

高等学校教材

---

# 电力系统

南京工学院主编

电力工业出版社

## 内 容 提 要

本书系高等学校“发电厂及电力系统”、“电力系统继电保护及自动化”、“电力系统及其自动化”专业的专业课程教材。

全书分四篇，分别讨论电力系统正常运行状况的分析和计算；电力系统运行状况的优化和调整；电力系统的故障分析和计算；电力系统运行的稳定性。取材方面除力求做到物理概念的阐述和数学分析并重外，还引入电子数字计算机计算电力系统的原理和方法，同时注意介绍国内外先进科学技术水平以及本学科发展的动向。每篇均编有例题，可帮助学生学习。书末附录稀疏矩阵方程的解算方法供读者参考。

本书供高等学校电力类有关专业师生使用，也可供从事电力系统运行、设计、科研的专业人员参考。

高等学校教材

### 电 力 系 统

南京工学院主编

\*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

顺义县印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 39.5印张 898千字 1插页

1980年8月第一版 1982年6月北京第二次印刷

印数24201-32740册 定价4.10元

书号 15036·4062

# 前 言

本书系根据1978年1月原水利电力部教学计划、教材规划座谈会制订的教材编审规划（草案）和1978年4月《电力系统》教材编写大纲讨论会提出，并经1978年5月“发电厂及电力系统”专业教材编写大纲协调会通过的“编写大纲”编写的。

全书分四篇，内容包括：电力系统正常运行状况的分析和计算；电力系统运行状况的优化和调整；电力系统的故障分析和计算；电力系统运行的稳定性。其中，电力系统正常和故障运行状况的分析和计算是高等学校电力类专业学生应学习的基础知识，也是本书的基本内容，应着重讲授；其它部分内容在教学中可根据具体情况有所侧重或取舍。书中小号字部分一般不属课堂讲授内容，可供学有余力的学生学习参考。

本书由南京工学院陈珩编写第一、第二篇，成都科学技术大学张道泉编写第三篇，重庆大学秦翼鸿编写第四篇，并由陈珩主编。书稿由上海交通大学黄家裕、吴际舜、王祖佑、吴惟静、岑文辉等进行初审，并在1979年9月的审稿会上通过。参加审稿会的除上海交通大学外，还有华东电业管理局、浙江大学、华北电力学院、山东工学院、合肥工业大学、新疆工学院、成都科学技术大学、重庆大学、南京工学院等单位共二十名代表。对审稿同志提出的宝贵意见，谨致谢忱。

本书在编写过程中得到西北电力设计院、成都电业局、南京供电局等单位的大力协助，对上述各单位以及本书所引文献资料的作者，在此一并表示感谢。

由于编者的水平所限，加以编写时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，希广大读者批评指正。

编 者

1979年12月

# 目 录

## 前 言

### 第一篇 电力系统的正常运行状况

第一章 电力系统概述 .....	1
1-1 电力系统 .....	1
1-1-1 电力系统 .....	1
1-1-2 电力系统发展简史 .....	2
1-1-3 对电力系统运行的基本要求 .....	3
1-1-4 电力系统课程的主要内容 .....	4
1-1-5 电力系统研究工具简介 .....	5
1-2 电力系统的接线方式和电压等级 .....	6
1-2-1 电力系统的接线方式 .....	6
1-2-2 电力系统的电压等级 .....	8
1-2-3 电力系统中性点的运行方式 .....	9
1-3 电力系统的负荷 .....	11
1-3-1 电力系统的负荷 .....	11
1-3-2 负荷曲线 .....	11
1-3-3 负荷特性 .....	13
1-4 电力线路的结构 .....	14
1-4-1 架空线路的导线和避雷线 .....	15
1-4-2 架空线路的杆塔 .....	16
1-4-3 架空线路的绝缘子和金具 .....	18
1-4-4 电缆线路 .....	21
小结 .....	24
第二章 电力系统的等值网络 .....	25
2-1 电力线路的参数和等值电路 .....	25
2-1-1 单位长度线路的参数 .....	25
2-1-2 一般线路的等值电路 .....	33
2-1-3 长线路的等值电路 .....	35
2-2 变压器、电抗器的参数和等值电路 .....	40
2-2-1 双绕组变压器的参数和等值电路 .....	40
2-2-2 三绕组变压器的参数和等值电路 .....	42
2-2-3 自耦变压器的参数和等值电路 .....	44
2-2-4 电抗器的参数和等值电路 .....	45

