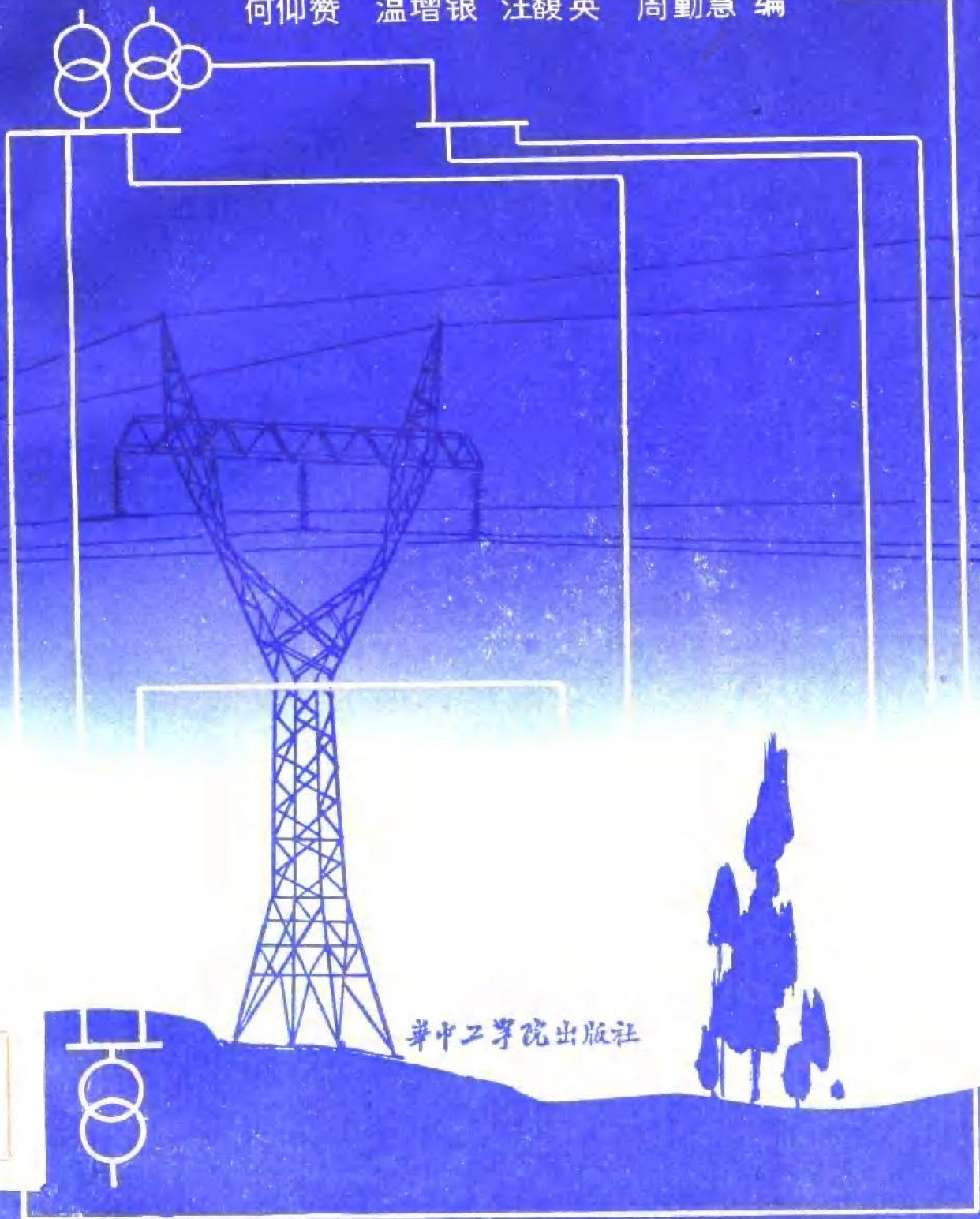


电力系统分析_上

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

本书共上、下两册。本册为上册，主要内容有：电力系统各元件的等值电路和参数计算，同步电机的基本方程，电力系统突然三相短路暂态分析，短路和故障的分析和计算，短路和故障计算的计算机方法等。下册将讨论电力系统的稳态运行和稳定性问题。

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的基本要求，可供高等学校的电力系统的有关专业选作教学用书，亦可供电力工程有关专业的技术人员参考。

电力系统分析(上册)

何仰赞 温增银 汪馥英 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 各地新华书店经售

湖南省新华印刷二厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：14.25 字数：346,000

1984年6月第一版 1984年6月第一次印刷

印数：1—7,000

统一书号：15255—030 定价：3.10元

前 言

本书以我院《电力系统》自编讲义为基础修订而成。在修订过程中，考虑了电力系统教材编审小组于1982年9月审订定稿的《电力系统稳态分析》和《电力系统暂态分析》两门课程的教学大纲要求。

全书共二十二章，分为上、下两册。上册内容主要是：电力系统的数学模型和参数计算，突然三相短路的暂态分析和实用计算，不对称短路和故障的分析计算等，在附录中编入了短路电流新计算曲线的数字表。下册内容主要是：电力系统稳态运行的电压和功率计算，电压调整和频率调整，经济运行，静态稳定和暂态稳定的基本概念和分析方法，提高稳定性的措施，交流远距离输电和直流输电的基本概念。

本书在着重阐明电力系统的基本概念、基本理论和计算方法的基础上，对电子计算机在电力系统分析计算中的应用也作了适当的介绍。书中反映前述两门课程教学大纲基本要求的部分所需授课学时（不含实验课和习题课）约为：上册46~48学时，下册54~56学时，带※号的内容供选用。采用本书作教材，可以按上、下册分别设课，依次开出。

参加本书编写的有：何仰赞（第二、四、五、七、八、九、十、十二、二十一、二十二章及附录）、温增银（第十六、十七、十八、十九、二十章）、汪馥英（第三、十三、十四、十五章）、周勤慧（第一、六、十一章）。何仰赞、温增银担任主编。何仰赞对全书进行了审订。

原讲义（即本书初稿）于1983年印出后，承蒙华南工学院、成都科学技术大学、郑州工学院、江西工学院、武汉水利电力学院、合肥工业大学、合肥联合大学、北京农业机械化学院等院校试用，许多老师对教材初稿提出了宝贵的意见和建议，对此我们表示衷心的感谢。

