



河北工业大学
Hebei University of Technology

电气工程学院
School Of Electrical Engineering



第一章 电力系统及其发展

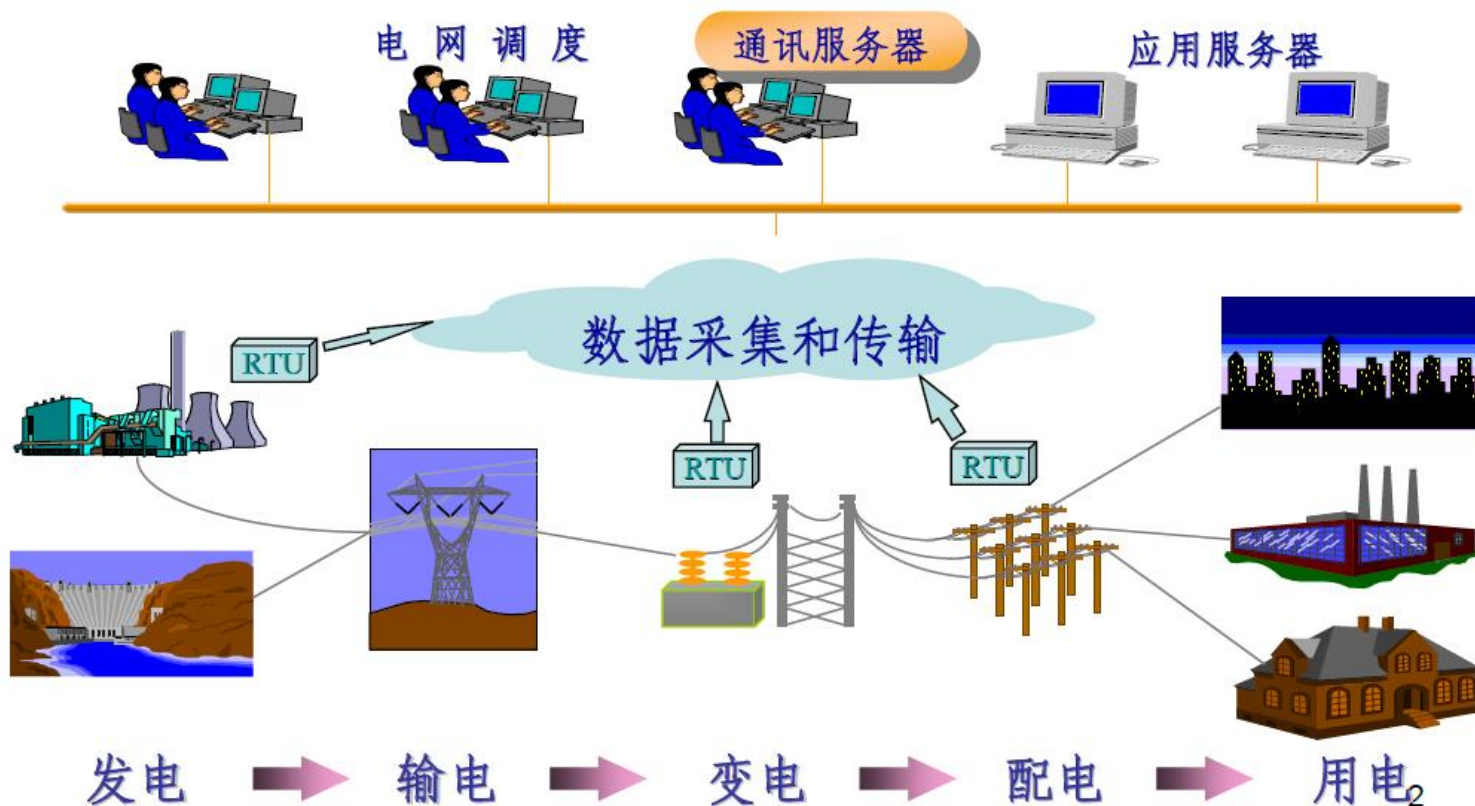
本章主要内容：

电力系统、电力系统主要元件、电力系统运行方式的初步认识

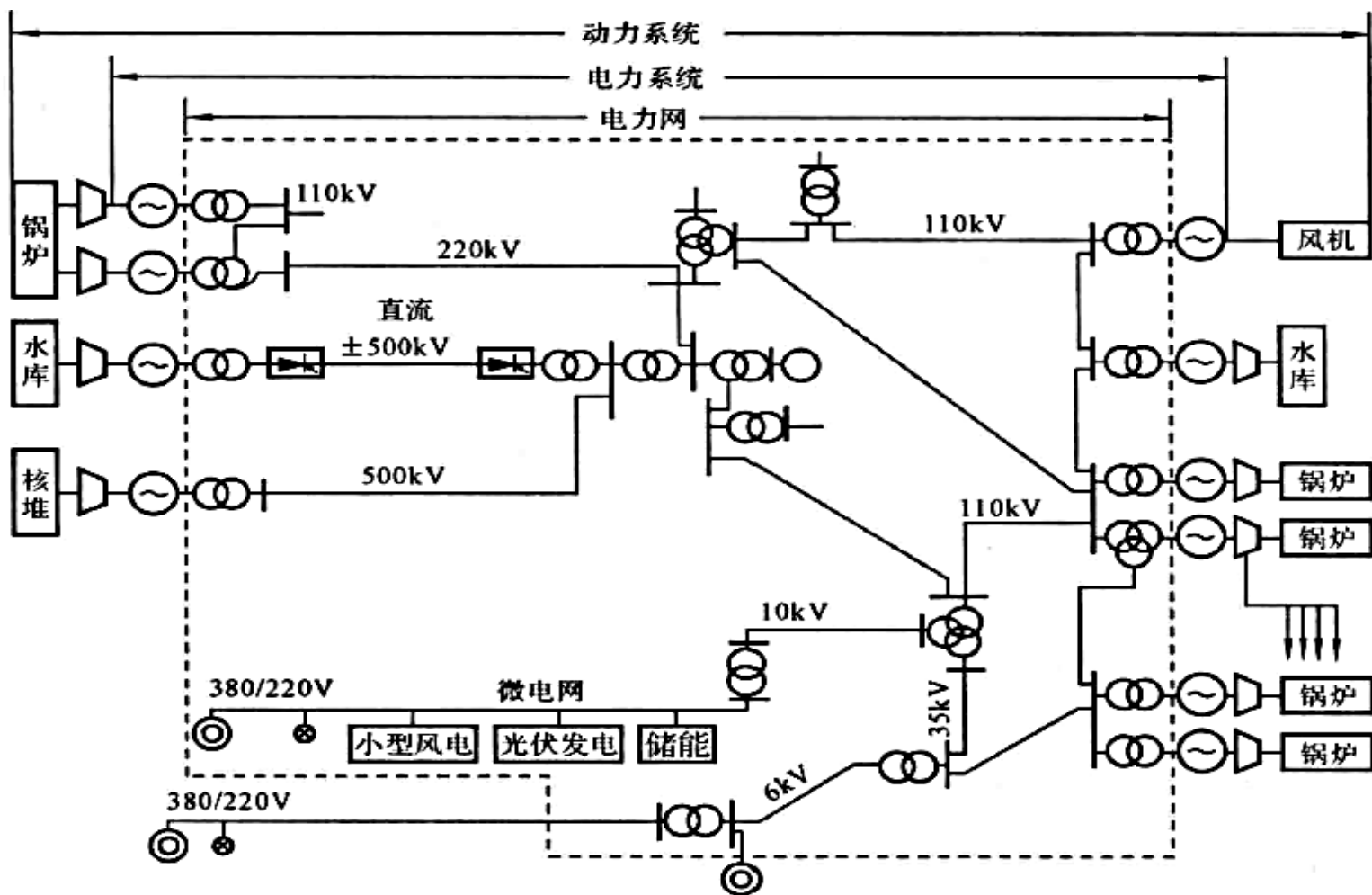


1.1 电力系统及其发展

二、电力系统及其组成



电力系统由发电厂、输配电系统(电力网络)及负荷组成的统一整体，包括**发电、输电、变电、配电及用电**五个环节，在传统电网中**功率流单向流动**，通常覆盖广阔的地域。



电力网：由变压器、变换器、电力线路组成。

电力系统：由发电机、变压器、变换器、电力线路、用电设备组成

动力系统：由发电厂动力部分、电力系统、用户侧动力部分组成



电力网的类型：根据电压的高低和供电范围的大小，分为**地方电力网**、**区域电力网**及**超高压远距离输电网**三种。

- **地方电力网**：电压等级在35kV及以下、供电半径在20 ~ 50km以内的中压电力网，又称配电网；
- **区域电力网**：电压等级在35kV以上、供电半径在50 ~ 300km的电力网：各省区的高压电力网；
- **超高压远距离输电网**：电压等级为330 ~ 750kV、供电半径在300 ~ 1000km的电力网。

通常，220kV及以上的电力线路称为**输电线路**，110kV及以下的电力线路称为**配电线路**。配电线路又分为高压配电线路（110kV）、中压配电线路（6 ~ 35kV）和低压配电线路（380/220V）。



变电所：是变换电能电压和接受、分配电能的场所。类型：

- **区域（枢纽）变电所：**连接电力系统中高压和中压的几个电压等级，汇集多个电源，变压器容量大，进出线回路数多，高压侧电压330~500kV，全所停电后，将引起整个系统解列甚至瓦解；
- **地区（中间）变电所：**将发电厂、枢纽变电所和负荷中心联系起来，可以向附近用户供电，也可以中转一部分电能到别的负荷中心，高压侧电压为110~220kV，全所停电后，将使该地区中断供电；
- **终端变电所：**是电网的末端变电所，其高压侧为10~110kV，全所停电后，将使用户中断供电。

