



普通高等教育“十五”国家级规划教材

电力系统分析

夏道止 主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十五”国家级规划教材

《电力系统分析》
《电力系统分析》
《电机学》
《电力系统继电保护》

夏道止主编
陈怡等编著
胡虔生等编著
张保会等主编



普通高等教育“十五”规划教材

《数字电子技术基础》
《模拟电子技术基础》
《信号与系统分析》
《电磁场导论》
《自动控制理论（第三版）》
《微型机继电保护基础（第二版）》
《电机学》
《电力系统概论》
《发电厂电气部分（第三版）》

《电力系统自动化（第四版）》
《发电厂及变电站的二次回路（第二版）》
《电力系统分析（第二版）》
《电力系统自动化》
《电力系统自动装置原理（第三版）》
《电能质量分析与控制》
《高电压技术（第二版）》
《电力系统远动》
《电网监控与调度自动化》
《PLC应用技术》
《电气控制与PLC应用》
《可编程序控制器原理及应用》
《电能计量技术》
《电力市场》
《电力市场营销管理》
《电力市场运营系统》
《运筹学》

王树昆主编
赵世平主编
宗伟等主编
孟昭敦主编
孙扬声主编
杨奇逊主编
陈世元主编
杨淑英编
熊信银主编（第三版）
范锡普主编（第二版）
李先彬主编
何永华主编
于永源等编
孙莹等编著
杨冠城主编
肖湘宁主编
周泽存等编
柳永智等编著
张永健主编
弭洪涛编著
范永胜等编
郁汉琪等主编
黄伟主编
杜松怀主编
刘秋华编著
刘继春主编
施泉生编

定价：29.80 元

ISBN 7-5083-2509-5



9 787508 325095 >

华北水利水电学院图书馆



209712471

TM711-43

X172



普通高等教育“十五”国家级规划教材

电力系统分析

主编 夏道止
 编写 李建华 方方良
 赵登福 杜正春
 主审 程时杰



中国电力出版社

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

971247

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材，为电气工程及自动化专业本科生电力系统分析课程教材。

全书包括电力系统稳态分析和电力系统暂态分析两部分内容，分别介绍电力系统的基本概念（第一章）、电力网的正序参数和等值电路（第二章）、电力系统的运行特性和潮流计算（第三、四章）、电力系统正常运行方式的调整和控制（第五章）、同步电机的数学模型（第六章）、电力系统对称和不对称故障分析（第七、八章）以及电力系统稳定性分析（第九章）。

在取材方面，注重基本概念和基本理论的论述，舍弃了大部分基于手工计算的各种近似计算方法；除了最基本的分析方法以外，简要介绍了有关的发展。

此外，对直流输电和应用电力电子元器件构成的新型输配电设备，在结构和工作原理方面进行了介绍。

在书末集中列出了一些具有一定难度的思考题，它们对于掌握和应用有关的内容将有很大的帮助。

本书主要作为普通高等教育电气工程及其自动化专业的本科教材，也可供高职高专相关专业的师生参考，还可作为从事电力系统工作工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统分析/夏道止主编. —北京: 中国电力出版社, 2004

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-5083-2509-5

I. 电... II. 夏... III. 电力系统-分析-高等学校-教材 IV. TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 085975 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

*

2004 年 9 月第一版 2004 年 9 月北京第一次印刷
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 20.25 印张 469 千字
印数 0001—5000 册 定价 29.80 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)



前 言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材，为电气工程及其自动化专业本科生电力系统分析课程所编写。

原能源部组织的全国高等学校电力系统及其自动化专业教学指导委员会曾经为“电力系统稳态分析”和“电力系统暂态分析”两门课程分别组织编写过相应的教材，本书是在上述教材的轮廓上进行修改和扩充而成，主要有以下几点：

- (1) 舍弃了基于手工计算的各种近似计算方法；
- (2) 增强了基础理论，如有关稳定性的基本概念和基本理论；
- (3) 除了最基本的分析方法以外，简要介绍了有关的发展，以扩大学生的视野。

