

# 电力系统工程基础

西安交通大学主编

电力工业出版社

## 内 容 提 要

全书内容包括：电力系统的基本知识及潮流计算；电力系统有功功率和无功功率的最佳分配及频率、电压的调整；电力系统故障和稳定性分析以及电力系统可靠性四部分。

本书在阐明电力系统基本知识和计算方法的基础上，初步应用电子数字计算机技术、最佳控制理论、系统稳定性和可靠性理论来分析和解决电力系统的规划和运行问题。书中并反映了国内外本学科新技术的发展动向。这些是近代电力系统工程技术人员所必须具有的基础知识。

本书是高等学校“发电厂及电力系统”、“电力系统及其自动化”专业的专业课程教材，也可作为研究生、工程技术人员的参考书。

## 电力系统工程基础

西安交通大学主编

\*

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

水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 25.75印张 588千字

1981年5月第一版 1981年5月北京第一次印刷

印数 00001—10630册 定价 2.80元

书号 15036·4186

## 前 言

本书在阐明电力系统基本知识和计算方法的基础上,初步运用电子数字计算机技术、最佳控制理论、系统稳定性和可靠性理论等来分析和解决电力系统的规划和运行问题。这些是近代电力系统工程所必须懂得和掌握的知识技能。作为一本教科书,本书只在每一领域的基本理论和基本方法方面打下基础。

全书共九章,中心内容包括电力系统的基本知识及潮流计算;电力系统有功功率和无功功率的最佳分配及频率、电压的调整;电力系统故障及稳定性分析以及电力系统可靠性四部分。可靠性一章可以暂不列为必修内容。第二章的内容可以集中讲授,也可配合后面各章分开讲授。

本书是集体编写的,西安交通大学孙启宏编写第一、三、四章,文矩编写第五、六章,李光琦编写第二、七、八章,清华大学孙绍先编写第九章,由孙启宏主编。书稿由清华大学孙绍先初审,并经西安审稿会议审议。参加审稿会的有清华大学、浙江大学、南京工学院、华北电力学院、重庆大学、湖南大学、天津大学、武汉水利电力学院等单位的代表,代表们提出了修改意见。修改稿又经清华大学王宗淦、孙绍先、周荣光、刘笙、陈寿孙等详细审查,对此深表感谢。

限于编者的经验和水平,错误之处在所难免,请读者批评指正。

编 者

1980年10月

# 目 录

## 前 言

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第一章 电力系统的基本概念                                                                      | 1   |
| 第一节 概述                                                                             | 1   |
| 第二节 电力系统的负荷                                                                        | 2   |
| 第三节 电力线路的结构                                                                        | 5   |
| 第四节 电力系统的接线                                                                        | 9   |
| 第五节 有功功率、无功功率和电压降                                                                  | 12  |
| 第六节 功率损耗和电能损耗                                                                      | 16  |
| 第七节 电力系统运行的特点和要求                                                                   | 17  |
| 第二章 电力系统元件特性                                                                       | 19  |
| 第一节 概述                                                                             | 19  |
| 第二节 标么制                                                                            | 19  |
| 一、标么值 二、基准值的选择 三、基准值变化时标么值的计算 四、标么制应用于三相系统 五、算例 六、采用标么制的优点                         |     |
| 第三节 输电线路                                                                           | 25  |
| 一、线路电阻 二、线路电抗 三、线路电纳 四、输电线路的方程和等值电路                                                |     |
| 第四节 变压器                                                                            | 47  |
| 一、变压器的等值电路及其参数 二、变压器为非标准变比时的等值电路 三、变压器的零序等值电路 四、变压器原副边的相量关系                        |     |
| 第五节 同步发电机                                                                          | 64  |
| 一、同步发电机的基本方程和坐标转换 二、发电机稳态运行时的方程、相量图、参数和等值电路 三、发电机在定子回路中受到突然扰动瞬间的参数 四、发电机的负序电抗和零序电抗 |     |
| 第六节 负荷                                                                             | 85  |
| 一、负荷的电压静态特性 二、负荷的数学模型(静态的)                                                         |     |
| 第三章 电力网的数学模型                                                                       | 92  |
| 第一节 概述                                                                             | 92  |
| 第二节 电力网的等值电路                                                                       | 92  |
| 第三节 电力网的数学模型                                                                       | 94  |
| 一、回路方程 二、节点方程 三、两种方程的比较                                                            |     |
| 第四节 节点导纳矩阵                                                                         | 97  |
| 第五节 节点阻抗矩阵                                                                         | 98  |
| 一、导纳矩阵求逆法 二、支路追加法                                                                  |     |
| 第六节 多级电压的电力网                                                                       | 108 |
| 第七节 电力网的简化                                                                         | 109 |
| 一、网络变换法 二、高斯消去法简化网络 三、三角分解法简化网络 四、矩阵分块法简化网络                                        |     |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第四章 电力系统潮流的计算及分析                                                        | 120 |
| 第一节 概述                                                                  | 120 |
| 第二节 一端电源开式电力网潮流的计算                                                      | 120 |
| 第三节 两端电源供电系统潮流的计算                                                       | 122 |
| 一、功率方程 二、对功率方程的分析 三、电力系统运行变量的分类 四、功率方程解的步骤 五、举例                         |     |
| 第四节 潮流计算的方程和约束条件                                                        | 127 |
| 一、功率方程的一般形式 二、节点的分类 三、潮流计算的实际约束条件                                       |     |
| 第五节 非线性代数方程的迭代计算                                                        | 130 |
| 一、雅可比迭代法 二、高斯-赛德尔迭代法 三、加速系数法 四、牛顿-拉夫逊法                                  |     |
| 第六节 高斯-赛德尔法计算潮流*                                                        | 138 |
| 第七节 牛顿-拉夫逊法计算潮流                                                         | 140 |
| 一、直角坐标形式的节点功率方程式 二、修正方程式 三、牛顿法的求解过程及框图 四、牛顿法的极坐标形式 五、牛顿-拉夫逊法的简化计算       |     |
| 第八节 灵敏度分析                                                               | 150 |
| 一、灵敏度方程 二、灵敏度分析                                                         |     |
| 第五章 电力系统的有功功率分配及频率调整                                                    | 156 |
| 第一节 概述                                                                  | 156 |
| 一、电力系统运行的任务 二、电力系统的负荷曲线及备用 三、电力系统频率调整的必要性                               |     |
| 第二节 电力系统有功功率的经济分配(I)*                                                   | 158 |
| 一、概述 二、忽略线路损耗时的经济功率分配 三、具有水、火电厂的电力系统的经济运行                               |     |
| 第三节 电力系统有功功率的经济分配(II)*                                                  | 167 |
| 一、线路功率损耗对经济功率分配的影响 二、电力系统线路功率损耗的计算 三、电力系统有功功率经济分配的计算                    |     |
| 第四节 电力系统的频率调整                                                           | 178 |
| 一、电力系统负荷的功率-频率静特性 二、发电机组的功率-频率静特性 三、电力系统的功率-频率静特性及频率的一次调整 四、电力系统频率的二次调整 |     |
| 第六章 电力系统的无功功率分配及电压调整                                                    | 189 |
| 第一节 概述                                                                  | 189 |
| 一、电压变动对用户的影响 二、有功及无功功率对节点电压的影响                                          |     |
| 第二节 电力系统的无功功率平衡                                                         | 192 |
| 一、无功功率的平衡 二、无功负荷及无功损耗 三、无功功率电源 四、无功功率的计算                                |     |
| 第三节 电力系统的电压调整(I)*                                                       | 197 |
| 一、中枢点电压管理 二、利用发电机调压 三、改变变压器变比调压                                         |     |
| 第四节 电力系统的电压调整(II)*                                                      | 206 |
| 一、改变电力网无功功率分布对电压的影响 二、考虑调压要求时无功补偿容量的选择 三、静止补偿器 四、串联电容器                  |     |
| 第五节 电力系统的综合调压                                                           | 210 |
| 第六节 电力系统无功功率的经济分布                                                       | 214 |
| 第七章 电力系统故障的计算                                                           | 219 |
| 第一节 概述                                                                  | 219 |

