

34

电力系统

下



063777

TM 711  
2122:2

# 电力系统分析

(下册)

何仰赞 温增银 汪馥英 周勤慧 编

华中工学院出版社

## 内 容 提 要

全书共上、下两册。上册内容主要是：电力系统的数学模型和参数计算，短路的分析计算，短路和复杂故障的计算机算法等。下册内容主要是：电力系统的电压和功率计算，电压调整和频率调整，经济运行，暂态稳定、静态稳定和提高稳定措施，交流远距离输电和直流输电简介。

全书内容能满足《电力系统稳态分析》和《电力系统暂态分析》两门课程现行教学大纲要求，可供高等学校《电力系统及其自动化》、《发电厂及电力系统》等专业选作教学用书，亦可供电力工程有关专业的工程技术人员参考。

### 电力系统分析(下册)

何仰赞 温增银 汪履英 周勤慧 编

责任编辑 李 德

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

湖北省新华书店发行

湖南省新华印刷二厂印刷

开本：787×1092毫米 1/16 印张：17 字数：415,000

1985年6月第一版 1985年6月第一次印刷

印数：1—15,000

统一书号：15255—030 定价：3.60元

# 目 录

第十章 电力系统运行的特点和对它的基本要求.....	( 1 )
10-1 电能生产的特点和对电力系统运行的基本要求.....	( 1 )
10-2 电力系统的负荷.....	( 2 )
一、负荷曲线 二、负荷特性	
10-3 电力系统的接线方式.....	( 5 )
第十一章 电力网的电压和功率分布计算.....	( 8 )
11-1 网络元件的电压降落和功率损耗.....	( 8 )
一、输电线的电压降落和功率损耗 二、电压降落和功率损耗的实际计算 三、电压降落计算 公式的简化 四、变压器的电压降落和功率损耗	
11-2 开式网络的电压和功率分布计算.....	( 12 )
一、线路上有几个负荷时电压和功率分布计算 二、两级电压的开式电力网计算	
11-3 闭式网络的电压和功率计算.....	( 16 )
一、重迭原理在电力网计算中的应用 二、两端供电网络的功率分布 三、闭式电力网中的电 压损耗计算 四、复杂闭式网络的计算	
11-4 含几个电压等级的环网的功率分布.....	( 29 )
第十二章 电力系统潮流的计算机算法.....	( 35 )
12-1 概述.....	( 35 )
12-2 潮流计算的数学模型.....	( 35 )
一、潮流计算的定解条件 二、潮流计算的约束条件	
12-3 迭代法潮流计算.....	( 37 )
一、雅可比迭代法 二、高斯-塞德尔迭代法 三、高斯-塞德尔法潮流计算	
12-4 牛顿-拉夫逊法潮流计算.....	( 39 )
一、牛顿-拉夫逊法的基本原理 二、牛顿-拉夫逊法潮流计算 三、牛顿法潮流计算的极坐标 形式 ※四、有功功率和无功功率分解法(PQ分解法)	
※12-5 灵敏度分析.....	( 56 )
一、运行变量的分类 二、灵敏度方程 三、灵敏度分析	
第十三章 电力系统的无功功率和电压调整.....	( 59 )
13-1 概述.....	( 59 )
13-2 电力系统的无功功率平衡.....	( 60 )
一、无功功率负荷和无功功率损耗 二、无功功率电源 三、无功功率平衡	
13-3 电力系统的电压管理.....	( 67 )
一、中枢点电压的确定 二、电压调整的基本原理	
13-4 发电机调压.....	( 69 )
13-5 改变变压器变比的电压调整方式.....	( 70 )

一、变压器分接头的选择 二、有载调压变压器 三、加压调压变压器	
13-6 利用无功功率补偿调压	(75)
一、按调压要求选择无功补偿设备容量 二、新型的无功补偿装置——静止补偿器	
13-7 按调压要求改善线路参数	(80)
一、串联电容补偿 二、按容许电压损耗选择导线截面	
13-8 电力系统综合调压	(84)
一、各种调压措施的合理应用※二、各种措施调压效果的综合分析	
<b>第十四章 电力系统的有功功率和频率调整</b>	<b>(88)</b>
14-1 概述	(88)
14-2 电力系统的频率特性	(89)
一、系统负荷的有功功率-频率静态特性 二、发电机组的有功功率-频率静态特性 三、电力系统的有功功率-频率静态特性	
14-3 电力系统的频率调整	(94)
一、频率的一次调整 二、频率的二次调整 三、互联系统的频率调整 四、主调频厂的选择 五、频率调整和电压调整的关系	
14-4 有功功率平衡和系统负荷在各类发电厂间的合理分配	(100)
一、有功功率平衡和备用容量 二、各类发电厂负荷的合理分配	
<b>第十五章 电力系统的经济运行</b>	<b>(103)</b>
15-1 概述	(103)
15-2 电力网中的能量损耗	(103)
一、电力网的能量损耗和损耗率 二、线路中能量损耗的计算方法	
15-3 降低网损的技术措施	(108)
一、降低网损的意义 二、改善网络中的功率分布 三、合理组织电力网的运行方式 四、对原有电网进行技术改造 五、合理选择导线截面	
15-4 火电厂间有功功率负荷的经济分配	(113)
一、耗量特性 二、等微增率准则 三、多个发电厂间的负荷经济分配 四、计及网损的有功负荷经济分配	
15-5 水、火电厂间有功功率负荷的经济分配	(118)
一、一个水电厂和一个火电厂间负荷的经济分配※二、计及网损时若干个水、火电厂间负荷的经济分配	
15-6 无功功率负荷的经济分配	(123)
一、等微增率准则的应用 二、无功功率补偿的经济配置	
※15-7 网损微增率的计算	(126)
一、阻抗矩阵法 二、 $B$ 系数法	
<b>第十六章 电力系统运行稳定性的基本概念</b>	<b>(131)</b>
16-1 概述	(131)
16-2 发电机转子间的相对位置	(131)
16-3 静态稳定的初步概念	(133)
16-4 暂态稳定的初步概念	(134)
16-5 负荷稳定的概念	(136)