2-3	发电机、负荷的参数和等值电路	46
2-3-1	发电机的电抗和电势	46
2-3-2	负荷的功率和阻抗	47
2-4	电力系统的等值网络	43
2-4-1	电压级的归算	48
2-4-2	标么制	53
2-4-3	电力系统的等值网络	59
	小结	61
<b>第三章 电力系统正常运行状况的分析和计算</b>		62
3-1	电力线路和变压器中的电压降落和功率损耗	62
3-1-1	电力线路上的电压降落和功率损耗	62
3-1-2	电力线路上的电能损耗	65
3-1-3	变压器中的电压降落、功率损耗和电能损耗	67
3-2	辐射形网络的潮流分布	69
3-3	环形网络的潮流分布	77
3-3-1	环式网络中的功率分布	77
3-3-2	两端供电网络中的功率分布	80
3-3-3	环形网络中的电压降落和功率损耗	81
3-3-4	环形网络中功率的强制分布	82
3-4	网络变换法	91
3-4-1	等值电源法	91
3-4-2	负荷移置法	92
3-4-3	星-网互换法	95
3-5	长电力线路的运行特性	99
3-5-1	传播常数、特性阻抗和自然功率	99
3-5-2	线路上的电压、电流分布	101
	小结	105
<b>第四章 电力系统潮流分布的计算机算法</b>		105
4-1	网络方程式	106
4-1-1	结点电压方程	106
4-1-2	回路电流方程	109
4-1-3	多电压级网络	110
4-1-4	网络的线图和关联矩阵	116
4-1-5	两种网络方程的比较	118
4-2	结点导纳矩阵和结点阻抗矩阵的形成	119
4-2-1	结点导纳矩阵的形成	119
4-2-2	结点导纳矩阵的修改	121
4-2-3	结点阻抗矩阵的形成和修改——支路追加法	123
4-3	功率方程和高斯-塞德尔法潮流计算	130

4-3-1	功率方程和变量、结点的分类 .....	130
4-3-2	高斯—塞德尔法潮流计算 .....	133
4-4	牛顿—拉夫逊法潮流计算 .....	138
4-4-1	牛顿—拉夫逊法简介 .....	138
4-4-2	潮流计算时的修正方程式 .....	140
4-4-3	潮流计算的基本步骤 .....	145
4-4-4	潮流计算时稀疏技术的运用 .....	149
4-5	$P-Q$ 分解法潮流计算 .....	155
4-5-1	潮流计算时的修正方程式 .....	155
4-5-2	潮流计算的基本步骤 .....	158
4-6	关于敏感度分析 .....	161
4-6-1	敏感度方程式 .....	161
4-6-2	敏感度矩阵 .....	162
4-6-3	敏感度分析 .....	163
小结	.....	166

## 第二篇 电力系统运行状况的优化和调整

第五章	电力系统的有功功率和频率调整 .....	169
5-1	电力系统中有功功率的平衡 .....	169
5-1-1	有功功率负荷的变动及其调整 .....	169
5-1-2	有功功率负荷曲线的预计 .....	170
5-1-3	有功功率电源和备用容量 .....	171
5-2	电力系统中有功功率负荷的最优分配 .....	172
5-2-1	耗量特性 .....	172
5-2-2	目标函数和约束条件 .....	173
5-2-3	等耗量微增率准则 .....	174
5-2-4	等耗量微增率准则的推广运用 .....	180
5-2-5	网络损耗的修正 .....	186
5-3	电力系统中有功功率电源的最优组合 .....	192
5-3-1	发电设备的最优组合顺序 .....	192
5-3-2	发电设备的最优组合数量 .....	193
5-3-3	发电设备的最优启停时间 .....	194
5-3-4	各类发电厂的特点 .....	197
5-3-5	各类发电厂的合理组合 .....	198
5-4	电力系统的频率调整 .....	201
5-4-1	自动调速系统及其调节特性 .....	201
5-4-2	频率的一次调整 .....	204
5-4-3	频率的二次调整 .....	208
5-4-4	频率调整厂的选择 .....	212