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第二节 三相对称短路 .....                                                                                                        | 221 |
| 一、一台发电机定子突然短路时的短路电流 二、电力系统短路电流(周期分量)的计算、短路容量的概念 三、计算机计算复杂网络短路电流(周期分量)的原理 .....                                          |     |
| 第三节 不对称短路计算 .....                                                                                                       | 250 |
| 一、对称分量法 二、用复合序网分析各种不对称短路时故障处的电流和电压 三、复杂电力系统不对称短路计算 四、计算机计算程序原理框图 .....                                                  |     |
| 第四节 非全相断线的分析计算 .....                                                                                                    | 269 |
| 第八章 电力系统的稳定性 .....                                                                                                      | 275 |
| 第一节 基本概念 .....                                                                                                          | 275 |
| 一、电力系统稳定性的概念 二、稳定问题的分类 .....                                                                                            |     |
| 第二节 旋转电机的转子运动方程 .....                                                                                                   | 276 |
| 一、同步电机转子运动方程 二、异步电动机的转子运动方程 .....                                                                                       |     |
| 第三节 简单电力系统的静态稳定 .....                                                                                                   | 280 |
| 一、简单电力系统的静态稳定 二、负荷的静态稳定 三、用小干扰法分析简单系统静态稳定* 四、计及发电机励磁调节器时的静态稳定 五、计及发电机调速器的作用 .....                                       |     |
| 第四节 复杂电力系统的静态稳定 .....                                                                                                   | 300 |
| 一、两机系统的静态稳定 二、多机系统的静态稳定 .....                                                                                           |     |
| 第五节 简单电力系统的暂态稳定 .....                                                                                                   | 313 |
| 一、暂态稳定的基本概念 二、简单系统暂态稳定 .....                                                                                            |     |
| 第六节 复杂电力系统的暂态稳定 .....                                                                                                   | 333 |
| 一、发电机电势 $E'$ 和机械功率均为常数, 负荷为恒定阻抗 二、计及发电机调节系统对暂态稳定的影响 .....                                                               |     |
| 第七节 提高电力系统稳定性的措施 .....                                                                                                  | 347 |
| 一、提高静态稳定性的措施 二、提高暂态稳定性的措施 .....                                                                                         |     |
| 第八节 系统失去稳定后的过程以及恢复同步的措施 .....                                                                                           | 352 |
| 一、系统失去稳定后的过程 二、发电机异步运行时的的问题以及系统解列措施 .....                                                                               |     |
| 第九章 电力系统的可靠性 .....                                                                                                      | 356 |
| 第一节 概述 .....                                                                                                            | 356 |
| 一、可靠性的一般概念及定义 二、电力系统可靠性问题 三、研究电力系统可靠性的基本方法和指标 四、本章的任务 .....                                                             |     |
| 第二节 可靠性数学 .....                                                                                                         | 357 |
| 一、元件的故障特性 二、系统的故障特性 三、连续型马尔可夫过程 四、发电机组的故障停运和修复过程 .....                                                                  |     |
| 第三节 发电系统的可靠性分析 .....                                                                                                    | 376 |
| 一、发电机组的概率模型 二、损失负荷概率法( $LOLP$ ) 三、系统机组扩建的最佳时间及容量 四、系统扩建后供电能力增加的计算 五、系统机组检修计划的制订 六、负荷预测不准确性的影响 七、损失电量概率法( $LOEP$ ) ..... |     |
| 第四节 互联系统发电容量的可靠性分析 .....                                                                                                | 390 |
| 第五节 发电厂主结线的可靠性分析 .....                                                                                                  | 394 |
| 一、发电机变压器单元 二、发电机变压器单元并联运行 三、发电机变压器扩大单元 四、三种不同结线方案的比较 .....                                                              |     |
| 附录 I 电感的计算 .....                                                                                                        | 398 |
| 附录 II 电容的计算 .....                                                                                                       | 403 |
| 参考文献 .....                                                                                                              | 405 |

# 第一章 电力系统的基本概念

## 第一节 概 述

电力系统主要有四个组成部分：发电厂、输电线路、配电系统及负荷。或者说，发电厂中发电机所产生的电能，经过输电线路送到配电系统，而后再由配电线路把电能分配到负荷用户，这样的统一整体叫做电力系统。用一个简单的线路图<sup>①</sup>来表示，电力系统如图 1-1。图中粗线条部分称为

母线，母线上接有多条回路。  
发电厂的基本任务是把一种其它能源转变成为电能。现在用于工业发电的其它能源，主要是水力、火力（煤、天然气、油等）和原子能。其它如太阳能、地

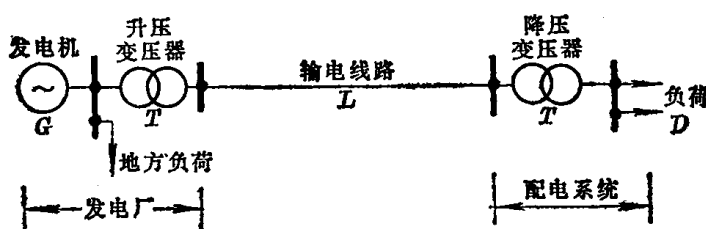


图 1-1 电力系统结线图

热、风力、潮汐等都还处于小容量发电阶段。本书以后各章提到的发电厂都是指火力发电厂或水力发电厂。目前我国已形成的大型电力系统中，都是以火力发电为主，大约占系统总发电容量的80~90%，水力发电只占10%左右。但是我国水力资源十分丰富，已经开发的仅有4~10%。这说明在今后电力工业的建设中，除继续发展火力发电而外，要特别注意水力发电的建设。原子能发电厂的建设在我国目前还处于开始阶段。

