

电力中等专业学校教材

电力工程

王新学 王香芳 合编

中国电力企业联合会教育培训部

电力中等专业学校教材

电 力 工 程

王新学 王秀芳 合编

中国电力企业联合会教育培训部

前 言

本书为电力类中等专业学校交流教材，适用于火电厂集控运行等专业。主要按照1988年部颁《火电厂集控运行专业教学计划及教学大纲》的要求编写的。在编写中比较全面地介绍了发电厂及电力系统运行的基本知识、基本理论和主要的计算方法。根据教学特点，注意到知识的衔接和配合，由浅入深，循序渐进，便于阅读和自学。并编入了一定数量的例题和习题，供课堂讲授和练习。

本书由王新学、王秀芳合编。其中，前六章由王新学编写；后三章由王秀芳编写，并请西北电力设计院汪传新同志审核和改正。在此，对审稿同志及为本书提供资料和改进意见的同志，以并致谢。由于编者水平有限，诚恳希望各校师生和读者，对本书的缺点和错误提出意见和批评，以便改进。

编 者

目 录

第一章 电力系统基本知识

第一节 概 述	1
第二节 电力系统主要元件的参数及等值电路	5
第三节 一端电源供电网的功率分布与电压计算	18
第四节 两端电源供电网的功率分布与电压计算	25
第五节 电力系统中性点的接地方式	28

第二章 短路电流计算

第一节 基本概念	34
第二节 标么制与系统各元件的电抗	36
第三节 计算短路电流的程序和方法	41
第四节 无限容量电力系统供电三相短路电流计算	45
第五节 有限容量电力系统供电三相短路电流计算	49
第六节 异步电动机对短路电流的助增	57
第七节 电力系统的不对称短路	58

第三章 发电厂及变电所的一次设备

第一节 电弧的基本知识	74
第二节 熔断器	81
第三节 低压开关	86
第四节 隔离开关	88
第五节 高压断路器	90
第六节 互感器	103

第四章 发电厂及变电所的电气主接线及自用电接线

第一节 概 述	113
第二节 电气主接线的基本形式	113
第三节 发电厂的主接线	120
第四节 发电厂的厂用电接线	121

第五章 电气设备选择

第一节 短路电流的电动力效应	125
第二节 短路电流的热效应	126
第三节 电气设备选择	131
第四节 短路电流的限制	136

第六章 电力系统运行

第一节 电能的质量	138
第二节 电力系统的频率调整	139

第三节	电力系统的电压调整	145
第四节	电力系统运行的静态稳定性	155
第五节	电力系统运行的暂态稳定性	162
第六节	电力系统振荡的概念	167
第七章 继电保护简介		
第一节	概 述	171
第二节	常用电磁型继电器	173
第三节	发电机—变压器组继电保护概述	176
第四节	发电机保护	180
第五节	变压器保护	191
第八章 发电厂的操作电源		
第一节	概 述	198
第二节	铅酸蓄电池	199
第三节	蓄电池组的运行方式及其接线	208
第四节	整流操作的直流系统	214
第五节	直流系统监察装置	218
第九章 发电厂的二次回路		
第一节	二次回路的基本概念	224
第二节	控制室、控制屏和继电器屏的布置	228
第三节	二次回路的编号和标志	235
第四节	屏背面接线图	239
第五节	断路器的控制回路	245
第六节	信号回路	259
第七节	发电厂的测量监视系统	267
第八节	同期回路	272

第一章 电力系统基本知识

电能是现代工农业生产和人们生活中主要应用的一类能源。因为电能便于转换为其它形式；便于输送和分配；便于控制和使用。一个国家或地区的生产发展规模和文明程度，往往根据其用电量的多少来衡量。

我国具有十分丰富的自然能源，其中水力资源蕴藏量约为 6.9 亿 kW，煤、石油、天然气、原子能等资源也很丰富。这些优越的自然条件为我国电力工业的发展提供了重要的物质基础。经过四十余年的建设，我国电力工业有了很大的发展，全国发电设备总装机容量已由解放前占世界第二十一位，跃升为世界第四位。我国有 11 亿人，按人口平均用电量来说还是相当落后，因此，为了满足国民经济发展和人民生活日益增长的需要，全体电力工作者还应加倍努力，为在本世纪内实现我国社会主义四个现代化建设而做出应有的贡献。

第一节 概 述

一、电力系统

由发电、输电、配电、变电及用户组成的统一体，称为电力系统。电力系统中的输配电部分，称为电力网。电力网的任务是输送与分配电能。

1、发电

将自然能转变为电能的过程，称为发电。自然能称为一次能源。地球上的自然能源主要来自太阳、地球和地球与其它天体的作用。在现代的科学技术条件下，世界各国主要用于发电的自然能源有：石油、煤炭、天然气、水力和原子能。其中，水力为无污染可再生的自然能源，其它能源不能再生总有用完之时。应用水力发电的称水电厂；应用原子能发电的称原子能电厂；应用煤炭、天然气、石油发电的称为火电厂等。兼供用户电能与热能的热电厂称为热电厂。此外，还有太阳能发电；风力发电；潮汐能发电；地热发电；磁流体发电；电气体发电等类型的电厂。