16-6	发电机转子运动方程	(137)
	一、转子运动方程 二、几何角和电气角 三、相对角和绝对角 四、用标么值表示的转子运动方程 五、惯性时间常数的意义	
<b>第十七章</b>	<b>电力系统的电磁功率特性</b>	<b>(141)</b>
17-1	简单电力系统的功率特性	(141)
	一、隐极式发电机的功率特性 二、凸极式发电机的功率特性	
17-2	自动励磁调节器对功率特性的影响	(144)
	一、无调节励磁时发电机端电压的变化 二、自动励磁调节器对功率特性的影响 三、用各种电势表示的功率特性	
17-3	复杂电力系统的功率特性	(152)
17-4	网络接线及参数对功率特性的影响	(154)
	一、串联电阻的影响 二、并联电阻的影响 三、并联电抗的影响	
<b>第十八章</b>	<b>电力系统暂态稳定性</b>	<b>(159)</b>
18-1	暂态稳定分析计算的基本假设	(159)
	一、电力系统机电暂态过程的特点 二、基本假设 三、近似计算中的简化	
18-2	简单电力系统暂态稳定的分析计算	(161)
	一、各种运行情况下的功率特性 二、大扰动后发电机转子的相对运动 三、等面积定则 四、极限切除角	
18-3	发电机转子运动方程的数值解法	(165)
	一、分段计算法 二、改进欧拉法 三、考虑调节系统作用时暂态过程的计算	
18-4	复杂电力系统暂态稳定的基本概念	(177)
	一、大扰动后各发电机转子运动的特点 二、复杂电力系统暂态稳定计算的原理和特点 三、暂态稳定计算用的网络模型 四、复杂电力系统暂态稳定的判据	
※18-5	电力系统异步运行的概念	(186)
	一、发电机异步运行时的功率特性 二、发电机由失步到稳态异步运行的过程 三、实现再同步的必要条件和促使再同步的措施 四、异步运行和再同步的计算	
<b>第十九章</b>	<b>电力系统静态稳定性</b>	<b>(192)</b>
19-1	运动稳定性的基本概念和小扰动法原理	(192)
	一、未受扰运动与受扰运动 二、扰动方程和相对运动 三、李雅普诺夫运动稳定性定义 四、线性系统的稳定性 五、非线性系统的线性近似的稳定性判断法 六、用小扰动法分析计算电力系统静态稳定的步骤	
19-2	简单电力系统的静态稳定	(195)
	一、不计发电机组的阻尼作用 二、计及发电机组的阻尼作用	
19-3	自动励磁调节器对静态稳定的影响	(200)
	一、按电压偏差调节的比例式调节器对静态稳定的影响 二、比例式调节器对静态稳定的影响 三、改进励磁调节器的几种途径 四、电力系统静态稳定的简要述评	
19-4	复杂电力系统静态稳定分析计算的概念	(214)
	一、复杂电力系统静态稳定性的判别法 二、关于参考轴的选择 三、发电机电磁功率增量的计算	
19-5	电力系统静态稳定的实际计算	(216)

一、静态稳定储备	二、静态稳定实用判据的概念	三、应用 $dP/d\delta$ 判据检验静态稳定性
※四、应用 $dQ/dV$ 判据计算静态稳定		
第二十章 改善和提高电力系统稳定性的措施		(228)
20-1 改善和提高稳定性的一般原则		(228)
20-2 改善电力系统基本元件的特性和参数		(229)
一、改善发电机及其励磁调节系统的特性	二、改善原动机的调节特性	三、减小变压器的电抗
四、改善继电保护和开关设备的特性	五、改善输电线路的特性	
20-3 采用附加装置提高电力系统的稳定性		(234)
一、输电线路采用串联电容补偿	二、输电线路的并联电抗补偿	三、输电线路设置开关站
四、中继同步调相机和中继电力系统	五、变压器中性点经小阻抗接地	六、发电机采用电气制动
20-4 改善运行条件及其他措施		(240)
一、正确规定电力系统运行参数的数值	二、合理选择电力系统的运行接线	三、切除部分发电机及部分负荷
四、减少系统稳定破坏所带来的损失和影响		
第二十一章 交流远距离输电的基本概念		(243)
21-1 概述		(243)
21-2 长线的稳态方程		(243)
21-3 沿长线的功率传送		(248)
一、输电线路的自然功率	二、沿无损线的功率传送	三、有损耗线路稳态运行时的电压和电流分布
21-4 提高远距离输电线路的功率极限和改善运行特性的措施		(253)
第二十二章 直流输电的基本概念		(255)
22-1 概述		(255)
22-2 换流器的基本工作原理		(257)
一、整流器的工作原理	二、逆变器的工作原理	
22-3 直流输电系统的基本控制方式		(263)
22-4 直流输电系统的谐波、滤波装置和无功功率补偿		(265)
22-5 直流输电系统的接线方式		(266)