编 者

1984年4月

目 录

第一章 电力系统各元件的参数和等值电路	(1)
1-1 电力系统的若干概念	(1)
一、电力系统的接线图 二、电力系统的额定电压和额定频率 三、电力系统的运行状态	
四、电力系统各元件的等值电路	
1-2 电力线路的结构	(5)
一、架空线路 二、电缆线路	
1-3 架空输电线路的电阻和电感	(8)
一、电阻 二、电感	
1-4 架空输电线路的电导和电容	(11)
一、电导 二、电容	
1-5 变压器的参数计算	(16)
一、双绕组变压器 二、三绕组变压器 三、自耦变压器	
1-6 变压器的 Π 型等值电路	(21)
1-7 标么制	(23)
一、标么制的概念 二、基准值的选择 三、不同基准值的标么值间的换算 四、有几级	
电压的网络中各元件参数标么值的计算 五、标么制的特点	
第二章 短路计算的基本知识	(30)
2-1 短路的一般概念	(30)
一、短路的原因、类型及后果 二、短路计算的任务和若干简化假设	
2-2 恒定电势源电路的三相短路	(32)
一、短路的暂态过程 二、短路冲击电流 三、短路电流的有效值 四、短路功率	
2-3 网络的变换和化简	(36)
一、网络的等值变换 二、简化网络的其它方法 三、网络化简的实例	
2-4 输入阻抗和转移阻抗	(41)
2-5 电流分布系数	(42)
一、电流分布系数的概念 二、电流分布系数的计算	
第三章 同步发电机的基本方程	(47)
3-1 基本前提	(47)
3-2 同步发电机的原始方程	(47)
一、假定正向的选取 二、电势方程和磁链方程 三、电感系数	
3-3 派克-戈列夫方程	(52)
一、坐标变换和 d 、 q 、 0 系统 二、 d 、 q 、 0 系统的电势方程 三、 d 、 q 、 0 系统的磁链	
方程和电感系数 四、功率公式	
* 3-4 同步电机的常用标么制	(58)
3-5 基本方程的拉氏运算形式	(60)
一、有阻尼绕组同步电机的运算方程 二、运算电抗的等值电路 三、无阻尼绕组同步电机	
的运算方程	

3-6	同步电机的对称稳态运行	(63)
	一、基本方程的实用化 二、稳态运行的电势方程式、相量图和等值电路	
第四章	电力系统三相短路的暂态过程	(67)
4-1	同步电机突然三相短路的物理分析	(67)
	一、突然短路暂态过程的特点 二、超导体闭合回路磁链守恒原则 三、无阻尼绕组同步电机突然三相短路的物理分析	
4-2	无阻尼绕组同步电机三相短路电流计算	(70)
	一、暂态电势和暂态电抗 二、不计衰减时的短路电流算式 三、自由电流的衰减 四、负载状态下的突然短路	
4-3	有阻尼绕组同步电机的突然三相短路	(81)
	一、突然短路的物理过程 二、次暂态电势和次暂态电抗 三、有阻尼绕组电机的短路电流 四、自由电流的衰减	
4-4	强行励磁对短路暂态过程的影响	(91)
第五章	电力系统三相短路电流的实用计算	(94)
5-1	起始次暂态电流和冲击电流的实用计算	(94)
5-2	短路电流的计算曲线	(98)
	一、计算曲线的概念 二、计算曲线的制作条件 三、“标准参数”和因参数差异而引起的修正	
5-3	计算曲线的应用	(100)
	一、网络化简和电源合并 二、计算步骤	
5-4	短路电流周期分量的近似计算	(106)
第六章	电力系统各元件的序阻抗和等值电路	(110)
6-1	对称分量法在不对称短路计算中的应用	(110)
	一、对称分量法 二、序阻抗的概念 三、对称分量法在不对称短路计算中的应用	
6-2	同步发电机的负序和零序电抗	(114)
6-3	变压器的零序等值电路及其参数	(116)
	一、普通变压器的零序等值电路及其参数 二、变压器的零序等值电路与外电路的联接 三、中性点有接地阻抗时变压器的零序等值电路 四、自耦变压器的零序等值电路及其参数	
6-4	架空输电线路的零序阻抗及其等值电路	(123)
	一、“单导线-大地”回路的自阻抗和互阻抗 二、三相输电线路的零序阻抗 三、平行架设的双回输电线路的零序阻抗及等值电路 四、架空地线对输电线路零序阻抗及等值电路的影响	
* 6-5	架空输电线路的零序电纳	(129)
	一、无架空地线时输电线路的零序电纳 二、架空地线对输电线零序电纳的影响	
6-6	综合负荷的序阻抗	(132)
6-7	电力系统各序网络的制订	(134)
	一、正序网络 二、负序网络 三、零序网络	
第七章	电力系统简单不对称故障的分析和计算	(138)
7-1	简单不对称短路的分析	(138)
	一、单相(α 相)接地短路 二、两相(b 相和 c 相)短路 三、两相(b 相和 c 相)短路接地	

四、正序等效定则	
* 7-2 不对称短路时计算曲线的应用	(143)
7-3 不对称短路时网络中电流和电压的计算	(146)
7-4 电压和电流对称分量经变压器后的相位变换	(150)
7-5 非全相断线的分析计算	(153)
第八章 电力网络的数学模型	(158)
8-1 概述	(158)
8-2 节点方程和回路方程	(158)
一、节点方程 二、回路方程 三、回路方程和节点方程的比较	
8-3 节点导纳矩阵	(161)
一、节点导纳矩阵元素的物理意义 二、节点导纳矩阵的修改 三、支路间存在互感时的节点导纳矩阵	
8-4 节点阻抗矩阵	(166)
一、节点阻抗矩阵元素的物理意义 二、用支路追加法形成节点阻抗矩阵	
8-5 网络方程的解法	(173)
一、高斯消去法和星网变换的关系 二、用高斯消去法简化网络 三、用线性方程直接解法对导纳矩阵求逆	
* 8-6 节点编号顺序的优化	(181)
第九章 电力系统故障的计算机算法	(185)
9-1 概述	(185)
9-2 对称短路计算	(185)
9-3 简单不对称故障计算	(188)
一、各序网络的电压方程式 二、横向不对称故障 三、纵向不对称故障 四、简单不对称故障的计算通式 五、简单不对称故障的通用复合序网	
9-4 复杂故障的计算方法	(196)
一、分析复杂故障的一般方法 二、双重故障的分析计算 * 三、任意重故障的通用方程式	
附录I 电感的计算	(204)
附录II 线性方程组的直接解法	(208)
附录III 短路电流周期分量计算曲线数字表	(219)

