



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
21世纪电力系统及其自动化规划教材

# 电力系统分析基础

李庚银 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
21世纪电力系统及其自动化规划教材

# 电力系统分析基础

主编 李庚银  
参编 杨淑英 栗然  
主审 艾欣 高沁翔

机械工业出版社

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书力求能充分反映当代电力系统分析领域的最新成就,突出电力系统分析基础的特点,以基本理论、基本概念和基本方法为主,着重阐述电力系统的基本概念、电力系统元件的参数和数学模型、电力系统潮流计算、电力系统有功功率和频率调整、电力系统无功功率和电压调整、电力系统短路计算等基本内容,在保证体系完整、理论严谨的基础上,力求简洁、实用,概念明晰,删除那些不必要的冗长的计算和推导过程,并将较复杂的电力系统暂态分析内容调整到后续其他课程。

本书既可供高等学校电气类有关专业师生使用,也可供从事电力系统工作的专业技术人员自学参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析基础/李庚银主编. —北京:机械工业出版社,2011.8  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材 21世纪电力系统及其自动化规划教材  
ISBN 978-7-111-34501-5

I. ①电… II. ①李… III. ①电力系统-系统分析-高等学校-教材  
IV. ① TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第118028号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤

版式设计:张世琴 责任校对:陈秀丽

责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2011年9月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·17.25印张·423千字

标准书号:ISBN 978-7-111-34501-5

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 21 世纪电力系统及其自动化规划教材 编 委 会

主任委员：熊信银

副主任委员：尹项根 韩学山 李庚银 刘宪林  
李 扬 陈少华 贡克勤 杨德先 (兼秘书)

委 员：(以姓氏笔画排序)

尹项根	毛承雄	车仁飞	文明浩	文劲宇
叶俊杰	刘学东	刘宪林	孙丰奇	许 珉
李 扬	李庚银	吴耀武	陆继明	张 利
张 波	杨国旺	杨宛辉	杨淑英	杨德先
陈 卫	陈少华	罗 毅	房俊龙	易长松
赵书强	赵玉林	赵丽平	娄素华	栗 然
盛四清	常鲜戎	梁振光	韩学山	游志成
熊信银	魏 萍			

# 前 言

随着电气工程及其自动化专业培养方案的修订和教学计划的调整,使得传统电力系统分析(含稳态、暂态)课程的教学体系和内容需要重新整合、调整。本教材在内容和结构体系上较传统教材做了较大调整,力求满足新的教学计划要求。

在内容上,力求能充分反映当代电力系统分析领域的最新成就,增加了一些最新且成熟的知识 and 成果。在结构体系上,突出电力系统分析基础的特点,以基本理论、基本概念和基本方法为主,着重阐述电力系统的基本概念、电力系统元件的参数和数学模型、电力系统潮流计算、电力系统有功功率和频率调整、电力系统无功功率和电压调整、电力系统短路计算等基本内容,在保证体系完整、理论严谨的基础上,力求简洁、实用,概念明晰,删除那些不必要的冗长的计算和推导过程,并将较复杂的电力系统暂态分析内容调整到后续其他课程。

本教材主要面向电气工程及其自动化专业的本科学生培养,教材内容力求和生产实际结合,既要保证学生掌握电力系统分析的基础知识,又要为学生学习后续专业课程乃至将来的实际工作奠定基础。由于国内各学校电气工程及其自动化专业的发展背景不同,事实上对该专业内涵的把握以及人才培养模式上有很大差异,本教材力图适应不同类型学校对该课程教学的共同需求,力争使其发挥最大的社会效益。

本书由李庚银任主编,第1章由李庚银编写,第2~6章由杨淑英编写,第7、8章由栗然编写,全书由李庚银统稿。全书承蒙华北电力大学艾欣教授、北京交通大学高沁翔教授审阅;并提出了宝贵的修改意见与建议。本书的立项和出版得到教育部高教司、机械工业出版社和华北电力大学的大力支持与帮助,谨在此一并表示衷心感谢。

本书已在华北电力大学试用,根据使用情况对书稿内容进行了适当调整。限于编者水平和实践经验,书中难免有不足或有待改进之处,尚希读者不吝指正。联系方式:李庚银 [ligy@ncepu.edu.cn](mailto:ligy@ncepu.edu.cn)。