此外，对直流输电和应用电力电子元器件构成的新型输配电设备，在结构和工作原理方面进行了介绍。

为了使学生易于接受和掌握有关的原理和分析方法，建议在一开始能组织学生参观变电所，从而对各种电力设备和实际电力系统有一个轮廓性的、感性的认识。

本课程的先修课程为电路和电磁场以及电机学，否则难以掌握本教材所涉及的基本理论和基本分析方法。

除了在正文中提出了一些建议读者自行推导的公式和考虑的问题以外，在书末集中列出了一些具有一定难度的思考题，它们对于掌握和应用有关的内容将有很大的帮助。

本书第一章和第五章由夏道止编写，第二、三、四章由李建华编写，第六章由方万良编写，第七章和第八章由赵登福编写，第九章由杜正春编写。全书由夏道止任主编。

本书初稿蒙华中科技大学程时杰教授审阅，提出了很多宝贵的意见和建议，在此深表感谢。

限于编者水平，书中错误和不妥之处难免，请读者批评指正。

编 者

2003年12月

2A006/07



目 录

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 我国的电力系统..... | 4 |
| 第三节 电力系统的特点和运行的基本要求..... | 8 |
| 第二章 电力网的正序参数和等值电路 | 11 |
| 第一节 电力线路的数学模型..... | 12 |
| 第二节 变压器的数学模型..... | 31 |
| 第三节 标幺制和电力网等值电路..... | 38 |
| 第三章 输电线路运行特性及简单电力系统潮流估算 | 51 |
| 第一节 电力网的电压降落和功率损耗..... | 51 |
| 第二节 输电线路的运行特性..... | 61 |
| 第三节 简单辐射形网络和闭式网络的潮流估算方法..... | 64 |
| 第四章 电力系统潮流的计算机算法 | 74 |
| 第一节 网络方程式..... | 74 |
| 第二节 潮流计算的节点功率方程和节点分类..... | 82 |
| 第三节 潮流计算的牛顿—拉夫逊法..... | 84 |
| 第四节 牛顿—拉夫逊法潮流计算中的收敛性和稀疏技术..... | 99 |
| 第五节 其他潮流计算方法简介..... | 101 |
| 第五章 电力系统正常运行方式的调整和控制 | 105 |
| 第一节 电力系统有功功率和频率的调整和控制..... | 105 |
| 第二节 电力系统无功功率和电压的调整和控制..... | 119 |
| 第三节 电力系统运行方式的优化..... | 131 |
| 第四节 电力系统潮流控制和高压直流输电..... | 139 |
| 第六章 同步电机的数学模型 | 154 |
| 第一节 同步电机的转子运动方程式..... | 154 |
| 第二节 abc 坐标系统下的同步电机方程..... | 158 |
| 第三节 派克变换及 dq0 坐标下的同步电机方程..... | 162 |
| 第四节 用电机参数表示的同步电机方程..... | 171 |
| 第五节 同步电机的简化数学模型..... | 178 |
| 第六节 同步电机的稳态方程式和相量图..... | 180 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 第七章 电力系统对称故障分析 | 185 |
| 第一节 故障种类、发生原因及后果 | 185 |
| 第二节 无限大功率电源供电的三相短路电流分析 | 187 |
| 第三节 无阻尼绕组同步电机突然三相短路分析 | 191 |
| 第四节 有阻尼绕组同步电机突然三相短路分析 | 207 |
| 第五节 复杂电力系统三相短路电流计算方法简介 | 213 |
| 第八章 电力系统简单不对称故障分析 | 216 |
| 第一节 对称分量法原理和分析方法 | 216 |
| 第二节 元件序阻抗和电力系统序网络的形成 | 219 |
| 第三节 不对称短路故障情况下短路点的电流和电压 | 236 |
| 第四节 非故障点的电流和电压计算 | 253 |
| 第五节 非全相运行的分析和计算 | 261 |
| 第六节 电力系统简单故障的计算机算法简介 | 268 |
| 第九章 电力系统稳定性分析 | 270 |
| 第一节 电力系统稳定性的基本理论和数学模型 | 270 |
| 第二节 电力系统小干扰稳定性分析 | 280 |
| 第三节 电力系统暂态稳定性分析 | 291 |
| 第四节 提高电力系统稳定性的基本措施及其原理 | 311 |
| 思考题 | 314 |
| 参考文献 | 316 |



第一章 电力系统的基本概念

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,促进了发电机和电动机的发明,从而开始了电能的生产和使用。当时所采用的是低压直流,主要供给照明用电,供电范围很小。

尔后,1882年在法国首先实现了电压在1000V以上的直流输电,虽然输送功率只有1.5kW,但传输距离达到57km,形成了世界上第一个完整的电力系统,它包含发电、输电和用电。

随着生产的发展,对传输功率和输电距离提出了更高的要求,特别是为了提高输电效率,需要采用更高的输电电压,以便减少线路流过的电流,从而降低线路电阻中的损耗,但是从用电设备来说为了安全又不得不采用较低的电压,而直流输电却不能适应这种要求。于是,在1891年制成三相变压器和三相异步电动机的基础上,首次在德国实现了三相交流输电,它由95V、230kV·A的水轮发电机,经变压器升压至15200V,将功率传送到178km以外的法兰克福,然后用2台变压器降压至112V,分别供给照明负荷和1台异步电动机驱动75kW的水泵,从而形成了现代电力系统的雏形。从此,三相交流制得到了迅速的发展,取代了以前的直流系统,而且逐步在同步发电机之间进行并列运行,在输、配电过程中采用多个电压等级,经过一百多年的发展,形成电压愈来愈高、容量和规模愈来愈大的区域性、地区性、全国性甚至跨国性的电力系统。