2、用户

使用电能的单位，称为用户。根据用户性质的不同可分为，工业用户、农业用户、公用事业用户及人民生活用电等类型。

工业用户集中，用电量大，设备利用率高；农业用户分散，用电量大小与气候、季节等因素有关；公用事业及人民生活用电面广，形式多样。

3、输电

将发电厂发出的电能，通过线路输送到用电中心的过程，称为输电。火电厂一般建设在原料的产地，以节约燃料运输费用。水电厂需要建设在江河水流落差较大的地区。而负荷中心则集中在大城市，工矿区及农业发达地区。因此，发电厂和负荷中心之间往往相距几十、几百甚至几千公里，这就需要用输电线作为传输电能的通道。输电线路距离长，输

送功率大，为了提高输送效率，需要采用很高的电压。我国输电线路电压一般在 110kV 以上。

4、配电

将负荷中心的电能，通过配电线路分配给用户的过程，称为配电。由于配电线路距离短，输送功率小，又比较分散，为了降低绝缘费用及采用电压较低，价格便宜的用电设备，因此，配电线路需要采用较低的电压。我国配电线路电压在 35kV 及以下。

5、变电

根据需要，通过变压器改变电压的过程，称为变电。一般在区域性发电厂设立升压变电所，在负荷中心设立降压变电所。变电所还担负着分配、控制、测量、保护等任务。

由上述各种类型的发电厂、变电所，各种不同电压等级的输配电线路，以及广大用户组成的统一体，称为电力系统。电力系统根据供电范围分为地区级、省级、大区以及全国统一的电力系统几类。在国外，还有跨国电力系统。图 1-1 为一简单电力系统的示意图。

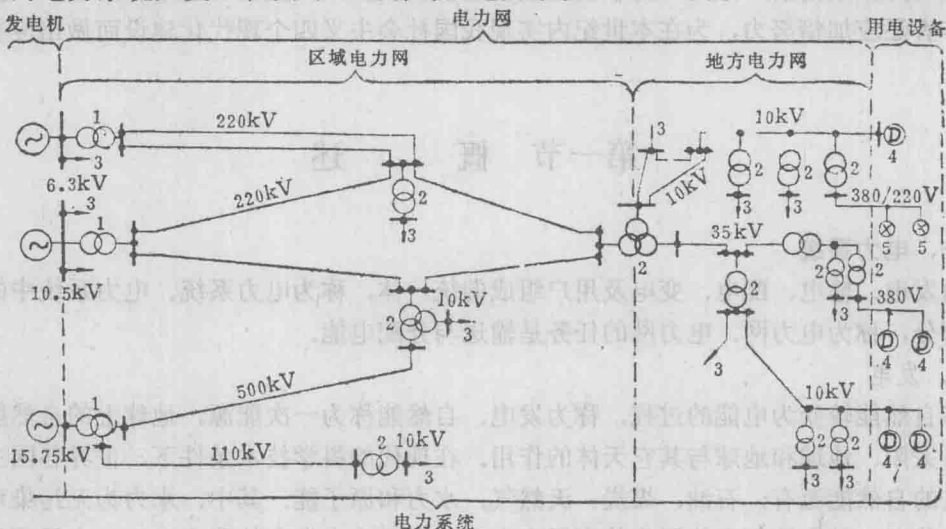


图 1-1 简单电力系统示意图

1-升压变压器；2-降压变压器；3-去负荷；4-电动机；5-电灯

二、电力系统的生产运行特点

1、电力系统生产运行的连续性

电力系统中发变输配电运行几乎在同一瞬间完成。任何一部分出现故障，都可能影响其它部分的工作。为了电力系统各部分安全、协调、经济、连续地运行，保证对用户不间断地供电，系统必须在统一指挥下，各部件都能安全可靠的工作。

2、与工农业生产及人民生活密切相关性

电力系统在运行时，如果对用户供电不足或中断，将直接影响国民生产计划的完成和人民的正常生活。对某些用户还会造成产品报废，设备损坏，引起人民生活混乱以及危及人身安全等严重后果。这就要求，不断提高电力工业发展速度，满足国民经济各部门用电日益增长的需要，不断提高供电的可靠性和电能的质量。