第一章 电力系统各元件的参数和等值电路

1-1 电力系统的若干概念

一、电力系统的接线图

现代工农业生产和人民生活的各个方面都广泛地应用电能。发电厂把别种形式的能量转换成电能，电能经过变压器和不同电压的输电线路输送并被分配给用户，再通过各种用电设备转换成适合用户需要的别种能量。这些生产、输送、分配和消费电能的各种电气设备连接在一起而组成的整体称为电力系统。如果把火电厂的汽轮机、锅炉、供热管道和热用户，水电厂的水轮机和水库等动力部分也包括进来，就称为动力系统。电力系统中输送和分配电能的部分称为电力网，它包括升、降压变压器和各种电压的输电线路(见图1-1)。

在交流电力系统中，发电机、变压器、输配电设备都是三相的，这些设备之间的连接状况，可以用电力系统接线图来表示。为简单起见，电力系统接线图一般都是画成单线的，如图1-1所示。

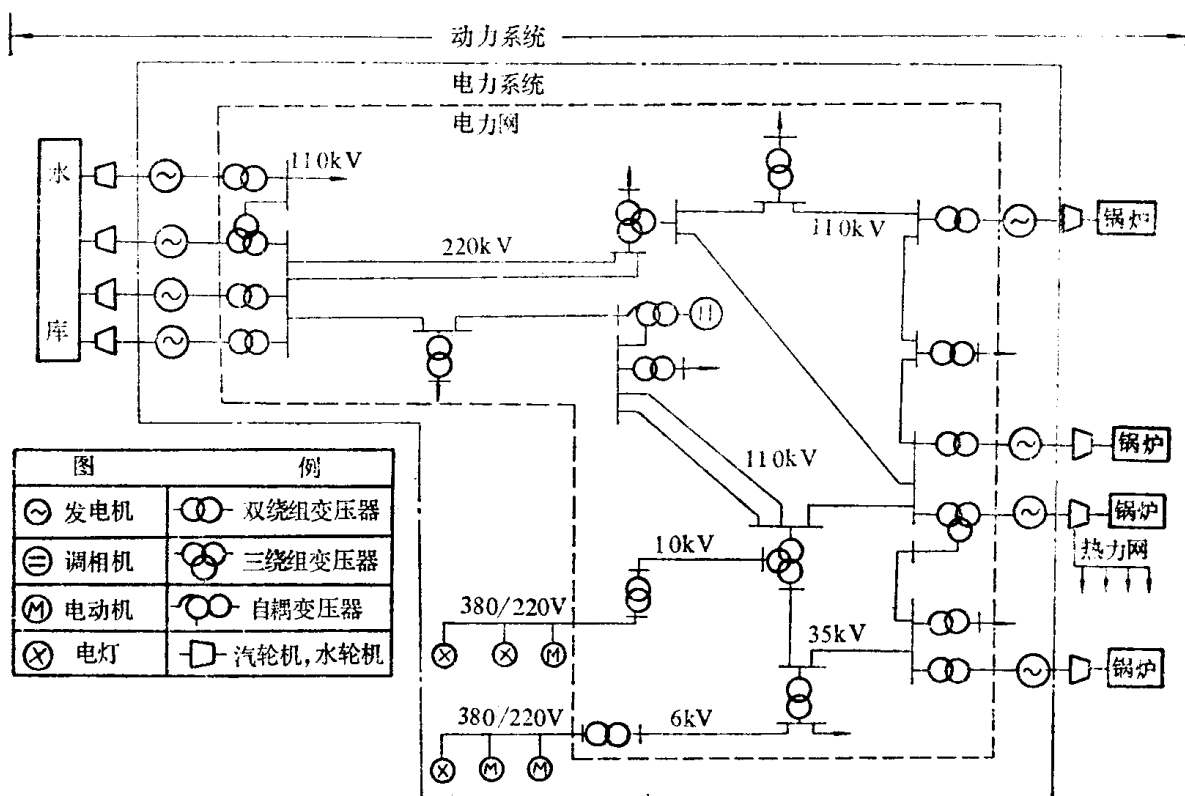


图1-1 动力系统、电力系统和电力网示意图

二、电力系统的额定电压和额定频率

电气设备都是按照指定的电压和频率来进行设计制造的，这个指定的电压和频率，称为电气设备的额定电压和额定频率。当电气设备在此电压和频率下运行时，将具有最好的技术性能和经济效果。

为了进行成批生产和实现设备的互换，各国都制定有标准的额定电压和额定频率。我国制定的标准额定电压分为三类。第一类为100伏以下适用于蓄电池和安全照明用具等电气设备的额定电压。第二类为500伏以下适用于一般工业和民用电气设备的额定电压。第三类为1000伏以上高压电气设备的额定电压，其数值列于表1-1中。

表1-1 1000 伏 以 上 的 额 定 电 压

用电设备额定线电压(千伏)	交流发电机额定线电压(千伏)	变 压 器 额 定 线 电 压 (千 伏)	
		一 次 绕 组	二 次 绕 组
3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
—	15.75	15.75	—
35	—	35	38.5
(60)	—	(60)	(66)
110	—	110	121
(154)	—	(154)	(169)
220	—	220	242
330	—	330	363
500	—	500	—

注：括号内为将要淘汰的电压级

从表中可以看到，同一个电压级别下，各种设备的额定电压并不完全相等。为了使各种互相联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。

电力线路的额定电压和用电设备的额定电压相等，有时把它们称为网络的额定电压，如220千伏网络等等。

发电机的额定电压规定比网络的额定电压高5%。

变压器额定电压的规定略为复杂。根据变压器在电力系统中传输功率的方向，我们规定变压器接受功率一侧的绕组为一次绕组，输出功率一侧的绕组为二次绕组。一次绕组的作用相当于用电设备，其额定电压与网络的额定电压相等，但直接与发电机联接时，其额定电压则与发电机的额定电压相等。二次绕组的作用相当于电源设备，其额定电压规定比网络的额定电压高10%，如果变压器的短路电压小于7%或直接(包括通过短距离线路)与用户联接时，则规定比网络的额定电压高5%。为了适应电力系统运行调节的需要，通常在变压器的高压绕组上设计制造有分接抽头。分接头用百分数表示，即表示分接头电压与主抽头电压的差值为主抽头电压的百分之几。对同一电压级的变压器，升压变压器和降压变压器，即使分接头百分值相同，分接头的额定电压也不同。图1-2所示为用线电压表示的 SF31500/22) ± 2 × 2.5% 型变压器的抽头额定电压。对于 + 5% 抽头，升压变压器为 $242 \times 1.05 = 254$ 千伏，降压变压器则为 $220 \times 1.05 = 231$ 千伏。