5-4-5 关于有功功率和频率的自动调整 .....	214
小结 .....	218
<b>第六章 电力系统的无功功率和电压调整 .....</b>	<b>219</b>
6-1 电力系统中无功功率的平衡 .....	220
6-1-1 无功功率负荷和无功功率损耗 .....	220
6-1-2 无功功率电源 .....	221
6-1-3 无功功率的平衡 .....	224
6-2 电力系统中无功功率电源的最优分布 .....	227
6-2-1 等网损微增率准则 .....	227
6-2-2 网损微增率的计算 .....	230
6-2-3 无功功率电源的最优分布 .....	231
6-3 电力系统中无功功率负荷的最优补偿 .....	232
6-3-1 负荷自然功率因数的提高 .....	232
6-3-2 最优网损微增率准则 .....	233
6-3-3 无功功率负荷的最优补偿 .....	234
6-4 电力系统的电压调整——电压管理和几种主要调压措施 .....	236
6-4-1 电压波动和电压管理 .....	236
6-4-2 借改变发电机端电压调压 .....	241
6-4-3 借改变变压器变比调压 .....	242
6-4-4 借改变网络中无功功率分布调压 .....	245
6-4-5 借串联电容器调压 .....	248
6-4-6 几种调压措施的比较 .....	251
6-5 电力系统的电压调整——调压措施的组合和自动调压 .....	252
6-5-1 分析调压措施组合时的敏感度方程式 .....	252
6-5-2 分析调压措施组合时的敏感度矩阵 .....	252
6-5-3 调压措施的组合——调压问题的敏感度分析 .....	255
6-5-4 关于无功功率和电压的自动调整 .....	261
小结 .....	264

### 第三篇 电力系统的故障分析和计算

<b>第七章 电力系统中各元件的电磁特性——同步发电机 .....</b>	<b>266</b>
7-1 同步发电机的基本方程式 .....	266
7-1-1 同步发电机的磁链方程式 .....	267
7-1-2 派克变换 .....	271
7-1-3 同步发电机的电压方程式 .....	281
7-2 同步发电机的暂态参数和等值电路 .....	283
7-2-1 同步发电机三相短路的物理过程 .....	284
7-2-2 同步发电机的正常运行方式 .....	287
7-2-3 同步发电机的暂态电势和暂态电抗 .....	290

7-2-4	同步发电机的三相短路电流 .....	295
7-2-5	强行励磁的影响 .....	303
7-3	同步发电机的次暂态参数和等值电路 .....	308
7-3-1	同步发电机的次暂态电势和次暂态电抗 .....	309
7-3-2	同步发电机的三相短路电流 .....	316
7-4	同步发电机的负序、零序参数 .....	327
7-4-1	对称分量法 .....	328
7-4-2	同步发电机不对称短路时的高次谐波电流 .....	331
7-4-3	同步发电机的负序阻抗 .....	333
7-4-4	同步发电机的零序阻抗 .....	335
小结	.....	335
<b>第八章 电力系统中各元件的电磁特性——异步电动机、变压器和电力线路 .....</b>		<b>336</b>
8-1	异步电动机的参数和等值电路 .....	336
8-1-1	异步电动机的暂态参数 .....	337
8-1-2	异步电动机的负序和零序参数 .....	339
8-2	变压器的零序参数和等值电路 .....	339
8-2-1	双绕组变压器 .....	340
8-2-2	三绕组变压器 .....	342
8-2-3	自耦变压器 .....	343
8-3	电力线路的零序参数和等值电路 .....	347
8-3-1	“导线—大地”回路的阻抗 .....	348
8-3-2	架空输电线路的零序阻抗 .....	349
8-3-3	电缆线路的零序阻抗 .....	359
8-3-4	架空输电线路的零序电纳 .....	360
8-4	电力系统故障运行时的等值网络 .....	363
8-4-1	短路故障时的等值网络 .....	363
8-4-2	非全相运行时的等值网络 .....	365
小结	.....	367
<b>第九章 电力系统的故障分析和计算 .....</b>		<b>368</b>
9-1	电力系统三相短路的分析 .....	368
9-1-1	短路电流中的非周期分量 .....	368
9-1-2	短路电流中的周期分量 .....	374
9-1-3	短路电流的计算机算法 .....	384
9-2	电力系统不对称短路的分析 .....	387
9-2-1	单相接地短路 .....	388
9-2-2	两相短路 .....	389
9-2-3	两相接地短路 .....	391
9-2-4	正序等效定则 .....	393
9-2-5	对称分量经变压器后的相位变化 .....	400