3、暂态过程的非常短暂性

电力系统由于负荷及运行方式的改变，引起的电磁、机电等变化过程是非常短暂的。

正常情况和故障情况所进行的切换操作要非常迅速，仅依靠手操作是达不到满意的效果的，甚至是完成不了任务的。所以，电力系统必须采取自动化程度高、又能迅速而准确动作的继电保护，自动装置和测控设备。同时，还应有大量的掌握现代电力技术的各类专门人才来管理和参预运行。

根据电力工业的生产特点，不断扩大和发展电力系统，逐步将小系统联合成大系统。这是因为联合电力系统在技术和经济上有下述几方面的优越性

- (1) 提高了供电的可靠性;
- (2) 提高了电能质量;
- (3) 可以减少备用设备，提高了设备利用率;
- (4) 便于安装大容量机组，而大容量机组单位容量制造与运行比较经济;
- (5) 可以合理利用国家能源，提高了运行的经济性。

三、电力系统的额定电压

1、我国电力设备及元件的额定电压

额定电压是电力设备及元件设计制造的一个重要参数。电力设备及元件在其额定电压下运行，技术与经济性能最好。为了使设备标准化与系列化，电力系统各设备及元件的额定电压由国家组织有关人员在技术经济论证的基础上统一制订，颁布执行。

我国规定的各主要电力设备及元件的额定电压，见表 1-1。

表 1-1 我国主要电力设备及元件的额定电压 (单位: kV)

受电设备 及 线 路	线路平均 额定电压	交流发电机	变 压 器	
			一次绕组	二次绕组
0.38	0.39	0.4	0.38	0.4
3	3.15	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
		13.8	13.8	
		15.75	15.75	
		18	18	
35	37			38.5
(63)	(63)			(66)
110	115			121
(154)	(162)			(169)
220	230			242
330	345			363
500	525			550
750	787			825

2、各级额定电压的供电范围

在输电距离和输送的功率一定的条件下，电力网各元件的功率损耗、电能损耗及电压损耗也就愈小，并且，可以采用较小截面的导线。另一方面，电压等级愈高，电力网各元件绝缘费用就愈高，杆塔、变电站构架的几何尺寸增大，这就要增加总投资。因此，对应一个电压等级就有一定的比较合理的输送容量与输送距离。

选择电力网电压时，应根据输送容量与输送距离，以及附近电网的额定电压，拟定几个电压等级方案进行经济技术比较确定。如果两个方案的技术经济指标相近，或较低电压等级的方案的优点不太明显时，应采用电压等级较高的方案。各级额定电压电力网的经济输送容量和输送距离与适用地区，如表 1-2 所示。

表 1-2 各级额定电压电力网的经济输送容量、输送距离与适用地区

额定电压 (kv)	经济输送容量 (MW)	输送距离 (km)	适用地区
0.38	0.1 以下	0.6 以下	低压配电网;低压动力与三相照明
3	0.1~1.0	1~3	高压电动机
6	0.1~1.2	4~15	高压电机
10	0.2~2.0	6~20	高压配电网; 高压电机
35	2.0~10	20~50	县级输电网; 用户配电网
110	30~60	30~120	地区级输电网; 用户配电网
220	100~200	100~250	省区级网架
330	200~500	200~500	省区级输电网, 联合系统网架
500	400~1000	250~800	省区级输电网, 联合系统网架
750	800~2000	500~1200	联合系统网架

四、电力网的接线方式

电力网的接线方式主要应满足电力系统调度和对用户供电的要求。在选择电力网的接线方式时，主要应该考虑以下几方面的问题

(1) 必须保证系统运行、检修的灵活性和在系统运行方式改变时，电力网能适应这一变化而不降低供电质量和可靠性;

(2) 必需保证对用户供电的可靠性，对于不容许间断供电的重要用户，应采用由两个独立电源供电的方式;

(3) 应力求节约设备和材料，减少投资与运行费;

(4) 各类接线方式都应保证运行人员能安全地操作。

根据以上对电力网接线的总要求，电力网接线方式主要分以下几种类型

1、一端电源供电网

在一端电源供电网中，用户只能从一个方面获得电能，如图 1-2 (a) 所示。一端电源供电网的特点是，简单、经济，供电可靠性较低。对于双回路电网，极大地提高了供电可靠性。由于双回路电网的电源侧，是接在不同的母线段上，可以看作为两端电源供电网。

