2) 保证良好的电能质量。电能质量指标是指电压、频率和波形等参数的变化不能超过允许的波动范围。电压的允许波动范围: 35kV 及以上为 $\pm 5\%$, 10kV 及以下为 $\pm 7\%$; 频率的允许偏移为 $50 \pm (0.2 \sim 0.5)$ Hz (小系统为 ± 0.5 Hz, 大系统为 ± 0.2 Hz); 波形应为标准正弦波且谐波应不超过标准。电能质量合格, 用电设备正常工作时具有最佳的技术经济效益; 相反, 电能质量不合格, 不仅对用电设备运行产生影响, 对电力系统本身也有危害。

(3) 保证电力系统运行的经济性。电力系统运行时, 要尽可能地降低发电、变电和输配电过程中的损耗, 最大限度地降低电能成本。这不仅意味着大量地节约了能量资源, 而且也降低了各用电部门的生产成本, 使国民经济整体受益。

第二节 发电厂和变电站的类型及设备

一、发电厂的类型

发电厂是将各种自然资源转换为电能的工厂。按照一次能源的种类不同, 发电厂又可以分为火力发电厂、水力发电厂、核能发电厂及其他形式能源的发电厂。

1. 火力发电厂

利用固体、液体、气体燃料的化学能来生产电能的工厂称为火力发电厂, 简称火电厂。迄今为止, 火电厂仍是世界上电能生产的主要方式, 占发电设备总装机容量的 60% 以上。我国和世界各国的火电厂使用的燃料大多以煤炭为主, 其他还有燃油、天然气以及生活、工业垃圾等燃料。

火电厂在将一次能源转化为电能的过程中, 一般要经过三次能量转换。首先是将燃料的化学能转化为热能, 再经过原动机把热能转变为机械能, 最后通过发电机将机械能转化为电能。火电厂生产过程示意图如图 1-2 所示。

火电厂按照其生产方式不同又可以分为下列类型:

(1) 凝汽式火电厂。将锅炉产生的过热蒸汽送到汽轮机, 通过汽轮机带动发电机发电。而凝汽式火电厂的特点是将已做过功的蒸汽(乏汽)排入凝汽器, 在凝汽器中凝结成水后再重新打入锅炉。在这一过程中, 大量的热量被循环水带走, 因此, 凝汽式火电厂的热效率较低, 一般只有 30%~40%。

(2) 热电厂。热电厂与凝汽式火电厂的主要不同点在于汽轮机中部分已经做过功的蒸汽, 从中间抽出后供给热力用户, 或经热交换器将水加热后再供给热力用户。由于热电厂减少了循环水带走的热量损失, 因此热电厂的热效率较高, 一般可以达到 60%~70%。