编 者

# 目 录

前言	
<b>第 1 章 电力系统的基本概念</b> ..... 1	
1.1 电力系统概述 ..... 1	
1.1.1 电力系统、电力网及动力系统 ..... 1	
1.1.2 我国电力系统的发展 ..... 3	
1.2 电力系统运行的特点和要求 ..... 4	
1.2.1 电能的优点 ..... 4	
1.2.2 电力系统运行的特点 ..... 4	
1.2.3 对电力系统运行的基本要求 ..... 5	
1.3 电力系统的接线方式和电压等级 ..... 6	
1.3.1 电力系统的接线方式和接线图 ..... 6	
1.3.2 电力系统的电压等级 ..... 8	
1.4 电力系统中性点的运行方式 ..... 11	
<b>第 2 章 电力系统各元件的参数和数学模型</b> ..... 15	
2.1 电力系统各元件的参数和数学模型 ..... 15	
2.1.1 电力线路的参数和数学模型 ..... 15	
2.1.2 电抗器的参数和数学模型 ..... 23	
2.1.3 变压器的参数和数学模型 ..... 23	
2.1.4 发电机、负荷的参数和数学模型 ..... 33	
2.2 简单电力系统的等值网络 ..... 34	
2.2.1 用有名值计算时的电压级归算 ..... 35	
2.2.2 用标幺值计算时的电压级归算 ..... 37	
小结 ..... 43	
思考题 ..... 44	
习题 ..... 44	
<b>第 3 章 简单电力系统的潮流分布计算</b> ..... 47	
3.1 电力线路运行状况的分析与计算 ..... 47	
3.1.1 电力线路上的功率损耗和电压降落 ..... 47	
3.1.2 电力线路的电能损耗 ..... 50	
3.2 变压器运行状况的分析与计算 ..... 53	
3.2.1 变压器的功率损耗和电压降落 ..... 53	
3.2.2 变压器的电能损耗 ..... 55	
3.3 辐射形网的潮流分布计算 ..... 55	
3.3.1 辐射形网潮流分布计算的一般步骤 ..... 57	
3.3.2 对多端网络的处理 ..... 58	
3.4 环形网中的潮流分布计算 ..... 63	
3.4.1 环形网中的初步功率分布 ..... 64	
3.4.2 环形网的分解及潮流分布 ..... 66	
3.5 电力网络的简化方法 ..... 72	
3.5.1 等效电源法 ..... 72	
3.5.2 负荷移置法 ..... 74	
3.5.3 星—网变换法 ..... 76	
3.6 电力网络潮流的调整控制 ..... 77	
3.6.1 调整控制潮流的必要性 ..... 77	
3.6.2 调整控制潮流的主要方法 ..... 79	
小结 ..... 80	
思考题 ..... 81	
习题 ..... 82	
<b>第 4 章 复杂电力系统潮流分布的计算机算法</b> ..... 86	
4.1 潮流计算的数学模型 ..... 86	
4.1.1 节点电压方程 ..... 86	
4.1.2 节点导纳矩阵的形成 ..... 88	
4.1.3 节点导纳矩阵的修改 ..... 91	
4.1.4 潮流计算的基本方程与节点分类 ..... 92	
4.2 高斯-塞德尔法潮流计算 ..... 93	
4.2.1 高斯-塞德尔法概述 ..... 93	
4.2.2 高斯-塞德尔法潮流计算的求解过程 ..... 94	
4.3 牛顿-拉夫逊法潮流计算 ..... 98	

4.3.1 牛顿-拉夫逊法原理 .....	98	习题 .....	165
4.3.2 潮流计算时的修正方程 .....	100		
4.3.3 牛顿-拉夫逊法潮流计算的 求解过程 .....	104		
4.4 P-Q 分解法潮流计算 .....	106		
4.4.1 潮流计算时的修正方程 .....	106		
4.4.2 P-Q 分解法潮流计算的基本 步骤 .....	109		
小结 .....	110		
思考题 .....	111		
习题 .....	111		
<b>第5章 电力系统的有功功率和频率 调整 .....</b>	<b>115</b>		
5.1 电力系统频率调整 .....	115		
5.1.1 频率调整的必要性 .....	115		
5.1.2 频率调整的措施 .....	118		
5.2 电力系统中有功功率负荷的优化和 分配 .....	126		
5.2.1 发电机组的耗量特性和耗量微 增率 .....	126		
5.2.2 等耗量微增率准则 .....	127		
小结 .....	130		
思考题 .....	130		
习题 .....	131		
<b>第6章 电力系统的无功功率和电压 调整 .....</b>	<b>133</b>		
6.1 电力系统无功功率的平衡 .....	133		
6.1.1 无功功率负荷和无功功率 损耗 .....	133		
6.1.2 无功功率电源 .....	135		
6.1.3 无功功率的平衡 .....	138		
6.2 电力系统中无功功率的最优分布 .....	138		
6.2.1 无功功率电源的最优分布 .....	139		
6.2.2 无功功率负荷的最优补偿 .....	143		
6.3 电力系统的电压调整 .....	144		
6.3.1 调压的必要性 .....	144		
6.3.2 电力系统的电压管理 .....	146		
6.3.3 电压调整的措施 .....	149		
小结 .....	164		
思考题 .....	165		
		<b>第7章 电力系统三相短路的分析与 计算 .....</b>	<b>170</b>
		7.1 电力系统故障概述 .....	170
		7.2 无限大功率电源供电的系统三相 短路电流分析 .....	172
		7.2.1 暂态过程分析 .....	172
		7.2.2 短路冲击电流和最大有效值 电流 .....	174
		7.2.3 短路功率 .....	175
		7.3 电力系统三相短路的实用计算 .....	176
		7.3.1 交流电流初始值的计算 .....	177
		7.3.2 应用运算曲线求任意时刻的 短路电流交流分量有效值 .....	188
		7.3.3 转移阻抗及其求法 .....	194
		7.4 计算机计算复杂系统短路电流交流 分量初始值的原理 .....	195
		7.4.1 等值网络 .....	195
		7.4.2 用节点阻抗矩阵的计算方法 .....	196
		7.4.3 用节点导纳矩阵的计算方法 .....	198
		7.4.4 短路点在线路上任意处的 计算 .....	201
		小结 .....	202
		思考题 .....	202
		习题 .....	202
		<b>第8章 电力系统不对称故障的分析 与计算 .....</b>	<b>205</b>
		8.1 对称分量法 .....	205
		8.1.1 对称分量法的计算 .....	205
		8.1.2 对称分量法在不对称故障分析中 的应用 .....	208
		8.2 电力系统元件的序参数和等效 电路 .....	210
		8.2.1 同步发电机的各序参数 .....	210
		8.2.2 异步电动机的各序电抗 .....	213
		8.2.3 变压器的各序电抗和等效 电路 .....	213
		8.2.4 输电线路的序阻抗和等效 电路 .....	219
		8.2.5 电缆线路的零序阻抗 .....	227