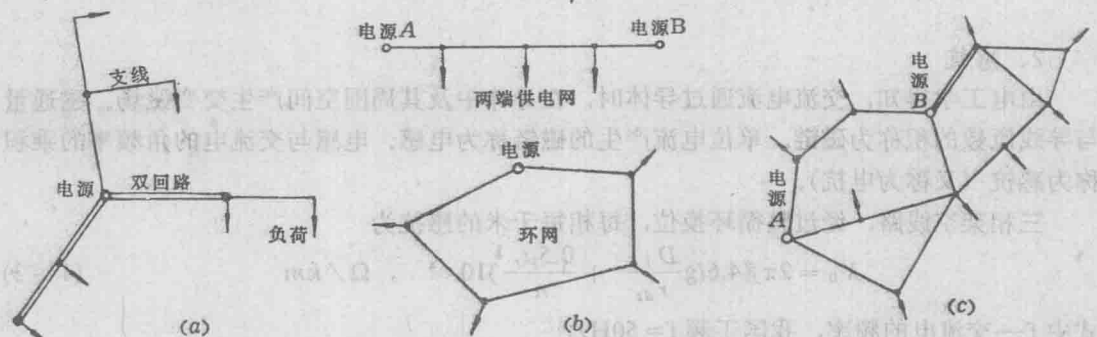


图 1-2 电力网的接线方式

(a) 一端电源供电网；(b) 两端电源供电网；(c) 多端电源供电网

2、两端电源供电网

两端电源供电网包括环网。这类供电网中的负荷可以从两个方面获得电能，因此，供电可靠性较高，可以满足重要负荷对供电不间断性的要求。两端电源供电网如图 1-2 (b) 所示。

3、多端电源供电网

多端电源供电网中负荷可以从三个或三个以上方面获得电能，如图 1-2 (c) 所示。这类供电网供电可靠，操作运行复杂，投资较大，多用于系统联系之用。

第二节 电力系统主要元件的参数及等值电路

电力系统的主要元件有：发电机、变压器、线路、电抗器等。其参数是描述元件电磁状态的物理量如：电压、电流、功率等，称为运行参数；又如：电阻、电抗、电纳、电导等，称为网络参数。本节讨论的均指元件的网络参数。

一、线路

线路是传输电能的通道，包括架空线路与电缆线路两大部分。架空线路应用较多，主要特点是投资少，便于检修，但是需占有空中与地面走廊。电缆线路投资较大，故障机会少，不需要空中走廊，主要用于发电厂及变电所进出线等拥挤地段。线路是三相对称元件，在计算参数和绘制等值电路时，只讨论其中一相的（称为参考相）。

1、电阻

电流通过导线时，单位长度导线的电阻为

$$r_0 = \frac{\rho}{nS} = \frac{10^3}{\gamma \cdot nS}, \quad \Omega / \text{km} \quad (1-1)$$

式中 S —导线的标称截面， mm^2 ；

n —每相分列导线的根数，对于普通线路 $n=1$ ；

ρ —导线材料计算用电阻率， $\Omega\text{mm}^2 / \text{km}$

γ —导线材料计算用电导率， $\text{m} / \Omega\text{mm}^2$ 。

对于铜绞线 $\rho=18.8$ ， $\gamma=53$ ；对于铝绞线和钢芯铝绞线 $\rho=31.5$ ， $\gamma=32$ 。

长度为 L 公里时，每相导线的电阻为

$$R=r_0 L, \quad \Omega \quad (1-2)$$

2、感抗

由电工学得知，交流电流通过导体时，在导体中及其周围空间产生交变磁场。磁通量与导线匝数的积称为磁链。单位电流产生的磁链称为电感。电感与交流电的角频率的乘积称为感抗（又称为电抗）。

三相架空线路，经过整循环换位，每相每千米的感抗为

$$X_0 = 2\pi f (4.6 \lg \frac{D_{jj}}{r_{dz}} + \frac{0.5\mu_r}{n}) 10^{-4} \quad \Omega / km \quad (1-3)$$