二、电力系统的组成

电力系统主要包含发电厂、输电和配电网络以及用户三个部分,图1-1给出了一个简单电力系统的示意图,用以说明它们之间的相互关系。

在目前的电力系统中,主要的发电厂为以煤、石油和天然气作为燃料的火力发电厂、利用水能发电的水力发电厂和利用核能发电的原子能发电厂。此外,利用风能、太阳能、地下热能和潮汐能发电的发电厂正在不断发展之中,有的已经具有一定的规模。

输电网络的作用是将各个发电厂通过较高电压(如220、330、500kV甚至750kV)的线路相互连接,使所有同步发电机之间并列运行,并同时将发电厂发出的电能送到各个大的负荷中心。由于每条线路上需要输送功率的大小以及传输距离的不同,在同一个输电网络中可能需要同时采用几种不同等级的电压,这就需要在输电网络中采用大量的变压器,将发电机电压通过升压变压器进行升压,并通过变压器连接不同电压等级的线路。在发电厂远离负荷中心而且需要传输大量功率的情况下,采用交流输电将会出现系统稳定性等技术问题,在此情况下高压直流输电将比采用交流输电更为经济,故目前电压在 ± 500 kV及以上的高压直流输电已经成为大功率远距离输电的主要手段之一。

电能送到负荷中心以后，需要经过配电网进行电能的分配，用较低电压（如 110、35、10kV 或 6kV 以及 380/220V）的线路供给各个集中的大工厂和分散的中、小工厂以及千家万户的生活用电。图 1-1 中虚线框以下的部分只是一个负荷中心下的一分配电网络，而在实际配电网中，110kV 和 35kV 的线路接线要复杂得多，10kV（或 6kV）线路的接线更加复杂，而 380/220V 的线路则是像蜘蛛网一般连接到城市和农村的每一户居民住宅和每个商店。

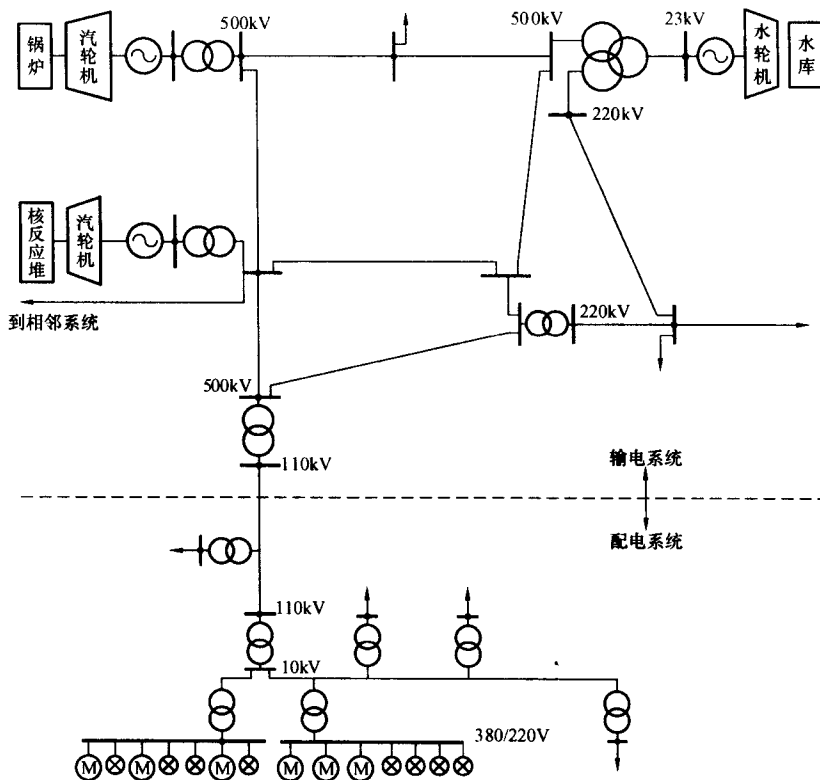


图 1-1 电力系统示意图

电力系统的用户包括工业、农业、交通运输等国民经济各个部门以及日常生活用电，而受电器的种类则有灯泡、电动机、电热器、整流器和电弧炉等，它们将电能分别转换为光能、机械能、热能和化学能等。

按照传统的定义，将电能生产、输送、分配和使用过程及其所涉及的全部元件的总体称为动力系统，它包括发电厂的全部动力部分（如锅炉、核反应堆、水库、汽轮机、水轮机等）、所有的发电机、输电和配电网、用户的受电器及由它们所带的负载。动力系统内的电气部分，即发电机、输电和配电网以及用户的受电器的总体称为电力系统，而将输电和配电网统称为电力网络或简称电网。然而，现在习惯上所用的术语却比较随便和混乱，动力系统这个名称基本上已不再使用，电力系统与电网的含义也基本相通，有时电网所指的范围比电力系统还大。