## 第十章 电力系统运行的特点和对它的基本要求

### 10-1 电能生产的特点和对电力系统运行的基本要求

同别种形式的能量相比较，电能具有许多优点。电能可以方便地转化为别种形式的能，例如，机械能、热能、光能、磁能、化学能等；电能的输送和分配易于实现，它可以输送到需要它的任何工作场所和生活场所；电能的应用规模也很灵活，既可以小量应用，也可以大量地应用。因此，电能被日益广泛地应用于工农业，交通运输业以及人民的日常生活中。以电作为动力，可以促进工农业生产的机械化和自动化，保证产品质量，大幅度提高劳动生产率。还要指出，提高电气化程度，以电能代替其它形式的能量，是节约总能源消耗的一个重要途径。

解放后，我国电力工业发展迅速，到1983年底装机容量已达七千六百四十四万千瓦，为1949年的四十一倍，居世界第八位。1983年的发电量为三千五百一十四亿度，为1949年的八十一倍，居世界第六位。电力系统也得到了迅速发展，目前我国跨省的大型电力系统已发展到六个，其中容量在1000万千瓦左右的有三个。交流电网的最高电压等级已达500千伏。

电力系统是由电能的生产、输送、分配和消费的各环节组成的一个整体。与别的工业系统相比较，电力系统的运行具有如下的明显特点。

(1) 电能不能大量存贮。电能的生产、输送、分配和消费实际上是同时进行的。电力系统中，发电厂在任何时刻发出的功率必须等于该时刻用电设备所需的功率、输送和分配环节中的功率损失之和。

(2) 电力系统的暂态过程非常短促。电力系统从一种运行状态到另一种运行状态的过渡极为迅速。

(3) 与国民经济的各部门及人民日常生活有着极为密切的关系。供电的突然中断会带来严重的后果。

根据这些特点，对电力系统运行的基本要求是：(1) 保证安全可靠的供电；(2) 要有合乎要求的电能质量；(3) 要有良好的经济性。

保证安全可靠的发、供电是对电力系统运行的首要要求。在运行过程中，供电的突然中断大多由事故引起。必须从各个方面采取措施以防止和减少事故的发生，例如，要严密监视设备的运行状态和认真维修设备以减少其事故，要不断提高运行人员的技术水平以防止人为事故。根据我国电力系统的目前发展水平，为了提高系统运行的安全性，还必须配备足够的有功功率电源和无功功率电源；完善电力系统的结构，提高电力系统抵抗干扰的能力，增强系统运行的稳定性；利用电子计算机对系统的运行进行安全监视和控制等。

整个地提高电力系统的安全运行水平，就为保证对用户的不间断供电创造了最基本的条件。根据用户对供电可靠性的不同要求，目前我国将负荷分为以下三级：

第一级负荷。对这一级负荷中断供电的后果是极为严重的。例如，可能发生危及人身安全的事；使工业生产中的关键设备遭到难以修复的损坏，以致生产秩序长期不能恢复正常，



造成国民经济的重大损失；使市政生活的重要部门发生混乱等。

第二级负荷。对这一级负荷中断供电将造成大量减产，使城市中大量居民的正常活动受到影响等。

第三级负荷。不属于第一、二级的，停电影响不大的其它负荷都属于第三级负荷，如工厂的附属车间，小城镇和农村的公共负荷等。对这一级负荷的短时供电中断不会造成重大的损失。

对于以上三个级别的负荷，可以根据不同的具体情况分别采取适当的技术措施来满足它们对供电可靠性的要求。

电压和频率是电气设备设计和制造的基本技术参数，也是衡量电能质量的两个基本指标。我国采用的额定频率为50赫芝，正常运行时允许的偏移为 $\pm 0.2 \sim \pm 0.5$ 赫芝。用户供电电压的允许偏移约为额定值的 $\pm 5\%$ 。电压和频率超出允许偏移时，不仅会造成废品和减产，还会影响用电设备的安全，严重时甚至会危及整个系统的安全运行。

频率主要决定于系统中的有功功率平衡，系统发出的有功功率不足，频率就偏低。电压则主要取决于系统中的无功功率平衡，无功功率不足时，电压就偏低。因此，要保证良好的电能质量，关键在于系统发出的有功功率和无功功率都应满足在额定频率和额定电压下的功率平衡要求。电源要配置得当，还要有适当的调整手段。

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，而且电能又是国民经济的大多数生产部门的主要动力。因此，提高电能生产的经济性具有十分重要的意义。

为了提高电力系统运行的经济性，必须尽量地降低发电厂的煤耗率（水耗率）、厂用电率和电力网的损耗率。这就是说，要求在电能的生产、输送和分配过程中减少耗费，提高效率。为此，应做好规划设计，合理利用能源；采用高效率低损耗设备；采取措施降低网损；实行经济调度等等。

上述三个方面的要求是互相联系，互相制约的。一个不安全的系统是谈不上优质和经济的。电能质量低的系统也不会是安全和经济的。但是有时候安全和优质的要求也可能同经济性发生矛盾。因此，对于一个具体的系统，在采取措施以满足上述三个方面的要求时，要有全面的考虑。