式中 f —交流电的频率，我国工频 $f=50\text{Hz}$ ；

μ_r —导线材料的相对导磁系数，对于铜线和铝及钢芯铝线， $\mu_r=1$ ；

D_{jj} —三相导线间的几何平均距离，其计算式为

$$D_{jj} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA}} \quad (1-4)$$

r_{dz} —每相导线的等值半径，其计算式为

$$r_{dz} = \sqrt[n]{r d_{cj}^{n-1}} \quad (1-5)$$

其中 n —每相分裂导线根数；

r —次导线半径；

d_{cj} —次导线几何均距

每相分裂导线示意及电磁场分布，见图 1-3

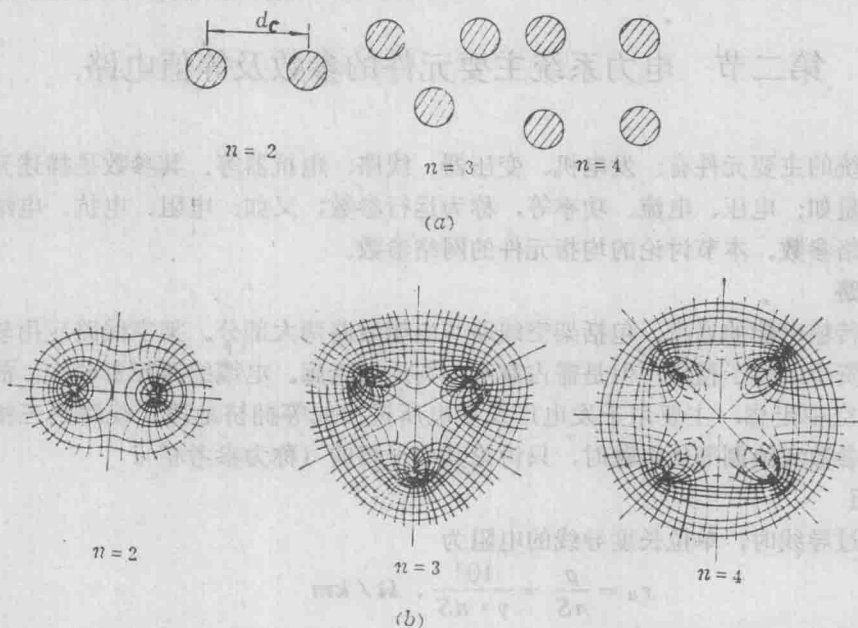


图 1-3 分裂导线示意图

(a) 每相分裂导线示意；(b) 电磁场分布

综上所述，三相普通架空线路 ($\mu_r=1$, $n=1$, $f=50\text{Hz}$) 导线每相每千米感抗的计算式为

$$X_0 = 0.1445 \lg \frac{D_{jj}}{r} + 0.0157 \quad \Omega / km \quad (1-6)$$

三相分裂导线架空线路 ($\mu_r=1$, $n>1$, $f=50\text{Hz}$)，每相每千米感抗计算式为

$$X_0 = 0.1445 l g \frac{D_{jj}}{r_{dz}} + \frac{0.0157}{n}, \Omega / km \quad (1-7)$$

长度为 L 千米, 每相导线的感抗为

$$X = x_0 L, \Omega \quad (1-8)$$

3、容纳

线路导线间, 在电压作用下形成电场, 导线电荷与电压的比值, 称为线路的电容。经整循环换位的三相架空线路, 每相每千米导线与理想中线的电容可按下式计算

$$c_0 = \frac{0.0241}{l g \frac{D_{jj}}{r_{dz}}} \times 10^{-6}, F / km \quad (1-9)$$

对于工频交流电, $f = 50\text{Hz}$, 每相每千米容性电纳为

$$b_0 = 2\pi f c_0 = \frac{7.58}{l g \frac{D_{jj}}{r_{dz}}} \times 10^{-6}, S / km \quad (1-10)$$

长度为 L 千米, 每相线路的容性电纳为

$$B = b_0 L, S \quad (1-11)$$

长度为 L 千米每相线路的电容电流为

$$I_c = \frac{U}{\sqrt{3}} B, kA \quad (1-12)$$

式中 U —线电压, kV

三相线路的电容功率(充电功率)为

$$Q_c = \sqrt{3} U I_c = U^2 B, Mvar \quad (1-13)$$

4、电导

高压线路在运行时, 除了在导线中产生与电流平方成正比的有功功率损耗外, 还在绝缘介质中产生与电压平方成正比的有功功率损耗。对于架空线路, 主要指电晕损耗和绝缘子泄漏损耗; 对于电缆线路, 主要指介质极化与泄漏损耗。这些损耗所对应的参数用电导表示。

当架空线导线表面的电场强度超过空气分子的游离强度时, 空气分子被电离为离子, 并发出“次次”的放电声, 放出臭氧 (O_3), 夜间还可以看见导线周围产生兰紫色的荧光, 这种现象称为电晕。架空线出现全面电晕时的危害有

- (1) 消耗有功功率;
- (2) 产生臭氧腐蚀金属;
- (3) 电磁波对空间无线电波产生干扰

因此, 一般设计时要避免全面电晕发生。防止电晕发生的条件是

$$U < U_{ij} \quad (1-14)$$

式中 U —架空线运行时平均电压, 若无平均电压数据时, 可近似的取 $U = U_c$;

U_{ij} —电晕临界电压, 由实验确定

如果上述不等式不能成立, 必然出现全面电晕。提高电晕临界电压的方法有

- (1) 增加导线半径, 如采用钢芯铝绞线、空芯导线、扩径导线等;
- (2) 采用分裂导线;

(3) 施工时不要磨损导线, 保持导线和金属零件表面光滑等。

虽然, 增大导线的线间距离也可以提高电晕临界电压, 但效果甚微, 反而增大线路的建设费用, 这是不应该采取的措施。

如果架空线不出现全面电晕, 泄漏损耗很小又可忽略不计, 则线路参数: 电导 $g_0 = 0$ 。

经过计算和实验, 架空线路可不必验算电晕的导线最小直径和相应的导线型号, 如表 1-3 所示。对于 330kV 及以上的超高压线路, 局部电晕损耗的有功功率, 可通过实验或实测确定。