在电力系统中，发电机、变压器、线路和受电器等直接参与生产、输送、分配和使用电能的电力设备常称为主设备或称一次设备，由它们组成的系统又称为一次系统。实际上，在电力系统中还包含各种测量、保护和控制装置，习惯上将它们称为二次设备和二次系统。

三、电力系统的基本参量和接线图

衡量一个电力系统的规模和大小，通常用总装机容量、年发电量、最大负荷和最高电压等级等基本参量来描述。

电力系统的总装机容量指系统中实际安装的发电机组额定有功功率的总和，其单位用 kW (千瓦)、MW (兆瓦) 或 GW (吉瓦)。

电力系统的年发电量指系统中所有发电机组全年实际发出电能的总和，其单位用 MWh (兆瓦·时)、GWh (吉瓦·时) 或 TWh (太瓦·时)。

最大负荷指电力系统总有功负荷在一年内的最大值，以 kW (千瓦)、MW (兆瓦) 或 GW (吉瓦) 计。年发电量与最大负荷的比常称为年最大负荷利用小时数。

最高电压等级指系统中所采用的最高额定电压，以 kV (千伏) 计。

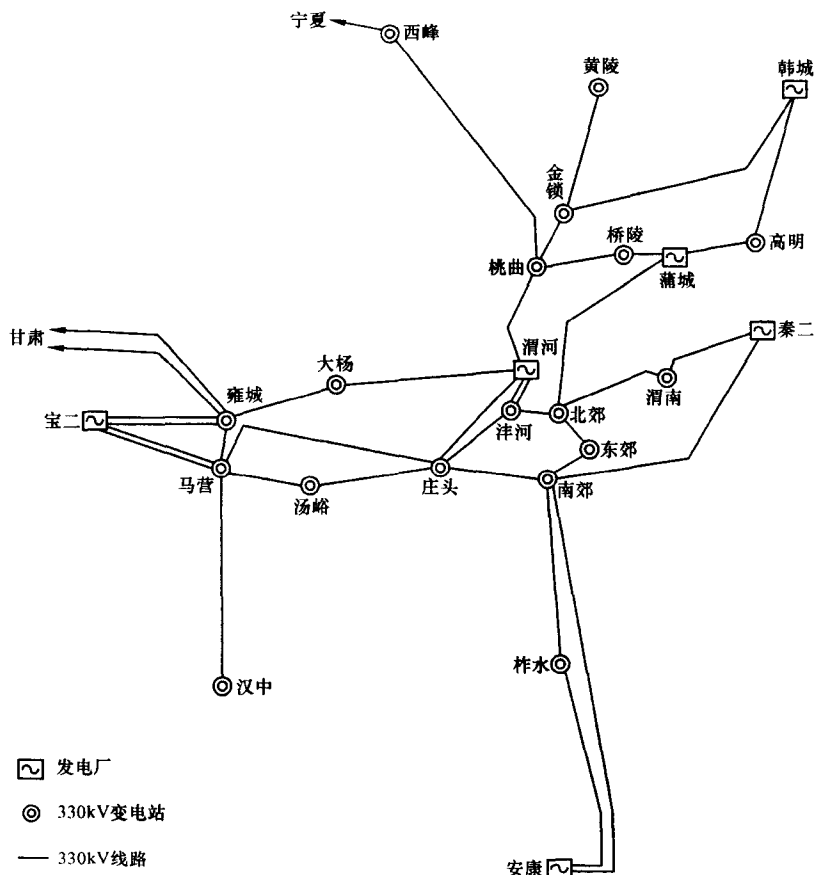


图 1-2 电力系统地理接线图示例

为了表示电力系统中各个元件之间的相互连接关系，通常采用两类接线图（又称接线图）：一类是地理接线图；另一类是电气接线图。地理接线图主要表示系统中各个发电厂和变电所的真实地理位置、电力线路的路径以及它们之间的相互连接关系，如图 1-2 所示。因此，从地理接线图可以对系统的主要情况有一个比较清晰的了解。电气接线图主要用单线图来显示系统中各个发电机、变压器、母线、线路等元件（有的还包括断路器）之间的电气连接关系而不反映它们的地理位置。因此，由电气接线图可以获得对系统更详细的了解。图 1-1 中表示发电机、变压器、母线和线路相互连接的部分实际上便是一种电气接线图。

第二节 我国的电力系统^①

一、我国电力系统概况

我国具有丰富的能源资源。水力资源的蕴藏量达 676GW，居世界首位。其中可利用的资源约有 378GW，主要集中在西南和西北，包括长江、金沙江、澜沧江、怒江和红水河的中上游以及黄河的上游。煤、石油和天然气资源也很丰富。煤的预测量约为 4 500Mt，其中 90% 集中在陕西、山西及内蒙。可利用的风力资源分布在东南沿海、新疆、甘肃及东北，共约为 160GW。这些优良的自然条件为我国电力工业的发展提供了物质基础。