由于发电厂的地理位置，特别是水力发电厂和坑口火电厂大都在边远地区，离开系统的负荷中心往往有几十、几百、乃至成千公里。这就需要建设高压或超高压输电线路，将强大的电能从发电厂输送到负荷中心。现在已建成的输电线路都是三相交流的。高压直流输电线路只在个别情况下才采用。一般地说，输送电能的容量越大，输送的距离越远，在经济上和技术上要求输电线路的电压就越高。目前世界上已投入运行的输电线路电压在110

千伏到750千伏之间，正在试验研究的更高级电压是1100千伏和1500千伏。设计和运行实践证明，架空输电线路的输送容量（单位为兆伏安）大致和线路电压（单位为千伏）的平方成正比。表1-1列出架空线路的电压、容量和输送距离之间的关系。

连接于两个电力系统之间的输电线路叫联络线。两个或两个以上的电力系统用联络线连接后叫联合电力系统或互联系统。系统之间联络线的任务是按照经济调度的要求交

表 1-1 架空线路的电压、容量和输送距离\*

| 线路电压(kV) | 输送容量(MVA) | 输送距离(km) |
|----------|-----------|----------|
| 110      | 10~50     | 50~150   |
| 220      | 100~500   | 100~300  |
| 330      | 200~800   | 200~600  |
| 500      | 1000~1500 | 150~850  |
| 750      | 2000~2500 | 500以上    |

\* 此表选自《电机工程手册》(试用本)1979。

① 这里所指的电力系统是三相交流系统。在稳态对称运行条件下，为了简便，总是用单线(一相)图来表示。

换功率，和在事故情况下增加系统运行的可靠性。

配电系统一般分高压配电网和低压配电网两级。高压配电网的电压是6千伏，10千伏和35千伏，有些大城市已采用110千伏和220千伏。低压配电网的电压是380伏和220伏的三相四线制。

图1-2所示的系统结线图，比较完整地描绘了电力系统及电力网的概貌。其中包括有火力发电厂，水力发电厂，输电系统，配电系统以及负荷用户等。

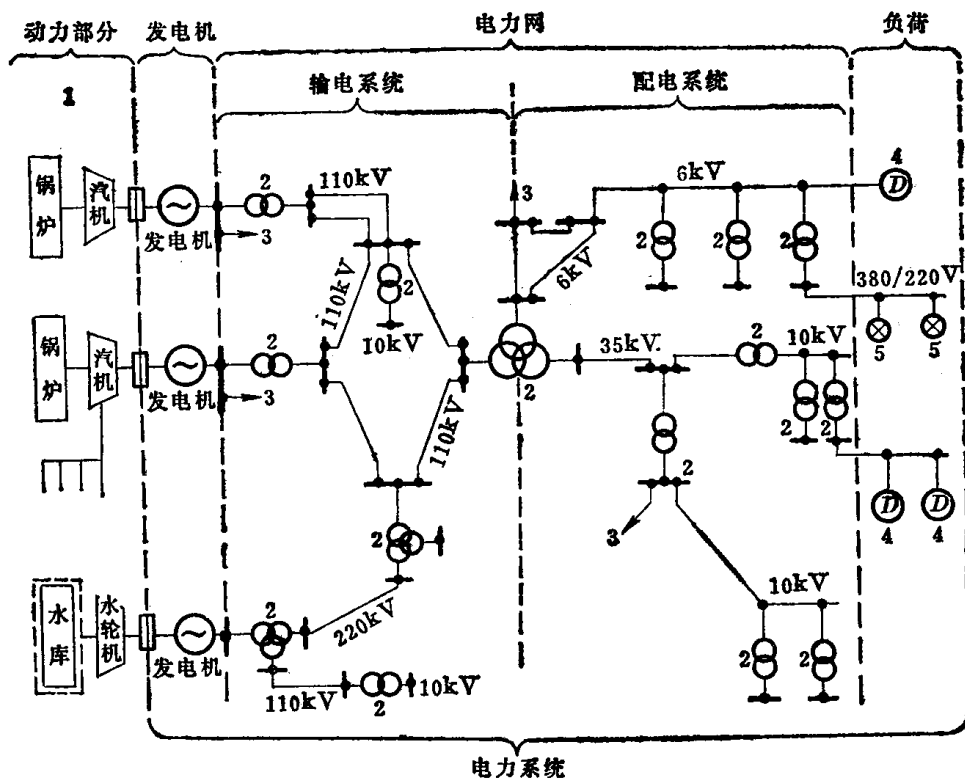


图 1-2 电力系统及电力网示意图

1—动力部分；2—变压器；3—负荷；4—电动机；5—电灯

以上概述了电力系统包括发电、输电和配电的基本概念。这些环节构成了电力系统的躯干，叫做一次系统。但是电力系统在运行中不可避免地要发生事故（原因很多，这里不作分析），引起过电压或过电流现象，以致损坏电力设备，中断对用户供电。因此需要有保护措施，以防止事故的扩大。在电力系统中设置有继电保护系统和过电压保护系统。同时系统运行人员需要对全系统进行测量、监视和调度，因而设置有调度控制系统。这些都是电力系统不可缺少的组成部分，通常叫做二次系统。这些将有专门课程分别介绍，本书只涉及到一次系统中有关设计和运行问题。

## 第二节 电力系统的负荷

电力系统中发电厂所发出的电能，除了一部分在传输和分配过程中损失掉以外，都供给用户。因而我们把用户所使用的功率叫系统负荷。这里的用户包括工业，农业，交通运

输以及人民生活等。

系统负荷主要由电动机（包括异步电动机和同步电动机）、电炉、照明和电热器等电气设备所组成。它们所消耗功率的大小具有随着系统电压和频率的变化而改变的性质，这种性质叫做负荷的电压和频率特性。此外，由于系统负荷涉及到广大地区的各种用户，而每个用户的用电情况是很不相同的。因而实际系统负荷是随着时间在不断变化，而且这种变化带有随机的性质，很难确切地预计负荷变化的情况。一般我们只是通过以往的运行经验（仪表的测量记录）来研究它的规律性，并用负荷曲线来描述它。在电力系统的规划设计和运行中我们经常用到的负荷曲线有以下几种。