<b>9-3</b>	<b>电力系统非全相运行的分析</b> .....	<b>404</b>
9-3-1	单相断线 .....	405
9-3-2	两相断线 .....	407
<b>9-4</b>	<b>电力系统简单故障的计算机算法</b> .....	<b>409</b>
9-4-1	计算机计算的一般原理 .....	409
9-4-2	计算机计算算例 .....	414
<b>9-5</b>	<b>电力系统复合故障的分析</b> .....	<b>418</b>
9-5-1	双重故障的分析 .....	418
9-5-2	多重故障的分析 .....	425
<b>小结</b>	.....	<b>426</b>

## 第四篇 电力系统运行的稳定性

<b>第十章</b>	<b>电力系统中各元件的机电特性</b> .....	<b>427</b>
<b>10-1</b>	<b>同步发电机组的特性和方程式组</b> .....	<b>428</b>
10-1-1	同步发电机组的运动方程式 .....	428
10-1-2	原动机的机械转矩 .....	431
10-1-3	发电机的电磁转矩 .....	432
10-1-4	发电机的功-角特性方程 .....	433
10-1-5	发电机的电磁暂态过程方程式 .....	450
<b>10-2</b>	<b>异步电动机组的特性和方程式组</b> .....	<b>452</b>
10-2-1	异步电动机组的运动方程式 .....	452
10-2-2	被驱动机械的机械转矩 .....	452
10-2-3	电动机的电磁转矩 .....	452
10-2-4	电动机的电磁暂态过程方程式 .....	454
<b>10-3</b>	<b>自动调节励磁系统的表示方式</b> .....	<b>458</b>
10-3-1	励磁系统主回路 .....	458
10-3-2	自动调节励磁装置 .....	460
10-3-3	自动调节励磁系统的表示方式 .....	461
<b>10-4</b>	<b>自动调节转速系统的表示方式</b> .....	<b>467</b>
10-4-1	自动调节转速装置 .....	467
10-4-2	原动机的蒸汽容积和水锤效应 .....	469
10-4-3	自动调节转速系统的表示方式 .....	470
<b>小结</b>	.....	<b>473</b>
<b>第十一章</b>	<b>电力系统的静态稳定性</b> .....	<b>474</b>
<b>11-1</b>	<b>电力系统静态稳定性概述</b> .....	<b>474</b>
<b>11-2</b>	<b>简单电力系统的静态稳定性——不计自动调节系统的作用</b> .....	<b>477</b>
11-2-1	小扰动法的原理和应用 .....	477
11-2-2	不计自动调节励磁作用时的静态稳定性 .....	482
<b>11-3</b>	<b>简单电力系统的静态稳定性——计及自动调节系统的作用</b> .....	<b>487</b>