8.2.6 电力系统的零序等效电路 .....	227	8.4.3 应用叠加原理的分析方法 .....	255
8.3 不对称短路的分析与计算 .....	229	8.5 不对称故障计算的计算机算法 .....	259
8.3.1 各种不对称短路时故障处的短路 电流和电压的计算 .....	229	小结 .....	262
8.3.2 非故障处电流和电压的计算 .....	246	思考题 .....	262
8.4 非全相运行的分析和计算 .....	251	习题 .....	263
8.4.1 一相断线 .....	253	<b>参考文献</b> .....	<b>266</b>
8.4.2 两相断线 .....	254		



# 第 1 章 电力系统的基本概念

本章阐述电力系统的基本概念、电力系统运行的特点和要求、电力系统接线方式和电压等级等问题，从中了解电力系统的重要性和整体性。

## 1.1 电力系统概述

### 1.1.1 电力系统、电力网及动力系统

电力系统通常是指由发电机、变压器、电力线路、用户等组成的三相交流系统。图 1-1 所示为一个简单电力系统，图 1-2 所示为一个复杂的电力系统。

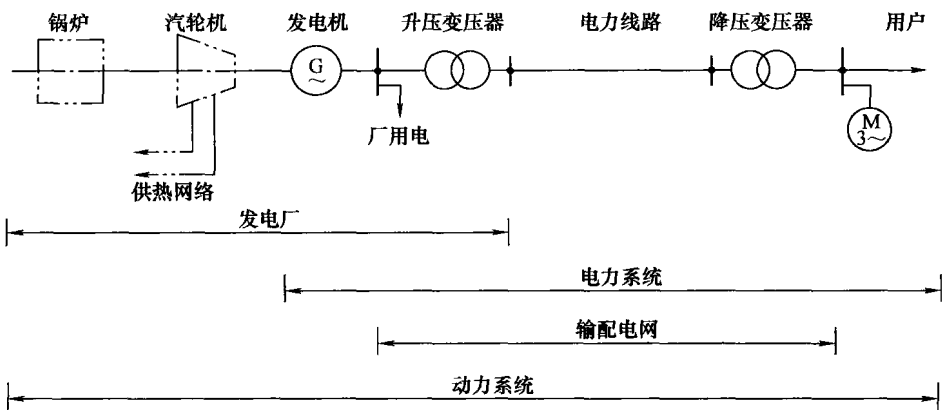


图 1-1 简单电力系统

电力系统中的电气设备也称电力系统的元件，它们之间互相作用完成发电/输配电/用电的过程。发电机产生电能，升压变压器把发电机发出的低压电能变换为高压电能，电力线路输送高压电能，降压变压器把网络中的高压电能变换为低压电能便于用户使用电能。这样一个产生电能、输送和分配电能、使用电能所连接起来的有机整体称为电力系统。