配电所：只接受和分配电能，不变换电压。

电力用户：消耗电能，将电能转换成其他形式能量。



二、电力系统发展简史（自学，参考教材P4-10及网络资源）

1、电力系统分析理论与方法的发展过程

第一阶段：

电力工业初期（19世纪80年代—20世纪40年代）

小系统，手工计算。 20世纪30年代**PARK理论**的提出是电力系统发展史上的里程碑。



第二阶段：

20世纪40年代—20世纪80年代后期

电力系统规模发展和分析方法计算机化，高压直流输电出现。



第三阶段：

20世纪80年代后期至今

现代电力系统时代，系统规模、组成和运行（运营）方式发生了巨大改变。



2, 现代电力系统分析面临的问题

现代电力系统的重要标志：大容量、超大规模、超高压、交直流混合，以及信息化、柔性化和市场化。无论从电力系统规划还是运行控制，都面临一些新问题和要求：

1) 计算机技术的广泛应用。潮流分析、静态、动态安全分析、稳定性分析，利用信息技术、现代通信技术对电力系统进行更准确、快速控制。

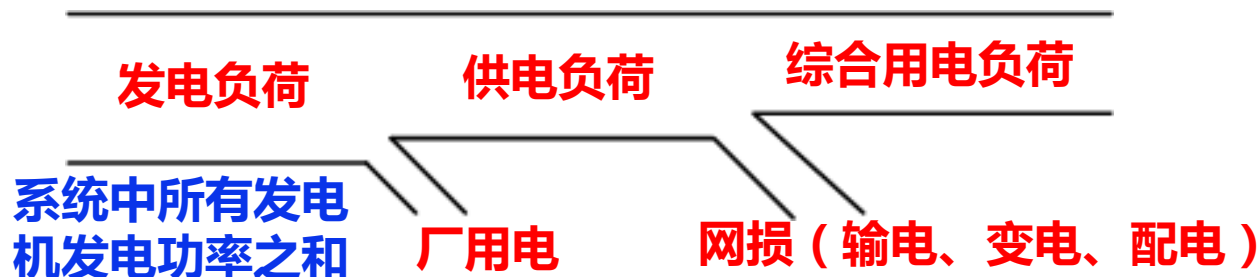
2) 电力电子技术在电力系统中的广泛应用，柔性交/直流输电技术在提高系统输电能力、稳定极限、改善系统特性等的建模分析、潮流分析等。

3) 大规模分布式电源的接入。

4) 电力市场化引起的最优潮流、潮流阻塞与阻塞管理等，要求进一步提供电力系统新的理论、分析方法、模型和算法。



三、电力系统的负荷与负荷曲线

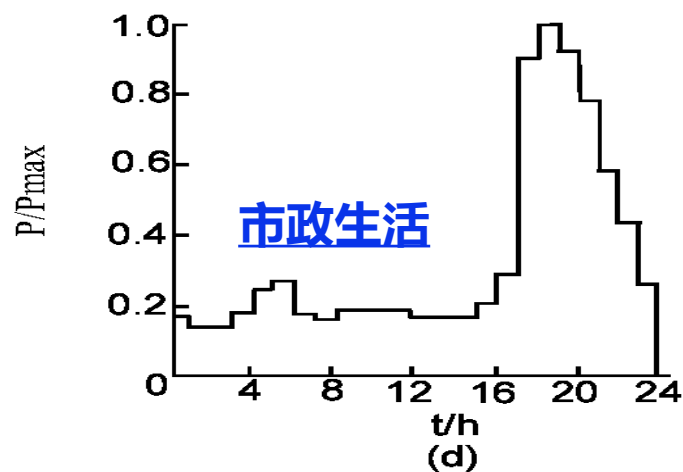
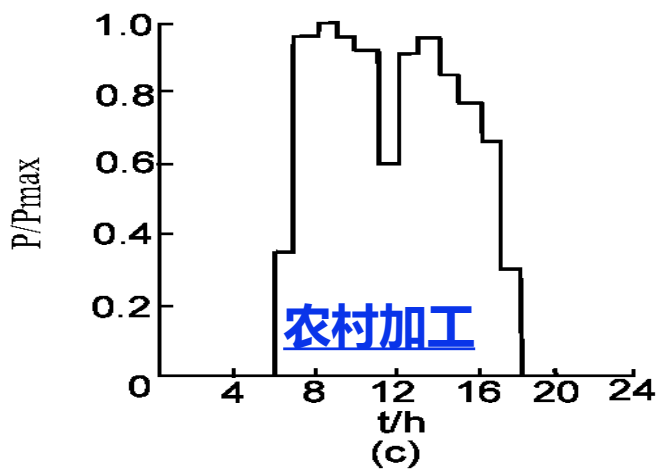
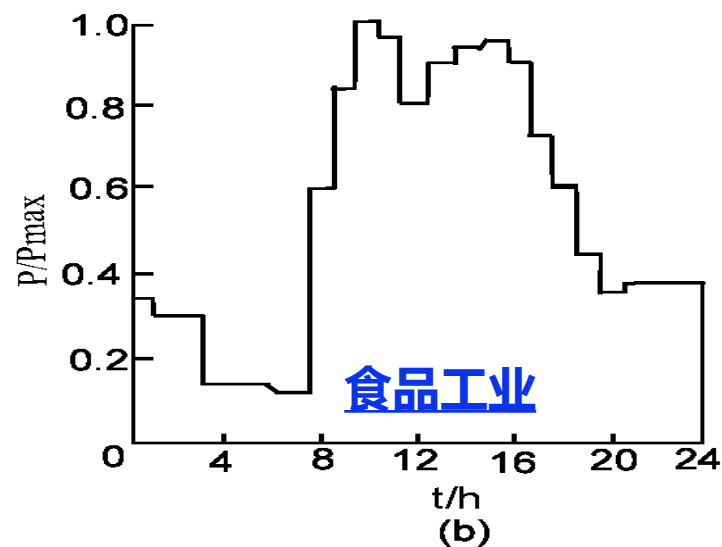
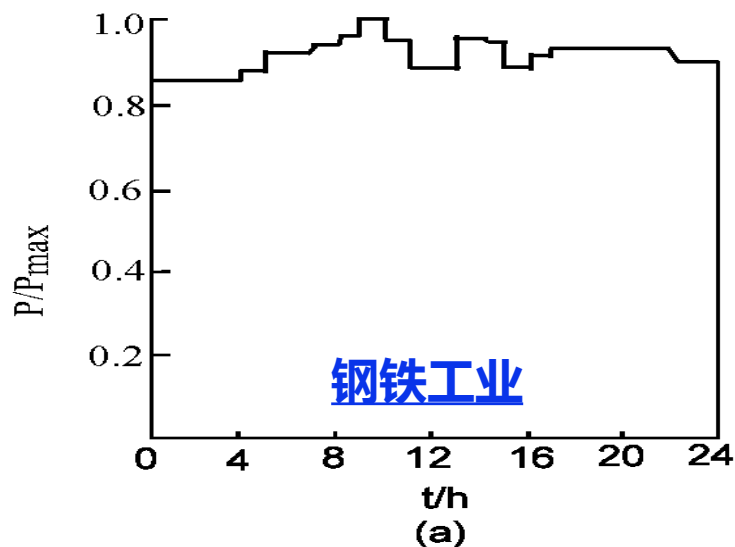


负荷曲线是电力系统重要技术资料，是调整发电任务的重要参考依据。

两种 { 有功功率负荷曲线: $P = p(t)$
无功功率负荷曲线: $Q = q(t)$

按照**计量位置**不同，可划分为 { 用户负荷曲线
电力线路负荷曲线
变电所负荷曲线
发电厂负荷曲线
系统负荷曲线

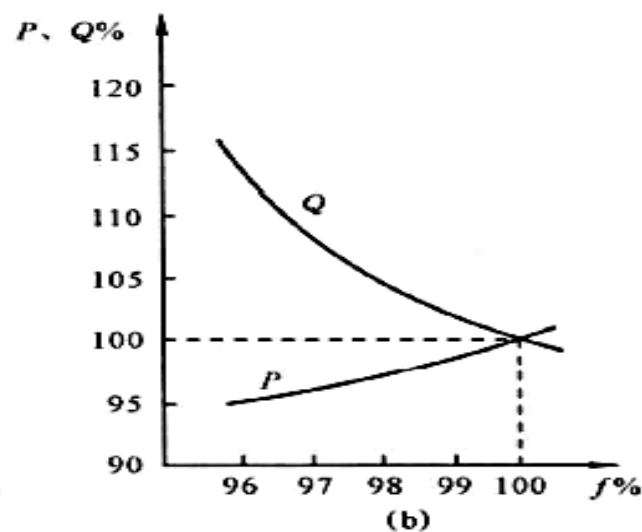
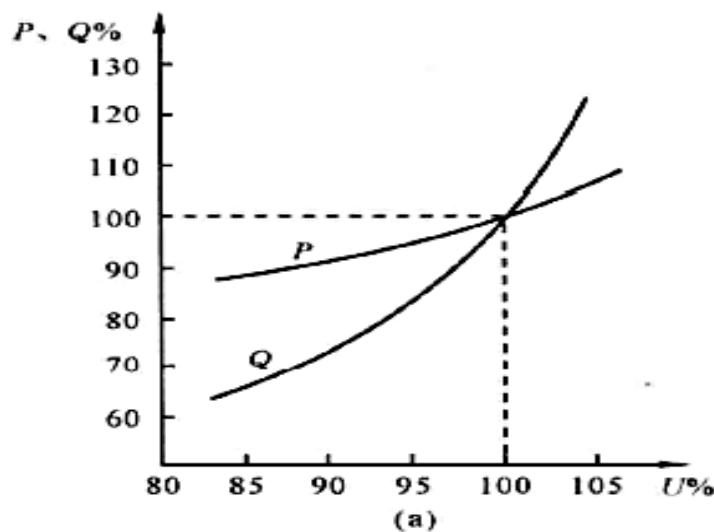
按照**计量时段**不同，可划分为 { 日负荷曲线
月负荷曲线
年负荷曲线



- 1) 系统负荷曲线的最大值恒小于各行业负荷曲线最大值之和；
- 2) 定义系统最大负荷与各行业最大负荷之和的比值为同时率，同时率恒小于1。



- 3) 系统负荷曲线为各行业负荷曲线之和，系统的负荷曲线相对平坦；
- 4) 各用电设备的有功功率与无功功率和系统频率、电压的关系不尽相同。
- 一般地，有功功率与电压、频率呈正相关特性，无功功率与电压呈正相关特性，而与频率呈负相关特性；



5) 负荷率的概念 (以日负荷为例)

$$A = \int_0^{24} P dt \Rightarrow P_{av} = \frac{A}{24} = \frac{1}{24} \int_0^{24} P dt$$

$$\text{负荷率} = \frac{P_{av}}{P_{\max}} \times 100\%$$

显然，负荷率反映了负荷曲线的平坦程度。



三、电力系统中的发电厂

1、火力发电：以化石能源驱动汽轮机，占电力系统绝大多数发电容量



火力发电（Thermal Power，Thermoelectricity Power Generation），一般是指利用可燃物燃烧时产生的热能来加热水，使水变成**高温、高压水蒸气**，然后再由水蒸气**推动发电机来发电**的方式的总称。以可燃物作为燃料的发电厂统称为火电厂。

火力发电厂主要设备系统包括：燃料供给系统、给水系统、蒸汽系统、冷却系统、电气系统及其他一些辅助处理设备。



2, 水力发电：以水头差驱动水轮机，占电力系统较大比重



水力发电(Hydroelectric power)利用河流、湖泊等位于高处具有势能的水流至低处，将其中所含势能转换成水轮机之动能，再借水轮机为原动力，推动发电机产生电能。