11-3-1	不连续调节励磁对静态稳定性的影响	487
11-3-2	按偏移调节励磁时的静态稳定性	490
11-3-3	按导数调节励磁时的静态稳定性	500
11-3-4	调节励磁对静态稳定性的影响综述	507
11-4	电力系统电压和频率的稳定性	508
11-4-1	电源的静态电压特性	509
11-4-2	负荷的静态电压特性	510
11-4-3	电力系统的电压稳定性	513
11-4-4	电源的静态频率特性	516
11-4-5	负荷的静态频率特性	516
11-4-6	电力系统频率的稳定性	518
11-5	复杂电力系统的静态稳定性	518
11-5-1	同步发电机组的线性化方程式组	518
11-5-2	网络方程式	522
11-5-3	自动调节系统的线性化方程式组	526
11-5-4	全系统微分方程式组的形成	529
11-5-5	静态稳定性的计算过程	532
11-6	保证和提高静态稳定性的措施	533
11-6-1	减小发电机或变压器的电抗	533
11-6-2	采用自动调节装置	533
11-6-3	减小线路电抗	534
11-6-4	采用串联电容器补偿	535
11-6-5	改善系统的结构	536
	小结	537
	第十二章 电力系统的暂态稳定性	538
12-1	电力系统暂态稳定性概述	538
12-2	简单电力系统的暂态稳定性——不计自动调节系统的作用	545
12-2-1	等面积定则	545
12-2-2	分段计算法	546
12-2-3	改进欧拉法	551
12-3	简单电力系统的暂态稳定性——计及自动调节系统的作用	555
12-3-1	计及自动调节系统的必要性	555
12-3-2	计及自动调节励磁系统作用时的暂态稳定性	557
12-3-3	计及自动调节转速系统作用时的暂态稳定性	564
12-4	复杂电力系统的暂态稳定性——不计自动调节系统的作用	569
12-4-1	用于暂态稳定计算的线性网络方程式	570
12-4-2	网络方程式和转子运动方程式的交替解算	573
12-5	复杂电力系统的暂态稳定性——计及自动调节系统的作用	584
12-5-1	隐式积分法	584
12-5-2	用于暂态稳定计算的发电机组方程式	585

12-5-3	用于暂态稳定计算的非线性网络方程式 .....	587
12-5-4	网络方程式和发电机组方程式的联立解算 .....	589
<b>12-6</b>	<b>提高暂态稳定性的措施 .....</b>	<b>593</b>
12-6-1	故障的快速切除和自动重合闸 .....	593
12-6-2	强行励磁和快速关闭汽门 .....	596
12-6-3	电气制动和变压器中性点经小电阻接地 .....	596
12-6-4	设置开关站和采用强行串联补偿 .....	598
12-6-5	采用单元结线方式和连锁切机 .....	599
12-6-6	设置解列点、异步运行和再同步 .....	601
<b>小结</b>	.....	<b>605</b>
<b>附录</b>	<b>线性稀疏矩阵方程式的直接解算 .....</b>	<b>607</b>
附-1	高斯消元法 .....	607
附-2	因子表法 .....	609
附-3	三角分解法 .....	610
附-4	消去结点法 .....	612
附-5	结点编号的最优顺序 .....	617
<b>参考书目</b>	.....	<b>621</b>



热力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用热设备，水力发电厂的水库、水轮机以及原子能发电厂的反应堆等等。所以，电力网络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。这三者的关系也示于图1-1。

### 1-1-2 电力系统发展简史

1831年法拉第发现电磁感应定律。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。因当时发电机发出的电能只用于电化工业和电弧灯，而电动机所需电能又来自蓄电池，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100~400伏低压直流电。由于输电电压低，输送的功率不可能大，输送的距离也不可能远。

第一次高压输电出现于1882年。法国人德普勒将水电厂发出的电输送到57公里外的慕尼黑，并用以驱动水泵。当时他采用的电压是直流1500~2000伏，输送功率约2千瓦。这个输电系统虽很小，却可认为是世界上第一个电力系统，因它具备了电力系统的各个重要组成部分。

生产的发展对输送功率和输送距离提出了进一步的要求，以致直流输电已不能满足要求。于是，1885年在制成变压器的基础上实现了单相交流输电。1891年在制成三相异步电动机、三相变压器的基础上又实现了三相交流输电。