#### （一）日负荷曲线

图 1-3 表示某电力系统冬季日负荷曲线，它表明了系统负荷在一天24小时内的变化情况。不同地区不同用户的负荷曲线是很不相同的。图 1-3 是全系统各用户负荷叠加起来的综合负荷曲线，以后即简称“负荷曲线”。

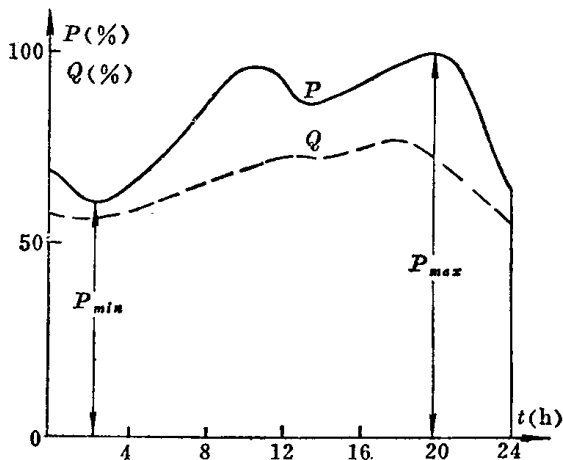


图 1-3 日负荷曲线

在负荷曲线中最大的负荷叫做日最大负荷 $P_{max}$ （又叫尖荷，峰值等），最小的负荷叫做日最小负荷 $P_{min}$ （又叫谷荷）。由于它们代表了一日之内负荷变化的两个极限，对电力系统的运行有很大的影响。因此常常作为分析和研究系统运行情况的重要数据。

除此而外，负荷曲线还可以用来估计用户消耗电能的大小。在一天内系统用户所消耗的总电能 $A$ 为

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

显然这就是日负荷曲线 $P$ 下边的面积。如果有功功率 $P$ 的单位是千瓦，时间 $t$ 的单位是小时，则电能 $A$ 的单位是度（千瓦小时）。系统运行人员就可以据此来制定日发电量计划。

系统负荷的日无功曲线 $Q$ （图1-3中的虚线）和有功曲线 $P$ 很相似。由于系统中变压器和电动机的励磁无功功率并不随有功负荷的大小而改变，仅仅和系统电压有关。因此在低负荷时功率因数相对的要低，而在高峰负荷时增加的多半是照明负荷，功率因数比较高。结果使得无功负荷曲线比有功负荷曲线要平坦些。

#### （二）年最大负荷曲线

在制定电力系统的运行和发展计划时，不仅要了解一天的负荷变化，而且还要了解一年或更长时间的负荷变化和增长情况。经常用到的是年最大负荷曲线，它描述每年从一月一日起到年终时系统逐日（或逐月）综合最大负荷的变化情况，以便有计划地扩建发电机组或新建发电厂，以满足系统负荷增长的需要，和恰当地安排全年机组的检修计划。图

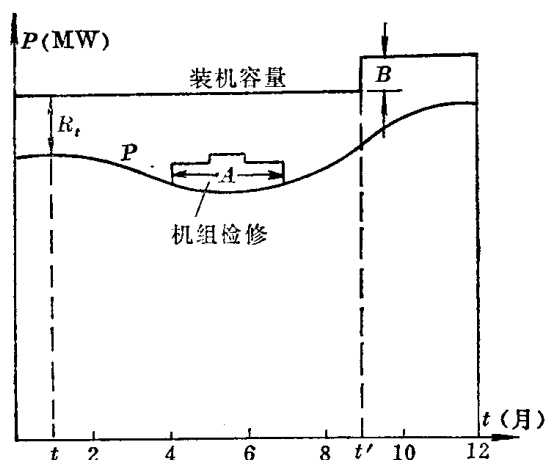


图 1-4 年最大负荷曲线

1-4 表示系统年最大负荷曲线，其中 A 是系统计划机组检修的时间，B 是系统扩建或新建的机组容量。

为了保证系统供电的安全可靠性，系统的装机容量在任何时刻都必须大于系统综合最大负荷，它们的差值如在  $t$  时刻的  $R_t$  叫做系统备用容量，一般应包括 负荷备用，事故备用，检修备用和国民经济备用。系统备用容量的确定，将直接影响到系统运行的可靠性。因此这是一个十分重要的问题。

### (三) 年持续负荷曲线

在编制电力系统的发电计划和进行可靠性估计时，常常用到年（或月或周）持续负荷曲线。如图 1-5(a) 所示，它是以电力系统全年（或月或周）按负荷大小及其持续运行时间（小时数）的顺序排列作成的。在曲线中  $A_1$  点反映了在一年内负荷值超过  $P_1$  的累积持续时间共有  $t_1$  小时。根据年持续负荷曲线，可以计算出系统全年负荷所取用（消耗）的电能  $A$  为

$$A = \int_0^{8760} P dt$$

不难看出，这就是年持续负荷曲线下面所包含的面积。如果将全年所取用的电能和一年内最大负荷  $P_{max}$  相比，即得年最大负荷利用小时数  $T_{max}$ 。