按**集中落差方式**分类：堤坝式水电厂、引水式水电厂、混合式水电厂、潮汐水电厂和抽水蓄能电厂。

按**径流调节程度**分类：无调节水电厂和有调节水电厂

按水电站**装机容量大小**分类：小型（5MW以下）、中型（5-100MW）和大型（100MW以上）水电站。



3, 核能发电：以核动力驱动汽轮机，占电力系统较小比重





4, 风力发电



5, 光伏发电





四、电力系统的基本参量、结构与结线

1、基本参量

1) 总装机容量：系统所有发电机（含冷备用）容量之和，通常用 MW、GW、TW 衡量。

2) 最大负荷：规定时间内有功功率负荷的最大值；

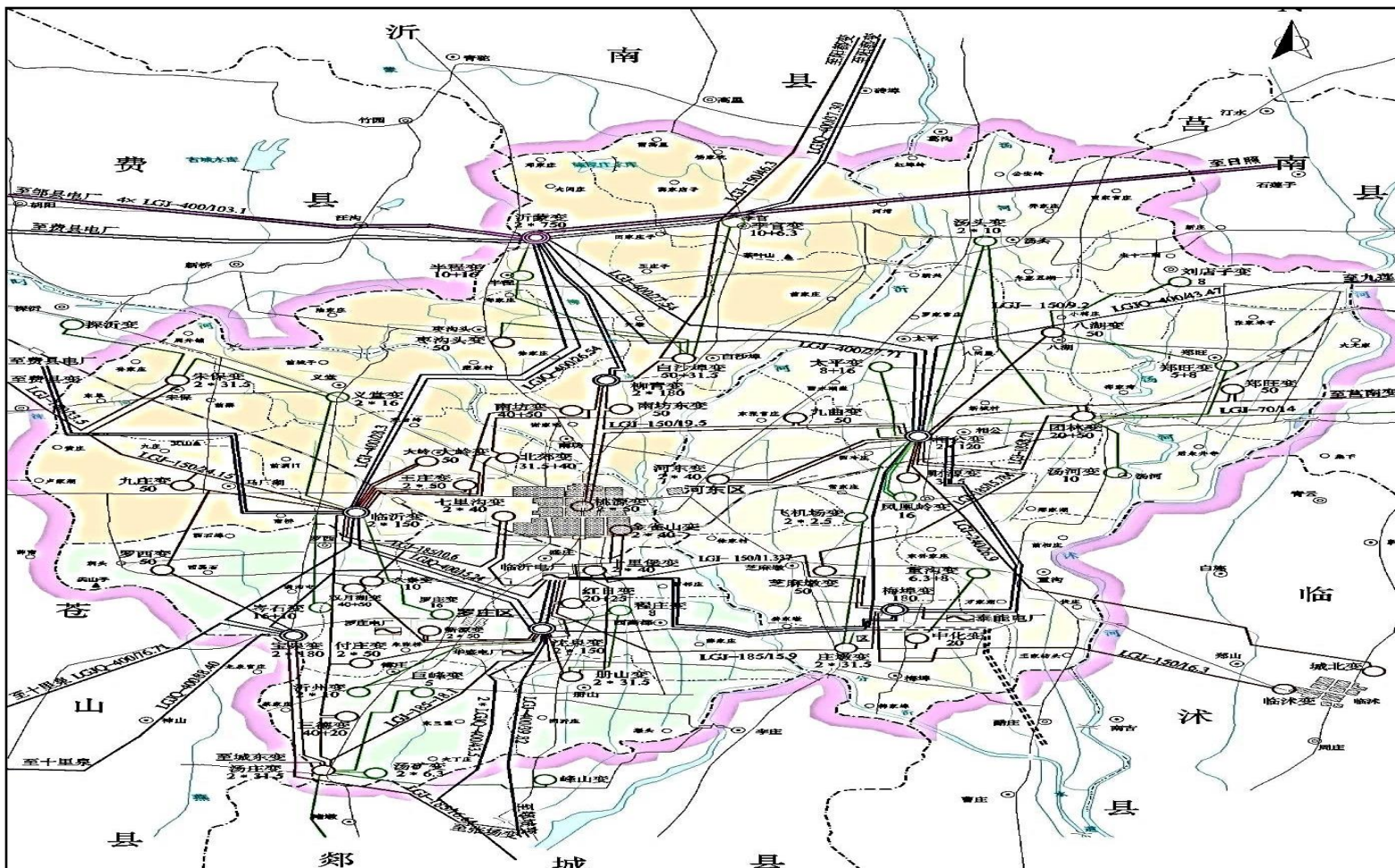
3) 年发电量：系统年实际发电量之和。至2018年，全球的发电总量达到255512.8亿千瓦时，**中国发电量为64951.4亿千瓦时，独占全球发电量的四分之一，发电量位居世界第一，相当于美国、俄罗斯、日本这三个国家的发电量之和。**