早在 1880 年，在上海就已经建立了第一个发电厂，但直到 1949 年，全国的总装机容量仅有 1 850MW，年发电量为 4.3TWh。解放后 50 年来全国总装机容量和年发电量的增长情况分别如图 1-3 和图 1-4 所示。到 2001 年底的装机容量达 338610MW，年发电量完成 1483.9TWh，分别是 1949 年的 184 倍和 345 倍，自 1996 年起稳居世界第二位。

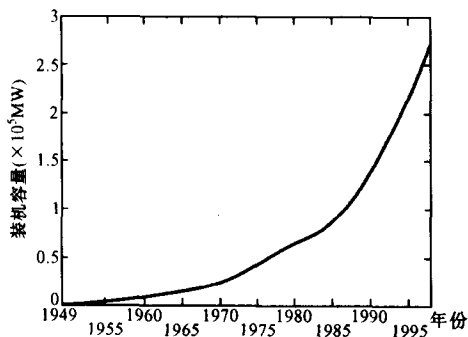


图 1-3 1949~1998 年全国总装机容量变化情况

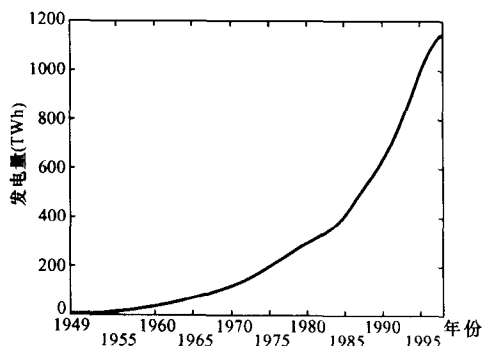


图 1-4 1949~1998 年全国年发电量变化情况

随着我国国民经济的高速发展，电力工业将有更大的发展。发展方针为：继续发展燃煤电厂，提高能源效率，减少对环境的污染；加速水力资源的开发利用和水电厂的建设；发展

^① 本节主要取材于：国家电力公司，新中国电力工业五十年，北京：中国电力出版社，1999。

核电技术并适度发展核电厂；因地制宜开发风力和潮汐等可再生能源发电；加速建设输、变、配电工程和电力系统，在中、西部地区开发大型水、火电基地，向能源短缺的东部地区进行远距离、大容量输电，促进区域电网之间的互联，并最终形成全国电力系统。

2000~2020年全国总装机容量和年发电量的规划如表1-1所示。

表 1-1 2000~2020年电力发展规划

| 年份 | 总装机容量 | | | | | | | 年发电量 | | | | | | |
|------|------------|-----------|--------|-----|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|--------|-----|----------|-----------|-----------|
| | 总量 (GW) | 水电 (%) | 火电 (%) | | | 核电 (%) | 其他 (%) | 总量 (TWh) | 水电 (%) | 火电 (%) | | | 核电 (%) | 其他 (%) |
| | | | 燃煤 | 燃油 | 燃天 然气 | | | | | 燃煤 | 燃油 | 燃天 然气 | | |
| 2000 | 305.7 | 22.1 | 67.7 | 6.6 | 2.6 | 0.9 | 0.1 | 1412.8 | 15.6 | 73.2 | 7.0 | 3.0 | 1.1 | 0.1 |
| 2010 | 535.8 | 18.7 | 68.8 | 5.6 | 2.8 | 3.7 | 0.4 | 2512.8 | 12.7 | 73.3 | 6.0 | 3.0 | 4.8 | 0.2 |
| 2020 | 790.1 | 20.2 | 63.4 | 6.3 | 3.2 | 5.1 | 1.8 | 3666.0 | 13.6 | 68.3 | 6.8 | 3.4 | 6.8 | 1.1 |

我国在电力系统发展规模方面，大体可以分为五个阶段：20世纪50年代为城市电网发展阶段，60年代逐渐形成以省为单位的电力系统（即省网），1970~1990年为区域电力系统（区域电网）发展阶段，90年代以后为区域电网之间的互联阶段并将逐步形成全国统一电网。

截至1998年，全国有5个区域电网和12个省网。5个区域电网分别是东北、华北、华东、华中和西北电网，它们的装机容量和年发电量如表1-2所示。省网包括山东、福建、广东、广西、四川、重庆、云南、贵州、海南、新疆、西藏和台湾。2003年已完成东北电力系统、华北电力系统、华中电力系统与川渝电力系统（原四川电力系统）之间的互联。