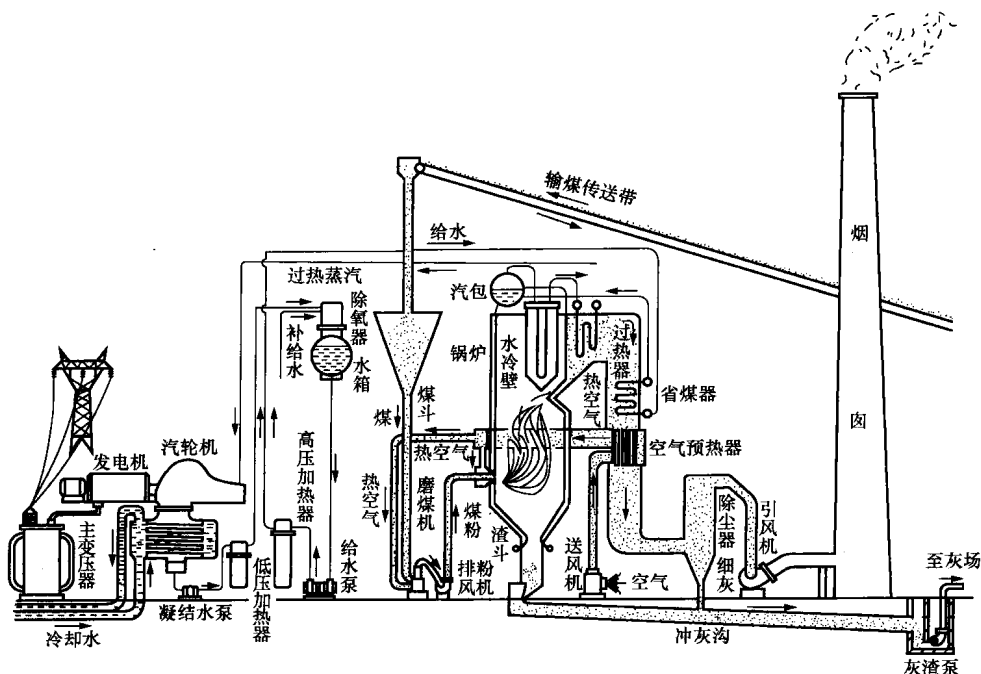


图 1-2 火电厂生产过程示意图

2. 水力发电厂

水力发电厂是利用河流等蕴藏的水能资源来生产电能的工厂，简称水电厂。水电厂将水的位能转换为电能过程中，只有两次能量转换，即通过原动机（水轮机）将水的位能转换为机械能，再通过发电机将机械能转变为电能。根据水利枢纽的布局不同，水电厂又可以分为堤坝式和引水式等类型。

(1) 堤坝式水电厂。如图 1-3 所示，这种发电厂的厂房建在坝后，全部水压由坝体承受，厂房本身不承受水压。利用坝体抬高水位形成发电水头，再将高水位的水头引下来冲动水轮机，带动发电机发电。堤坝式水电厂按水头又可以分为坝后式和径流式两种，我国长江三峡、刘家峡和二滩等都属于坝后式水电厂，葛洲坝则为径流式水电厂。

(2) 引水式水电厂。将水电厂建筑在山区水流湍急的河道上，或河床坡度较大的区段，用修隧道或渠道的方法形成水流落差来发电。这种发电厂多用于小水电。

此外，为了系统调峰的需要，系统中还有一些水电厂，在负荷较小时利用系统“多余”的电能，使机组按电动机—水轮机（水泵）方式运行，将下游的水抽到上游水库储存；而在系统负荷高峰时，使机组按水轮机—发电机方式运行，将水库中的蓄水转变为电能。这种水电厂一般称为抽水蓄能电厂。

3. 核能发电厂

核能发电厂与火电厂发电过程相似，只是其热能是利用置于反应堆中的核燃料在发生裂变时释放出的能量而得到。利用蒸汽发生器取代火电厂的锅炉系统，除蒸汽发生器、泵等外，主要就是核反应堆。根据反应堆的形式不同，核电厂又可以分为轻水堆型和重水堆型等类型。目前世界上的核电厂大多是轻水堆型，轻水堆型又分为沸水堆型和压水堆型。

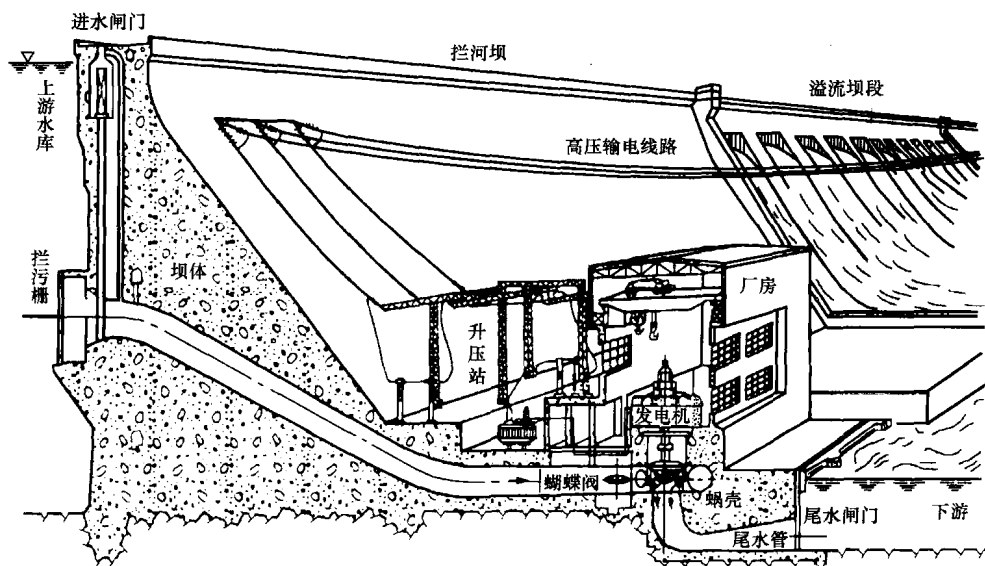


图 1-3 堤坝式水电厂生产过程示意图

4. 其他能源发电

目前,除了上述利用燃料的化学能、水的位能和核能作为生产电能的主要方式外,还可以利用风能、地热、潮汐、太阳能等可再生能源生产电能。近些年,利用风能发电的风电场在国内得到了迅猛的发展。