## 10-2 电力系统的负荷

系统中所有用电设备消耗的功率总和就是电力系统的负荷。系统中主要的用电设备大致有异步电动机、同步电动机、电热装置、整流装置和照明设备等。根据用户的性质，用电负荷也可以分为工业负荷、农业负荷、交通运输业负荷和人民生活用电负荷等。在不同性质的用户中，上述各类用电设备消耗功率所占的比重是不同的。全系统总的用电负荷是把不同地区、不同性质的所有用户的负荷总加起来而得到的。

### 一、负荷曲线

实际的系统负荷是随时间变化的，其变化规律可用负荷曲线来描述。常用的负荷曲线有日负荷曲线和年负荷曲线。图10-1所示的电力系统日负荷曲线描述了一天24小时负荷的变化情况。负荷曲线中的最大值称为日最大负荷 $P_{\max}$ （又称峰荷），最小值称为日最小负荷 $P_{\min}$ （又称谷荷）。在同一图中用虚线表示了无功功率日负荷曲线。由于一日之内功率因数是变化的，

在低负荷时功率因数相对较低，而在高峰负荷时，功率因数较高。因此无功负荷曲线同有功负荷曲线不完全相似，两种曲线中相应的极值不一定同时出现。为了方便计算，实际上常把连续变化的曲线绘制成阶梯形，如图10-1(b)所示。

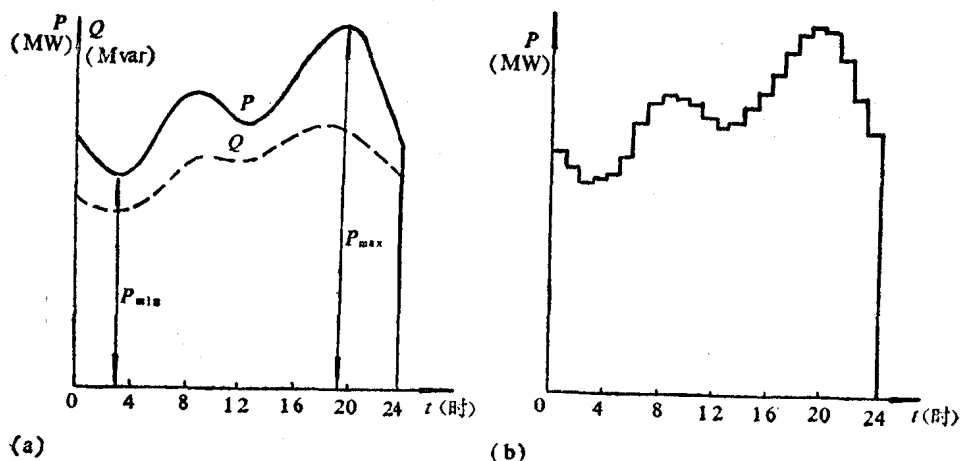


图10-1 日负荷曲线

根据日负荷曲线可以计算一日的总耗电量，即

$$W_d = \int_0^{24} P dt$$

故日平均负荷为

$$P_{av} = \frac{W_d}{24} = \frac{1}{24} \int_0^{24} P dt. \quad (10-1)$$

为了说明负荷曲线的起伏特性，常引用这样两个系数：负荷率 $k_m$ 和最小负荷系数 $\alpha$ 。

$$k_m = \frac{P_{av}}{P_{max}}, \quad (10-2)$$

$$\alpha = \frac{P_{min}}{P_{max}}. \quad (10-3)$$

这两个系数不仅用于日负荷曲线，也可用于其它时间段的负荷曲线。

在电力系统中各用户的日最大负荷不会都在同一时刻出现，最小负荷也不会都在同一时刻出现。因此，系统的最大负荷总是小于各用户最大负荷之和，而系统的最小负荷总是大于各用户最小负荷之和。在我国的电力系统中，为了缓和电力供不应求的矛盾，普遍地进行了“调荷节电”，合理地、有计划地安排各类用户的用电时间，使负荷曲线变得比较平坦，因而使系数 $k_m$ 和 $\alpha$ 都接近于1。这样做的好处是：使设备得到充分的利用；为电力系统的调压和调频创造有利条件；降低电力网的损耗率，提高系统运行的经济性等。

年最大负荷曲线描述一年内每月（或每日）最大有功功率负荷变化的情况，它主要用来安排发电设备的检修计划，同时也为制订发电机组或发电厂的扩建或新建计划提供依据。图10-2为年最大负荷曲线，其中划斜线的面积A代表各检修机组的容量和检修时间的乘积之和，B是系统新装的机组容量。

在电力系统的运行分析中，还经常用到年持续负荷曲线，它按一年中系统负荷的数值大小及其持续小时数顺序排列而绘制成。例如，在全年8760小时中，有 $t_1$ 小时负荷值为 $P_1$ （即

最大值  $P_{max}$ ),  $t_2$ 小时负荷值为  $P_2$ ,  $t_3$ 小时负荷值为  $P_3$ , 于是可绘出如图10-3所示的年持续负荷曲线。在安排发电计划和进行可靠性估算时, 常用到这种曲线。