表 1-2 1998年区域电力系统的装机容量和发电量

| 电力系统名称 | 总装机容量 | | | 年发电量 | | |
|--------|---------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | 总量 (MW) | 水电 (%) | 核电 (%) | 总量 (TWh) | 水电 (%) | 核电 (%) |
| 东北系统 | 34312.1 | 16.0 | | 141.151 | 5.6 | |
| 华北系统 | 37186.6 | 5.9 | | 178.931 | 1.4 | |
| 华东系统 | 46121.0 | 9.6 | 0.65 | 211.451 | 5.4 | 0.55 |
| 华中系统 | 40749.3 | 39.9 | | 160.373 | 28.7 | |
| 西北系统 | 17275.1 | 40.1 | | 69.602 | 28.3 | |

二、我国电力系统的电压等级

当传输功率一定时，所采用的输电电压愈高，则线路流过的电流将愈小，因而所需要的导线截面愈小，而且线路电阻中的功率损耗和线路上的电压降落也愈小。但是，电压愈高对绝缘的要求也愈高，从而使杆塔、变压器和断路器所需要的投资愈大。可以想象，对应于一定的传输功率和输送距离，将有一个最佳的输电电压。然而，在实际电力系统中有大量的输电和配电线路，它们输送功率的大小和距离各不相同，不可能、也没有必要对它们分别采用不同的“最佳电压”。特别是从设备制造的经济性和运行维护的方便性来说，需要对设备进行规格化和系列化，而不宜有过多的额定电压等级。为此，世界各国都规定一定数量的标准

电压，这些标准电压通常称为电压等级，或称为网络额定电压或者用电设备额定电压，三者完全相同。对于交流电力系统，我国曾规定 1000V 以上电压的额定电压标准为 3、6、10、35、(60)、110、(154)、220、330、500kV（其中 60kV 和 154kV 为历史遗留而被限制发展的电压等级，现已不再发展），如表 1-3 中的第 1 列，而 750kV 的线路和设备也已经被批准进行架设和制造。

这里需要特别强调指出以下两点：

(1) 所有的电压等级（网络额定电压、用电设备额定电压）都是指线电压而不是相电压；

(2) 网络额定电压或用电设备额定电压并不是发电机和变压器的额定电压，这从表 1-3 可以清楚地看出，其原因将在下面解释。

表 1-3 我国规定的电压等级

| 用电设备额定线电压 (kV) | 发电机额定电压 (kV) | 变压器额定电压 (kV) | |
|-------------------|-----------------|--------------|------------|
| | | 1 侧绕组 | 2 侧绕组 |
| 3 | 3.15 | 3.0, 3.15 | 3.15, 3.3 |
| 6 | 6.3 | 6.0, 6.3 | 6.3, 6.6 |
| 10 | 10.5 | 10.0, 10.5 | 10.5, 11.0 |
| | 15.75 | 15.75 | |
| | 23.0 | 23.0 | |
| 35 | | 35 | 38.5 |
| 110 | | 110 | 121 |
| 220 | | 220 | 242 |
| 330 | | 330 | 345, 363 |
| 500 | | 500 | 525, 550 |
| 750 | | 750 | 788, 825 |

实际上，各种电气设备都是以它自己的额定电压来进行设计和制造的，当设备正好在其额定电压下运行时，可以获得比较好的性能和效率，并保证预期的寿命。但是在实际电力系统运行过程中，由于线路和变压器流过电流后将产生电压降落，使系统中各点的实际运行电压都不相同，一些地方电压较高而另一些地方电压较低。为了使设备的额定电压尽量接近其实际运行电压，应该对经常运行于电压较高处的设备采用稍高一些的额定电压，而对经常运行于电压较低处的设备采用稍低一些的额定电压。这就是发电机和变压器所采用的额定电压与网络额定电压不同的原因。具体来说，由于用电设备一般希望运行电压与其额定电压之差最好不要超过 $\pm 5\%$ ，这就要求线路上的电压降落最好不要超过 10%，从而可以让线路始端电压约比网络额定电压高出 5%，而线路末端电压不致低于网络额定电压的 95%，如像图 1-5 所画的 a 和 b 之间线路上的电压分布情况。显然，考虑到发电机有可能经过线路供给负荷，这种情况下发电机经常的运行电压将比网络额定电压高出 5% 左右，这就是为什么将发电机的额定电压取得比网络额定电压高 5% 的原因，参阅表 1-3 中的第 2 列。注意，其中的额定电压 15.75kV 和 23.0kV 只作为大容量发电机专用，没有相应的网络额定电压。