1891年在法兰克福城举行的国际电工技术展览会上，俄国人多里沃—多勃列沃列斯基展出的输电系统奠定了近代输电技术的基础。这系统从拉芬镇到法兰克福全长175公里。设在拉芬镇的水轮发电机组功率为230千伏安，电压为95伏，转速为150转/分。升压变压器将电压升高到15200伏。电功率经直径为4毫米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低到112伏。其中，一台变压器供电给白炽灯，另一台供电给异步电动机，电动机又驱动一台功率为75千瓦的水泵。显然，这已是近代电力系统的雏形。这系统的建成，在电力系统的发展过程中取得了重大突破。

三相交流制的优越性很快显示出来。运用三相交流制的发电厂迅速发展，直流制很快被淘汰。汽轮发电机组不久便代替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。输电功率、输电电压、输电距离日益增大。大电力系统不断涌现。数十年间，在一些国家中甚至出现了全国性和国际性电力系统。

目前，世界上最高线路电压已达765千伏，并继续向1100~1500千伏发展；最远输送距离已超过1000公里；最大电力系统的容量已超过10000万千瓦。发电能源的比例也发生了很大变化。除原有的火力发电和水力发电外，出现了原子能发电，且比重愈来愈大。此外，还有地热发电、风力发电、潮汐发电等等。电力系统的自动化程度愈来愈高，已出现用电子计算机控制的电力系统。这些计算机具有监视、控制电力系统运行的功能。还应指出，为彻底解决同步发电机并列运行的稳定性等问题，又重新采用直流输电。而目前的直流输电距离已超过1000公里，电压已超过±500千伏，输送功率已超过100万千瓦，和一百年前德普勒的试验相比，已有霄壤之别。

在我国，自1882年在上海建立第一个发电厂开始至1949年全国解放，六十余年间，电力工业和电力系统的发展非常缓慢。1949年全国解放时，发电设备总容量仅185万千瓦，年

发电量仅43亿度。110千伏以上电压等级的电力系统仅东北三省有两个，总容量为72万千瓦。

解放后，1957年底，第一个五年计划完成时，发电设备总容量增加为464万千瓦；1962年底，第二个五年计划完成时，又增加为1300万千瓦。1978年底，发电设备总容量进一步增加为5211万千瓦，年发电量则增加为2565.5亿度。110千伏以上电压等级的电力系统也从解放前的两个增加为数十个。其中，大电力系统的容量已超过700万千瓦，最高电压等级已达330千伏。

这样的发展速度虽较解放前有很大增长，仍不能满足工农业用电的要求，以致不少地区出现电力供应不足的情况。而就电压等级、输送距离、系统总容量等技术指标而言，则距世界先进水平尚远，有待继续努力。

### 1-1-3 对电力系统运行的基本要求

电能的生产、输送、分配、消费和其它工业的区别在于：

#### 1. 与国民经济各部门的关系都很密切

由于电能与其它能量之间转换方便，宜于大量生产、集中管理、远距输送、自动控制，使用电能较其它能量有显著优点，所以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部门。

#### 2. 过渡过程非常短促

发电机、变压器、电力线路、电动机等元件的投入或退出都在一瞬间完成。电能从一处输送至另一处所需时间仅千分之几甚至百万分之几秒。电力系统从一种运行方式过渡到另一种运行方式的过渡过程非常短促。

#### 3. 电能不能大量储存

电能的生产、输送、分配、消费实际上是同时进行的，即发电厂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、分配中损耗电能之和。

根据这些特点，对电力系统运行的基本要求是：

#### 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超过电力系统本身的损失。因此，电力系统运行首先要满足安全发供电的要求。

电力系统中的事故将造成计划外的供电中断，而形成事故的原因却很多。统计资料表明，电力系统稳定性破坏性事故的直接原因中，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；采用电子计算机监视、控制电力系统的运行等都是重要的技术措施。

