

供电中级工培训教材

送电线路电气及 机械计算

东北电业管理局 教材编审委员会
供电中级工培训

辽宁省职工教育教材编审委员会

工人出版社

编著者：杨 森 杨守印

审 稿 者：曾庆和

责任编辑：腾 骧

责任校对：柏 森

东电供电中级工培训教材编委会

主 任：张凤逸

副 主 任：胡恩喜 刘宗祥

编 委：范克文 郭素容

郭嘉毅 冀升山

高 莉

供 电 中 级 工 培 训 教 材
送 电 线 路 电 气 及 机 械 计 算

东北电管局供电中级工培训教材编审委员会

辽 宁 省 职 工 教 育 教 材 编 审 委 员 会

工人出版社出版（北京安外六铺炕）

沈阳图书服务部发行

济南印刷三厂印刷

开本：787×1032 1/32 印张：9.5 字数：203千字

1986年4月第一版 1986年4月第一次印刷

印数：1—48,370册

统一书号：15007·25 定价：1.40 元.

目 录

第一章 电力系统概述	
第一节 电力系统和电网	(1)
第二节 电力系统的基本要求	(4)
第二章 电网的参数计算	
第一节 送电线路的参数	(8)
第二节 变压器的等值电路及参数	(26)
第三章 电网功率和电能损耗的计算	
第一节 负荷曲线	(32)
第二节 送电线路的功率损耗和电能损耗	(35)
第四章 电网的功率分布与电压计算	
第一节 概述	(44)
第二节 电网环节的功率分布与电压计算	(46)
第三节 开式电网的功率分布与电压计算	(54)
第四节 闭式电网的功率分布与电压计算	(63)
第五章 电网导线截面的选择	
第一节 按经济电流密度选择导线截面	(71)
第二节 按发热条件校验导线截面	(73)
第三节 按电压损耗选择导线截面	(74)
第四节 按机械强度要求考虑导线的截面	(78)
第五节 按电晕损耗条件的要求导线最少允许直径	(79)
第六节 导线截面选择方法综述	(79)
第六章 导线的机械计算	
第一节 气象条件	(81)

第二节	导线的机械物理特性和比载·····	(83)
第三节	导线的弛度和应力·····	(89)
第四节	导线的状态方程式·····	(98)
第五节	机械计算中各种档距的概念·····	(102)
第六节	最大弛度出现条件判定·····	(113)
第七节	导线的应力弛度曲线与安装曲线·····	(115)
第八节	避雷线使用应力的确定·····	(127)
第七章	导线机械计算的特殊问题 ·····	
第一节	孤立档的应力和弛度计算·····	(135)
第二节	有集中荷载的导线计算·····	(144)
第三节	过牵引计算·····	(148)
第四节	连续上、下山档的应力、弛度及其 调整·····	(149)
第五节	杆塔上拔计算·····	(153)
第六节	导线的其他机械计算·····	(157)
第八章	杆塔计算基本力学知识 ·····	
第一节	杆塔计算的基本力学知识·····	(170)
第二节	杆塔荷载·····	(186)
第九章	铁塔计算 ·····	
第一节	铁塔内力计算方法·····	(191)
第二节	铁塔的强度、稳定及刚度计算·····	(214)
第十章	钢筋混凝土电杆计算 ·····	
第一节	钢筋混凝土构件强度计算·····	(227)
第二节	各种杆型的内力计算·····	(247)
第十一章	杆塔基础稳定计算 ·····	
第一节	电杆基础的稳定计算·····	(283)
第二节	铁塔基础的稳定计算·····	(293)

第一章 电力系统概述

第一节 电力系统和电力网

一、电力系统和电力网的组成

世界上大部分国家的动力资源和电力负荷中心分布是不一致的。如水力资源都是集中在江河流域水位落差较大的地方，热力资源又都集中在煤炭、石油和其他热源的产地。而大电力负荷中心则多集中在工业区和大城市。因而发电厂和负荷中心间往往相隔很远的距离，从而发生了电能输送的问题，必须要有输电线路来承担这一输送任务。为了保证安全可靠、经济合理的输电，需将孤立运行的发电厂用电力线路连接起来。首先在一个地区内互相连接，再发展到地区和地区之间互相连接，这就组成了统一的电力系统。