表 1-3 可不必验算电晕的导线最小直径和相应的导线型号

额定电压 (kV)	110	220	330		500	750
			单导线	双分裂	(3~4 分裂)	(4 分裂)
导线外径(mm)	9.6	21.6	33.6			
相应导线型号	LGJ-50/8	LGJ-240/30	LGJ-630/45	2×LGJ-240/30	3×LGJ-400/25	4×LGJ-400/25

在计算线路参数时, 对于额定电压 $U_e < 35\text{kV}$ 的架空线路, 由于电压较低, 线路较短, 由电容引起的充电功率小, 可以忽略不计。所以, 这类线路的网络参数只计电阻、感抗两项。

5. 线路的等值电路

由于三相线路是对称元件, 等值电路只画出参考相的。线路的实际参数是均匀分布的, 可用图 1-4 (a) 所示的链型电路造型。链型电路应用时很不方便, 在不考虑电导的情况下, 一般线路所用的等值电路为如图 1-4 (b)、(c) 所示的 Π 型电路或 T 型电路。采用 T 型等值电路时, 电路中增加了一个结点, 给以后的计算工作增加了工作量, 所以, 对于电压为 110kV 及以上线路, 多采用 Π 型等值电路。对于电压在 110kV 以下的线路, 由于电容电纳及其通过的电容功率较小, 可以忽略不计, 所以, 采用一字型等值电路 (图 1-4 (d))。

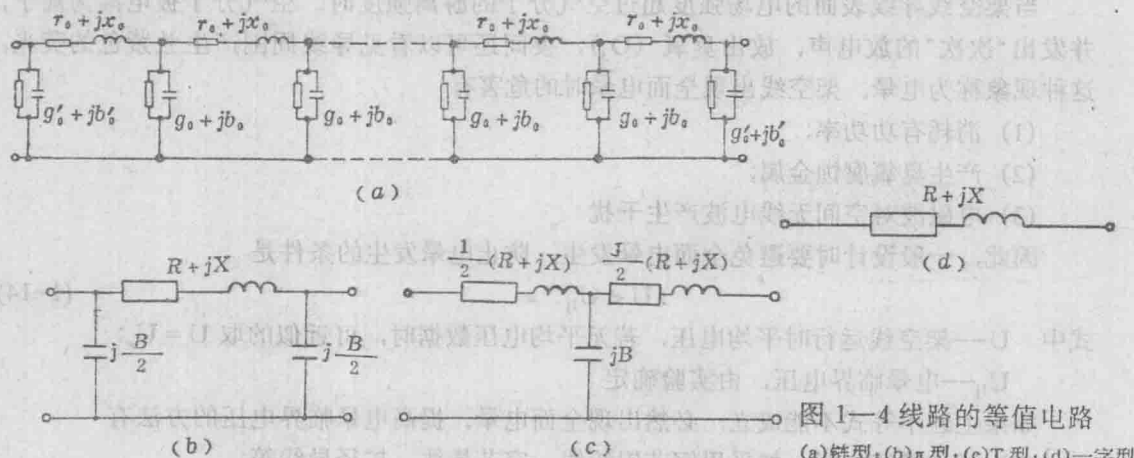


图 1-4 线路的等值电路
(a) 链型; (b) Π 型; (c) T 型; (d) 一字型

采用 Π 型或一字型等值电路时, 实际上是将线路均匀分布的参数, 用集中参数所代替。这样所引起的误差, 对于长度小于 300km 的架空线路与长度小于 50~100km 的电缆线路很小, 可以略去不计。若线路长度超过上述规定, 仍用集中参数等值电路时, 应乘以参数修正系数。在不考虑电导的情况下, 采用集中参数 Π 型等值电路, 参数修正系数为

$$\begin{aligned} \text{电阻修正系数} \quad k_r &= 1 - \frac{l^2}{3} x_0 b_0 \\ \text{感抗修正系数} \quad k_x &= 1 - \frac{l^2}{b} (x_0 b_0 - r_0^2 \frac{b_0}{x_0}) \\ \text{容纳修正系数} \quad k_b &= \frac{3 + k_r}{2(1 + k_r)} \end{aligned} \quad (1-15)$$

式中 l — 线路的长度, km;

r_0 — 线路每公里电阻, Ω/km ;

x_0 — 线路每公里感抗, Ω/km ;

b_0 — 线路每公里容纳, Ω/km ;