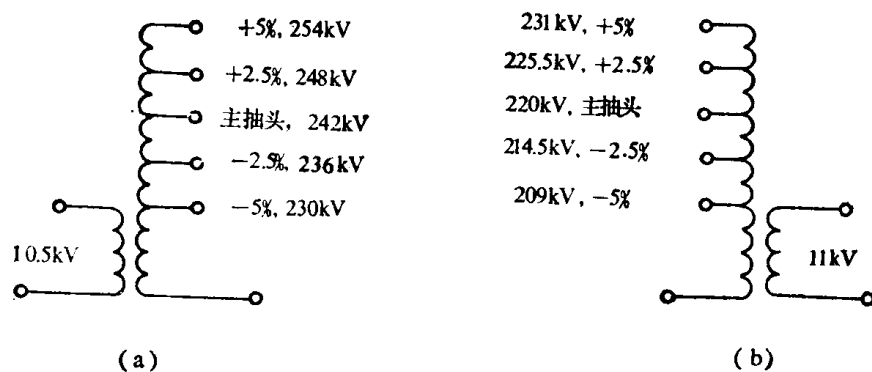


图1-2 用线电压表示的抽头额定电压
(a) 升压变压器；(b) 降压变压器

三、电力系统的运行状态

当电力系统中各种发电、变电、输配电及用电设备之间的相互联接情况已经确定时，电力系统的运行状态是由一些运行变量（亦称为运行参数）的变化规律来描述的。这些运行变量包括功率、频率、电压、电流、磁链、电动势以及发电机转子间的相对位移角等等。

电力系统运行状态一般可区分为稳态和暂态。实际上，由于电力系统存在各种随机扰动（如负荷变动）因素，绝对的稳态是不存在的。在电力系统运行的某一段时间内，如果运行参数只在某一恒定的平均值附近发生微小的变化，我们就称这种状态为稳态。稳态还可以分为正常稳态、故障稳态和故障后稳态。正常稳态是指正常三相对称运行状态，电力系统在绝大多数的时间里处于这种状态。

电力系统暂态一般是指从一种运行状态到另一种运行状态的过渡过程。在暂态中，所有运行参数都发生变化，有些则发生激烈的变化。此外，运行参数发生振荡的运行状态，也是一种暂态。

对电力系统运行状态的分析研究，除了对运行中的电力系统进行实际观测和进行必要的模拟试验外，大量采用的方法是把待研究的系统状态用数学方程式描述出来，运用适当的数学方法和计算工具进行分析计算。描述系统状态的数学方程式，反映了各种运行变量间的相互关系，有时也称为系统的数学模型。例如，正弦电势源作用下的R-L电路的方程式为：

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E_m \sin(\omega t + \alpha)。$$

有n个节点的复杂网络的节点方程式为：

$$\dot{I}_i = Y_{i1} \dot{V}_1 + Y_{i2} \dot{V}_2 + \dots + Y_{in} \dot{V}_n = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{V}_j \quad (i = 1, 2, \dots, n)。$$

在上述方程式中， E_m 、 ω 、 α 、 i 、 \dot{V}_j 、 \dot{I}_i 等都是运行变量，系数 R 、 L 、 Y_{ij} 等统称为系统参数。系统参数是指系统各元件或其组合在运行中反映其物理特性的参数。各种元件的电阻、电感（或电抗）、电容（或电纳）、时间常数、变压器的变比以及系统的输入阻抗、转移阻抗等都属于系统参数。系统参数主要取决于元件的结构特点，也同其额定参数密切相关。元件的额定参数（如额定电压、额定电流、额定容量、额定功率因数、额定频率等等）反映了对元件结构的设计要求，同时也规定了元件所适用的运行条件。无论对电力系统进行何种状态的分析研究，系统参数的计算都是必不可少的。

四、电力系统各元件的等值电路

在电力系统的电气计算中，常用等值电路来描述系统元件的特性。电力系统的运行状态基本上是三相对称的（如正常运行状态）或者是可以化为三相对称的（如用对称分量法），因此，只要研究一相的情况就可以了。电力系统各元件的三相，有星形接法和三角形接法，相应地三相等值电路也有星形电路和三角形电路。为了能用一相等值电路进行分析计算，把三角形电路都化为星形电路。等值电路中的参数是计及了其余两相影响（如相间互感等）的一相等值参数。

现将电力系统计算中常用的各元件等值电路简述如下。

1. 发电机

发电机常用有一定内阻抗的电势源（或化为电流源）来表示，如图1-3所示。其电势和阻抗的确定将在第三、四章详细讨论。

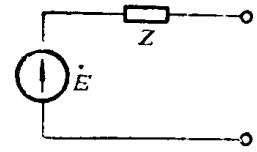


图1-3 发电机的等值电路

2. 变压器

在电力系统计算中，双绕组变压器的近似等值电路常将励磁支路前移到电源侧。在这个等值电路中，一般将变压器二次绕组的电阻和漏抗折算到一次绕组侧并和一次绕组的电阻和漏抗合并，用等值阻抗 $R_T + jX_T$ 来表示〔见图1-4(a)〕。对于三绕组变压器，采用励磁支路前移的星形等值电路，如图1-4(b)所示，图中的所有参数值都是折算到一次侧的值。

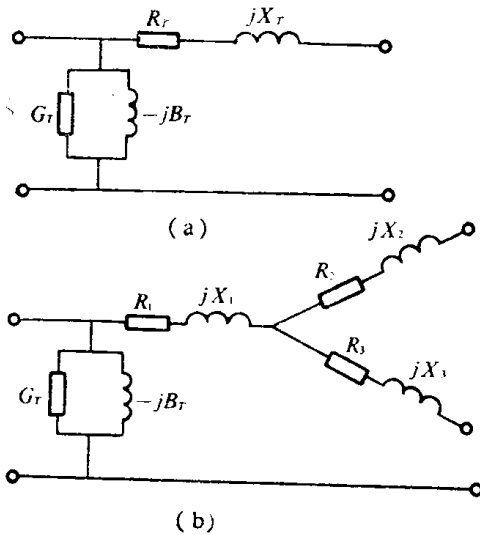


图1-4 变压器的等值电路

(a) 双绕组变压器；(b) 三绕组变压器

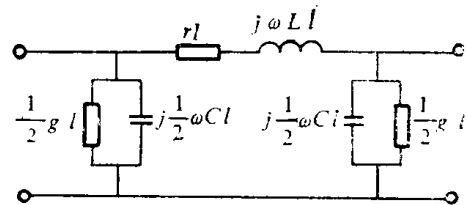


图1-5 输电线路的II型等值电路

3. 输电线路

输电线路的参数有四个：反映线路通过电流时产生有功功率损失效应的电阻；反映载流导线周围产生磁场效应的电感；反映线路带电时绝缘介质中产生泄漏电流及导线附近空气游离而产生有功功率损失的电导；反映带电导线周围电场效应的电容。输电线路的这些参数通常可以认为是沿全长均匀分布的，每单位长度的参数为电阻 r 、电感 L 、电导 g 及电容 C 。长度为 l 的一段输电线路，常用集中参数的II型等值电路表示（见图1-5）。在一般的分析计算中，一个II型等值电路可代表长度在300公里以下的一段架空输电线路。线路长度超过300公里或有其它要求时，可用多个串级联接的II型等值电路来表示，每个II型等值电路所代表的线路长度，可根据实际需要确定。