4) 额定频率：50Hz

5) 最高电压等级：同一电力系统中最高电压等级；

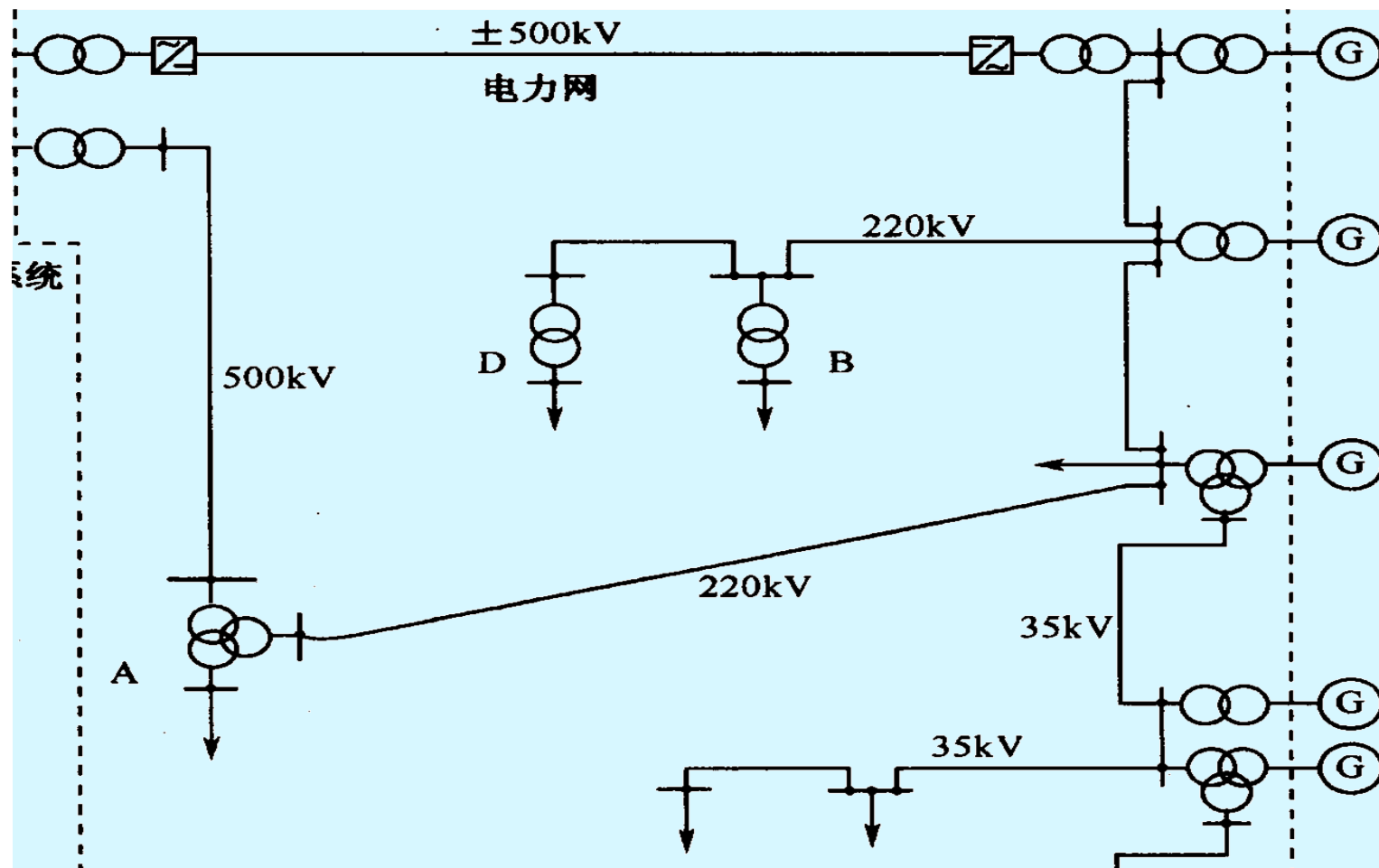


6) 地理结线图：体现电力系统中发电厂、变电所的地理位置，线路的路径、长度及相互联结；



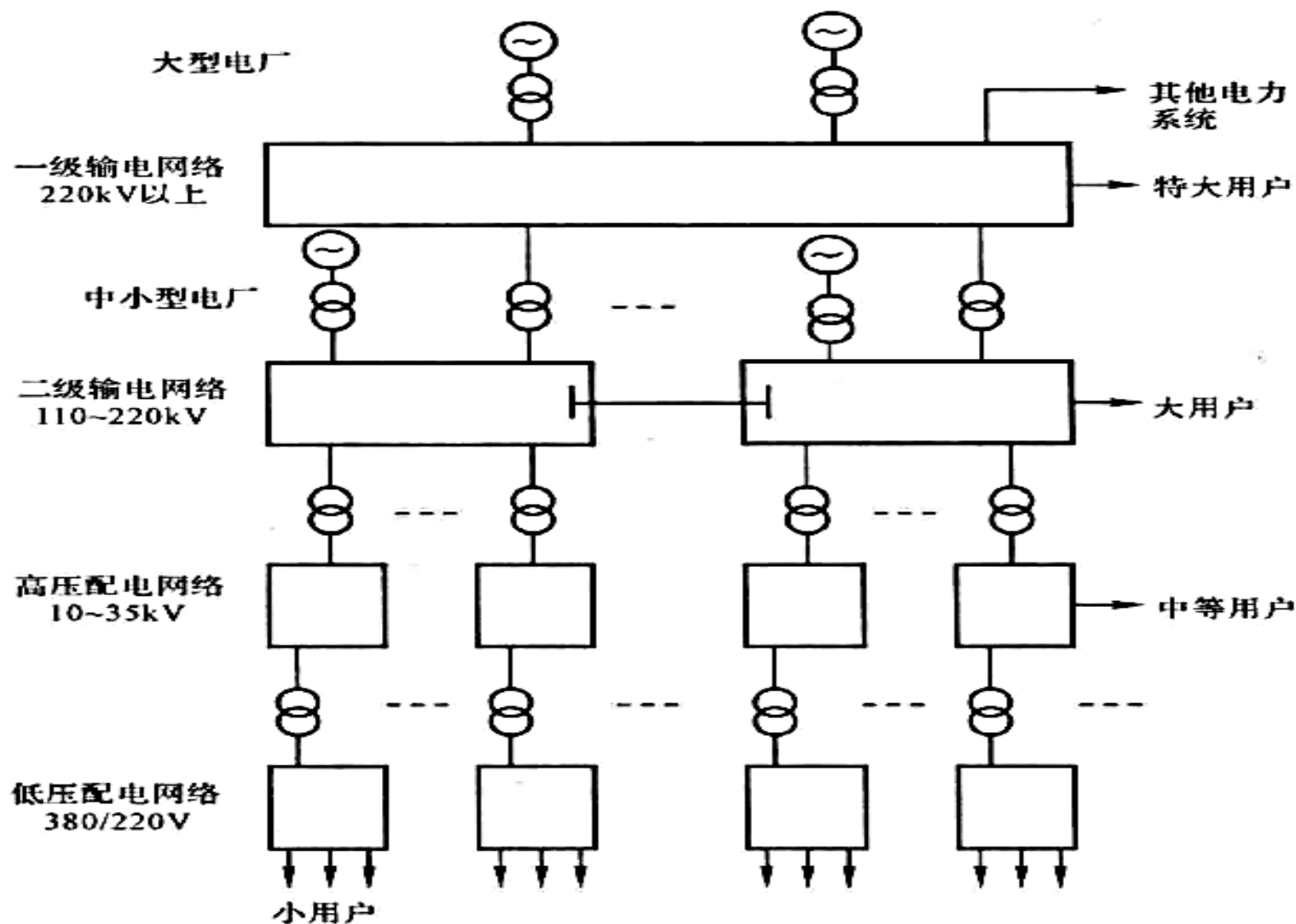


7) 电气结线图：体现电力系统中的发电机、变压器、母线、断路器、电力线路等主要元件之间的电气连接。



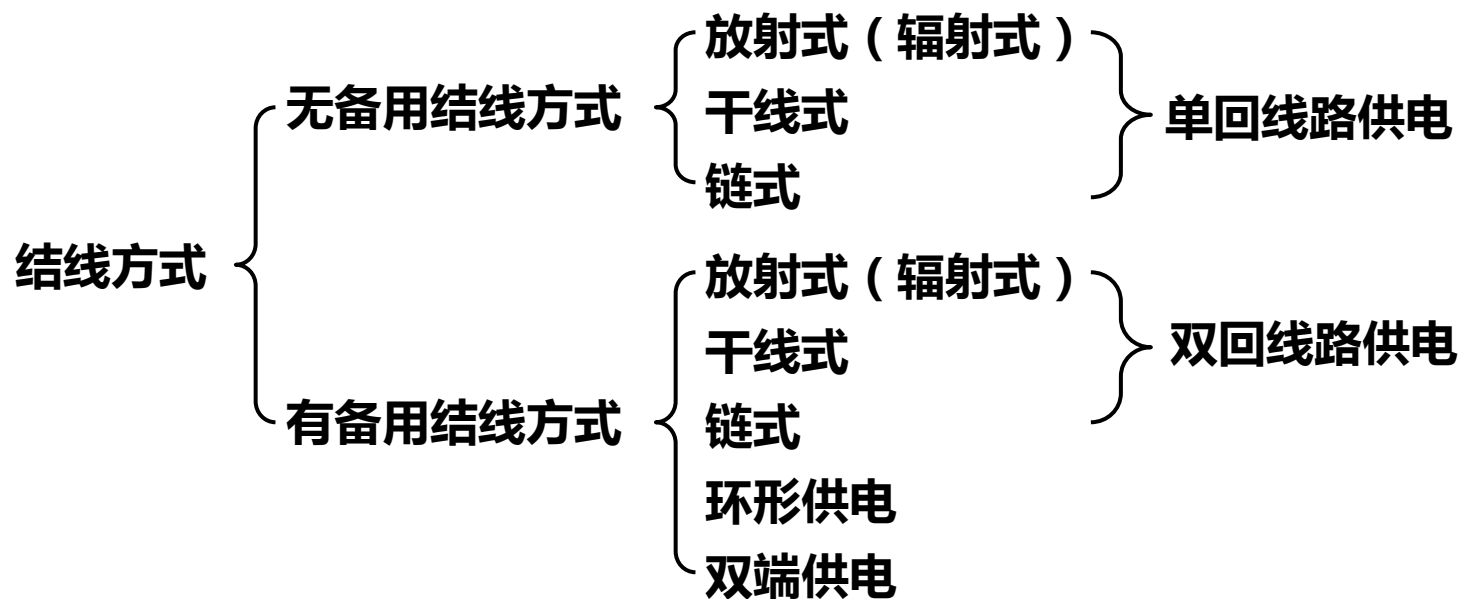


2. 基本结构

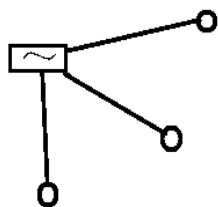




3, 基本结线方式：无备用、有备用

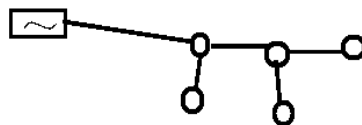


无备用结线：负荷点只能从一回路径获得电能，供电可靠性较差。



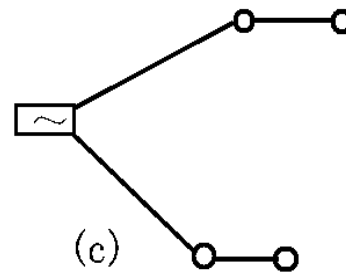
(a)

放射式



(b)

干线式



(c)

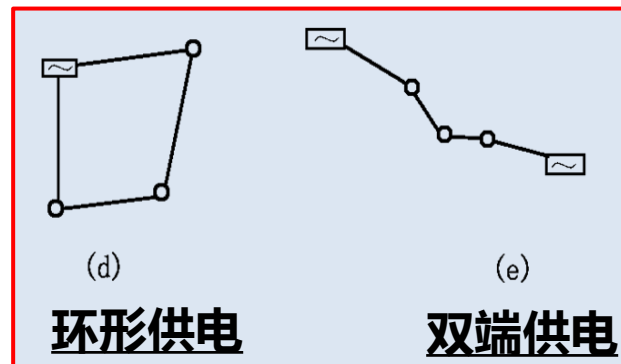
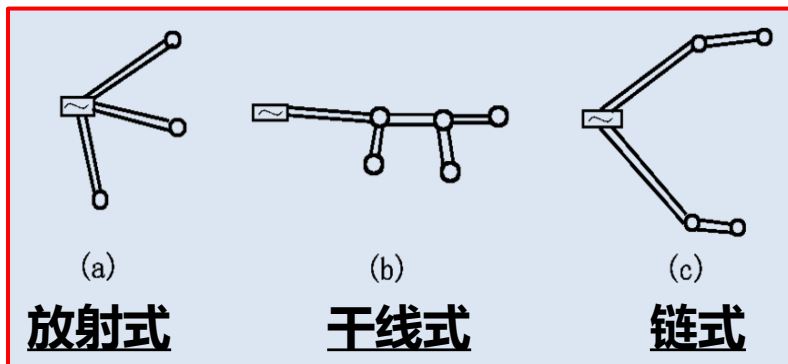
链式



有备用结线：负荷点至少能从两回路路径获得电能，供电可靠性较高。

利用双回供电实现备用

改变供电方式实现备用



五、电力系统的电压等级与额定电压

制定电压等级的基本原则：

- 1) 在一个国家的电力系统内，宜选用**一种电压系列**；
- 2) 在同一电力系统内，电压等级差一般为**2~3倍**；
- 3) 在同一电压等级中，电力系统不同元件（发电机、变压器、电力线路、用电设备）的额定电压略有不同。
- 4) 我国常用电压等级：3kV，6kV，10kV，35kV，110kV，220kV，330kV，500kV，750kV，1000kV。



表 1-2 额 定 电 压 等 级（单位：kV）

用 电 设 备 额 定 线 电 压	交 流 发 电 机 线 电 压	变 压 器 线 电 压	
		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
35		35	37 及 38.5
110		110	115 及 121
220		220	232 及 242
330		330	345 及 363
500		500	525 及 550
750		750	788 及 825
1000		1050	1050

电力元件额定电压等级选择原则

某一电压级的额定电压是以系统的额定电压（用电设备额定电压）为中心而定的。具体如下：



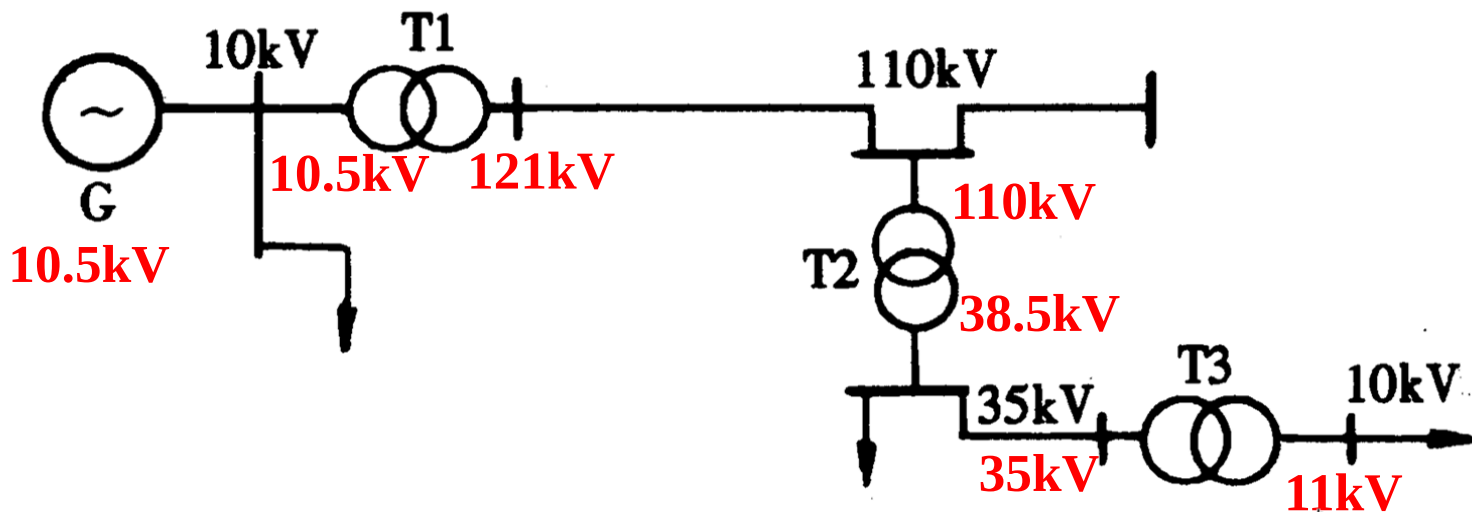
线路：与系统的额定电压相同（用电设备额定电压）。

发电机：通常应比系统的额定电压高5%。

变压器：一次侧相当于用电设备，其额定电压与系统相同；与发电机直接相连时，则与发电机相同。二次侧相当于电源，其额定电压应比系统高5%，考虑变压器内部的电压损耗（5%），实际应定为比线路高10%。