图 1—1 为电力系统和电力网示意图。通常将发电厂（动力部分和电气部分）、变电所用电设备、用热设备之间用电力网和热力网联接起来的整体，叫做动力系统。动力系统内的电气部分，即发电机、配电装置、升压和降压变电所、电力线路以及用电设备等所构成的网络，叫做电力系统。电力系统中，由送变电设备及各种不同电压等级的电力线路所组成的部分，叫做电力网。

电力线路是电力系统的重要组成部分，它担负着输送和分配电能的任务。由电源向电力负荷中心输送电能的路径，

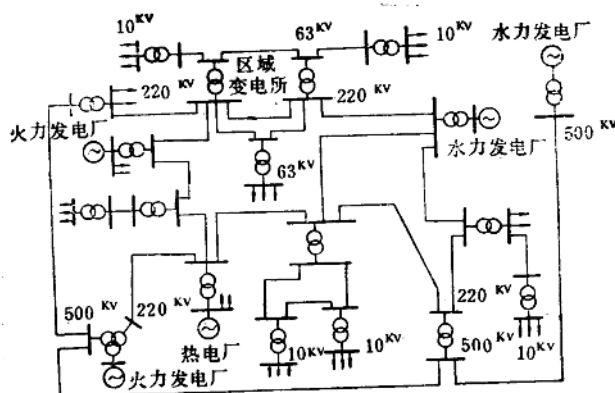


图 1—1 电力系统和电力网示意图

称为输电线路或送电线路。送电线路的电压较高，一般在35千伏及以上，主要担负分配电能任务的线路，称为配电线路。配电线路电压较低，一般在10千伏及以下。

为了研究和计算方便，通常将电力网分为地方电力网和区域电力网。电压在110千伏及以上，供电范围较广，输送功率较大的电力网，称为区域性电力网；电压在110千伏以下，供电距离较短，输送功率较少的电力网称为地方电力网。电压在10千伏及以下的电力网，则称为配电网。但是，这种划分方式，其间并没有什么严格的界限。

根据电力网本身的结构方式，又分为开式电力网和闭式电力网。凡用户只能从单方向得到电能的电力网称为开式电力网；凡用户至少可以从两个或更多方面同时得到电能的电力网，称为闭式电力网。

根据电压等级的高低，电力网还可分为低压、高压、超

高压和特高压几种。通常把电压在 1 千伏以下的电力网称为低压电网；电压在 1 千伏至 110 千伏之间的电力网称为高压电网；220 千伏至 1000 千伏间的电力网称为超高压电网；1000 千伏以上的电力网称为特高压电网。

二、联合电力系统

两个或两个以上的小型电力系统用电网连接起来并联运行，即可组成地区性电力系统。若干个地区性电力系统用电网联接起来，即组成联合电力系统。联合电力系统在技术上和经济上都有很大的优越性：

1. 提高供电可靠性和电能质量

因为大电力系统中备用发电机组较多，容量也比较大，个别机组发生故障对系统影响较小，从而提高了供电可靠性。此外，由于联合电力系统容量较大，个别负荷变动，即使是较大的冲击负荷，也不会造成电压和频率的明显变化，因而保证了电能质量。

2. 可减少系统的装机容量，提高设备利用率

大电力系统往往占有很大的地域，因而存在时差和季差，系统中各个用户的最大负荷出现时间就不同，综合起来的最大负荷，也将小于各个用户最大负荷相加的总和，因此系统中总的装机容量可以减少些。同时，备用机组容量也可减少些。如果装机容量一定，则可提高设备利用率，增加供电量。

3. 便于安装大机组，降低造价

由于联合电力系统容量大，按照比例（一般 100 万千瓦以上至 1000 万千瓦电力系统中，最经济的机组容量为系统容

量的6-10%)可装设容量较大的机组,而大机组每1千瓦设备的投资和生产每一度电能的燃料消耗以及维修费用,都比装设小机组便宜,从而可节约投资,降低煤耗,降低成本,提高劳动生产率。