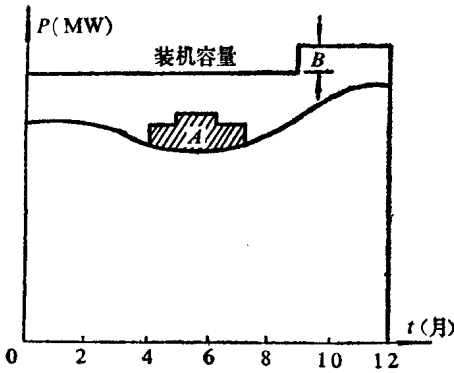


图10-2 年最大负荷曲线

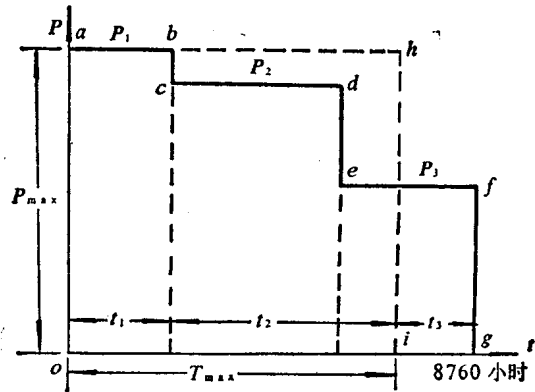


图10-3 年持续负荷曲线

根据年持续负荷曲线可以确定系统负荷的全年耗电量为

$$W = \int_0^{8760} P dt。$$

如果负荷始终等于最大值  $P_{max}$ , 经过  $T_{max}$  小时后所消耗的电能恰好等于全年的实际耗电量, 则称  $T_{max}$  为最大负荷利用小时数,

$$T_{max} = \frac{W}{P_{max}} = \frac{1}{P_{max}} \int_0^{8760} P dt。 \quad (10-4)$$

对于图10-3所示的年持续负荷曲线, 若使矩形面积  $oahio$  同面积  $oabcdefgo$  相等, 则线段  $oi$  即等于  $T_{max}$ 。

根据电力系统的运行经验, 各类负荷的  $T_{max}$  的数值大体有一个范围 (见表10-1)。

表10-1 各类用户的年最大负荷利用小时数

负 荷 类 型	$T_{max}$ (小时)
户内照明及生活用电	2000~3000
一班制企业用电	1500~2200
二班制企业用电	3000~4500
三班制企业用电	6000~7000
农灌用电	1000~1500

在设计电网时, 用户的负荷曲线往往是未知的。但如果知道用户的性质, 就可以选择适当的  $T_{max}$  值, 从而近似地估算出用户的全年耗电量, 即  $W = P_{max} T_{max}$ 。

## 二、负荷特性

负荷取用的功率一般是要随系统的运行参数 (主要是电压和频率) 的变化而变化的, 反映这种变化规律的曲线或数学表达式称为负荷特性。当频率维持额定值不变时, 负荷功率与电压的关系称为负荷的电压静态特性。当负荷端电压维持额定值不变时, 负荷功率与频率的

关系称为负荷的频率静态特性。所谓“静态”，是指这些关系是在系统处于稳态下确定的。各类用户的负荷特性依其用电设备的组成情况而不同，一般是通过实测确定。图10-4表示由6千伏电压供电的中小工业负荷的静态特性。

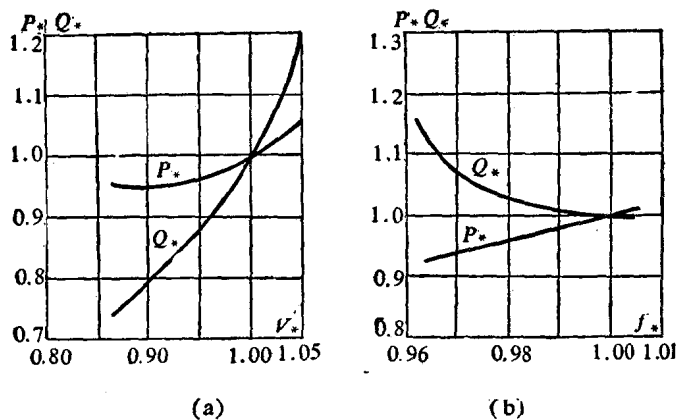


图10-4 6千伏综合性中小工业负荷的电压静态特性(a)和频率静态特性(b)  
 负荷组成：异步电动机79.1%；同步电动机3.2%；电热电炉17.7%

### 10-3 电力系统的接线方式

电力系统的接线方式对于保证安全、优质和经济地向用户供电具有非常重要的作用。电力系统的接线包括发电厂的主接线、变电所的主接线和电力网的接线。发电厂和变电所的主接线在发电厂的课程中学习，这里只对电力网的接线方式作简略的介绍。

电力网的接线方式通常按供电可靠性分为无备用和有备用两类。无备用接线的网络中，每一个负荷只能靠一条线路取得电能，单回路放射式、干线式和树状网络即属于这一类（见图10-5）。这类接线的特点是简单，设备费用较少，运行方便。但是供电的可靠性比较低，任一段线路发生故障或检修时，都要中断部分用户的供电。在干线式和树状网络中，当线路较长时，线路末端的电压往往偏低。