确切地说，电力系统是指由发电机、变压器、电力线路、用户等在电气上相互连接所组成的有机整体。

在图 1-1 所示简单电力系统中，除去发电机、用户，剩下的部分，即电力线路和它两边连接的变压器，称为输配电网，简称电网。

电网是指由各种电压等级的输、配电线路以及由它们所联系起来的各类变电所所组成的电力网络。

由电源向电力负荷中心输送电能的线路，称为输电线路，包含输电线路的电力网称为输电网。而主要担负分配电能任务的线路称为配电线路，包含配电线路的电力网称为配电网。

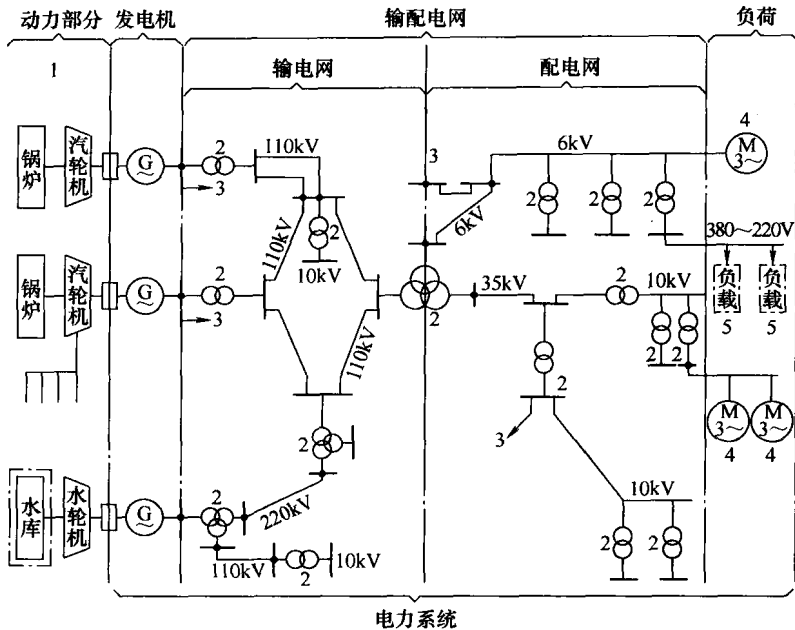


图 1-2 复杂电力系统

1—动力部分 2—变压器 3—负荷 4—电动机 5—低压负载

电力系统再加上它的动力部分称为动力系统。换言之，动力系统是指“电力系统”与“动力部分”的总和。

所谓动力部分，是指随电厂的性质不同而不同，主要有以下几种：

- 1) 火力发电厂的锅炉、汽轮机、供热网络等，如图 1-1 中所示。
- 2) 水力发电厂的水库、水轮机。
- 3) 核能发电厂的反应堆。
- 4) 风能、太阳能等。

由以上分析可知，电网是电力系统的一个组成部分，而电力系统又是动力系统的一个组成部分。

动力部分是产生电能的动力。下面以火力发电厂凝汽式汽轮发电机组为例说明电能的生产过程。

如图 1-3 所示，原煤由输煤传送带运至原煤斗后又落入到磨煤机中，磨成煤粉后再经过粗粉及细粉分离器进入煤粉仓里，排粉机给出的煤粉与风机送来的暖风混合后送入炉膛燃烧，使水冷壁管中的水加热蒸发为蒸汽，蒸汽经过汽包、过热器变为过热蒸汽，然后通过主蒸汽管道被送入汽轮机。进入汽轮机的蒸汽膨胀做功，喷打汽轮机的叶片，推动汽轮机的大轴转动。由于发电机与汽轮机同轴，发电机的转子固定在大轴上随大轴一起转动，定子固定不动，在定子槽内放有按一定规律连接的 a、b、c 三相定子绕组。在转子磁极上缠绕励磁绕组，当给励磁绕组通上直流电后，转子转动就形成了旋转磁场，定子绕组在旋转的磁场中切割磁场，于是便感应产生了电动势，因定子回路与外电路形成闭合的三相电路，于是有三相交流电流流通。发电机发出的电能，再经升压后送入高压电力网。