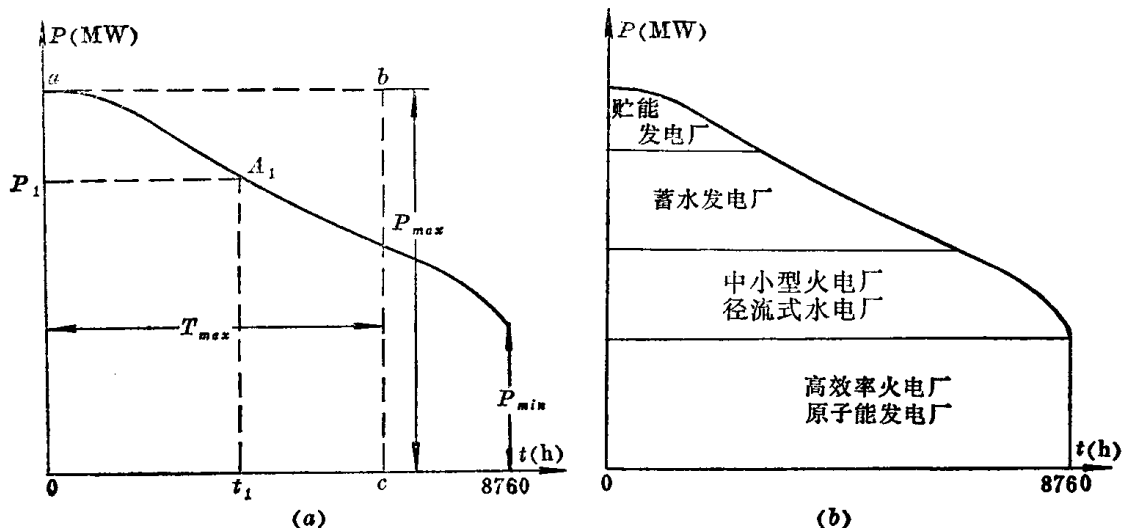


图 1-5 系统年持续负荷曲线

(a) 年持续负荷曲线；(b) 年发电计划

$$T_{max} = \frac{A}{P_{max}}$$

或

$$T_{max} \cdot P_{max} = A = \int_0^{8760} P dt$$

如果我们根据运行经验知道各类用户的年最大负荷利用小时数  $T_{max}$ ，就可以直接由上式估计出电力网的全年用电量，而不必用积分式来计算。

此外，系统运行人员应根据系统中各发电厂的机组特性和效率情况，计划全年发电方式，以降低发电费用，取得较高的经济效益。图 1-5 (b) 所表示的电力系统全年发电方式仅仅是一般原则。

一般说来，影响负荷曲线的因素很多，诸如负荷组成的性质，工矿企业生产的发展，地理位置，生产管理及作息制度，气候变化，假日以及人民生活习惯等等。如何根据电力系统已知条件，预测（短期的或长期的）下一步负荷的变化，是当前电力系统运行工作中十分重要而未完全解决的问题。

### 第三节 电力线路的结构

电力线路包括输电线路和配电线路。就其结构来说，主要分架空线路和电缆线路两大类。架空线路就是将导线架设在露天的线路杆塔上，如图 1-6 所示。电缆线路一般是埋在地下的电缆沟或管道中。由于架空线路的建造费用比电缆线路要低得多，而且便于架设、维护和修理，因此在电力网中绝大多数的线路都采用架空线路。不过近年来组合电器新技术的发展，大城市的配电系统相继改为地下电缆网。

架空线路由导线、避雷线（或叫架空地线）、杆塔、绝缘子和金具等主要元件组成。它们的用途分别是：

- （1）导线的作用是传导电流，进行电能的输送；
- （2）避雷线的作用是把雷电流引入大地，以保护电力线免遭雷击而引起过电压的破坏；
- （3）绝缘子用来使导线和杆塔之间保持绝缘；
- （4）金具用以连接导线，使导线固定在绝缘子上，并保护导线以及将绝缘子固定在杆塔上；
- （5）杆塔用来支持导线和避雷线，使导线与导线之间，导线与大地之间保持一定的距离。

架空线路相邻杆塔之间的水平距离，称为线路的档距。在档距中导线的最低点和悬挂点之间的垂直距离，称为导线的弧垂。两个相邻杆塔之间档距的大小，决定于导线的允许弧垂和对地距离。对于 6~10 千伏配电线路，档距一般在 100 米以下。110~220 千伏输电线路，采用钢筋混凝土杆时档距一般为 150~400 米，用铁塔时为 250~500 米。导线弧垂的大小，决定于导线的允许拉力和档距，并随气象（如温度，覆冰等）条件的改变而变化。以

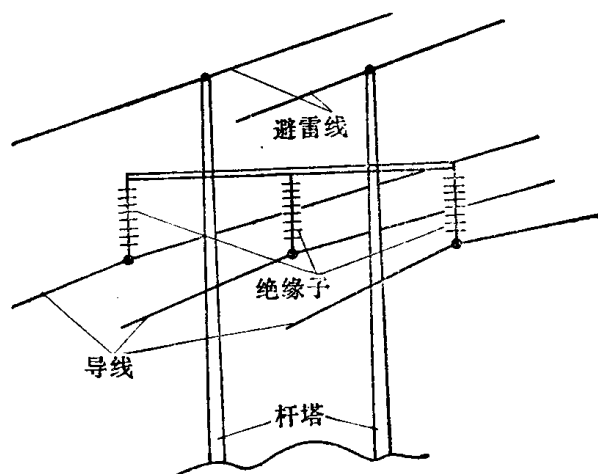


图 1-6 110 千伏架空线

下分别对架空线路的各个元件和电缆线路的结构作简单的介绍。

### (一) 导线和避雷线

架空线路的导线和避雷线是在露天里工作的，不仅受到风压、覆冰和温度变化的影响，而且还要受到空气中各种化学杂质的侵蚀。因此，导线和避雷线除了要求有良好的导电性能而外，还必须具有较高的机械强度和耐化学腐蚀的能力。

目前常用的导线材料是铜、铝、铝合金等。避雷线一般用钢线，在特殊情况下也有用铝包钢线的。

导线除低压配电线路使用绝缘线而外，一般都是裸线，其构造主要有以下三种型式。

1. 单股线 由单根实心的金属线构成，如图 1-7 (a)。这种单股线只有铜线和铝线两种，现在已很少采用。

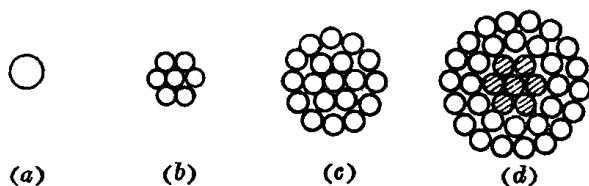


图 1-7 裸导线的构造

(a) 单股线；(b)、(c) 一种金属的多股绞线；(d) 两种金属的多股绞线

2. 一种金属的多股绞线 如图 1-7 (b)、(c)，它们是由 7、19 或 37 根单股线互相扭绞而成。

3. 两种金属的多股绞线 由于铝线的机械强度较低，采用铝导线时，线路的档距不能太大。这样就增加了杆塔数目，从而抬高了线路的造价。所以目前电压在 10 千伏以上的输电线路广泛采用钢芯铝绞线，如图 1-7 (d)。钢芯铝绞线按照其铝线和钢线截面比的不同，有不同的机械强度，一般分为三类：