注意：二次侧直接与用电设备相连且线路较短时，其二次侧额定电压比系统高5%。

例：简单电力系统如下图，确定各元件额定电压（此类题目为国家电网招工考试常考题目）。





架空线路不同电压等级输电功率和输送距离

线路电压 (kV)	输电功率 (MW)	输送距离 (km)	线路电压 (kV)	输电功率 (MW)	输送距离 (km)
3	0.1-1.0	1-3	220	100-500	100-300
6	0.1-1.2	4-15	330	200-800	200-600
10	0.2-2.0	6-20	500	1000-1500	150-850
35	2.0-10.0	20-50	750	2000-2500	>500
110	10.0-50.0	50-150	1000	>2500	>1000

由上可知：

- 1) 供电距离、输电功率均随电压等级升高而加大；
- 2) 提高供电距离、输电容量的基本方法之一是提高输电线路的电压等级。



六、电力系统运行的特点和要求

运行特点：

- 1) 与国民经济各部门之间的关系密切；
- 2) 电能不易大量存储；
- 3) 电能的生产、输送、消费各环节为统一整体，不可分割；
- 4) 电能的生产、输送、消费各环节工况改变十分迅速，过渡过程短暂。

运行要求：

1) 保证安全、可靠、持续供电；

三级负荷划分：

一级负荷：可造成人身事故，设备损坏，生产长期不能恢复，人民生活发生混乱等；(必须保证不间断供电)

二级负荷：可造成大量减产，使人民生活受到影响；(尽可能保证供电)

三级负荷：不属于第一、二级的负荷。

2) 保证良好的电能质量；

3) 保证系统运行的经济性 (煤耗率、网损率等)。



七、电力系统中性点的运行方式

电力系统中变压器、发电机的中性点与大地之间的连接方式，涉及电力系统多个方面，对电力系统的设计和运行有多方面影响。

以系统零序电抗与正序电抗的比值划分 $\begin{cases} X_0 / X_1 \leq 3, \text{ 直接接地} \\ X_0 / X_1 > 3, \text{ 非直接接地} \end{cases}$

项目	接地方式					
	不接地	实接地 (单点)	实接地 (多点)	低阻抗接地	高阻抗接地	谐振接地 (消弧线圈接地)
使用国家	Italy, Japan, Ireland, Russia Peru, Spain China	Great Britain	USA, Canada Australia Latin America	France Spain		Northern and Eastern Europe, China Israel
负荷连接	Ph-Ph	Ph-Ph, Ph-N	Ph-Ph, Ph-G	Ph-Ph	Ph-Ph	Ph-Ph
过渡过程电压	Bad($4-4.5U_p$)	Good	Good	Good	Good(R-Grd) Bad(L-Grd)	Average($<4U_p$)
相地故障运行	Not Always	No	No	No	Not Always	Almost Always
人身安全	Average	Good	Bad	Good	Average	Good
故障后供用电设备热效应	Low	High	High	High	Low	Lowest
通讯干扰	Average	High	High	High	Low	Lowest
接地保护灵敏度	Average	Good	Bad	Good	Average	Average



1.2 电力系统基本元件概述

一、发电机（同步发电机）

$n = 60 f / p$ ，发电频率与同步发电机转速有严格对应关系

- ┌ 汽轮发电机：3000转/分，转速高，转子转动惯量小，卧式结构
- └ 水轮发电机：转速低，转子转动惯量大
- ┌ 直流励磁系统：通常用于中、小容量
- └ 可控硅交流励磁系统：大容量发电机

二、电力变压器（总容量为系统发电机装机容量的6—8倍）



按**用途**可分为：

- ┌ 升压变压器
- └ 降压变压器
- ┌ 配电变压器
- └ 联络变压器

R10容量系列（按 $\sqrt[10]{10}$ 倍率递增）：
1, 1.25, 1.6, 2, 2.5, 3.2, 4, 5, 6.3, 8



按**容量**大小划分

- $\leq 630 KVA$, 小型变压器
- $800 KVA - 6300 KVA$, 中型变压器
- $8000 KVA - 63000 KVA$, 大型变压器
- $\geq 80000 KVA$, 特大型变压器