虽然保证安全发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，可按对供电可靠性的要求将负荷分为三级：

**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；

**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；

**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。

电力系统的运行人员应认真分析各负荷的重要程度，以便必要时根据情况，区别对待。

### 2. 保证良好的电能质量

良好的电能质量指电压正常，偏移不超过额定值的 $\pm 5\%$ ；频率正常，偏移不超过 $\pm 0.2\sim 0.5$ 赫。电压或频率偏移过大时，同样会引起大量减产、产生废品。严重时，同样会造成人身事故、设备损坏。

近年来，由于电力供应不足，我国电力系统中较多出现的是电压和频率偏低。为解决这问题，除大力增加新发电设备外，还必须继续挖掘潜力，使现有设备充分发挥作用；合理调配用电；大力宣传节约用电，杜绝一切浪费。

在电力供应充足的系统中，电能质量的低劣往往是调度管理不当、运行调整不及时造成的。因此，除提高自动化程度外，加强运行人员工作的责任心，提高他们的技术水平也非常重要。

### 3. 保证系统运行的经济性

电能生产的规模很大，消耗的能源在国民经济能源总消耗中占的比重很大。电能输送、分配时的损耗绝对值相当可观。因此，降低每生产一度电所消耗的能源和降低输送、分配时的损耗有极重要的意义。为此，应开展电力系统经济运行工作，使负荷在各发电厂之间合理分配。例如，使水力发电厂能充分利用水能，避免弃水；火力发电厂中经济性能好的多发电，差的少发电；避免频繁地开停机组；使功率在系统中合理分布以降低输送、分配时的损耗，等等。

应该指出，以上这些要求是互相关联的，而且往往是互相矛盾、互相制约的。因此，在考虑满足任何一项要求时，必须兼顾其它两项。

根据以上基本要求，最好将各别系统联合，组成联合电力系统。它可大大提高供电的可靠性，减少因设备事故引起供电中断而设置的备用容量。它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。同时，由于个别负荷在系统总负荷中所占比重的减小，它们的波动对系统电能质量的影响也将减小。它还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。联合电力系统容量很大，个别机组的开停，甚至故障，对系统的影响将减小，从而可采用大容量、高效率的机组。虽然，也应指出，为使各别系统联合，通常需增加一定的投资。

#### 1-1-4 电力系统课程的主要内容

电力系统课程是“电力系统及其自动化”或“发电厂及电力系统”专业的专业课程之一，在教学计划中起承上启下的作用。

关于电力系统，有两方面问题需研究，即电力系统运行和电力系统规划。本课程仅涉及前者。但由于电力系统运行和规划有不少共同的理论基础，本课程也适当兼顾某些规划方面的内容。

电力系统运行涉及两方面的问题，即电力系统的稳态运行和电力系统的暂态过程或过渡过程。电力系统的稳态运行指电力系统正常的、相对静止的运行状态。电力系统的暂态过程指电力系统急剧地从一种运行状态向另一种运行状态过渡的过程。虽然，严格说，电力系统无时无刻不处在过渡过程中，但为了便于分析问题，作如上的划分还是可行的。而且，实践证明这是一种行之有效的方法。

电力系统的稳态运行通常包含两方面内容，即电力系统正常、三相对称运行状况的分析和计算以及电力系统有功功率—频率和无功功率—电压的控制和调整。前者是本书第一篇讨论的内容，后者则是本书第二篇讨论的内容。

电力系统的暂态过程可划分为三类——波过程、电磁暂态过程、机电暂态过程。

波过程主要与运行操作或雷击时的过电压有关，涉及电流、电压波的传播。这类过程最短暂。在这类过程中，电流、电压的变化幅度最大，变化频率最高。这类过程属《高电压技术》讨论的范畴。

电磁暂态过程主要与短路和自励磁有关，涉及电流、电压随时间的变化。这类过程的持续时间较波过程长。在这类过程中，电流、电压的变化幅度略小，变化频率略低。这类过程是本书第三篇讨论的内容。

机电暂态过程主要与系统振荡、稳定性的破坏、异步运行等有关，涉及功率、功率角 $\delta$ 、旋转电机的转速 $\omega$ 等随时间的变化。这类过程的持续时间最长。在这类过程中，电流、电压的变化幅度最小，功率、功率角等的变化频率也很低。这类过程是本书第四篇讨论的内容。