第一类是普通钢芯铝绞线，型号为 LGJ，它的铝截面  $s_L$  和钢截面  $s_G$  的比值  $s_L/s_G = 5.3 \sim 6.1$ 。

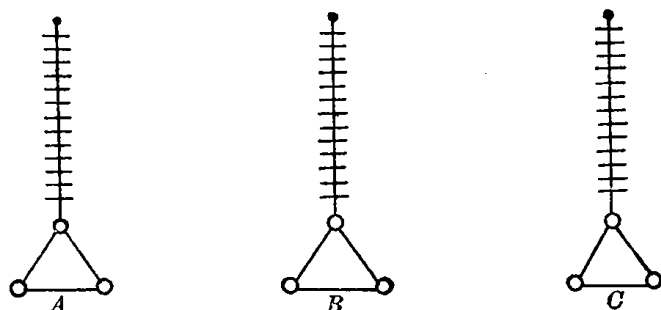


图 1-8 三分裂导线示意图

第二类是轻型钢芯铝绞线，型号为 LGJQ，它的  $s_L/s_G = 7.6 \sim 8.3$ 。

第三类是加强型钢芯铝绞线，型号为 LGJJ，它的  $s_L/s_G = 4 \sim 4.5$ 。

此外，为了减少电晕损耗和线路电抗，对电压在 220 千伏以上的输电线路多采用分裂导线或扩径空心导线。分裂导线就是把线路每一相导线分成 2、3 或 4 根，每根之间保持一定的距离（例如 400 毫米）。图 1-8 为 3 分裂导线的示意图。

### (二) 杆塔

架空线路的杆塔用以支撑导线。它的类型很多，分类的方法也不相同。一种是按照杆塔的材料分类，一种是按照杆塔的结构形式分类，一种是按照杆塔所承担的任务分类。

根据杆塔的材料，分为木杆、钢筋混凝土杆和铁塔三种。为了节约木材，木杆在我国已不多用。

钢筋混凝土杆大多用离心法浇制而成，有等径杆和锥形杆两种。为了运输和施工的方便，主杆可以分段装配。按照结构形式钢筋混凝土杆有单杆，II 型杆和三联杆。图 1-9 表

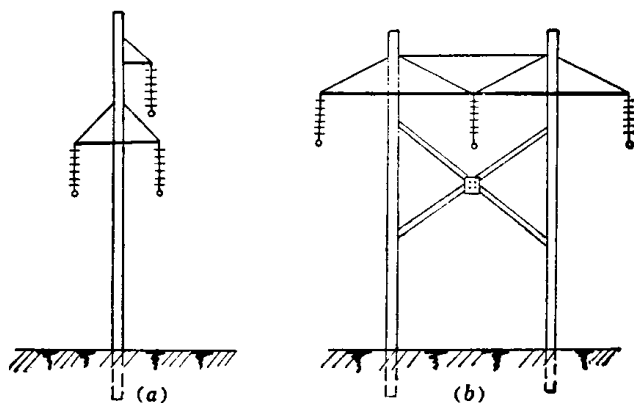


图 1-9 钢筋混凝土杆  
(a)单杆, (b)II型杆

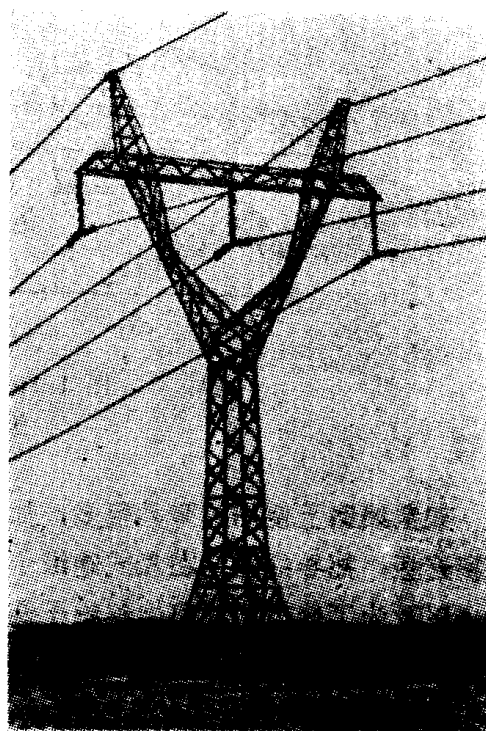


图 1-10 酒杯型铁塔

示了两种钢筋混凝土杆。

铁塔是由角铁用焊接、铆接或螺栓连接起来的。形状和种类很多,结构也比较复杂,多用于大跨越或高压输电线路。单回路铁塔我国常用的有酒杯型和猫头型等。图1-10示出酒杯型铁塔。

随着杆塔形式的不同,也就有不同的导线排列方式。单回路杆塔上导线的排列有上字型、三角型和水平排列等。对两回路铁塔有伞型、鼓型和双三角型等。

架空线路的杆塔按其承担的任务,又可分为直线杆塔(即中间杆塔),耐张杆塔(即承力杆塔),转角杆塔,终端杆塔和特种杆塔等五种。特种杆塔主要用于大跨越和导线换位。

换位杆塔是用来进行导线换位的。由于三相导线在杆塔上的排列不对称,从而引起三相导线上感性和容性电抗的不对称。这对于电力系统的运行产生不利的影响。为了使线路电抗值能相等,在线路全程中每隔一定的距离将三相导线进行轮流变换位置,这就叫“换位”。

### (三) 绝缘子和金具

绝缘子是用来支持或悬挂导线,并使之与杆塔绝缘的一种瓷质或玻璃元件。因而它应具有足够的绝缘强度和机械强度。同时对化学杂质的侵蚀也要有足够的抵抗能力,并能适应周围大气的变化,温度和湿度的变化对它的影响要小。

架空线路上所用的绝缘子主要有针式和悬式两种。此外在个别情况下有用棒式和瓷横担等型式的。针式和悬式绝缘子如图1-11所示。

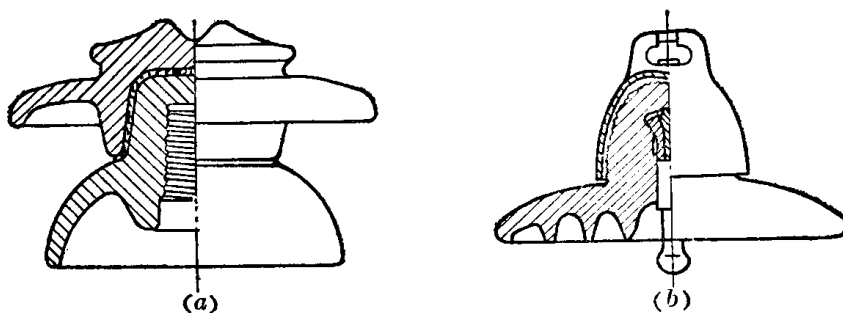


图 1-11 针式绝缘子和悬式绝缘子  
(a)针式; (b)悬式

架空线路上使用的金具很多, 如连接导线用的接线管; 连接悬式绝缘子用的挂环, 挂板和连板; 把导线固定在悬式绝缘子链上用的各种线夹; 防止导线震动用的护线条, 防震锤, 以及为了使高压线路上绝缘子链上电压分布均匀而用的均压环等等。所有这些金属部件统称为金具。这里不作进一步的介绍。