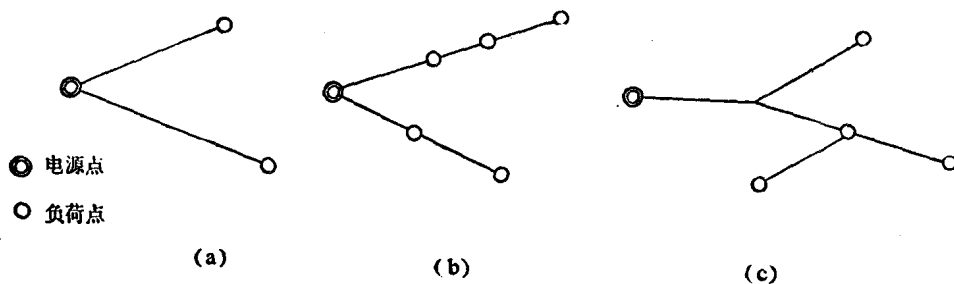


图10-5 无备用网络  
 (a) 放射式网络；(b) 干线式网络；(c) 树状网络

凡是每一个负荷都只能沿唯一的路径取得电能的网络，称为开式网络。

在有备用的接线方式中，最简单的一类是在上述无备用网络的每一段线路上都采用双回

路。这类接线同样具有简单和运行方便的特点,而且供电可靠性和电压质量都有明显的提高,其缺点是设备费用增加很多。

由一个或几个电源点和一个或几个负荷点通过线路连接而成的环形网络[见图10-6(a), (b)],是一类最常见的有备用网络。一般说,环形网络的供电可靠性是令人满意的,也比较经济。其缺点是运行调度比较复杂。在单电源环网中 [图10-6(a)],当线路a1发生故障而开环时,正常线段可能过负荷,负荷节点1的电压也明显降低。

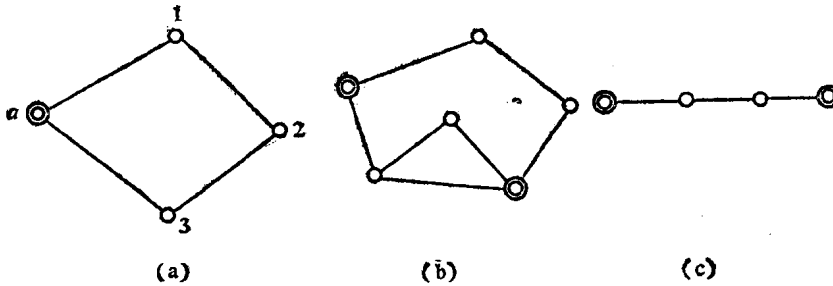


图10-6 几种常用的有备用网络

另一种常见的有备用接线方式是两端供电网络[见图10-6(c)],其供电可靠性相当于有两个电源的环形网络。

对于上述有备用网络,根据实际需要也可以在部分或全部线段采用双回路。环形网络和两端供电网络中,每一个负荷点至少通过两条线路从不同的方向取得电能,具有这种接线特点的网络又统称为闭式网络。

电力系统中各部分电力网担负着不同的职能,因此对其接线方式的要求也不一样。电力网按其职能可以分为输电网络和配电网络。

**输电网络**的主要任务是,将大容量发电厂的电能可靠而经济地输送到负荷集中地区。输电网络通常由电力系统中电压等级最高的一级或两级电力线路组成。系统中的区域发电厂(经升压站)和枢纽变电所通过输电网络相互联接。对输电网络接线方式的要求主要是,应有足够的可靠性,要满足电力系统运行稳定性的要求,要有助于实现系统的经济调度,要具有对运行方式变更和系统发展的适应性等。

用于联接远离负荷中心地区的大型发电厂的输电干线和向缺乏电源的负荷集中地区供电的输电干线常采用双回路或多回路。位于负荷中心地区的大型发电厂和枢纽变电所一般是通过环形网络互相联接。

输电网络的电压等级要与系统的规模(容量和供电范围)相适应。表10-2列出各种电压

表10-2 各级电压架空线路的输送能力

额定电压 (千伏)	输送容量 (兆伏安)	输送距离 (公里)	额定电压 (千伏)	输送容量 (兆伏安)	输送距离 (公里)
3	0.1~1.0	1~3	110	10~50	50~150
6	0.1~1.2	4~15	220	100~500	100~300
10	0.2~2	6~20	330	200~800	200~600
35	2~10	20~50	500	1000~1500	150~850
60	3.5~30	30~100	750	2000~2500	500以上

等级的单回架空线路输送功率和输送距离的适宜范围。

配电网的任务是分配电能。配电线路的额定电压一般为0.4~35千伏,有些负荷密度较大的大城市也采用110千伏,以至220千伏。配电网的电源点是发电厂(或变电所)相应电压级的母线,负荷点则是低一级的变电所或者直接为用电设备。

配电网采用哪一类接线,主要取决于负荷的性质。无备用接线只适用于向第三级负荷供电。对于第一级和第二级负荷占较大比重的用户,应由有备用网络供电。

当负荷密度很大,供电可靠性要求很高时,还可采用复杂的闭式网络,例如,现代化大城市所采用的网格式配电网(图10-7)。低压配电网接成网格式,110千伏或220千伏的电力线路(常采用电缆)直接引到供电点,经一次降压到达低压配电网。这种网络具有供电可靠、保证电压质量、降低网络功率损耗和适应负荷增长等优点。但是继电保护装置比较复杂。

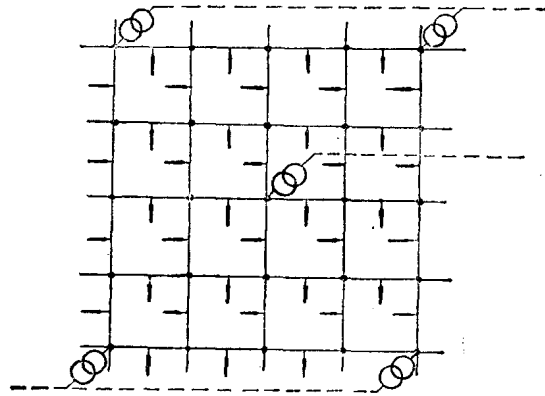


图10-7 网格式网络

实际电力系统的配电网比较复杂,往往是由各种不同接线方式的网络组成的。在选择接线方式时,必须考虑的主要因素是,满足用户对供电可靠性和电压质量的要求,运行要灵活方便,要有好的经济指标等等。一般都要对多种可能的接线方案进行技术经济比较后才能确定。