需要指出，电力系统的这三类暂态过程有时是相互关联的。例如，雷击造成短路而导致系统稳定性破坏的全过程中，既包括了波过程，也包括了电磁暂态过程和机电暂态过程。

#### 1-1-5 电力系统研究工具简介

由于电力系统及其暂态过程的复杂，研究电力系统时，常需借助一定的工具。这些研究工具大致分两类——电力系统的数学模拟和电力系统的物理模拟。

最简单的电力系统数学模拟是直流计算台。它是一种由直流电源和若干可变电阻组成的计算工具。借调整各电阻值来模拟系统各元件参数，并按给定的结线图将它们相互连接，再在各电源点施加直流电压，就可用表计测量模拟系统中的电流、电压分布。这种计算台主要用以计算系统中发生短路时的短路电流，但也可作近似的功率分布计算。

交流计算台的工作原理和直流计算台相似。只是交流计算台可分别以电阻和电抗模拟系统各元件，而且施加在各电源点的交流电压的相位也可调节。因此，交流计算台的用途远较直流计算台广。它可用以计算系统中的功率分布、短路电流以及系统的静态和暂态稳定性等。

通用模拟式电子计算机也可用以研究电力系统。按描述发电机、电动机、自动调节装置等的方程式组将它的积分元件、加法元件、乘法元件等组合为系统各元件并组成整个电力

系统的模拟后，就可运用示波器观测以电压表示的、连续变化的、表征系统运行状态的各个变量。因此，这种计算机适合于分析系统的暂态过程，尤其是有自动调节装置时的暂态过程。它的缺点是可供使用的元件数量有限，以致待研究的系统不能过于复杂。

通用数字式电子计算机已广泛用于电力系统的运行、设计和科学研究各个方面。自1956年成功地运用它计算功率分布以来，几乎所有主要的电力系统计算都已使用这种计算机。因此，本书有关章节中将着重介绍这种研究工具的运用。

上列四种研究工具都属数学模拟。它们的共同特点是必须先明确系统及其各元件的数学表示方式方能运用它们计算、分析。除数学模拟外，还有物理模拟，即通常所谓的动态模拟。电力系统动态模拟可看作是一种具体而微的电力系统。其中，发电机、变压器、电动机等都用相应的实物模拟。将它们按给定的接线方式组成模拟系统后，就可运用表计或示波器直接观测其中出现的各种物理现象。因此，不仅系统各元件的数学表示式未知时就可进行动态模拟试验，而且动态模拟的试验结果还可用以检验拟定的数学表示式是否正确。此外，在动态模拟上还可进行自动调节、控制装置的实物试验。这一功能也是各种数学模拟所不具备的。动态模拟的缺点也是待研究系统的规模不能过大，而且模拟装置的参数调整范围有一定的限制。

综上所述，各种研究工具都有其特点和适用范围。取长补短、互相配合才是正确的发展方向。正是沿这一方向，近年来又陆续出现了模拟计算机和数字计算机的组合、模拟计算机和交流计算台的组合以及数字计算机、模拟计算机和动态模拟的组合等新型研究工具。

## 1-2 电力系统的接线方式和电压等级

### 1-2-1 电力系统的接线方式

#### 1. 电力系统的接线图

电力系统的接线图有两种：电力系统的电气接线图和电力系统的地理接线图。电力系统的电气接线图就如图1-1。在电气接线图上较详细地表示出电力系统各主要元件之间的电气联系，但不能反映各发电厂、变电所的相对地理位置。电力系统的地理接线图如图1-2。在地理接线图上，各发电厂、变电所的相对地理位置，乃至各条电力线路的路径都按一定比例有所反映，但各主要元件之间的电气联系却往往难以表示。因此，这两种接线图常配合使用。

#### 2. 各种接线方式的特点

电力系统的接线方式大致可分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1-3所示。有备用接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1-4所示。

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