#### (四) 电缆

电力电缆的结构主要包括三个部分, 即导体、绝缘层和保护包皮。

电缆的导体通常用多股铜绞线或铝绞线, 以增加电缆的柔软性, 使之在一定程度内弯曲而不变形。根据电缆中导体数目的不同, 有单芯电缆、三芯电缆和四芯电缆几种。单芯电缆的导体截面总是圆形的。三芯或四芯电缆的导体截面除了圆形而外, 更多采用扇形, 如图1-12, 这样可以充分利用电缆的总面积。

电缆的绝缘层用来使导体与导体之间, 以及导体与保护包皮之间绝缘。绝缘层使用的绝缘材料种类很多, 如橡胶、沥青、聚乙烯、麻、丝、纸等。电力电缆多采用油浸纸绝缘。

电缆的保护包皮是用来保护绝缘层使其在运输、敷设和运行过程中不受外力的损伤, 并防止水分的浸入。它具有一定的机械强度。在油浸纸绝缘电缆中还有防止绝缘油外流的

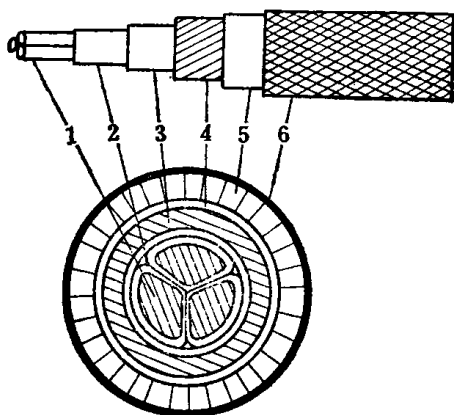


图 1-12 扇形三芯电缆

1—导体; 2—绝缘层; 3—铅包皮; 4—黄麻层; 5—钢带装甲; 6—黄麻保护层

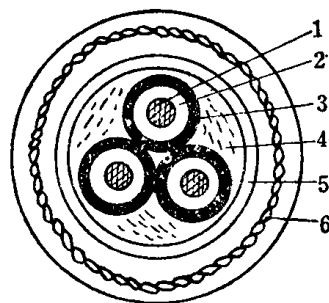


图 1-13 三芯分相铅包电缆

1—导体; 2—纸绝缘; 3—铅包; 4—填充物; 5—黄麻层; 6—钢丝甲

作用。常用的包皮有铅包皮和铝包皮。为了防止外力破坏，电缆外层为钢带铠甲。

电缆的分类，除按芯数和导体形状不同而分外，又可分为统包型、屏蔽型和分相铅包型。图1-12即为统包型，三相芯线绝缘层外有一共同的铅包。这种电缆内部电场分布不均匀，不能充分利用绝缘强度，只用于10千伏以下的电缆。10千伏以上的电缆常采用屏蔽型和分相铅包型，屏蔽型的每相芯线绝缘外面都包有金属带，分相铅包型的各相分别有铅包，如图1-13所示，这样可以得到均匀分布的辐射电场，更好地利用电缆的绝缘。

以上介绍的电力电缆都是电压在35千伏以下的。对于电压在110千伏以上的则采用充油式或充气式电力电缆。

#### 第四节 电力系统的结线

近代电力系统的结线是十分复杂的。这主要是由于一个具有一定规模的电力系统，常常是在几十年乃至更长时间逐步形成起来的。它概括了新旧发电、输电和配电技术的发展和成就，难以综合说明系统结线的性质和特点。但是，无疑它又是十分重要的问题。本节仅从发展的角度简单介绍几种系统结线形式。系统结线和系统电压等级是紧密联系在一起的，因此首先介绍关于电压等级问题。

##### （一）电压等级和额定电压

电力系统中的受电器（如电动机、照明、电炉等）、变压器和发电机等电气设备，都规定有额定电压。只有在额定电压条件下运行，这些电气设备的技术性能和经济效果才是最好的。为此，国家规定了标准电压条例，按照电压的高低分为三类：

第一类的额定电压是100伏以下的电压，见表1-2。主要用于安全照明、蓄电池及开关设备的直流操作电源。而三相36伏电压只作为特殊情况下安全照明和电力负荷用。

第二类的额定电压是大于110伏和小于1000伏的电压，见表1-3。主要用于电力及照明设备。

第三类的额定电压是1000伏以上的电压，见表1-4。主要用于发电机、变压器及高压电力设备。

电力网的额定电压是依照用电设备的额定电压来确定的，它和用电设备的额定电压相等。但是，由于电力网在输送功率时有电压降落，因此发电机和变压器的额定电压都比电力网的额定电压高出5~10%，用以抵偿电力网的电压降落，从而保证用户的电压能够在额定电压条件下运行。

##### （二）输电系统的结线

输电系统和配电系统之间在电压等级上没有严格的分界线，各国的规定也不相同。目

表 1-2 第一类额定电压

| 直 流 (V) | 交 流 (V) |     |
|---------|---------|-----|
|         | 三相(线电压) | 单 相 |
| 6       | —       | —   |
| 12      | —       | 12  |
| 24      | —       | —   |
| —       | 36①     | 36  |
| 48      | —       | —   |

① 三相36伏电压只作为潮湿工地及房屋的局部照明及电力负荷用。

表 1-3

第 二 类 额 定 电 压

| 用 电 设 备        |                |       | 发 电 机          |                          | 变 压 器   |       |       |       |
|----------------|----------------|-------|----------------|--------------------------|---------|-------|-------|-------|
| 直 流<br><br>(V) | 三 相 交 流<br>(V) |       | 直 流<br><br>(V) | 三相交流<br>(V)<br><br>线 电 压 | 交 流 (V) |       |       |       |
|                | 线 电 压          | 相 电 压 |                |                          | 三 相     |       | 单 相   |       |
|                |                |       |                |                          | 一 次     | 二 次   | 一 次   | 二 次   |
| 110            | —              | —     | 115            | —                        | —       | —     | —     | —     |
| —              | (127)          | —     | —              | (133)                    | (127)   | (133) | (127) | (133) |
| 220            | 220            | 127   | 230            | 230                      | 220     | 230   | 220   | 230   |
| —              | 380            | 220   | —              | 400                      | 380     | 400   | 380   | —     |
| 440            | —              | —     | 480            | —                        | —       | —     | —     | —     |