二、变电站的类型

变电站是电能输送过程中的一个重要环节,起着转换和分配电能的作用。根据变电站在系统中的位置和作用,变电站可以分为枢纽变电站、中间变电站、地区变电站和终端变电站等类型,如图 1-4 所示。

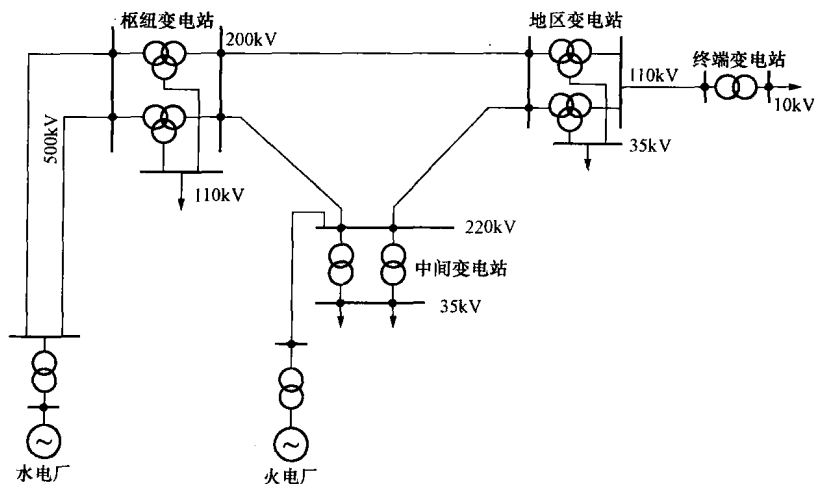


图 1-4 变电站类型

1. 枢纽变电站

枢纽变电站是大供电区域内的核心变电站,起着汇集多个大型发电厂电能和再分配的重要任务。一般电压为 330~500kV 且有大量 110~220kV 出线的变电站,称为枢纽变电站。

枢纽变电站的故障，将引起供电区域内大面积停电，系统解列，甚至造成系统瘫痪。本仿真培训系统廉州站为枢纽变电站，如果该变电站停电将造成大面积停电。

2. 中间变电站

中间变电站的特点是以交换潮流为主，一般汇集 2~3 个电源，作为长距离输电线路的分段，低压侧可以带部分当地负荷，在系统中起着“承上启下”的重要作用。变电站故障停电后，将导致该供电地区供电中断，甚至区域网络解列。

3. 地区变电站

地区变电站的高压侧电压一般只有 110~220kV，以对地区供电为主，一般作为地区或城市配电网的主要变电站。全站故障停电后，仅使该供电地区停电。本仿真培训系统鹿天站为地区变电站。

4. 终端变电站

终端变电站作为电网的末端变电站，一般位于输电线路终端，接近负荷点；高压侧电压为 35~110kV，经降压后直接向用户变、配电站供电。全站停电后，仅影响该站的供电用户。本仿真培训系统曲雷站为终端变电站，如果该变电站停电只造成该站的供电用户停电，影响较小。

此外，变电站按作用不同还可以分为升压变电站、降压变电站、联络变电站和整流变电站等类型。

三、电气设备及其作用

发电厂和变电站在工作时需要很多控制、保护、监视及自动化设备，这些电气设备主要有以下几种。

(1) 电能生产和转换类设备，如发电机、电动机、变压器等。发电机主要用来将机械能转换为电能；电动机则是将电能转换为机械能；变压器可以将电压按要求升高或降低，以满足输配电的要求。

(2) 控制和保护类电气设备，如断路器、负荷开关、熔断器、接触器、低压断路器（自动空气开关）等。这些电气设备主要用来对电路及设备的运行进行控制，当电路或设备发生故障时，能在继电保护的配合下，迅速动作切除故障。