4. 负荷

根据电力系统分析计算的不同要求，负荷应采用不同的模型，这将在以后结合有关内容进行讨论。

5. 电抗器

通常略去电抗器的电阻，只用集中的纯电抗表示。

电力系统各元件都用相应的集中参数的等值电路表示之后，就可以按电力系统接线情况组成整个系统的等值电路。在短路计算以及电压和功率分布计算中，都是应用这种等值电路的。所以，这一类的计算属于集中参数线性电路的计算。

1-2 电力线路的结构

电力线路按结构可分为架空线路和电缆线路两大类。架空线路架设在户外地面上空，它由导线、避雷线（又称为架空地线）、杆塔、绝缘子及金具等元件组成。电缆线路一般埋设在地下的电缆沟或管道中，它由导线、绝缘层、保护层等组成。下面分别简要介绍两种线路的各种元件的作用及其结构。

一、架空线路

1. 导线和避雷线

导线和避雷线均采用裸线。导线的作用是传输电能，避雷线的作用是将雷电流引入大地，保护电力线路免受雷击，因此它们都应有较好的导电性能。导线和避雷线均架设在户外，除了要承受导线自身重量、风压、冰雪及温度变化等产生的机械力作用外，还要受空气中有害气体的化学腐蚀作用。所以，导线和避雷线还应有较高的机械强度和抗化学腐蚀能力。导线常用的材料有铜、铝、铝合金和钢等。

铜是电的良导体之一，抗拉强度较高，能抵抗空气中大部分有害气体的腐蚀作用，易于焊接，是一种很理想的导线材料。但铜的用途很广、产量有限，因此，为了节约铜的消耗量，除特殊情况外，架空线路一般不用铜导线。

铝的导电性能虽比铜差，但亦属良好，是常用的导线材料。铝的机械强度低、允许应力小，因此，常采用铝合金来改善其机械强度。铝虽极易受碱性物质和盐酸的侵蚀，但能很好地抵抗空气中一般化学物质的腐蚀作用。

钢的导电性能又比铝差，且在空气中易生锈，但其机械强度高。为节约有色金属，钢导线常用于负荷密度较小的地方，如用在农村或小城镇的电力线路中。避雷线一般采用钢导线。

裸导线有单股线、由一种材料制成的多股绞线和由两种材料制成的多股绞线（见图1-6）。由于多股绞线柔性好，机械强度高，便于制造、安装和保管，因此，架空线路大多数采用多股绞线。目前，为了增加导线的机械性能，减少架空线路的杆塔数目，节约线路投资，10千伏以上的线路，广泛采用钢芯铝线。它是由多股铝线绕在单股或多股的钢导线外层而构成的。铝线是主要载流部分，而机械应力则由钢线和铝线共同承担，这就可以充分利用铝线导电性能好、钢线机械强度高的优点。在220千伏以上的输电线路中，为了改善输电线路参数和减少电晕损耗，常采用特殊结构的导线，例如扩径导线和每相由多根多股标准导线构成的分裂导线等（见图1-6）。

多股导线是按规定的标准制造的，导线的标号用汉语拼音字母和数字表示，例如，LGJ-120，字母LGJ表示线型为普通钢芯铝绞线，数字120表示主要载流部分（对钢芯铝线是铝线

部分)的标称截面积为120平方毫米。其他几种常见的线型有: TJ——铜绞线; LJ——铝绞线; LGJJ——加强型钢芯铝线; LGJQ——轻型钢芯铝线等。

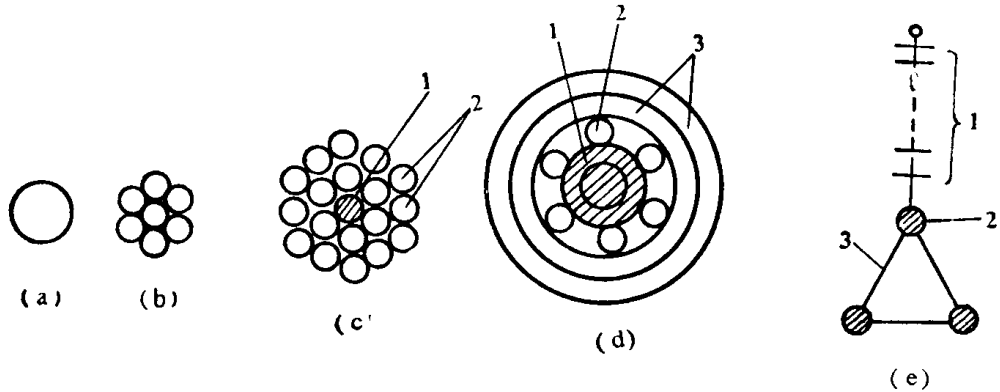


图1-6 架空输电线路导线的结构示意图

- | | | | | |
|---------|---------|---------|------------|-----------|
| (a)单股线; | (b)多股线; | (c)钢芯铝线 | (d)扩径导线 | (e)一相分裂导线 |
| | | 1)钢线, | 1)多股钢芯线, | 1)绝缘子串, |
| | | 2)铝线; | 2)支撑层6股铝线, | 2)多股绞线, |
| | | | 3)外层多股铝线; | 3)金属间隔棒 |

2. 杆塔

杆塔用于支持导线和避雷线,其示意图如图1-7所示。杆塔的类型很多,分类的方法也各不相同。按杆塔所承担的任务可分为:

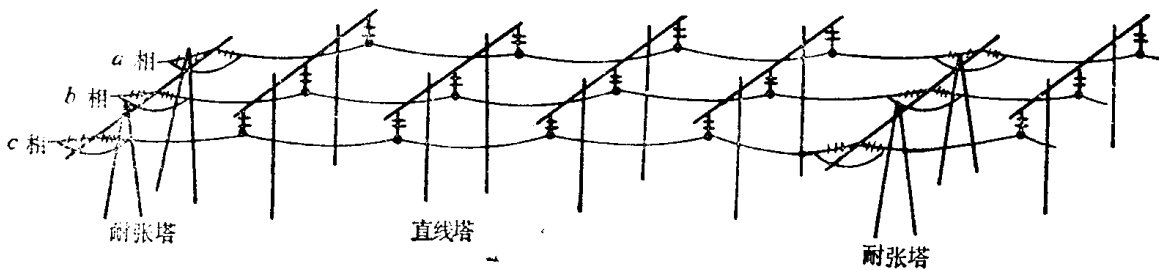


图1-7 架空线路示意图

直线杆塔,它又称为中间杆塔,主要用来悬挂导线,是线路上用得最多的一种杆塔。

耐张杆塔,它又称为承力杆塔,主要用来承担线路正常及故障(如断线)情况下导线的拉力,同时使线路分段,便于施工和检修,限制故障范围。在耐张塔上,绝缘子串不象直线塔上那样与地面垂直,而象是导线的延续。杆塔两边同一相导线是通过跳线来接通的。

终端杆塔,它是最靠近变电所的一座杆塔,用来承受最后一个耐张档距导线的单向拉力。如果没有终端杆塔,则拉力将由变电所建筑物承担,这将增加变电所的造价。

转角杆塔,它用于线路拐弯处,承受侧向拉力。拐角较大时做成耐张塔的形式,拐角较小时也可做成直线塔的形式。

特种杆塔。它是在特殊情况下使用的一种杆塔,如导线换位用的换位塔,跨越河流、山谷等跨距很大的跨越杆塔等。

3. 绝缘子和金具

绝缘子用来支持或悬挂导线并使导线与杆塔绝缘,因此,它必须具有良好的绝缘性能和足够的机械强度。架空线路上用的绝缘子有针式、悬式等各种型式(见图1-8)。针式绝缘子应用在电压不超过35千伏的线路上。悬式绝缘子可以根据线路电压的高低,用不同数目的绝

缘子组成绝缘子串。当使用X-4.5型时，35千伏线路不少于3片；110千伏不少于7片；220千伏不少于13片；330千伏不少于19片。

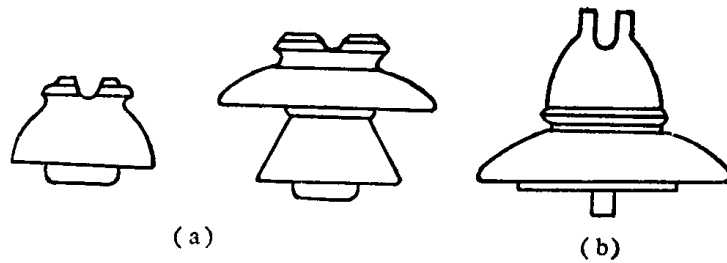


图1-8 架空线路上用的绝缘子
(a)针式； (b)悬式

金具是用来组装架空线路的各种金属零件的总称，其品种繁多，用途各异。如结合金具用来联结悬式绝缘子串；连接金具用来联接导线；固紧金具用来将导线固定在悬式绝缘子串上；保护金具中的防震锤用来防止导线因振动而损坏等等。

二、电缆线路

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，以增加电缆的柔性，使之能在一定程度内弯曲而不变形。根据电缆中导体数目不同，可分为单芯、三芯和四芯电缆。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外，还有扇形的，如图1-9所示。

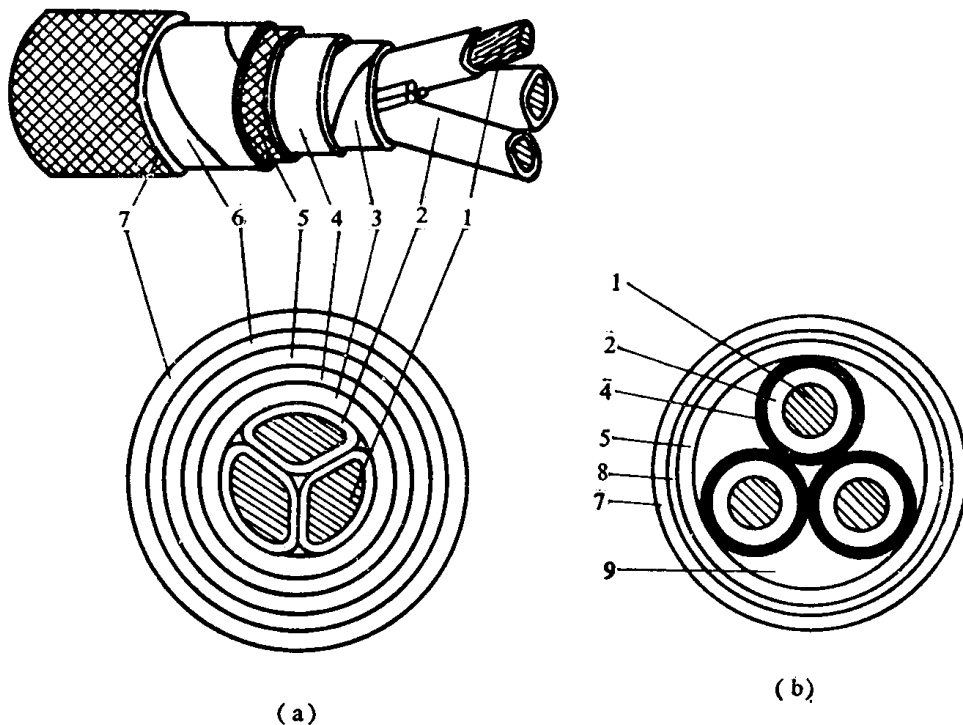


图1-9 电缆结构示意图

(a)三相统包型； (b)分相铅包型

1—导体； 2—相绝缘； 3—纸绝缘； 4—铅包皮； 5—麻衬；
6—钢带铠甲； 7—麻被； 8—钢丝铠甲； 9—填充物

电缆的绝缘层用来使各导体之间以及导体与包皮之间绝缘。绝缘层使用的绝缘材料种类很多，如橡胶、聚乙烯、纸、油、气等。一般多采用油浸纸绝缘及充油、充气绝缘。

电缆的保护包皮用来保护绝缘层，使其在运输、敷设和运行过程中不受外力损伤，并防止水分的侵入，在油浸纸绝缘电缆中还有防止绝缘油外流的作用。常用的有铅包皮和铝包皮。为了防止外力破坏，电缆外层还有钢带铠甲。

电缆除按芯数和导体截面形状分类外，又分为统包型、屏蔽型和分相铅包型。统包型的三相芯线绝缘层外有一共同的铅包皮。这种电缆内部电场分布不均匀，不能充分利用绝缘强度，它只用于10千伏以下的电缆。屏蔽型的每相芯线绝缘层外都包有金属带。分相铅包型的各相分别铅包，如图1-9所示。对于电压在110千伏及以上的线路多采用充油式或充气式电缆。