按**相数**划分

- 单相变压器：大容量时考虑生产、运输等问题
- 三相变压器

按**绕组数**划分

- 双绕组变压器：连接两个不同电压等级
- 三绕组变压器：连接三个不同电压等级

按**耦合方式**划分

- 普通变压器
- 自耦变压器

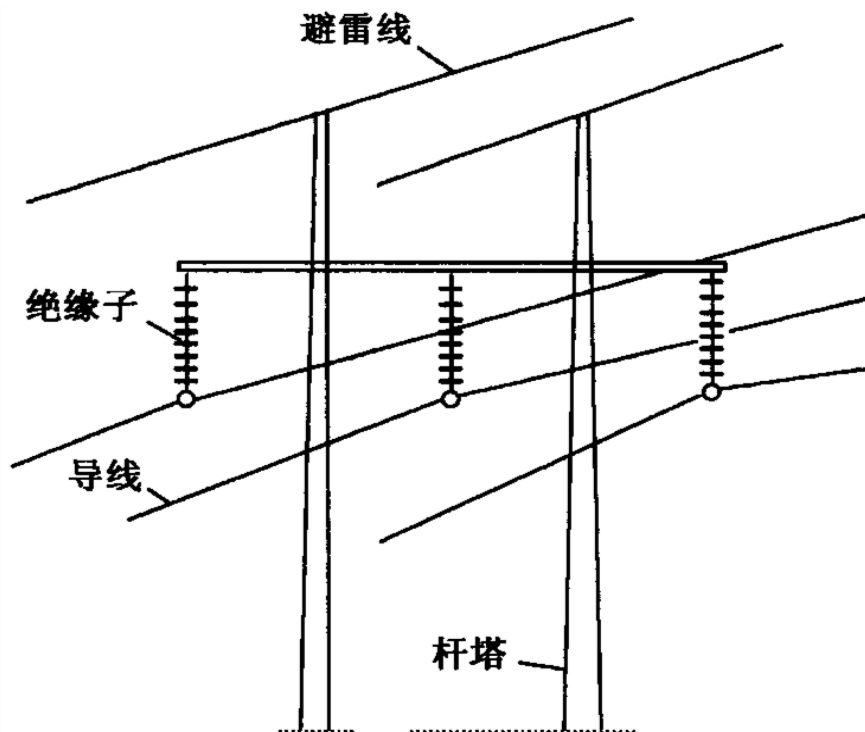
按**冷却方式**划分

- 干式变压器
- 油浸式变压器



三、电力线路

1、架空线路



架空线路由**导线**、**避雷线**（**架空地线**）、**杆塔**、**绝缘子**和**金具**等元件组成。

杆塔：支持导线和避雷线；

避雷线：又称架空地线，将雷击过电流引入大地；

绝缘子：导线与杆塔绝缘；

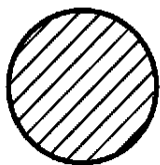
金具：支持、接续、保护导线与避雷线，联结和保护绝缘子；

导线：架空线路的主要组成元件，是电能传输的主要载体。为了提高输电线路传送功率，常使用分裂导线。

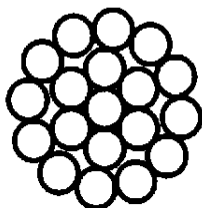




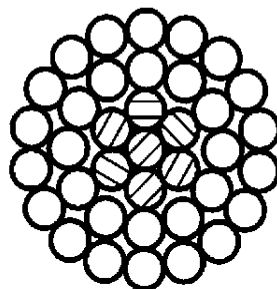
常用导线形式



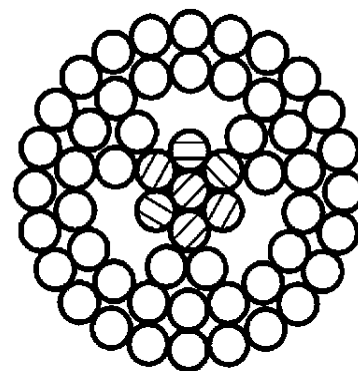
(a) 单股导线



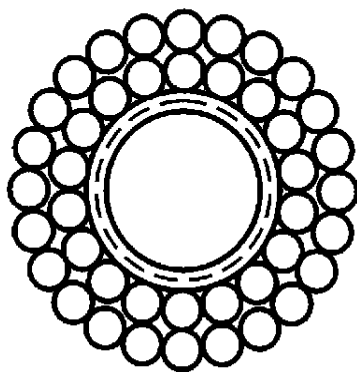
(b) 单金属多股
绞线



(c) 钢芯铝绞线

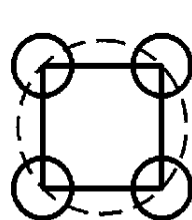


(d) 扩径导线

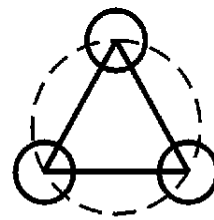


(e) 空心导线

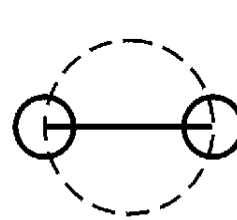
四分裂



三分裂



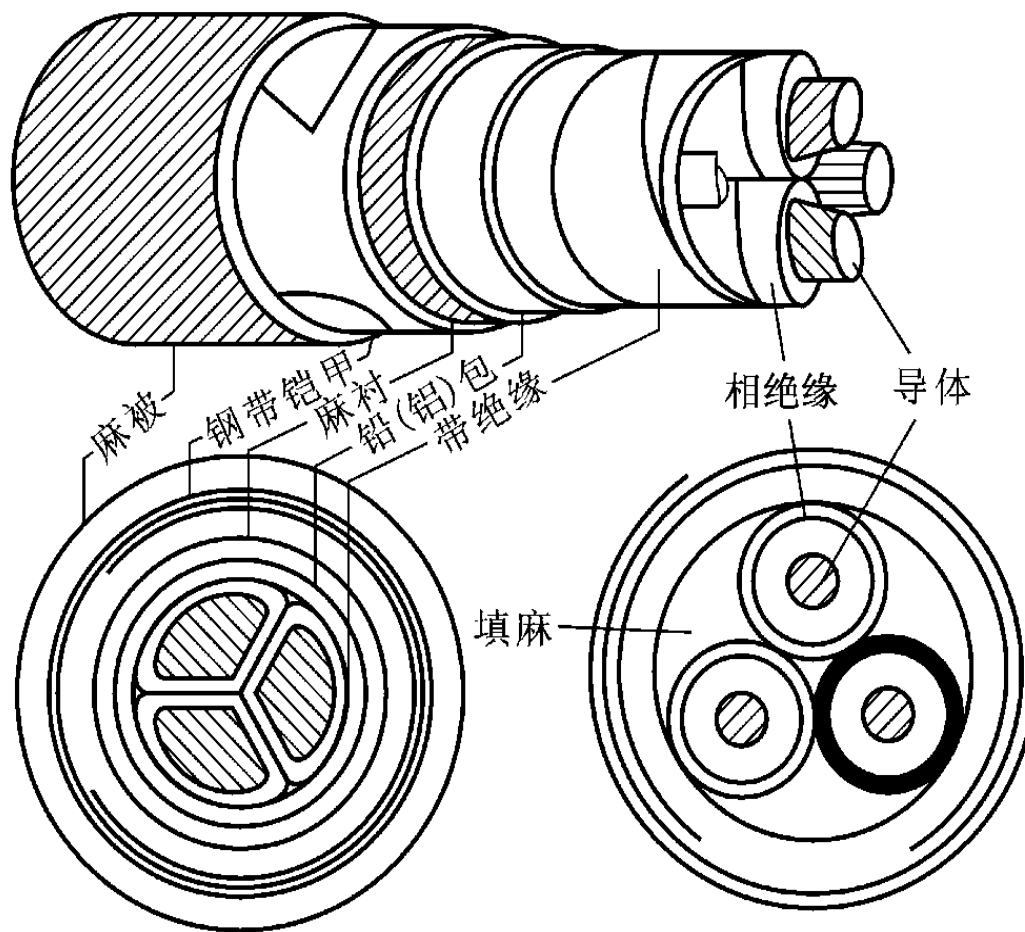
二分裂



(f) 分裂导线



2, 电缆线路



(a) 三相统包型

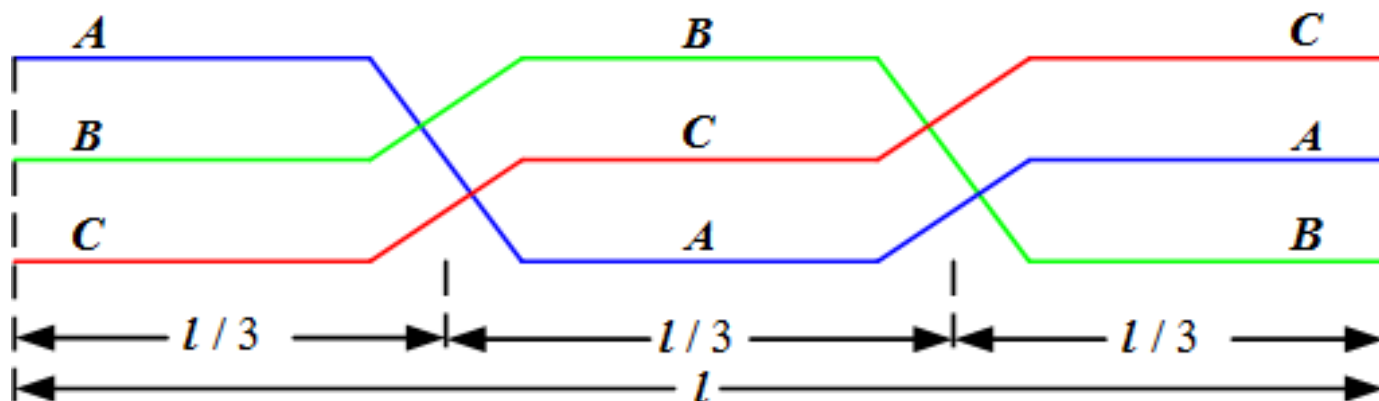
(b) 分相铅(铝)包型



3, 杆塔和金具 (参照教材)

导体换位：为了**三相参数均衡**采用导体换位消除导体位置引起的偏差，换位过程保证**三相相序不变**。

一次三相整体换位示意图

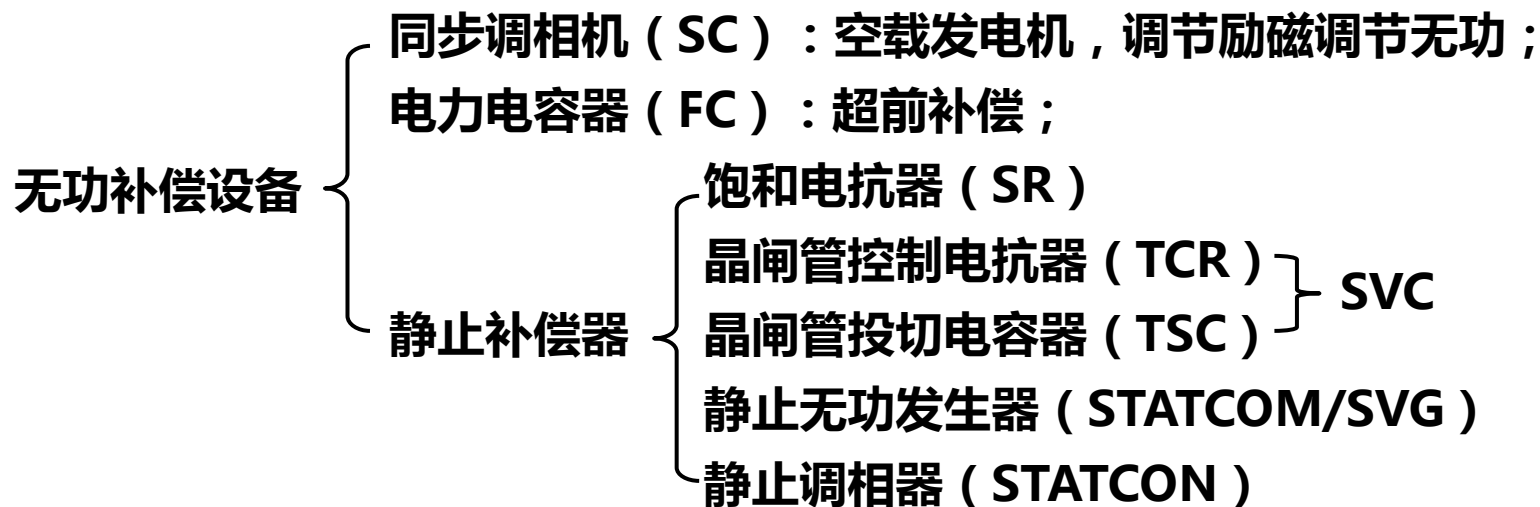


4, 导线型号

- LJ 铝绞线
- LGJ 钢芯铝绞线
- LGJQ 轻型钢芯铝绞线
- LGJJ 加强型钢芯铝绞线



四、无功功率补偿设备





第二章

电力系统元件数学模型

本章主要内容：

- 1, 电力线路：四个参数、稳态方程、波阻抗、自然功率；分裂导体、导体换位，提高输电能力的方法；
- 2, 电力变压器：分类方法、普通变压器与自耦变压器、等值电路的确定、三绕组变压器与三绕组自耦变压器的特殊问题；
- 3, 发电机、无功补偿设备、电力系统负荷的数学模型；
- 4, 非标准变比变压器的处理；
- 5, 电力系统等值网络（有名制、标么值）。



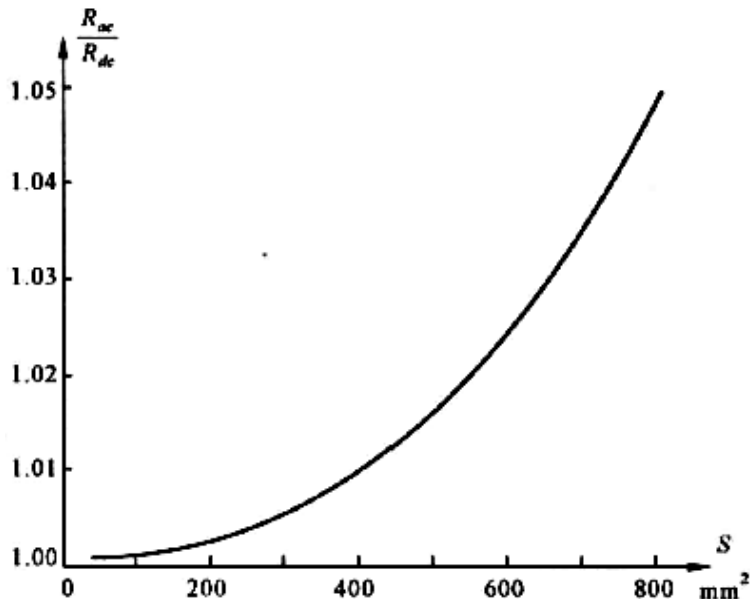
2.1 三相电力线路

一、线路电阻

交流电阻：导体通以交流电流产生集肤效应，使导体的等效载流面积减小、电阻增大；

直流电阻

注：在输电线路中，由于集肤效应引起的导体面积减少通常在 1% 以内，可用直流电阻替代交流电阻！



单位长度 (km) 电阻： $r = \rho / S$

在 20°C 时 $\begin{cases} \rho_{Al} = 31.2 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km} \\ \rho_{Cu} = 18.8 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km} \end{cases}$

实际温度相差较大时，应按实际温度校正：

$$r_1 = r_{(20)} [1 + \alpha(t - 20)]$$

其中 $\begin{cases} \alpha_{Cu} = 0.0036 \text{ (} 1/^\circ\text{C)} \\ \alpha_{Al} = 0.00382 \text{ (} 1/^\circ\text{C)} \end{cases}$



二、电力线路电感

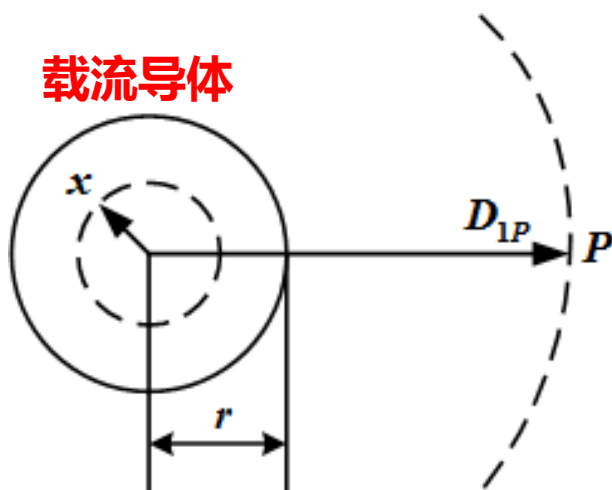
将三相电力线路视为**三个长直圆导体的集合体**，由电磁场理论可知：

单相导体电感 $\left\{ \begin{array}{l} \text{导体的自感} \left\{ \begin{array}{l} \text{导体的内自感} \\ \text{导体的外自感} \end{array} \right. \\ \text{导体间互感：两相导体对一相导体的互感} \end{array} \right.$