(3) 限流和限制过电压类设备，如限制短路电流的限流电抗器和限制过电压的避雷器及避雷针等。

(4) 载流导体类，如汇流母线、引流线等，利用这些载流导体可以将各种电气设备连接起来。

上述电气设备担负着生产和输配电能的任务，通常称为一次设备。还有一些设备是对这些设备进行监察、测量、控制和保护用的，称为二次设备。它们包括如下几类。

(1) 互感器类，如电流互感器和电压互感器。它们的作用是将高电压、大电流转换成低电压和小电流，供仪表和继电保护装置使用。

(2) 测量表计类，如电压表、电流表、功率表、电能表等。它们主要用来测量电路中的各种电气量。

(3) 继电保护和自动装置类。这些装置能迅速反应系统的各种不正常工作状态，并作用于自动调节装置或断路器跳闸，快速切除故障以使系统尽快恢复正常。

(4) 直流设备，如直流发电机、蓄电池和直流系统等。其作用是继电保护、控制、事故照明等提供电源。

第三节 电力系统的接线方式和电压等级

一、接线形式

实际的电力网络（以下简称电网）接线要复杂得多。一个大的电网（互联电网）是由许多子电网发展、互联而成，因此分层结构是电网的一大特点。一般电网可划分为一级输电网、二级输电网、高压配电网和低压配电网等层次，如图 1-5 所示。

一级输电网一般是由电压为 220kV 及以上的主干输电线路组成，它连接大型发电厂、特大容量用户以及相邻子电网。二级输电网的电压一般为 110~220kV，它上接一级输电网，下连高压配电网，是一区域性的电网，连接区域性的发电厂和大用户。配电网是向中等用户和小用户供电的电网，6~35kV 的称为高压配电网，1kV 以下的称为低压配电网。

电网的接线方式大致可分为无备用和有备用两类。无备用接线包括单回路放射式、干线式和链式网络，如图 1-6 所示。有备用接线包括双回路放射式、干线式、链式、环式和两端供电网，如图 1-7 所示。

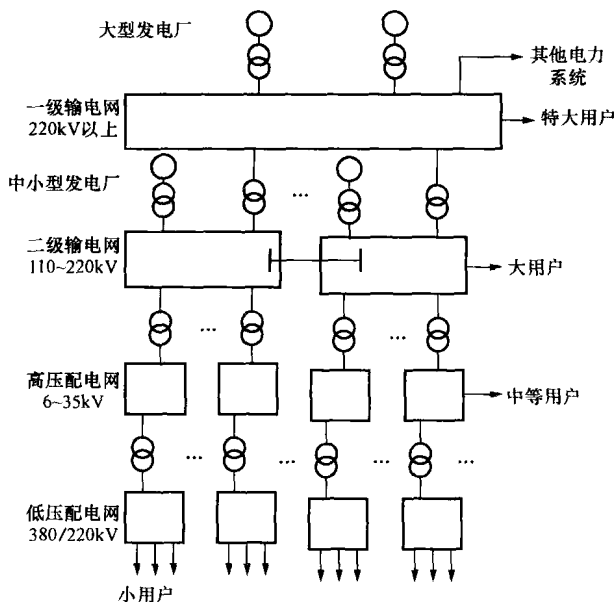


图 1-5 电网的结构

无备用接线方式接线简单、经济、运行方便，但供电可靠性差。架空线路的自动重合闸装置在一定程度上能弥补上述缺点。相反，有备用接线方式供电可靠性高，一条线路的故障或检修，一般不会影响对用户的供电，但投资大，且操作较复杂。其中，环式供电和两端供电方式较为常用。

二、电力系统的电压等级

1. 额定电压等级

为使电气设备的生产实现标准化、系列化，各元件能够合理配套，电力系统中发电机、变压器、线路及各种电气设备等，都是按照规定的额定电压进行设计制造的。电气设备在额定电压下运行时，其技术和经济性能最佳。

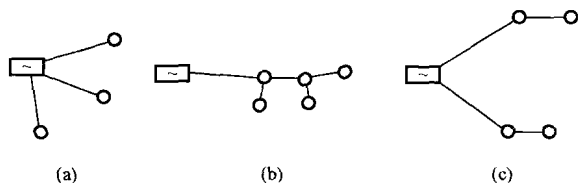


图 1-6 无备用接线方式

(a) 放射式；(b) 干线式；(c) 链式

在电力系统中，当输送功率一定时，线路的电压越高，导线中的电流就越小，所用导线的截面就可以减小，对应的导线投资也减少，导线中的功率损耗和电能损耗也相应降低。因此大容量和远距离输电时要采用高电压等级。但是，电压越高，线路的绝缘水平也相应提高，