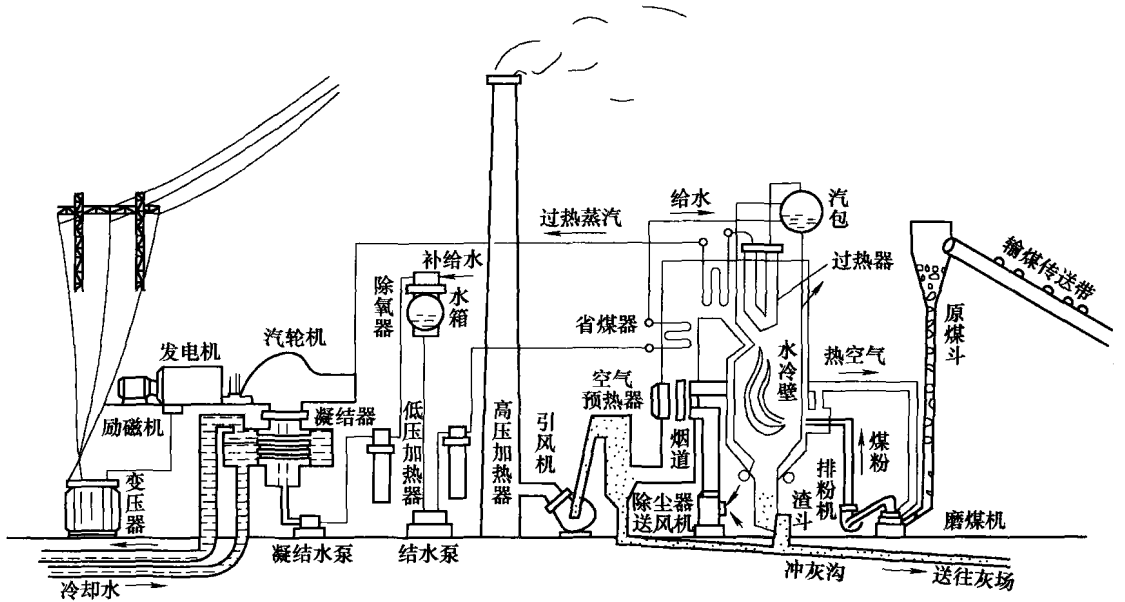


图 1-3 凝汽式火力发电厂生产过程

### 1.1.2 我国电力系统的发展

我国的电力工业起步很早，几乎与世界同步。自 1879 年 5 月上海公共租界点亮第一盏电灯开始写下了中国使用电力照明的历史。1882 年中国第一家公用电业公司——上海电气公司在上海创办，建成的第一个发电厂是上海乍浦路建设电灯厂，装机只有 11.8kW（16 马力）。到 1949 年底新中国成立时，全国发电装机容量仅有 185 万 kW，发电量 43 亿 kW·h，分别居世界第 21 位和第 25 位。

新中国成立后，我国电力工业得到迅速发展。从 1950 ~ 1978 年期间，国产 10 万 kW、12.5 万 kW、20 万 kW、30 万 kW 汽轮发电机组和国产 15 万 kW、22.5 万 kW、30 万 kW 的水轮发电机组相继制成并投产。至 1978 年底，全国发电装机容量达到 5712 万 kW，年发电量达到 2566 亿 kW·h，分别居世界第 8 位和第 7 位。截至 2006 年底，全国发电装机容量达到 62200 万 kW，连续 10 年居世界第 2 位。

2009 年 1 ~ 7 月，我国电力装机突破了 8 亿 kW。

截至 2009 年 7 月底，全国 6000kW 及以上电厂发电装机容量更新为 78341 万 kW。我国发电装机容量和发电量增长情况见表 1-1。

表 1-1 我国发电装机容量和发电量增长情况

年份	装机容量 /万 kW	装机容量 在国际排位	年发电量 /亿 kW·h	年发电量在 国际排位	备注
1882 ~ 1949	185 (16)	21	43 (7)	25	建国前 67 年
1960	1192 (194)	9	594 (74)	—	装机容量突破 1000 万 kW
1987	10290 (3019)	5	4973 (1000)	—	装机容量突破 1 亿 kW
1995	21722 (5218)	4	10069 (1868)	—	装机容量突破 2 亿 kW

(续)

年 份	装机容量 /万 kW	装机容量 在国际排位	年发电量 /亿 kW·h	年发电量在 国际排位	备 注
1996	23654(5558)	2	10794(1869)	2	全国电力供需基本平衡
2000	31932(7935)	2	13685(2431)	2	装机容量突破 3 亿 kW
2003	38450	2	19080(2830)	2	
2006	62200(12857)	2	28344(4167)	2	装机容量突破 6 亿 kW
2009 年 7 月	82752(18200)	2		2	装机容量突破 8 亿 kW

注：括号内为其中的水电装机容量及年发电量。

我国电力工业进入了大机组、大电厂、大电网、超/特高压、远距离输电、交直流输电、自动化、信息化，水电、火电、核电、新能源发电全面发展的新时期。目前，我国电力工业正在逐步进入跨大区联网和推进全国联网的新阶段。我国电网已基本实现全国互联，到 2010 年，全国 330kV 及以上交流线路达 11.4 万 km，变电容量为 4.7 亿 kV·A，直流线路为 8200km，直流换流站容量为 4000 万 kW。

20 世纪 80 年代以来，我国电力需求连续 20 年实现快速增长，年均增长速度接近 8%。根据我国的具体情况，预计我国全面实现小康社会的人均用电水平在 3000kW·h 左右。在未来的 20 年，电力需求仍然需要保持 5.5%~6% 左右的快速增长。到 2010 年，全社会用电将达到 25400 亿~26600 亿 kW·h，需要装机 5.5 亿~5.8 亿 kW；2020 年全社会用电将达到 39400 亿~43200 亿 kW·h，需要装机 8.2 亿~9.0 亿 kW。电力与经济紧密相关，电力是保证经济发展的重要物质基础，经济发展是电力发展的内在动力。为满足全面建设小康社会的需要，电力发展的任务艰巨，责任重大。

## 1.2 电力系统运行的特点和要求

### 1.2.1 电能的优点

由于电能在各种能源中具有特殊的地位，它有许多优点，例如：

- 1) 电能可以很方便地转换成其他形式的能，如光能、热能、机械能和化学能等。
- 2) 电能便于生产、输送、分配、使用，易于控制。
- 3) 自然界中具有丰富的电力资源，如煤、石油、天然气、水力、核能和太阳能等，可以方便地转化为电能。