4. 充分利用各种动力资源,提高运行的经济性

水力发电受季节影响很大,夏季雨水多,可多发水电。冬季枯水期,可多发火电,充分利用水、火资源,从而降低电能成本,提高运行的经济性。

第二节 电力系统的基本要求

一、电能在生产技术上的主要特点

电能的生产、输送、分配和使用是在同一瞬间完成的。电能的供应是不容间断的,发电厂的发电量,决定于用户的需求,发电量和用电量随时都是平衡的。因而电力系统每个环节中,任何一部分或任何一点发生故障或运行方式发生变化,都会破坏局部供电,甚至影响整个电力系统电能的生产 and 供应。

电力系统的电磁过渡过程(如突然短路、稳定运行破坏等过程)非常迅速,因而电能的生产靠人工进行操作和调整是达不到满意效果的,甚至是不可能的。必须采取专用的自动装置才能迅速而准确地完成电能生产的任务,所以电力系统自动化的程度必须高。

电力工业和国民经济各部门以及人民生活关系极为密切,电能供应不足或突然停止供电都会直接影响国民经济的发展和人民的正常生活。

二、对电力系统的基本要求

对电力系统的要求，概括地说是安全、经济、多供、少损。

1. 保证供电的可靠性

运行经验证明：电力系统中的大事故，往往是由小事故引起的；整体性事故往往是由局部性事故发展扩大而造成的。因此，要保证对用户供电的可靠性，就要对每一发电、变电、输电和用电设备都经常进行监视、维护，並定期进行预防性试验和检修，使设备始终处于完好的运行状态，严格执行规章制度，提高系统的安全运行水平，杜绝事故的发生。

2. 保证良好的电能质量

所谓电能质量，是指电压、频率、波形等三个技术指标。尤其是前面两个尤为主要，电力系统中的频率以及各点的电压变动应保持在一定的容许范围以内。

所有电力设备都是按一定的额定电压制造的。当电力设备的外加端电压与其额定电压之差超过允许值时，设备运行情况就会恶化。我国规定的容许电压偏移标准为：

①35千伏及以上电压供电的和对电压质量有特殊要求的用户是 $\pm 5\%$ ；

②10千伏及以下高压供电和低压电力用户为 $\pm 7\%$ ；

③低压照明用户为 $+5\% \sim -10\%$ 。

频率的变化，不仅严重影响电力用户的正常工作（当频率降低时，电动机的转速也降低，因而影响机械效率和产品质量），而且对发电厂和电力系统本身也有严重危害。我国

规定,电力系统的标准频率是50赫。偏差值:300万千瓦及以上的系统,不得超过 ± 0.2 赫;300万千瓦以下的系统,不得超过 ± 0.5 赫。

除电压和频率外,电能质量标准中尚有电压波形。由于现代用电设备,如热轧机、电弧炉、电焊机、可控硅控制的电动机、电解整流装置等,会向电网输出高次谐波电流,影响电源电压的波形(正弦波),使正弦波形发生畸变,严重时会使继电保护、自动装置、电子计算机及其他装置发生误动或动作不正常。因此要求任一高次谐波的瞬时值不得超过同相基波电压瞬时值的5%。

3. 保证电力系统的经济性

提高电力系统运行的经济性,就是使电力系统在运行中做到多供、少损、降低煤耗。有三个主要考核指标,即:

①燃料消耗。每度电的燃料消耗量应越低越好,这对降低发电成本,提高能源利用率有极重要的意义。

②厂用电率。发电厂发电设备在生产过程中所消耗的电量与其发出的电量之百分比称为厂用电率。目前我国火电厂的厂用电率在6—10%间,是一个电能消耗户,应努力降低。

③供电损失(线路损失)率。电网在供电环节中所损耗的电能与所输送的电量之百分比称线损率,目前我国各级电网的线损率约在3—10%间,与厂用电率一样,是一个不可忽视的能源损失。