例题 1-1 有一额定电压为 10kV 的架空线路, 长度为 25km, 采用 LJ-50 导线, $D_{jj}=1\text{m}$, $d=9\text{mm}$ 试求参数并画等值电路。

$$\text{解: } r_0 = \frac{\rho}{S} = \frac{31.5}{50} = 0.63 \, \Omega/\text{km}$$

$$\begin{aligned} x_0 &= 0.1445 \lg \frac{D_{jj}}{r} + 0.0157 = 0.1445 \lg \frac{2 \times 1000}{9} + 0.0157 \\ &= 0.355 \, \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

所以

$$R = r_0 l = 0.63 \times 25 = 15.75 \, \Omega$$

$$X = x_0 l = 0.355 \times 25 = 8.88 \, \Omega$$

等值电路如图 1-5 所示

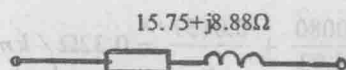


图 1-5 例题 1-1 附图

例题 1-2 有一额定电压为 110kV 的架空线路, 长度为 100 公里, 采用 LGJ-240/30 导线, $D_{jj}=5\text{m}$, $d=21.6\text{mm}$, 试求参数并画等值电路。

$$\text{解: } r_0 = \frac{\rho}{S} = \frac{31.5}{240} = 0.13 \, \Omega/\text{km}$$

$$x_0 = 0.1445 \lg \frac{D_{jj}}{r} + 0.0157 = 0.1445 \lg \frac{2 \times 5000}{21.6} + 0.0157$$

$$= 0.4 \Omega / km$$

$$b_0 = \frac{7.58}{lg \frac{D_{jj}}{r}} \times 10^{-6} = \frac{7.58}{lg \frac{2 \times 500}{21.6}} \times 10^{-6}$$

$$= 2.84 \times 10^{-6} S / km$$

所以

$$R = 0.13 \times 100 = 13 \Omega$$

$$X = 0.4 \times 100 = 40 \Omega$$

$$B = 2.84 \times 10^{-6} \times 100 = 2.84 \times 10^{-4} S$$

$$Q_c = 110^2 \times 2.84 \times 10^{-4} = 3.44 Mvar$$

等值电路示于图 1-6。

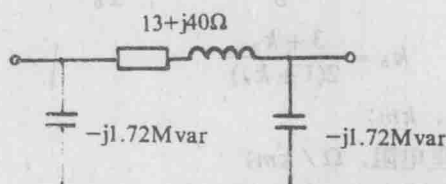


图 1-6 例题 1-2 附图

例题 1-3 有一条额定电压为 330kV 的架空线路，长度为 600km，每相采用双分裂导线，次导线为 LGJ-300/25，外径为 23.76mm，次导线间距为 400mm，相间距离为 8m，水平排列，试求参数并画等值电路。

解：

1、求每相每公里参数

$$r_0 = \frac{\rho}{nS} = \frac{31.5}{2 \times 300} = 0.053 \Omega / km$$

每相导线等值半径

$$r_{ds} = \sqrt[n]{r d_{ej}^{n-1}} = \sqrt{\frac{1}{2} \times 23.76 \times 400} = 68.93 mm$$

相间几何均距

$$D_{jj} = \sqrt[3]{2 \times 8 \times 8 \times 8} = 1.26 \times 8 = 10.08 m$$

所以

$$x_0 = 0.1445 lg \frac{10080}{68.93} + \frac{0.0157}{2} = 0.32 \Omega / km$$

$$b_0 = \frac{7.58}{lg \frac{10080}{68.93}} \times 10^{-6} = 3.5 \times 10^{-6} S / km$$

查表 1-3，线路运行时，不会出现全面电晕，所以 $g_0 = 0$

2、求参数修正系数

$$k_r = 1 - \frac{l^2}{3} x_0 b_0 = 1 - \frac{600^2}{3} \times 0.32 \times 3.5 \times 10^{-6}$$

$$= 1 - 0.1344 = 0.8656$$

$$\begin{aligned} k_x &= 1 - \frac{l}{6} (x_0 b_0 - r_0^2 \frac{b_0}{x_0}) \\ &= 1 - \frac{600^2}{6} (0.32 \times 3.5 \times 10^{-6} - 0.053^2 \times \frac{3.5}{0.32} \times 10^{-6}) \\ &= 1 - 60000 (1.12 \times 10^{-6} - 0.0307 \times 10^{-6}) \\ &= 1 - 0.06536 = 0.9346 \end{aligned}$$

$$k_b = \frac{3 + k_r}{2(1 + k_r)} = \frac{3 + 0.8656}{2(1 + 0.8656)} = 1.0360$$

3、求线路Π型等值电路的参数

$$R = r_0 \times lk_r = 0.053 \times 600 \times 0.8656 = 27.53\Omega$$

$$X = x_0 lk_x = 0.32 \times 600 \times 0.9346 = 179.44\Omega$$

$$B = b_0 lk_b = 3.5 \times 10^{-6} \times 600 \times 1.036 = 0.218 \times 10^{-2} S$$