电缆附件有接线盒、终端接头等，对于充油或充气式电缆，还有一整套供油或供气设备。

1-3 架空输电线路的电阻和电感

一、电阻

有色金属导线的直流电阻，可按下列式计算：

$$r = \frac{\rho}{s} \quad \text{欧/公里}, \quad (1-1)$$

式中， ρ 为导线的电阻率(欧·毫米²/公里)； s 为导线载流部分的标称截面积(毫米²)。

考虑到：(1)通过导线的是三相工频交流电流，而由于集肤效应和邻近效应，交流电阻比直流电阻略大；(2)由于多股绞线的扭绞，导体实际长度比导线长度长2~3%；(3)在制造中，导线的实际截面积常比标称截面积略小。因此，在实际应用公式(1-1)时，不用导线材料的标准电阻率而是用略为增大的计算值。如，铜用18.8欧·毫米²/公里，铝用31.5欧·毫米²/公里。

工程计算中，也可以直接从手册中查出各种导线的电阻值。按公式(1-1)计算所得或从手册查得的电阻值，都是指温度为20°C时的值，在要求较高精度时， t °C时的电阻值 r_t 可按下列式计算：

$$r_t = r_{20} [1 + \alpha(t - 20)], \quad (1-2)$$

式中， α 为电阻温度系数，对于铜 $\alpha = 0.00382(1/°C)$ ，铝 $\alpha = 0.0036(1/°C)$ 。

二、电感

1. 基本算式

导体通过电流时其周围就产生磁场。若磁路的导磁系数为常数，与导体交链的磁链 Ψ 就同电流 I 呈线性关系，导体的自感

$$L = \frac{\Psi}{I}. \quad (1-3)$$

若导体A和导体B相邻，导体B中的电流 I_B 产生与导体A相交链的磁链为 Ψ_{AB} ，则互感

$$M_{AB} = \frac{\Psi_{AB}}{I_B}. \quad (1-4)$$

非铁磁材料制成的圆柱形长导线，长度为 l ，半径为 r ，周围介质为空气，当 $l \gg r$ 时，每单位长度的自感

$$L = 2 \times 10^{-7} (\ln \frac{2l}{D_s} - 1) \text{亨/米}, \quad (1-5)$$

式中, $D_s = re^{-1}$ 为圆柱形导线的自几何均距。

两根平行的、长度为 l 的圆柱形长导线, 导线轴线间的距离为 D , 每单位长度的互感

$$M = 2 \times 10^{-7} (\ln \frac{2l}{D} - 1) \text{ 亨/米。} \quad (1-6)$$

公式(1-5)和(1-6)是计算多相输电线路电感的基础, 这些公式的推导将在附录I给出。

2. 三相输电线路的等值电感

呈等边三角形对称排列的三相输电线, 各相导线的半径都是 r , 导线轴线间的距离为 D 。当输电线通以三相对称正弦电流时, 与 a 相导线相交链的磁链

$$\Psi_a = LI_a + M(I_b + I_c) = 2 \times 10^{-7} \left[\left(\ln \frac{2l}{D_s} - 1 \right) I_a + \left(\ln \frac{2l}{D} - 1 \right) (I_b + I_c) \right] \text{ 韦/米,}$$

式中, 电流和磁链都是相量。

计及 $I_a + I_b + I_c = 0$, 可得

$$\Psi_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{D_s} I_a \text{ 韦/米,} \quad (1-7)$$

因此, a 相等值电感

$$L_a = \frac{\Psi_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{D_s} \text{ 亨/米。} \quad (1-8)$$

由于三相导线排列对称, b 、 c 相的电感均与 a 相的相同。

当三相导线排列不对称时, 各相导线所交链的磁链及各相等值电感便不相同, 这将引起三相参数不对称。因此必须利用导线换位来使三相恢复对称。图1-10为导线换位及经过一个

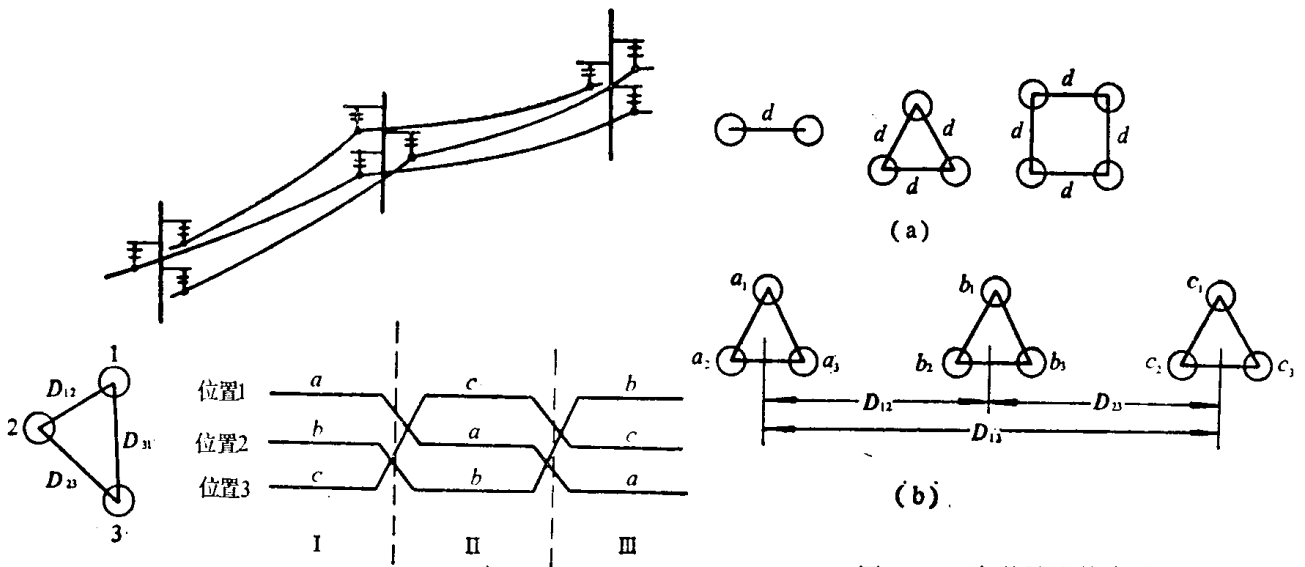


图1-10 导线换位

图1-11 分裂导线的布置

(a) 一相分裂导线的布置; (b) 三相分裂导线的布置

整循环换位的示意图。当I、II、III段线路长度相同时, 三相导线 a 、 b 、 c 处于1、2、3位置的长度也相同, 这样便可使各相平均电感接近相等。

用 Ψ_{a1} 表示第I段 a 相导线每单位长度所交链的磁链, 此时, 导线 a 、 b 、 c 分别处于位置1, 2, 3, 利用公式(1-5)和(1-6), 并计及 $I_a + I_b + I_c = 0$, 可得:

$$\Psi_{aI} = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_s} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{31}} \right)。$$