由于这些原因，所以电能是被人们广泛使用着的一种能源。

### 1.2.2 电力系统运行的特点

任何一个系统都有它自己的特征。电力系统的运行和其他工业系统比较起来，具有如下明显的特点：

#### 1. 电能不能大量储存

电能的产生、输送、分配和使用实际上是同时进行的，每时每刻系统中发电机发出的电

能必须等于该时刻用户使用的电能，再加上传输这些电能时在电网中损耗的电能。这个产销平衡关系是电能生产的最大特点。

## 2. 过渡过程非常迅速

电能的传输近似于光的速度，以电磁波的形式传播，传播速度为 30 万 km/s，“快”是它的一个极大特点。如电能从一处输送至另一处所需要的时间仅千分之几秒；电力系统从一种运行状态过渡到另一种运行状态的过渡过程非常快。

## 3. 与国民经济各部门密切相关

现代工业、农业、国防、交通运输业等都广泛使用着电能，此外在人民日常生活中也广泛使用着各种电器，而且各部门的电气化程度愈来愈高。因此，电能供应的中断或不足，不仅直接影响各行业的生产，造成人民生活紊乱，而且在某些情况下甚至会造成政治上的损失或极其严重的社会性灾难。

由于这些特点的存在，对电力系统的运行提出了严格要求。

### 1.2.3 对电力系统运行的基本要求

评价电力系统的性能指标是安全可靠、电能质量和经济性能。根据电力系统运行的特点，电力系统应满足以下基本要求。

#### 1. 保证可靠地持续供电

电力系统运行首先要满足可靠、不间断供电的要求。虽然保证可靠、不间断的供电是电力系统运行的首要任务，但并不是所有负荷都绝对不能停电，一般可按负荷对供电可靠性的要求将负荷分为三级，运行人员根据各种负荷的重要程度不同，区别对待。

一级负荷：属于重要负荷，如果对该负荷中断供电时，将会造成人身事故、设备损坏、产生大量废品，或长期不能恢复生产秩序，给国民经济带来巨大损失。

二级负荷：如果对该级负荷中断供电时，将会造成大量减产、工人窝工、机械停止运转、城市公用事业和人民生活受到影响等。

三级负荷：指不属于第一、二级负荷的其他负荷，短时停电不会带来严重后果。如工厂的不连续生产车间或辅助车间、小城镇、农村用电等。

通常对一级负荷要保证不间断供电。对二级负荷，如有可能也要保证不间断供电。当系统中出现供电不足时，三级负荷可以短时断电。当然，对负荷的这种分级不是一成不变的，它是随着国家的技术经济政策而转变的。

#### 2. 保证良好的电能质量

我国已先后颁布了 7 个有关电能质量的国家标准，即供电电压偏差、电力系统频率偏差、公用电网谐波、三相电压不平衡、电压波动和闪变、暂时过电压和瞬态过电压、公用电压间谐波。这些国家标准的制定，无疑保证了我国电力系统的电能质量。

电力系统的电压和频率正常是保证电能质量的两大基本指标，电压质量和频率质量一般以偏离额定值的大小来衡量。实际用电设备均按额定电压设计，若电压偏高或偏低都将影响用电设备运行的技术和经济指标，甚至不能正常工作。一般规定，电压偏移范围为额定电压的  $\pm 5\%$ 。频率的变化同样影响用电设备的正常工作，以电动机为例，频率降低引起转速下降，频率升高则转速上升。电力系统运行规定，频率偏移范围为  $\pm (0.2 \sim 0.5\text{Hz})$ 。

近些年来，随着冶金工业、化学工业及电气化铁路的发展，电力系统中的非线性负荷

(如整流设备、电力机车、电解设备等)及冲击性负荷(如电弧炉、轧钢机等)使电网的非线性、非对称性和波动性日趋严重。由于大量非线性负荷接入系统,引起谐波比重增大,交流电波形达不到规定的标准。正弦交流电的波形质量一般以谐波畸变率衡量。所谓谐波畸变率是指周期性交流量中谐波含量(减去基波分量后所得的量)的方均根值与其基波分量的方均根值之比(用百分数表示)。谐波畸变率的允许值随电压等级的不同而不同,如110kV供电时为2%,35kV供电时为3%,10kV供电时为4%。

为使电力系统中的冲击性负荷对供电电压质量的影响控制在合理的范围内,按标准规定,电力系统公共供电点,由冲击性负荷产生的电压波动允许值:在10kV及以下为2.5%、35~110kV为2%、220kV及以上为1.6%。电压闪变 $\Delta U_{10}$ (等效10Hz电压闪变值)允许值:对照明要求较高的白炽灯负荷为0.4%、一般性照明负荷为0.6%。

三相电力系统中三相不对称的程度称为三相不平衡度。用电压或电流负序分量与正序分量的方均根值百分比表示。按标准规定,电力系统公共连接点正常电压不平衡度允许值为2%,短时不得超过4%。

由此可知,衡量电能质量的主要指标是电压偏差、频率偏差、谐波畸变率、三相不平衡度及电压波动和闪变(电压的短暂变动)。如果不能满足这些指标要求,无论对用户还是对电力系统本身都会产生不良后果。因此,运行人员必须随时调节电力系统的电压和频率,并在一些地点实施相应的限制电压波动措施及谐波治理措施,以保证电力系统的电能质量。