1、单相导体的自感

由电磁场理论可知，单根长直圆导体的内自感（**部分交链**）为：

$$L_i = \frac{\mu_0 l}{8\pi}, \text{ 与导体的径向尺寸无关}$$



以a相导体为例，由电磁场理论：

$$B_x = \mu_0 H_x = \frac{\mu_0 i_a}{2\pi x}$$

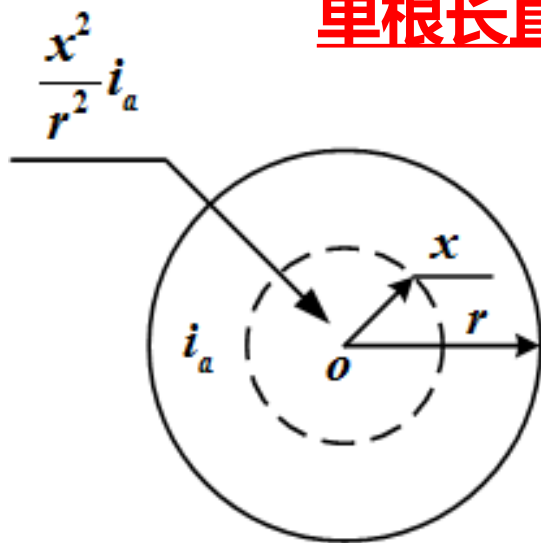
单位长度外磁链与外自感为

$$\psi_e = \int_r^{D_{1P}} B_x dx = \frac{\mu_0 i_a}{2\pi} \ln \frac{D_{1P}}{r}$$

$$L_e = \frac{\psi_e}{i_a} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{1P}}{r}$$



单根长直圆导体内自感的解释



$$i = \left(\frac{\pi x^2}{\pi r^2} \right) i_a = \frac{x^2}{r^2} i_a$$

$$B_x = \frac{\mu_0 i}{2\pi x} = \frac{\mu_0}{2\pi x} \left(\frac{x^2}{r^2} i_a \right) = \frac{\mu_0 x}{2\pi r^2} i_a$$

$$d\Phi_x = B_x dx \rightarrow d\Psi_x = \left(\frac{x^2}{r^2} \right) B_x dx = \frac{\mu_0 x^3}{2\pi r^4} i_a dx$$

$$\Psi_x = \int_0^r \frac{\mu_0 x^3}{2\pi r^4} i_a dx = \left(\frac{\mu_0 x^4}{8\pi r^4} i_a \right) \Big|_0^r = \frac{\mu_0}{8\pi} i_a \rightarrow L_i = \frac{\mu_0}{8\pi}$$

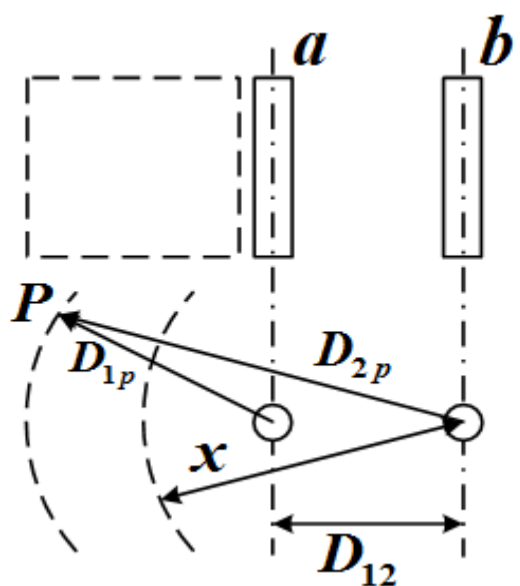
单位长度单根长直圆导体的内自感为一常数，与导体的径向尺寸无关。使用分裂导线时，导体的内自感取决于分裂数。



单位长度单根长直圆导体的自感磁链为

$$\psi_{as} = \psi_i + \psi_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D_{1p}}{r} + \frac{1}{4} \right) i_a$$

2, 两根长直圆导体的互感磁链



设二导体间距为 D_{12} , 由于 $D_{12} \gg r$, 可认为电流集中在导体轴线上, 令 $i_a = 0, i_b \neq 0$

$$B_x = \frac{\mu_0 i_b}{2\pi x}$$

$$\psi_{abp} = \int_{D_{12}}^{D_{2p}} B_x dx = \frac{\mu_0 i_b}{2\pi} \ln \frac{D_{2p}}{D_{12}}$$

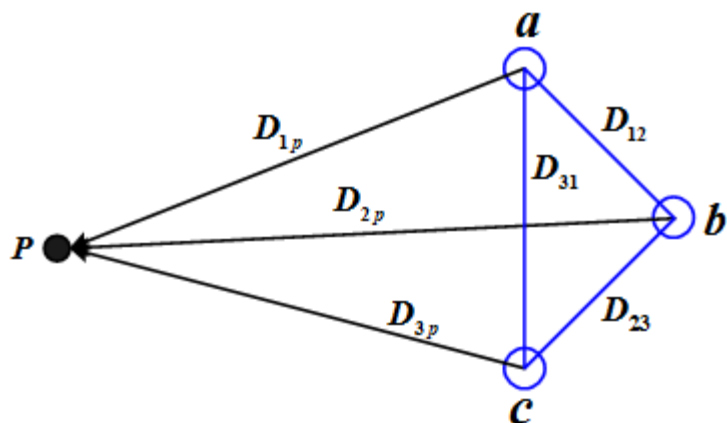
同理, 令 $i_b = 0, i_a \neq 0$, 同理可得

$$\psi_{bap} = \int_{D_{12}}^{D_{1p}} B_x dx = \frac{\mu_0 i_a}{2\pi} \ln \frac{D_{1p}}{D_{12}}$$

3, 三相导体的磁链和互感

以A相导体为例, 总磁链包括:

- { A相导体的自感磁链 (含内自感与外自感)
- { B相导体、C相导体的互感磁链



单位长度与A相导体交链的总磁链：

$$\psi_{ap} = \psi_{as} + \psi_{abp} + \psi_{acp}$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_a \left(\ln \frac{D_{1p}}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{D_{2p}}{D_{12}} + i_c \ln \frac{D_{3p}}{D_{31}} \right]$$

电力系统正常运行时， $i_c = -(i_a + i_b)$

$$\psi_{ap} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_a \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{1}{D_{12}} + i_c \ln \frac{1}{D_{31}} + i_a \ln D_{1p} + i_b \ln D_{2p} + i_c \ln D_{3p} \right]$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_a \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{1}{D_{12}} + i_c \ln \frac{1}{D_{31}} + i_a \ln D_{1p} + i_b \ln D_{2p} - i_a \ln D_{3p} - i_b \ln D_{3p} \right]$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_a \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{1}{D_{12}} + i_c \ln \frac{1}{D_{31}} + i_a \ln \frac{D_{1p}}{D_{3p}} + i_b \ln \frac{D_{2p}}{D_{3p}} \right]$$

令 $P \rightarrow \infty$ (无穷远)，可得 $\lim(\ln \frac{D_{1p}}{D_{3p}}) = 0$, $\lim(\ln \frac{D_{2p}}{D_{3p}}) = 0$ ，则

$$\psi_{ap} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_a \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{1}{D_{12}} + i_c \ln \frac{1}{D_{31}} \right]$$



当导体采用**整体换位时**，可认为 $D_{12} = D_{23} = D_{31} = D_m$, $D_m = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$

$$\psi_{ap} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_a \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{1}{D_m} + i_c \ln \frac{1}{D_m} \right]$$

D_m — 导体间的几何均距。

对于三相导体，可得：

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} & \ln \frac{1}{D_m} & \ln \frac{1}{D_m} \\ \ln \frac{1}{D_m} & \ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} & \ln \frac{1}{D_m} \\ \ln \frac{1}{D_m} & \ln \frac{1}{D_m} & \ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

综合分析：

1，各导体的自感系数只与导体的径向尺寸有关，导体间互感系数取决于导体排列，与几何均距有关；

2，导体换位是导体间参数的解耦措施，通过导体换位使的导体参数相互独立且互感系数相同；



3) , 以上分析适用于 $i_a + i_b + i_c = 0$ 时的参数计算 (正序和负序) , 不适用对零序参数的计算。

$$\begin{cases} \psi_a = Li_a + M(i_b + i_c) = (L - M)i_a = L_1 i_a \\ \psi_b = L_1 i_b \\ \psi_c = L_1 i_c \end{cases}$$

L_1 ——导体单位长度等值正序电感

$$L_1 = L - M = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) - \ln \frac{1}{D_m} \right] = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D_m}{r} + \frac{1}{4} \right)$$

工程上常用计算公式：

$$L_1 = \left(2 \ln \frac{D_m}{r} + \frac{1}{2} \right) \times 10^{-4} \text{ (H / km)}$$

$$L_1 = \left(4.6 \lg \frac{D_m}{r} + \frac{1}{2} \right) \times 10^{-4} \text{ (H / km)}$$

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 = 0.06283 \ln \frac{D_m}{r} + 0.0157 \text{ (}\Omega / \text{km)}$$

- 1) 导体的单位长度正序电抗只与导体的径向尺寸和导体排列有关；
- 2) 常数项对应导体的内自感。



4. 分裂导体三相线路与紧凑型布局

为了减小导体周围的电晕，通常采用分裂导线。美国学者O. I. Elgerd在《Electric Energy Theory: An Introduction》中证明分裂导体线路的电抗仍可使用下式：

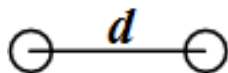
$$x_1 = 0.06283 \ln \frac{D_m}{r} + 0.0157 \quad (\Omega / km)$$

但需做如下修正（**分裂导体等值半径变大**）：

1) 导体的半径用n分裂（正多边形）之后的等值几何半径代替；

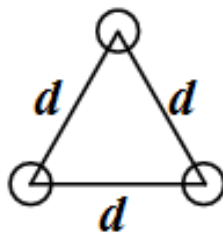
$$r_{eq} = \sqrt[n]{r(d_{12}d_{13} \dots d_{1n})} \quad (r \text{ 为导体半径} ; d \text{ 为分裂间距})$$