注 列入( )内的电压,只用于矿井下或其他保安条件要求较高的地方。

表 1-4

第 三 类 额 定 电 压

| 电 力 设 备<br>额 定 电 压<br>(kV) | 发 电 机<br>(交流)电压<br>(kV) | 变 压 器 线 电 压 (kV) |          | 电 力 设 备<br>额 定 电 压<br>(kV) | 发 电 机<br>(交流)电压<br>(kV) | 变 压 器 线 电 压 (kV) |     |
|----------------------------|-------------------------|------------------|----------|----------------------------|-------------------------|------------------|-----|
|                            |                         | 一 次              | 二 次      |                            |                         | 一 次              | 二 次 |
| 3                          | 3.15                    | 3及3.15           | 3.15及3.3 | 110                        | —                       | 110              | 121 |
| 6                          | 6.3                     | 6及6.3            | 6.3及6.6  | (154)                      | —                       | (154)            | 169 |
| 10                         | 10.5                    | 10及10.5          | 10.5及11  | 220                        | —                       | 220              | 242 |
| —                          | 15.75                   | 15.75            | —        | 330                        | —                       | 330              | 363 |
| 35                         | —                       | 35               | 38.5     | 500                        | —                       | 500              | —   |
| (60)                       | —                       | (60)             | (66)     | 750                        | —                       | 750              | —   |

注 列入( )内的电压为将要淘汰的电压级。

前我国规定电压在110千伏及以上的电力网叫输电系统(或高压系统),电压在35千伏及以下的电力网叫配电系统。输电系统的结线方式,从发展过程来说有以下几种结线方式。



图 1-14 开式系统

1. 开式串形结线 从一个水电厂或坑口火电厂用单回或双回线路向负荷中心输送电能,如图1-14。这种结线方式叫开式串形结线。这在电力系统发展的初期

特别是有水电厂的地方,大都是这样。这种结线方式在系统电力不足的情况下,只能用切除负荷的办法来进行调节。从可靠和经济性上来说,都是不理想的。但在当时由于继电保护技术和断路器遮断容量的限制,还不允许把许多输电线路联结在一起。

2. 闭式环形结线 为满足系统负荷的增长以及提高对用户供电的可靠性,将几个发电厂用高压线路联结起来成为环形系统,叫闭式环形结线,如图1-15。这种结线方式在供电可靠性和经济性上都有很大的提高。

两个或更多的开式和闭式系统用高压线路联结起来,形成为复杂电力系统。

近年来各国都重视高压直流输电的研究和发展。交直流并联系统,在提高稳定性和增

加输送容量方面有显著的成效，将具有很大的发展前途。高压直流输电问题在本书中不予介绍。

### (三) 配电系统的结线

配电系统和输电系统的区别，除电压高低这一明显不同而外，还有其他不同之点。例如配电系统所包含的线路的数目比输电系统要多得多。网络结构自然也不同。在我国标准的配电系统是电压由35千伏或110千伏降到10千伏，而后分配到用户。

配电系统由于地区的负荷密度和对供电可靠性要求的不同，分城市配电系统和农村配电系统。

近代大城市的负荷密度非常大，其配电系统的发展有三个特点：一是低压配电系统的网格化，如图1-16。这样的配电网对负荷发展的适应性，高度的可靠性和保证电压质量方面都有特殊的意义。但对网络的继电保护提出了严重的技术问题。二是地下管道化。由于小型可靠电器设备的出现和大城市市政交通条件的限制，架空配电线路已不再能适应。因而逐步改为地下管道电缆线路配电。三是由于以上两个原因，要求尽量使配电系统简单化，减少电压等级。因而采用高压线路直接进入城市（如220千伏或更高电压级的线路），经过一次降压即到达低压配电网。

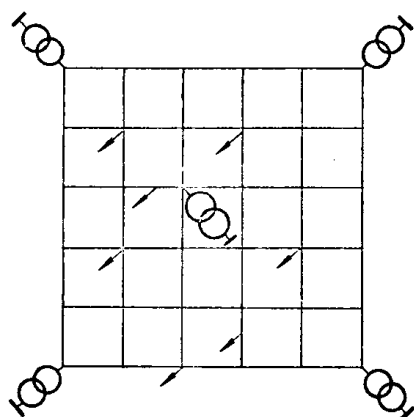


图 1-16 大城市配电网

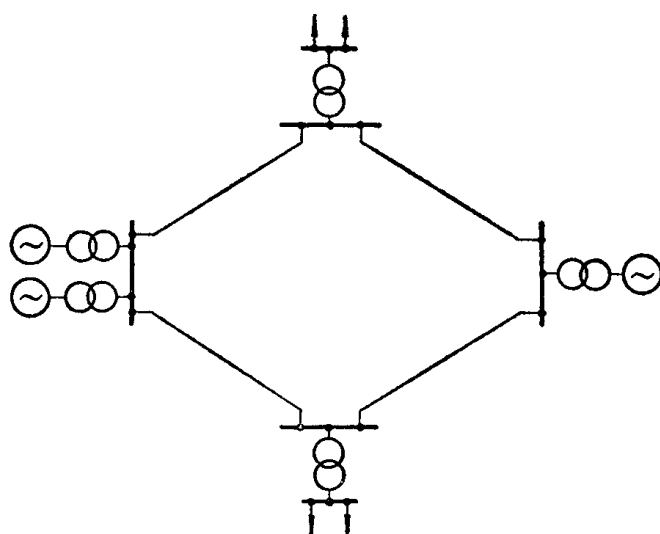


图 1-15 环形系统

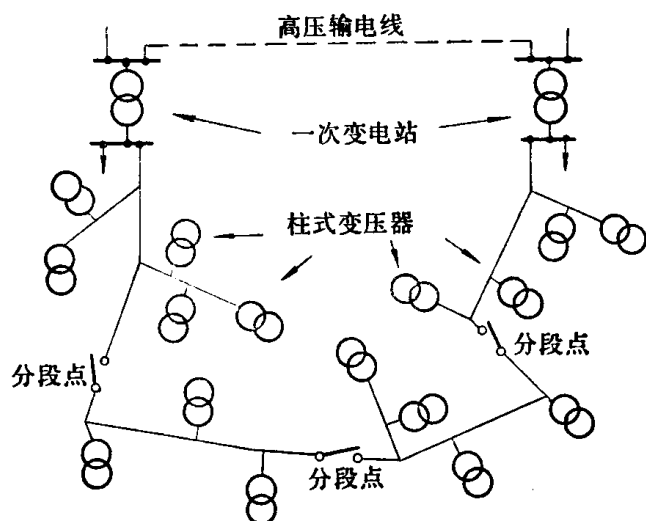


图 1-17 农村供电系统

农村用电的特点是负荷分散和具有季节性。其结线方式多采用架空线路辐射形供电。图1-17为一典型的农村供电系统。我国目前农村供电系统的电压级和城市配电网一样采用110千伏（或35千伏）降到10千伏，而后用分散的柱式配电变压器降到380/220伏，供给农业用户。