### 3. 努力提高电力系统运行的经济性

电力系统运行的经济性主要反映在降低发电厂的能源消耗、厂用电率和电力网的电能损耗等指标上。

电能所消耗的能源在国民经济能源的总消耗中占的比重很大,使电能在生产、输送和分配的过程中耗能小、效率高,最大限度地降低电能成本有着十分重要的意义。电能成本的降低,不仅意味着能量资源的节省,还将影响到各用电部门成本的降低,对整个国民经济带来很大益处。而要实现经济运行,除了进行合理的规划设计外,还需对整个电力系统实施最佳的经济调度。

以上对电力系统运行的基本要求,前两条必须保证,在保证可靠性、电能质量的前提下力求减少能源消耗。另外,环境保护问题也越来越受到人们的关注,在当代提倡“绿色能源,低碳能源”的理念下,更为环保的新能源,如风能、太阳能发电、潮汐发电也成为人们研究的热点,并取得了长足的进展。

## 1.3 电力系统的接线方式和电压等级

### 1.3.1 电力系统的接线方式和接线图

电力系统分布在非常广大的地域上,只能通过看各元件连接情况的单线图,才能了解到整个系统的连接情况。

#### 1. 电力系统的接线图

接线图有电气接线图和地理接线图两种。

### (1) 电气接线图

电力系统的电气接线图如图 1-4 所示。在电气接线图上，要求突出表明电力系统各主要元件之间（发电机、变压器、线路等）的电气连接关系。要求接线清楚，一目了然，而不过分重视实际的位置如何、距离的比例关系。

### (2) 地理接线图

电力系统的地理接线图如图 1-5 所示。在地理接线图上，很强调电厂与变电所之间的实际位置关系，各条输电线路的路径长度都按一定比例反映出来，但各主要元件之间的电气联系、连接情况不必详细表示。

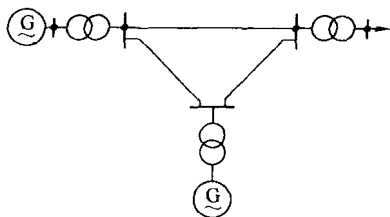


图 1-4 电力系统的电气接线图

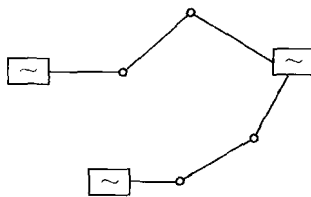


图 1-5 电力系统的地理接线图

通常为了清楚、确切地掌握电力系统实际连接情况，往往将这两种图配合使用。

## 2. 电力系统的接线方式

电力系统的接线方式应满足电力系统运行的基本要求：

- 1) 必须保证用户供电的可靠性。
- 2) 必须能灵活地适应各种可能的运行方式。
- 3) 应力求节约设备和材料，减少设备费用和运行费用，使电力网的建设和运行比较经济。

4) 应保证在各种运行方式下运行人员都能够安全灵活地操作。

按照以上要求，不管是户内网络、城市网络，还是区域网络，其接线方式大致可分为无备用和有备用两类。

### (1) 无备用接线

无备用接线就是指用户只能从一个方向取得电源的接线方式，包括放射式、干线式、链式，如图 1-6 所示。

无备用接线的特点是简单、经济、运行方便，但供电可靠性差、电能质量差。为了提高这类电网的供电可靠性，除了加强检查与维护外，通常还要在适当的地点装设保护装置，以便使故障线路的切断有一定的选择性，从而尽可能地缩小停电范围。

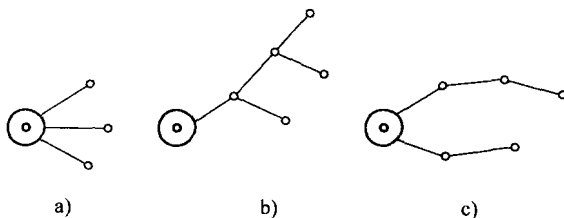


图 1-6 无备用接线方式

a) 放射式 b) 干线式 c) 链式

### (2) 有备用接线

有备用接线是指用户可以从两个或两个以上方向取得电源的接线方式，包括双回路的放射式、干线式、链式和环式、两端供电网等，如图 1-7 所示。

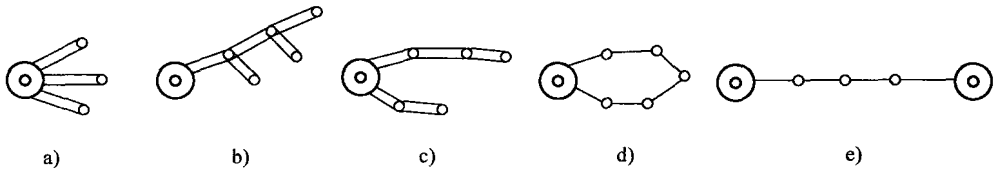


图 1-7 有备用接线方式

a) 双回路放射式 b) 双回路干线式 c) 双回路链式 d) 环式 e) 两端供电网

有备用接线的优点是供电可靠、电能质量高；缺点是运行操作和继电保护复杂，经济性较差。

由以上可知，不同形式的接线各有优缺点，在实际中应该采用哪一种方案好，需要进行技术和经济性能的比较。除了比较供电可靠性、电能质量、经济性、操作方便与灵活性等 4 个方面外，还应考虑当前国家的经济政策，最后确定出可行的接线方案。