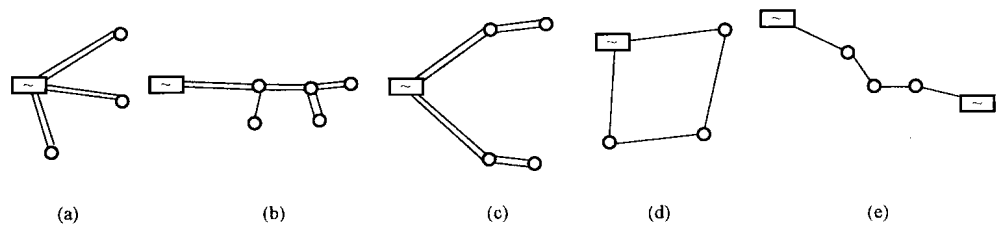


图 1-7 有备用接线方式

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

除对应的线路杆塔尺寸、输电走廊等增大外，变压器和电气设备等的投资也增大。因此，对电力系统电压等级的选择，过高或过低都不合理。对应一定的传输距离和传输功率有一个最合理的线路电压值。但为了设备制造方便，电压值又不能任意设定，且电压等级规定得过多也不利于电力工业的发展。考虑到电力系统现有的实际情况和进一步发展的需要，国家制定了一系列标准（额定）电压等级。通常将 100V 以下的电压称为第一类额定电压，将 100～1000V 的电压称为第二类额定电压，1000V 以上的电压称为第三类额定电压。第二类和第三类额定电压如表 1-1 和表 1-2 所示。输电线路的电压等级只能选用国家规定的额定电压等级。

表 1-1 1000V 以下（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	三 相		单 相	
	线电压	相电压			一次绕组	二次绕组	一次绕组	二次绕组
110	—127		115	—133	—127	—133	—127	—133
220	220	127	230	230	220	230	220	230
	380	220	400	400	380	400	380	
440								

表 1-2 3kV 级以上（三类）额定电压 (kV)

用电设备	线路平均额定电压	交流发电机	变 压 器	
			一次绕组	二次绕组
3	3.15	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
		13.8, 15.75, 18, 20, 24	13.8, 15.75, 18, 20, 24	
35	37		35	38.5
—60	63		—60	—66
110	115		110	121
—154	—162		—154	—169
220	230		220	242
330	345		330	363
500	525		500	550
750	787		750	825

2. 电气设备的额定电压

(1) 用电设备的额定电压。用电设备的额定电压应和电网的额定电压相一致。但由于在电能输送时，线路和变压器等设备上会产生电压损失，使线路上各处的电压不相等，使各点的实际电压偏离额定电压，即线路首端的电压将高出额定电压，末端将低于额定电压。电网设备额定电压示意如图 1-8 所示。

为了使电气设备有良好的运行性能，国家标准规定各级电网电压在用户处的电压偏差不得超过 $\pm 5\%$ ，即输电线路从首端至末端的电压损失允许为 10% 。这样，无论图中的负荷 1~5 接在哪一点，都能保证其承受的电压不超过额定电压的 $\pm 5\%$ 。

(2) 发电机的额定电压。因为发电机总是接在线路的首端，所以它的额定电压应比电网的额定电压高 5% ，用以补偿电网上的电压损失。

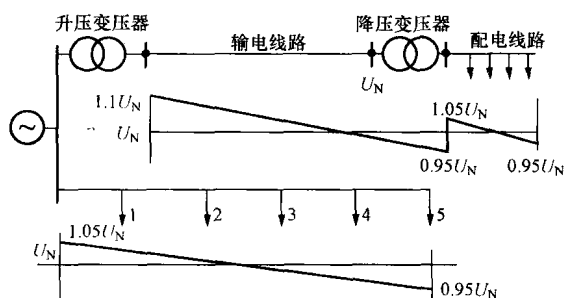


图 1-8 电网各设备额定电压示意

(3) 变压器的额定电压。变压器具有发电机和用电设备的双重性。在电力系统中，变压器的一次绕组相当于用电设备，接受电能；二次绕组输出电能则相当于发电机。因此规定，变压器一次绕组的额定电压等于电网的额定电压，即 U_N 。但是，当变压器的一次绕组直接与发电机的出线端相连时，其一次绕组的额定电压与发电机的额定电压相同，即 $1.05U_N$ 。变压器二次绕组的额定电压是指变压器空载运行时的电压。当变压器在额定负荷下运行时，其内部阻抗会造成大约 5% 的电压损失。为使变压器在额定负载下工作时，其二次绕组的电压比同级电网的额定电压高 5% ，因此规定变压器二次绕组的额定电压应比同级电网的额定电压高 10% ，即 $1.1U_N$ 。当变压器的二次侧输电距离较短或变压器的阻抗较小（一般 35kV 及以下，阻抗电压小于 7.5% ）时，则变压器二次绕组的额定电压可比同级电网的额定电压高 5% ，即 $1.05U_N$ 。