类似地可分别得到第II、III段a相所交链的磁链：

$$\Psi_{aII} = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_s} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{D_{12}} \right)，$$

$$\Psi_{aIII} = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_s} + I_b \ln \frac{1}{D_{31}} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right)。$$

这样，a相每单位长度所交链磁链的平均值

$$\Psi_a = \frac{1}{3} (\Psi_{aI} + \Psi_{aII} + \Psi_{aIII}) = 2 \times 10^{-7} I_a \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \text{ 韦/米，}$$

a相的平均电感

$$L_a = \frac{\Psi_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \text{ 亨/米} = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \text{ 亨/公里，} \quad (1-9)$$

式中， $D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$ 称为三相导线间的互几何均距，对于三相导线水平排列的线路， $D_{eq} = \sqrt[3]{D D 2D} = 1.26D$ 。

通常输电线路导线都是多股绞线。利用自几何均距和互几何均距的概念(见附录I)，可以求出多股绞线自几何均距 D_s 的值，它与导线的材料和结构(如股数)有关。若多股绞线的计算半径为 r ，则：

对于非铁磁材料的单股线， $D_s = r e^{-1/4} = 0.779r$ ；

对于非铁磁材料的多股线， $D_s = (0.724 \sim 0.771)r$ ；

对于钢芯铝线， $D_s = (0.77 \sim 0.9)r$ 。

3. 具有分裂导线的输电线的等值电感

通常，每相分裂成多根的导线，总是布置在正多边形的顶点上，正多边形的边长 d 称为分裂间距(见图1-11)。输电线路各相间的距离通常比分裂间距大得多，故可以认为不同相的导线间的距离都近似地等于该两相分裂导线重心间的距离，如图1-11所示的情况，取 $D_{a1b1} \approx D_{a1b2} \approx D_{a1b3} \approx D_{a2b1} \approx D_{a2b2} \approx D_{a2b3} \approx D_{a3} = D_{12}$ 等。

根据自几何均距和互几何均距的概念，用分裂导线每相的自几何均距 D_{sb} 去代替式(1-9)中的 D_s ，便可得到分裂导线一相等值电感的算式：

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_{sb}} \text{ 亨/米} = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{D_{eq}}{D_{sb}} \text{ 亨/公里。} \quad (1-10)$$

分裂导线的自几何均距 D_{sb} 与分裂间距及分裂根数有关，对于图1-11的情况，当分裂根数为二时，

$$D_{sb} = \sqrt[4]{(D_s d)^2} = \sqrt{D_s d}， \quad (1-11)$$

当分裂根数为三时，

$$D_{sb} = \sqrt[6]{(D_s d d)^3} = \sqrt[3]{D_s d^2}， \quad (1-12)$$

当分裂根数为四时，

$$D_{sb} = \sqrt[16]{(D_s d d \sqrt{2} d)^4} = 1.09 \sqrt[4]{D_s d^3}。 \quad (1-13)$$

以上各式中的 D_s 为每根多股绞线的自几何均距。

分裂间距 d 通常比每根导线的自几何均距大得多,因而分裂导线每相的自几何均距 D_{st} 也比单导线线路每相的自几何均距大,所以分裂导线线路的等值电感较小。

4. 输电线路的等值电抗

额定频率下输电线路每相的等值电抗

$$x = 2\pi f_N L_0$$

我国的额定频率为50赫。对于单导线线路

$$x = 2\pi \times 50 L = 314 \times 2 \times 10^{-4} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} = 0.1445 \lg \frac{D_{eq}}{D_s} \text{ 欧/公里。} \quad (1-14)$$

对于分裂导线线路

$$x = 314 \times 2 \times 10^{-4} \ln \frac{D_{eq}}{D_{st}} = 0.1445 \lg \frac{D_{eq}}{D_{st}} \text{ 欧/公里。} \quad (1-15)$$

我们看到,虽然相间距离、导线截面等与线路结构有关的参数对电抗大小有影响,但这些数值均在对数符号内,故各种线路的电抗值变化不很大。一般单导线线路每公里的电抗为0.4欧左右;分裂导线线路的电抗与分裂根数有关,当分裂根数为2, 3, 4根时,每公里的电抗分别为0.33, 0.30, 0.28欧左右。

对于钢导线,由于集肤效应及导线内部的导磁系数均随导线通过的电流大小而变化,因此,它的电阻和电抗均不是恒定的,钢导线构成的输电线路将是一个非线性元件。钢导线的阻抗无法用解析法确定,只能用实验测定其特性,根据电流值来确定其阻抗。

1-4 架空输电线路的电导和电容

一、电导

架空输电线路的电导是用来反映泄漏电流和空气游离所引起的有功功率损耗的一种参数。一般线路绝缘良好,泄漏电流很小,可以将它忽略,主要是考虑电晕现象引起的功率损耗。所谓电晕现象,就是架空线路带有高电压的情况下,当导线表面的电场强度超过空气的击穿强度时,导体附近的空气游离而产生局部放电的现象。这时会发出滋滋声,并产生臭氧,夜间还可看到紫色的晕光。

线路开始出现电晕的电压称为临界电压 V_{cr} 。当三相导线排列在等边三角形顶点上时,电晕临界相电压的经验公式为:

$$V_{cr} = 84 m_1 m_2 \delta r \lg \frac{D}{r} \text{ 千伏,} \quad (1-16)$$

式中, m_1 为考虑导线表面状况的系数,对于多股绞线 $m_1 = 0.83 \sim 0.87$; m_2 为考虑气象状况的系数,对于干燥和晴朗的天气 $m_2 = 1$,对于有雨雪雾等的恶劣天气 $m_2 = 0.8 \sim 1$; r 为导线的计算半径(厘米); D 为相间距离(厘米); δ 为空气的相对密度。

$$\delta = 3.92b / (273 + t), \quad (1-17)$$

式中, b 为大气压力,用水银柱厘米表示; t 为空气温度($^{\circ}\text{C}$)。当 $t = 25^{\circ}\text{C}$, $b = 76$ 厘米时, $\delta = 1$ 。

对于水平排列的线路,两根边线的电晕临界电压比上式算得的值高6%;而中间相导线的则低4%。