在运行中应当力争将全电力系统的各项经济指标降低到最小。

4. 最大限度地满足用户的用电需要

电力生产部门的任务,是生产电能不间断地向用户供

电，以满足国民经济建设事业日益发展的需要，和人民物质、文化生活的需要。电力工业必须先行。根据国家发展国民经济的总方针，全面地进行电力工业发展的规划和设计，並充分发挥现有设备的潜力，采用新技术，提高设备出力，保证向用户提供足够的电力。

为保证向用户提供可靠、优质、经济的电能，首先要做到安全发供电和安全用电。

习 题 一

1. 什么叫做动力系统、电力系统和电力网？
2. 电能在生产技术上有哪些特点？
3. 对电力系统有哪些基本要求？

第二章 电力网的参数计算

第一节 送电线路的参数

送电线路的电气参数计算，是进行电力网电能损耗和电压损耗计算的基础数据，也是研究线路及电力系统各种运行问题的基础。

送电线路的电气参数，包括导线中的电阻，线路中的电导（与电晕、泄漏电流等因素有关），以及由交变电磁场所引起的电感、电容四部分。线路的电感以电抗表示于计算中，线路的电容则以电纳表示于计算中。

送电线路的参数是均匀分布于导线全长中的，它的电阻、电导、电感电抗（简称电抗）和电容电纳（简称电纳）都是沿线路长度均匀分布的。每公里线路的电阻、电导、电抗和电纳分别以 r_0 、 g_0 、 X_0 、和 b_0 表示，四个参数的计算方法，分别叙述如下：

一、线路的电阻

由理论电工学可知，每公里长导线的电阻 r_0 可由下式计算出：

$$r_0 = \frac{\rho}{s} = \frac{1000}{\gamma \cdot s} \quad (\text{欧/公里}) \quad (2-1)$$

式中：

ρ ——导线材料的电阻率（欧·毫米²/公里）；

γ ——导线材料的电导率（米/欧·毫米²）；

s ——导线的额定截面积（毫米²）。

在温度 $t = 20^{\circ}\text{C}$ 时，铜和铝的电阻率、电导率分别为：

材质 电阻率 ρ (欧·毫米²/公里) 电导率 γ (米/欧·毫米²)

铜 18.8 53

铝 31.5 32

在导线长度为 L 时的电阻为

$$R = r_0 L \text{ 欧} \quad (2-2)$$

实用时，各种导线的 r_0 可以从有关型录或标准中查得。

以上所讲的电阻，严格地讲，是指直流电阻而言。实际运行中，在导线内通过的是交流电，由于有集肤效应和邻近效应的影响，电流在导线截面上分布是不均匀的。因此，导线的电阻值比直流电阻略微大一些。但增大数值极小，在工程应用中完全可忽略不计，近似地把交流有效电阻与直流电阻看作相等。电阻是引起线路电压降，造成线路有功电能损耗和电压损耗的主要因素之一。

二、线路的电抗

当导线通过交变电流时，在导线的周围即产生交变电磁场，因而引起导线的“电抗”。

电抗与三相导线间的距离，导线的直径，导线材料的导磁系数等因素有关。三相对称排列的单回路有色金属导线的送电线路，传输50赫交流电时，每相每公里导线的电抗值可按下列通用公式计算：

$$X_0 = 0.0157 \frac{\mu}{n} + 0.1451 \lg \frac{d_m}{D_s} \quad (\text{欧/公里}) \quad (2-3)$$

$$\text{或} \quad X_0 = 0.1451 \lg \frac{d_m}{R_m} \quad (2-4)$$

式中: μ ——导线材料的相对导磁率, 当使用有色金属时, $\mu = 1$;

d_m ——三相导线间的几何均距(米);

D_s ——同相导线组间的几何均距(米)(见图 2-1);

n ——每相导线的根数;

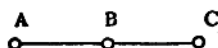
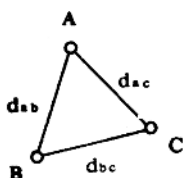
R_m ——导线的等价半径(米)。