对于变压器来说, 1 侧的额定电压有的有两种可供选用 (如表 1-3 中的第 3 列所示): 一种是与相应的用电设备额定电压相等; 另一种是与发电机的额定电压相等。其原因是因为变压器的 1 侧绕组从发电机或网络中接受电能, 它的处境与用电设备相当, 因此其额定电压理应与用电设备的额定电压相同; 考虑到有些变压器的 1 侧绕组可能直接与发电机相连接或者比较靠近发电机, 在这种情况下 1 侧的额定电压应与发电机的额定电压相同。由于发电机最高的额定电压在 35kV 以下, 因此, 当绕组电压在 35kV 及以上时, 1 侧的额定电压只有一种。变压器 2 侧的额定电压也有两种。由于变压器的 2 侧绕组将向负荷供电, 它的处境与发电机相当, 因此, 2 侧的额定电压至少应比网络额定电压高出 5%; 但考虑到变压器的额定电压是指其空载时的电压, 带负荷后绕组本身存在电压降落 (如图 1-5 中变压器 T2 的情况所示), 而为了补偿这一电压降落, 使其输出电压仍然能够高出网络额定电压, 所以一些变压器的 2 侧额定电压比网络额定电压高出 10%。

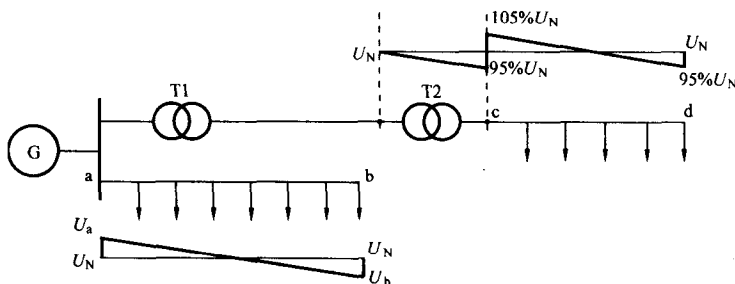


图 1-5 设备额定电压与网络额定电压之间关系的解释

为了清楚起见, 举一个具体的例子。对于连接 220kV 和 10kV 的变压器来说, 两侧的额定电压可以是 10kV/242kV 或者 10.5kV/242kV, 也可以是 220kV/10.5kV 或者 220kV/11kV, 前两种主要用作从 10kV 到 220kV 的升压变压器, 后两种主要用作从 220kV 到 10kV 的降压变压器, 而 220kV/10kV 即一侧额定电压为 220kV 而另一侧额定电压为 10kV 的变压器将不是标准变压器。

实际上, 变压器的高压绕组常设置一定数量的分接头 (三绕组变压器的中压侧绕组上也有), 以便根据实际需要加以选用。但必须注意, 变压器的额定电压总是指其主接头上的空载电压。

在表 1-3 所列的电压等级中, 3kV 限于工业企业内部采用, 10kV 是最常用的城乡配电电压, 而只当负荷中高压电动机所占比重很大时才用 6kV 作为配电电压。习惯上将 110kV 和 220kV 称为高压, 330、500kV 和 750kV 称为超高压, 而 1000kV 以上则称为特高压。

显然, 对于不同的电压等级, 所适宜的输送功率和输送距离将各不相同, 表 1-4 列出了其大致范围, 在一定程度上可以用作参考。

对于高压直流输电, 虽然国内已投入运行的有舟山、嵊泗直流输电工程等两个海底直流输电工程, 以及葛洲坝-上海、天生桥-广州直流输电线路等两条 ± 500 kV 线路, 而且还有不少正在建设和规划之中, 但迄今还没有标准的电压等级。

表 1-4 架空线路不同电压等级下输送功率和输送距离的大致范围

| 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) |
|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------------|-----------|
| 3 | 0.1 ~ 1.0 | 1 ~ 3 | 220 | 100.0 ~ 500.0 | 100 ~ 300 |
| 6 | 0.1 ~ 1.2 | 4 ~ 15 | 330 | 200.0 ~ 800.0 | 200 ~ 600 |
| 10 | 0.2 ~ 2.0 | 6 ~ 20 | 500 | 1000.0 ~ 1500.0 | 150 ~ 850 |
| 35 | 2.0 ~ 10.0 | 20 ~ 50 | 750 | 2000.0 ~ 2500.0 | 500 以上 |
| 110 | 10.0 ~ 50.0 | 50 ~ 150 | | | |

第三节 电力系统的特点和运行的基本要求

一、电能生产、输送、分配和使用的特点

虽然电能也是一种商品,但是电能的生产、输送、分配和使用却有着极明显的特殊性,主要表现在以下几点:

1. 电能与国民经济各个部门、国防和日常生活之间的关系都很密切

由于电能与其他能量之间的转换十分方便,而且容易进行大量生产、远距离输送和控制,因此目前都非常广泛地使用电能。如果电能供应不足,则将影响国民经济的各个部门、国防和日常生活。另外,如果能降低电能的价格,则将有利于降低其他商品的成本。