3. 各级电压的经济输送容量

选择电网的电压时，应根据输送容量和输电距离，以及周围电网的额定电压情况，拟定几个方案，通过经济技术比较确定。如果两个方案的技术经济指标相近，或较低电压等级的方案优点不太明显时，应采用电压等级较高的方案。表 1-3 所示为各级电压的经济输送功率与输送距离的关系，可供选择电压等级时参考。

表 1-3 架空输电线路的额定电压与输送功率和输送距离的关系

线路电压 (kV)	输送功率 (MW)	输送距离 (km)	线路电压 (kV)	输送功率 (MW)	输送距离 (km)
0.38	0.1 以下	0.6 以下	110	10~50	50~150
3	0.1~1.0	1~3	220	100~500	100~300
6	0.1~1.2	4~15	330	200~800	200~600
10	0.2~2.0	6~20	500	1000~1500	250~850
35	2.0~10	20~50	750	2000~2500	500 以上

电力工业发展的经验表明，电压等级不宜过多或过少，即相邻的两个电压等级的级差不

宜过大或过小。级差过小,将导致电压等级过多,使电气设备制造部门的生产复杂化,既增加了设备成本,也增大了重复降压时的变电损耗。相反,过少的电压等级又会使电压等级的选择受到限制,不易达到合理配置。根据经验,在 110kV 以下时,额定电压的级差以 3 倍左右为宜;110kV 以上时,额定电压的级差以 2 倍左右为宜。

第四节 电力系统稳态分析与计算

一、电力系统的潮流分布

电力系统的潮流分布,指的是电力系统在某一稳态的正常运行方式下,电网(节点)的功率和电压的分布。

潮流的分布计算,是按给定的电力系统接线方式、参数和运行条件,确定电力系统各部分稳态运行状态参量的计算。通常给定的运行条件包括系统中各电源和负荷节点的功率、枢纽点电压、平衡节点的电压和相位角。待求的运行状态参量包括各节点的电压及其相位角,以及流经各元件的功率、网络的功率损耗等。

潮流计算的主要目的有如下几点。

(1) 通过潮流计算,可以检查电力系统各元件(如变压器、输电线路等)是否过负荷,以及可能出现过负荷时应事先采取哪些预防措施等;

(2) 通过潮流计算,可以检查电力系统各节点的电压是否满足电压质量的要求,还可以分析机组发电出力和负荷的变化,以及网络结构的变化对系统电压质量和安全经济运行的影响;

(3) 根据对各种运行方式的潮流分布计算,可以帮助我们正确地选择系统接线方式,合理调整负荷,以保证电力系统安全、可靠地运行,向用户供给高质量的电能;

(4) 根据功率分布,可以选择电力系统的电气设备和导线截面积,可以为电力系统继电保护整定计算提供必要的数据等;

(5) 为电力系统的规划和扩建提供依据;

(6) 为调压计算、经济运行计算、短路计算和稳定计算提供必要的参数。

潮流计算可以分为离线计算和在线计算两种方式。离线计算主要用于系统规划设计和运行中安排系统的运行方式,在线计算主要用于在运行中的系统经常性的监视与实时控制。

(一) 电力系统的等值电路

采用数学模拟的方法来对电力系统进行分析计算时,首先要将电力系统中的各设备(如输电线路、变压器、发电机等)及其连接方式用等值电路来加以表示。

电力系统各设备通常是三相对称的,因此可以只研究其中一相的等值电路及其参数。

1. 输电线路参数及等值电路

输电线路的电气参数包括电阻、电导(与电晕、泄漏电流及电缆的介质损耗有关)、电感和电容(由交变磁场和交变电场而引起)。线路的电感以电抗的形式表示,而电容以电纳的形式表示。

输电线路是均匀分布参数的电路,也就是说它的电阻、电导、电抗、电纳都是沿线均匀分布的。每千米(单位长度)的电阻、电导、电抗、电纳分别以 r_1 、 g_1 、 x_1 、 b_1 表示。

(1) 电阻。输电线路每相导线单位长度的电阻与导线的材料和截面积有关。当导线通过交流电时,由于集肤效应和邻近效应等影响,导线的有效电阻与在直流下的直流电阻的比值