(1) 三相单导线的电抗可用以下简化公式计算:

$$X_0 = 0.0157 \mu + 0.1451 \lg \frac{d_m}{r} \quad (2-5)$$

或近似地

$$X_0 = 0.1451 \lg \frac{d_m}{r_m} \quad (2-6)$$



$$d_{ab} = d_{bc} = d$$

图 2-1 几何均距

d_m ——三相导线间的几何均距(米);

$$d_m = \sqrt[3]{d_{ab} \cdot d_{bc} \cdot d_{ac}},$$

当导线按正三角形排列时, $d_m = d_{ab} = d_{bc} = d_{ac}$; 当导线按等距离水平排列时:

$$d_m = \sqrt[3]{d \cdot d \cdot 2d} = 1.26d \quad (2-7)$$

r ——导线的半径(米);

r_m ——导线的等价半径(米)

见表 2—1。

表 2—1 导线的等价半径 r_m

有色金属实心圆导线	0.779r
有色金属绞线 7 股	0.726r
19 股	0.738r
37 股	0.768r
61 股	0.772r
91 股	0.774r
钢心铝线	0.81r
空心有色金属绞线，忽略	
钢心影响的钢心铝线	
两层 30 股	0.826r
两层 26 股	0.809r
三层 54 股	0.810r
单层钢心铝线	0.35r—0.70r

(2) 相分裂导线线路的电抗，也可按通用公式计算。

$$D_s = \sqrt[n]{r \cdot s_m^{n-1}} \quad (\text{米}) \quad (2-8)$$

$$R_m = \sqrt[n]{r_m \cdot s_m^{n-1}} \quad (\text{米}) \quad (2-9)$$

式中：

S_m ——导线束内各股线的几何均距(米)。

双分裂导线 $S_m = S$

三分裂导线 $S_m = S$

四分裂导线 $S_n = \sqrt[3]{s \cdot s \cdot \sqrt{2} \cdot s}$

R_r ——分裂导线的等价半径(米);

双分裂导线 $R_m = \sqrt{r_m \cdot s}$

三分裂导线 $R_n = \sqrt[3]{r_m \cdot s^2}$

四分裂导线 $R_n = \sqrt[4]{r_m \cdot s^3 \sqrt{2}}$

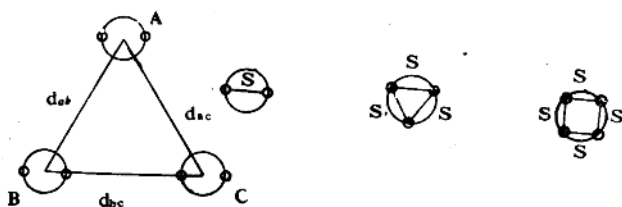


图 2—2 组合导线等价半径

在工程中, 电抗 X_0 可以从表 2—2(a)及 2—2(b)中查得。

电抗也能引起电压降, 同时也是造成送电线路无功损失的主要因素之一。

表 2—2 (a) LGJ型导线的电抗表(欧/公里)

几何均距 (米)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
导线型号														
LGJ—35	0.385	0.403	0.417	0.429	0.438	0.446								
LGJ—50	0.347	0.392	0.406	0.418	0.427	0.435								
LGJ—70	0.364	0.382	0.396	0.408	0.417	0.425	0.433	0.440	0.446					
LGJ—95	0.353	0.371	0.385	0.397	0.406	0.414	0.422	0.429	0.435	0.44	0.445			
LGJ—120	0.347	0.365	0.379	0.391	0.400	0.408	0.416	0.423	0.429	0.433	0.438			
LGJ—150	0.340	0.358	0.372	0.384	0.398	0.401	0.409	0.416	0.422	0.426	0.432			
LGJ—185			0.365	0.377	0.386	0.394	0.402	0.409	0.415	0.419	0.425			
LGJ—240			0.357	0.369	0.378	0.386	0.394	0.401	0.407	0.412	0.416	0.421	0.425	0.429
LGJ—300									0.399	0.405	0.410	0.414	0.418	0.422
LGJ—400									0.391	0.397	0.402	0.406	0.410	0.414