# 第十一章 电力网的电压和功率分布计算

## 11-1 网络元件的电压降落和功率损耗

### 一、输电线的电压降落和功率损耗

图11-1示一段输电线路及其一相等值电路，其中 $R$ 、 $X$ 和 $B$ 分别为一相的电阻，等值电抗和等值电纳； $V$ 和 $I$ 表示相电压和相电流。

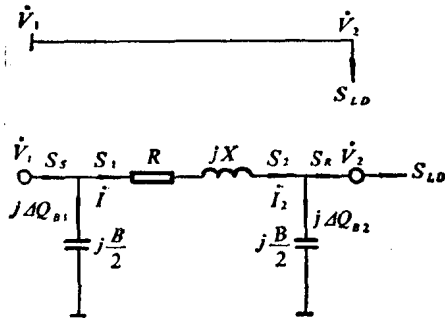


图11-1 输电线路及其等值电路

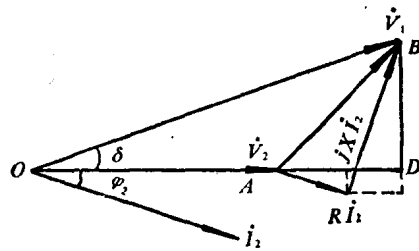


图11-2 电压降落相量图

#### 1. 电压降落

输电线路的电压降落是指线路首末端两点电压的相量差，由等值电路图11-1可知：

$$\dot{V}_1 - \dot{V}_2 = (R + jX)\dot{I}_2 = (R + jX)\dot{I}_1 \quad (11-1)$$

以相量 $\dot{V}_2$ 为参考轴，如果 $I_2$ 和 $\cos\varphi_2$ 已知，可作出相量图如图11-2所示。图中 $\overline{AB}$ 就是电压降相量 $(R + jX)\dot{I}_2$ 。把电压降相量分解为与电压相量 $\dot{V}_2$ 同方向和相垂直的两个分量 $\overline{AD}$ 及 $\overline{DB}$ ，记这两个分量的绝对值为 $\Delta V_2 = AD$ 及 $\delta V_2 = DB$ ，由图可以写出：

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_2 &= RI_2 \cos\varphi_2 + XI_2 \sin\varphi_2, \\ \delta V_2 &= XI_2 \cos\varphi_2 - RI_2 \sin\varphi_2. \end{aligned} \right\} \quad (11-2)$$

于是输电线路的电压降落可以表示为：

$$\dot{V}_1 - \dot{V}_2 = (R + jX)\dot{I}_2 = \Delta\dot{V}_2 + \delta\dot{V}_2, \quad (11-3)$$

式中 $\Delta\dot{V}_2$ 和 $\delta\dot{V}_2$ 分别称为电压降落的纵分量和横分量。

在电力网分析中，习惯用功率进行运算。与电压 $V_2$ 和电流 $I_2$ 相对应的一相功率为：

$$S_2 = \dot{V}_2 \dot{I}_2^* = P_2 + jQ_2 = V_2 I_2 \cos\varphi_2 + jV_2 I_2 \sin\varphi_2,$$

用功率代替电流，可将式(11-2)改写为：

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_2 &= \frac{P_2 R + Q_2 X}{V_2}, \\ \delta V_2 &= \frac{P_2 X - Q_2 R}{V_2}. \end{aligned} \right\} \quad (11-4)$$

而输电线路首端的相电压为：

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 + \Delta\dot{V}_2 + \delta\dot{V}_2 = V_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{V_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{V_2} = V_1 \angle \delta, \quad (11-5)$$

$$V_1 = \sqrt{(V_2 + \Delta V_2)^2 + (\delta V_2)^2}, \quad (11-6)$$

$$\delta = \text{tg}^{-1} \frac{\delta V_2}{V_2 + \Delta V_2}, \quad (11-7)$$

式中 $\delta$ 为线路首末端电压相量的相位差。

若以电压相量 $\dot{V}_1$ 作参考轴,用 电流 $I_1$ 计算电压降,并把电压降落相量分解为与 $\dot{V}_1$ 同方向和相垂直的两个分量(见图11-3),便有:

$$\dot{V}_1 - \dot{V}_2 = (R + jX)I_1 = \Delta\dot{V}_1 + \delta\dot{V}_1. \quad (11-8)$$

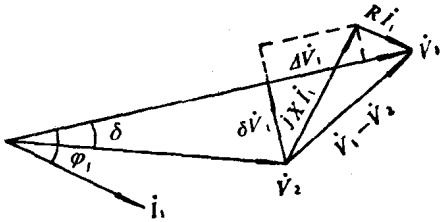


图11-3 输电线的电压相量图

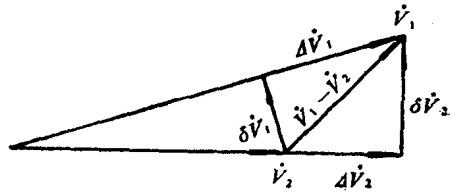


图11-4 电压降落相量的两种分解法

如果再用一相功率

$$S_1 = \dot{V}_1 \dot{I}_1 = P_1 + jQ_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1 + jV_1 I_1 \sin \varphi_1$$