2. 电能不能大量储存

电能的生产、输送、分配和使用实际上是在同一时刻进行的。这就是说,发电设备在任何时刻所生产的总电能严格等于该时刻用电设备取用的电能和输、配电过程中电能损耗之总和。由于存在这一特点,在系统发生某些故障后,由于没有储存手段,将可能造成局部停电或甚至造成全系统的瓦解,形成一片混乱。2003年下半年在北美和欧洲的几个国家相继发生的大停电事故便是例证。

3. 电力系统中的暂态过程十分迅速

在电力系统中,由于雷击或开关操作引起的过电压,其暂态过程只有微秒到毫秒数量级;从发生故障到系统失去稳定性通常也只有几秒的时间;因事故而使系统全面瓦解的过程一般也只以分钟计。为了使设备不致因暂态过程的发生而招致损坏,特别是为了防止电力系统失去稳定或发生崩溃,必须在系统中采用相应的快速保护装置和各种自动控制装置。

4. 对电能质量的要求比较严格

电能质量主要指频率、供电电压偏移和电压波形。我国电力系统的额定频率规定为50Hz。当实际频率与额定频率之间的偏差过大,或者实际供电电压与额定电压之间有较大的偏差时,都可能导致减产或产生废品、损坏设备,或者甚至使系统发生频率或电压崩溃。频率和电压的具体要求和相应的对策和措施将在第五章中介绍。电压波形的要求主要指波形中谐波含量的限制,如果因谐波含量过高而使波形严重畸变,同样会影响设备的正常运行,特别是对那些精密的电子设备和仪器。另外,谐波还可能在电力系统中产生局部谐振,以及对通信造成严重的干扰等。

此外,电压闪变、电压凹陷和凸起、电压间断等现象也属于电能质量问题。

二、对电力系统运行的基本要求

根据电能这一商品的特殊性，在传统的电力系统中，对于运行的基本要求可以概括为安全、优质和经济。由于这三个基本要求之间存在一定的矛盾，因此，处理这三者之间关系的一般原则是：在保证安全和电能质量的前提下使运行最为经济。至于在电力市场环境下对电力系统运行的基本要求及其间的关系如何，目前尚无定论。

当然，要满足运行的基本要求，在电力系统规划和设计时就必须加以考虑。另外，安全性要求的定性和定量指标也是一个十分重要而且尚未完满解决的问题。

下面对三个基本要求作简要的介绍。

1. 保证系统运行的安全可靠

电力系统运行的安全可靠主要指保证对用户的持续供电，并保证系统本身设备的安全。为了提高电力系统的安全可靠性，首先要求系统必须有足够的电源容量（包括具有一定的备用容量）和合理的布局；而且电网的结构也必须合理，使得在某一（或某些）线路或变压器因故障或检修而退出运行后仍然能对用户继续供电。为此，在输电系统中大都采用图1-1所示的环形网络，即将各个发电厂和各个向负荷供电的变电站之间用线路连接成单个或多个复杂的环，使得当其中的某一线路退出运行时，各变电站仍能从其他线路获得电能；或者采用双回线路供电，使当其中一回线路退出运行时，另一回线路仍能继续供电。在配电网中，大都采用“闭环结构开环运行”的方式，即网络本身是环形的，但在正常运行情况下断开其中的一些线路，使它呈辐射形（即树枝形），而在发生故障后则通过开关操作将失去电源的负荷转移到其他线路上去。

对电力系统安全可靠最大的威胁是系统失去稳定，对此必须在系统不同运行方式下进行稳定性分析和计算，并在必要时采取提高稳定性的措施。

虽然保证对用户的持续供电非常重要，但并不等于说所有的负荷都不能停电。一般，按对供电可靠性的要求将负荷分为三级：

(1) 第一级负荷。对这些负荷的中断供电，将可能造成生命危险、设备损坏，破坏生产过程，使大量产品报废，给国民经济造成重大损失，使市政生活发生混乱等。

(2) 第二级负荷。对这一级负荷的中断供电，将造成大量减产，交通停顿，使城镇居民生活受到影响等。

(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、小城镇等负荷属于第三级负荷。

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。

2. 保证良好的电能质量

如上所述，电能质量包括频率质量、电压质量和波形质量三个方面。在我国，对于频率的容许偏差、电压的容许偏差以及谐波电压和电流的容许含量都有相应的标准，在电力系统设计和运行中都不允许超出这些标准。

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量中占有很大的比重。为了系统运行的经济性并节约能源，应在发电厂之间进行功率的经济调度，使水力发电

厂的水能得以充分利用，并使全部火力发电厂所消耗的燃料总量最少。这一方面的具体内容将在第五章中介绍。另外，提高发电厂本身的效率、减少厂用电，降低电网的能量损耗等，也是提高系统运行经济性的重要方面。

除此而外，环境保护问题为人们日益关注。在火力发电厂中产生的各种污染物质，包括氧化硫、氧化氮、飞灰等排放量的限制，也将成为对电力系统运行的要求。