### 1.3.2 电力系统的电压等级

#### 1. 电力系统各元件的额定电压

电气设备的额定电压通常是由制造厂商根据其工作条件确定的电压。电力系统正常运行时，发电机、变压器、用电设备等，各种电气设备只有在额定电压运行时，技术经济性能才最好，安全可靠运行及使用寿命才都能得到保证。但是，从设备制造及运行管理的角度考虑，额定电压等级不宜过多，且电压级差不宜过小。为了使电力工业和电工制造业的生产标准化、系列化和统一化，许多国家和有关国际组织都制定有关于标准电压等级的条例。我国规定的各种电气设备额定电压，按电压的高低分为三类。

第一类是 100V 以下的额定电压，见表 1-2，它们主要用于安全照明、蓄电池及开关设备的直流操作电源。表 1-2 中的三相 36V 电压等级，只作为特殊情况下安全照明负荷用。

表 1-2 第一类额定电压

直流电压/V	交流电压/V	
	三相(线电压)	单相
1	—	—
12	—	12
24	—	—
—	36	36
48	—	—

第二类是 100V 以上、1000V 以下的额定电压，见表 1-3，它们主要用于一般电力负荷及照明设备。表中括号内的电压，只用于矿井下或其他安全条件要求较高之处。

第三类是 1000V 以上的额定电压，见表 1-4，它们主要用于发电机、变压器及用电设备。



表 1-3 第二类额定电压

用电设备			发电机		变压器			
直流电压/V	三相交流电压/V		直流电压/V	交流三相线电压/V	交流电压/V			
	线电压	相电压			三 相		单 相	
					一次绕组	二次绕组	一次绕组	二次绕组
110	—	—	115	—	—	—	—	—
—	(127)	—	—	(133)	(127)	(133)	(127)	(133)
220	220	127	230	230	220	230	220	230
—	380	220	—	400	380	400	380	—
400	—	—	460	—	—	—	—	—

表 1-4 第三类额定电压

用电设备电压/kV	发电机线电压/kV	变压器线电压/kV		用电设备电压/kV	发电机线电压/kV	变压器线电压/kV	
		一次绕组	二次绕组			一次绕组	二次绕组
3	3.15	3, 3.15	3.15, 3.3	110	—	110	121
6	6.3	6, 6.3	6.3, 6.6	220	—	220	242
10	10.5	10, 10.5	10.5, 11	330	—	330	345, 363
—	15.75	15.75	—	500	—	500	525, 550
—	23	23	—	750	—	750	788, 825
35	—	35	38.5	1000	—	1000	1050, 1100

注：1. 变压器一次绕组栏内 3.15kV、6.3kV、10.5kV、15.75kV 及 23kV 电压适用于和发电机端直接连接的升压变压器。

2. 变压器二次绕组栏内 3.3kV、6.6kV 及 11kV 电压适用于短路电压值在 7.5% 及以上的降压变压器。

3. 为证明在技术上和经济上有特殊优点时，水轮发电机的额定电压容许用非标准电压。

从表 1-4 中可以看出，即使在同一个电压等级中，各种电气设备（发电机、变压器、电力线路、用电设备等）的额定电压并不完全相等。某一级的额定电压是以用电设备的额定电压为中心而定的，为了使互相连接的电气设备都能运行在较有利的电压下，各电气设备的额定电压之间有一个相互配合的问题。

电力系统中发电机、变压器、电力线路、用电设备等额定电压的确定：

#### (1) 用电设备的额定电压

用电设备的额定电压为  $U_N$ （最理想、最经济的工作电压），也是其他元件的参考电压。

#### (2) 电力线路的额定电压

电压沿线路长度的分布如图 1-8 所示。线路的始端和末端均可接有用电设备，而用电设备的端电压一般允许在额定电压的  $\pm 5\%$  以内波动。因而在没有调压设备的情况下，可容许在线路始末两端之间的电压损耗不大于 10%。于是：

线路始端电压比用电设备的额定电压高 5%，即  $U_1 = U_N(1 + 5\%)$ ；

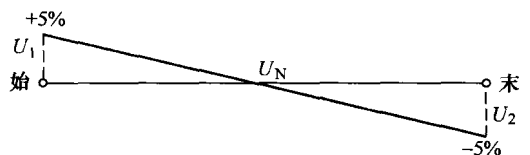


图 1-8 电压沿线路长度的分布