表示电流, 便得:

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_1 &= \frac{P_1 R + Q_1 X}{V_1}, \\ \delta V_1 &= \frac{P_1 X - Q_1 R}{V_1}. \end{aligned} \right\} \quad (11-9)$$

而线路末端的相电压为:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - \Delta\dot{V}_1 - \delta\dot{V}_1 = V_1 - \frac{P_1 R + Q_1 X}{V_1} - j \frac{P_1 X - Q_1 R}{V_1} = V_2 \angle -\delta, \quad (11-10)$$

$$V_2 = \sqrt{(V_1 - \Delta V_1)^2 + (\delta V_1)^2}, \quad (11-11)$$

$$\delta = \text{tg}^{-1} \frac{\delta V_1}{V_1 - \Delta V_1}. \quad (11-12)$$

图11-4示出电压降落相量的两种不同的分解。由图可见,  $\Delta V_1 \neq \Delta V_2, \delta V_1 \neq \delta V_2$ 。

上述公式都是按电流落后于电压, 即功率因数角 $\varphi$ 为正的情况下导出的。如果电流超前于电压, 则 $\varphi$ 应有负值, 在以上各公式中的无功功率 $Q$ 也应改变符号。

必须注意, 在使用公式(11-4)和(11-9)计算电压降落的纵、横分量时, 如所用的是某一点的功率, 则应该取用同一点的电压。

## 2. 功率损耗

有功功率损耗 $\Delta P_L$ 是由于电流通过电阻 $R$ 产生的。



$$\Delta P_L = I_2^2 R = \left(\frac{S_2}{V_2}\right)^2 R = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} R \quad (11-13)$$

或

$$\Delta P_L = I_1^2 R = \left(\frac{S_1}{V_1}\right)^2 R = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{V_1^2} R \quad (11-14)$$

电流通过线路的感抗 $X$ 要产生无功功率损耗 $\Delta Q_L$ ；在外加电压作用下，线路电容将产生无功功率 $\Delta Q_B$ 。作为无功功率损耗， $\Delta Q_L$ 取正号， $\Delta Q_B$ 则应取负号。

$$\Delta Q_L = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} X = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{V_1^2} X, \quad (11-15)$$

$$\Delta Q_{B_1} = -\frac{1}{2} B V_1^2, \quad \Delta Q_{B_2} = -\frac{1}{2} B V_2^2. \quad (11-16)$$

上述各公式是从单相电路导出的，因此各式中电压和功率分别为输电线路的相电压及单相功率。在电力网的实际计算中，习惯采用线电压和三相功率，以上导出的公式(11-4)~(11-7)、(11-9)~(11-16)仍然适用。各公式中有关参数的单位如下：阻抗为欧，导纳为西，电压为千伏，功率为兆伏安。在本章以下的讨论中，如不作特别说明，电压和功率都是指线电压和三相功率，但是仍然采用一相等值电路。

## 二、电压降落和功率损耗的实际计算

在电力网的实际计算中，按已知条件的不同，可区分为以下的两种情况。

### 1. 已知同一端的电压和功率

设线路末端的三相功率 $S_R = P_R + jQ_R = S_{LD}$ 及线电压 $V_2$ 为已知，欲求线路首端电压和功率。

因为末端电压已知，宜采用公式(11-4)和(11-13)计算电压降落及线路功率损耗。为此应先确定功率 $S_2$ ，从等值电路图11-1可知：

$$S_2 = S_R + j\Delta Q_{B_2} = P_R + j\left(Q_R - \frac{1}{2} B V_2^2\right). \quad (11-17)$$

然后利用公式(11-5)即可确定首端电压。线路首端的功率也容易算出：

$$S_1 = S_2 + \Delta P_L + j\Delta Q_L = P_R + \Delta P_L + j\left(Q_R - \frac{1}{2} B V_2^2 + \Delta Q_L\right), \quad (11-18)$$

$$S_S = S_1 + j\Delta Q_{B_1} = P_R + \Delta P_L + j\left[Q_R + \Delta Q_L - \frac{1}{2} B(V_1^2 + V_2^2)\right]. \quad (11-19)$$

如果已知首端功率 $S_S$ 和电压 $V_1$ ，计算步骤请读者自己考虑。

### 2. 已知一端功率和另一端的电压

当线路首端接于供电点，末端接于用户时，往往已知用户的功率 $S_{LD}$ （即末端功率 $S_R$ ）和供电点的电压 $V_1$ ，要求计算末端电压 $V_2$ 和首端功率 $S_S$ 。在这种情况下，由于首端电压已知，宜采用公式(11-9)计算电压降。为此先要利用公式(11-18)算出功率 $S_1$ ，在计算线路末端充电功率 $\Delta Q_{B_2}$ 和线路阻抗的功率损失 $\Delta P_L$ 和 $\Delta Q_L$ 时，未知的末端电压 $V_2$ 可暂用额定电压 $V_N$ 代替。算出功率 $S_1$ 后，线路的电压降和末端电压就可用公式(11-9)和(11-10)确定了。

## 三、电压降落计算公式的简化

利用公式(11-6)或(11-11)，可以在已知输电线路某端的电压和功率的条件下，精确地求出另一端的电压值，但是计算比较繁。如将此两式展开，并取其前两项便得：