$$Q_c = U^2 B = 330^2 \times 0.218 \times 10^{-2} = 237.4 Mvar$$

等值电路如图 1-7 所示。由例题 1-3 计算结果看出，超高压线路电容充电功率很大，一般需要并联电抗补偿。

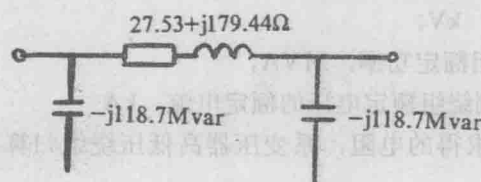


图 1-7 例题 1-3 附图

二、双绕组变压器

1、双绕组变压器的等值电路

双绕组变压器是对称的三相电气元件，等值电路可只画其中参考相的，如图 1-8 所示。等值电路用 1-8 (a) 所示的 T 型电路时，中间多了一个结点，为了简化计算，可以将变压器的激磁阻抗移至电源侧，并用激磁导纳表示，这样表示是近似的，如图 1-8 (b)。变压器的激磁阻抗等值变换为激磁导纳的关系式为

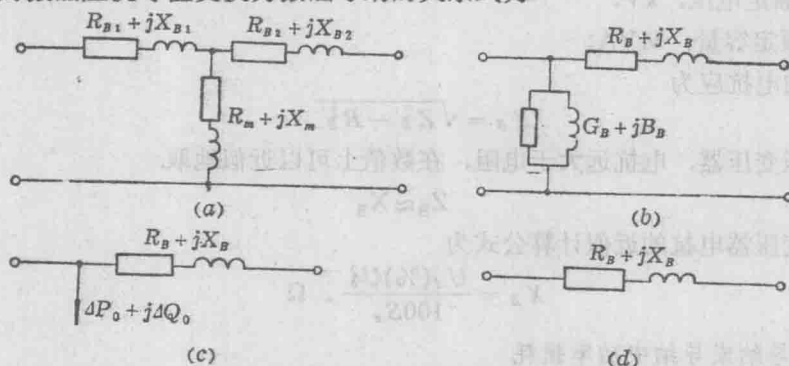


图 1-8 双绕组变压器的等值电路

(a) T 型电路；(b) Γ 型电路；(c) Γ 型电路（以功率表示激磁损耗）；(d) 简化电路（一字型）

$$Y_B = \frac{1}{R_m + jX_m} = \frac{R_m - jX_m}{(R_m + jX_m)(R_m - jX_m)} \\ = \frac{R_m}{R_m^2 + X_m^2} - j \frac{X_m}{R_m^2 + X_m^2} = G_B - jB_B \quad (1-16)$$

对于变压器高压侧的额定电压在 35kV 及以下时, 激磁回路损耗的功率很小, 可以忽略不计, 变压器的等值电路可以简化为图 1-8 (d) 所示的一字型电路。

2、电阻

变压器的电阻与绕组中有功功率损耗有关, 而绕组的有功损耗又近似地等于短路损耗。变压器的短路损耗为

$$\Delta P_d = 3I_e^2 R_B = \frac{S_e^2}{U_e^2} R_B$$

所以, 变压器的电阻计算式为

$$R_B = \frac{\Delta P_d U_e^2}{S_e^2}, \Omega \quad (1-17)$$

式中 ΔP_d —变压器短路损耗, MW;

U_e —额定电压, kV;

S_e —变压器三相额定功率, MVA;

I_e —对应于某侧绕组额定电压的额定电流, kA

由式 (1-17) 所求得电阻, 系变压器高低压绕组归算在一侧额定电压下的电阻之和。

3、电抗

根据短路电压的定义, 变压器的短路电压百分数为

$$U_d(\%) = \frac{\sqrt{3} I_e Z_B}{U_e} \times 100 = \frac{S_e Z_B}{U_e^2} \times 100$$

所以, 变压器的阻抗为

$$Z_B = \frac{U_d(\%) U_e^2}{100 S_e}, \Omega \quad (1-18)$$

式中 U_e —额定电压, kV;

S_e —额定容量, MVA;

变压器的电抗应为

$$X_B = \sqrt{Z_B^2 - R_B^2} \quad (1-19)$$

对于高压变压器, 电抗远大于电阻, 在数值上可以近似地取

$$Z_B \approx X_B$$

所以, 变压器电抗的近似计算公式为

$$X_B = \frac{U_d(\%) U_e^2}{100 S_e}, \Omega \quad (1-20)$$

4、激磁导纳或导纳中功率损耗

变压器激磁导纳中功率损耗包括电导中的空载有功损耗 (ΔP_0) 与电纳中的激磁无功损耗 (ΔQ_0) 两部分。其中 ΔP_0 可直接从产品铭牌中查出; 而激磁无功损耗可用空载电流