二分裂



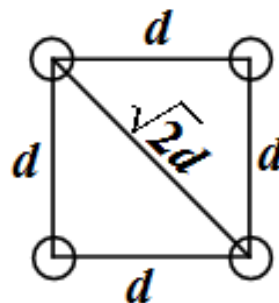
$$r_{eq} = \sqrt[2]{rd}$$

三分裂



$$r_{eq} = \sqrt[3]{rd^2}$$

四分裂

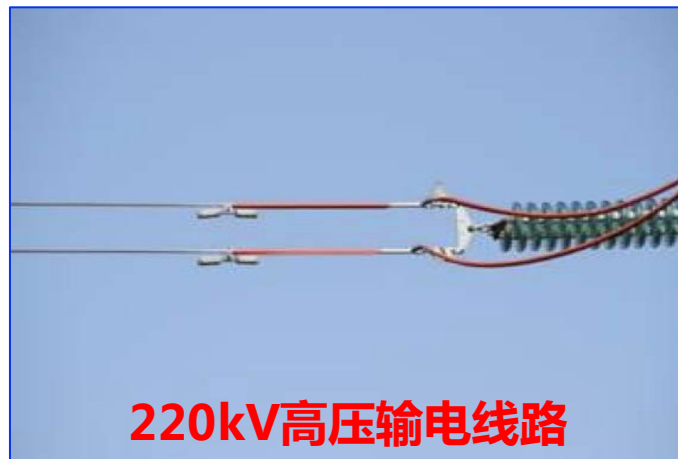


$$r_{eq} = \sqrt[4]{rd^2 \sqrt{2}d} = 1.09 \sqrt[4]{rd^3}$$



2) 常数项与导体分裂数有关。分裂导体单位长度正序等值电抗为：

$$x_1 = 0.06283 \ln \frac{D_m}{r_{eq}} + \frac{0.0157}{n} \quad (\Omega / km)$$



电压等级越高，分裂导线数越多，输电能力越强。



高压输电线路应采用紧凑型布局杆塔结构

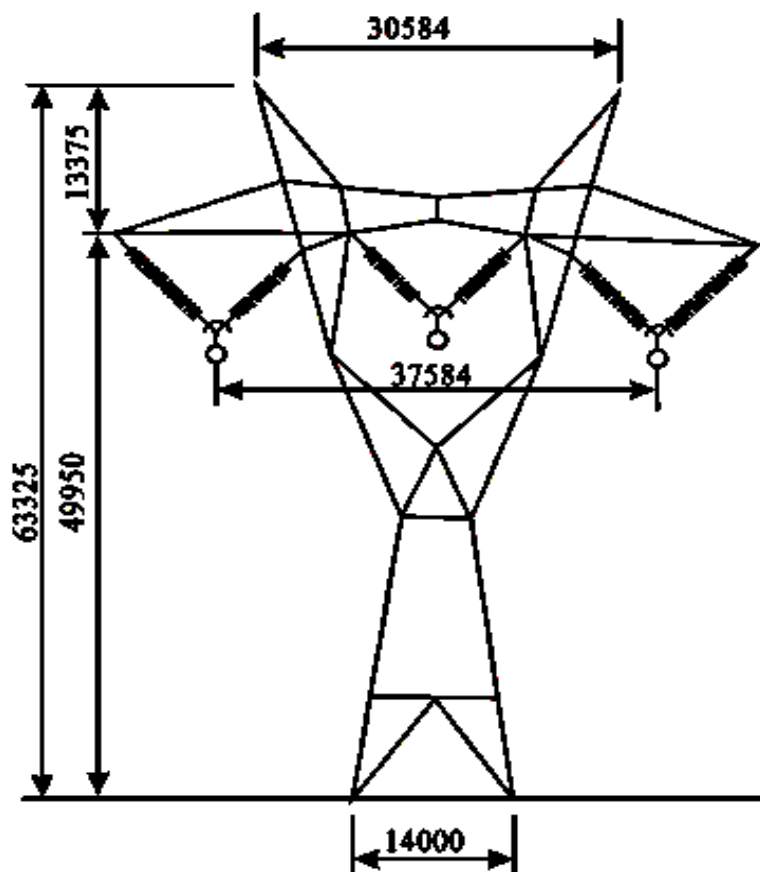
紧凑型布局的思想：在不减小相地（钢铁结构）绝缘间距的情况下尽量减小相间距离，以减小特高压线路走廊占地面积、减小线路等值电抗和波阻抗，提高特高压线路的输电能力。

基本方法：设计特殊的杆塔形状和绝缘子悬挂方法使得相间没有接地部件，悬挂导线采用V型绝缘子，不受风力而摆动的影响，使导线对接地部件间和相间的间距减小。

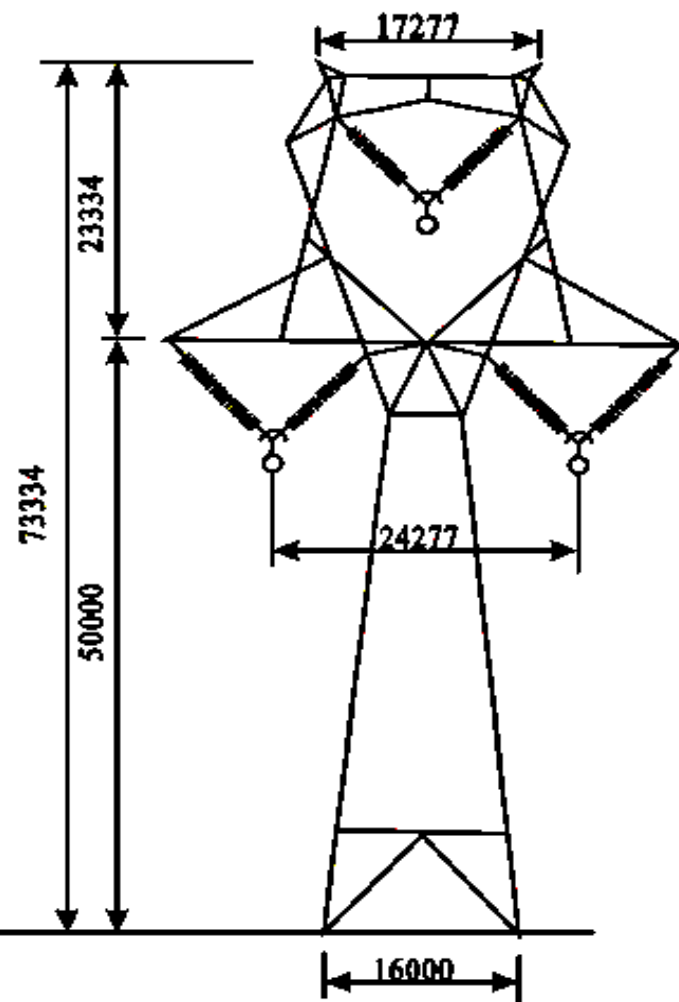
实践证明：从杆塔和线路导线系统的结构上研究，优化布局，提高线路传输能力，比使用补偿装置更为经济。



特高压杆塔结构



3V形水平排列



3V形三角排列

我国1000kV线路直线杆塔形式



三、电力线路电导

电力线路的并联电导用以**反映电晕损失**，描述电力线路因电压作用而引起的有功损耗。定义

$$g_1 = \frac{\Delta P_0}{U^2} \times 10^{-3} \text{ (S / km)}$$

ΔP_0 ——三相电力线路单位长度电晕引起的有功损耗 (KW) ；

U ——三相电力线路电压水平 (KV) ；

说明：

- 1) 电力线路的电晕损失与线路电压水平、气候因素等有关，具有统计规律属性；
- 2) 当不计电晕损失时， $g_1 = 0$ 。



线路开始出现电晕的电压称为**临界电压** (U_{cr})。当三相导体为三角形排列时，电晕临界电压的经验公式为：

$$U_{cr} = 49.3 m_1 m_2 \delta r \lg \frac{D_m}{r} \quad (kV)$$

m_1 ——考虑导体表面状况的系数，多股导体 $m_1 = 0.83 - 0.87$

m_2 ——考虑气象状况的系数，干燥和晴朗天气 $m_2 = 1$ ，雨雪天气 $m_2 = 0.8 - 1$

D_m, r ——导体间的几何均距与导体的等值半径

δ ——空气的相对密度

$$\delta = 3.86b / (273 + t)$$

b ——大气压力 (P_a)

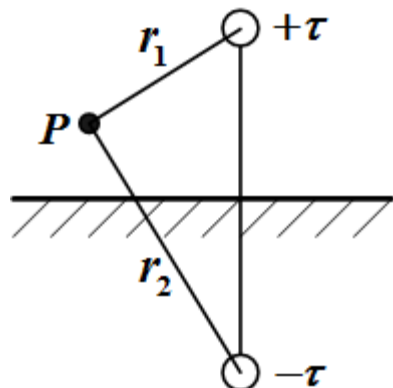
t ——空气温度 ($^{\circ}C$)

三相导体水平排列时，边相导线电晕临界电压比上式计算值高6%，中相导线电晕临界电压比计算值低4%，中相导体更易产生电晕。



四、电力线路电容

由《电磁场》镜像法理论可知，单根长直圆导体空间一点P的电位为



$$\varphi_p = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

以a相导体为例，其电位（相电压）为

$$u_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} (q_a \ln \frac{H_{11}}{r} + q_b \ln \frac{H_{12}}{D_{12}} + q_c \ln \frac{H_{13}}{D_{31}})$$

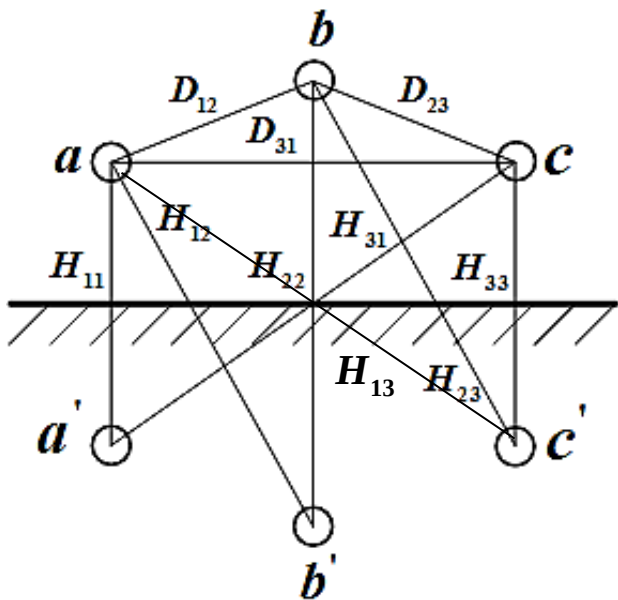
与前述讨论类似，经导体换位后定义

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}, \text{ 导体间几何均距}$$

$$H_{sm} = \sqrt[3]{H_{11} H_{22} H_{33}}, \text{ 导体与镜像导体几何均距}$$

$$H_{mm} = \sqrt[3]{H_{12} H_{23} H_{31}}, \text{ 不同导体与镜像几何均距}$$

$$u_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} (q_a \ln \frac{H_{sm}}{r} + q_b \ln \frac{H_{mm}}{D_m} + q_c \ln \frac{H_{mm}}{D_m})$$





推广到三相导体，可得

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} \ln \frac{H_{sm}}{r} & \ln \frac{H_{mm}}{D_m} & \ln \frac{H_{mm}}{D_m} \\ \ln \frac{H_{mm}}{D_m} & \ln \frac{H_{sm}}{r} & \ln \frac{H_{mm}}{D_m} \\ \ln \frac{H_{mm}}{D_m} & \ln \frac{H_{mm}}{D_m} & \ln \frac{H_{sm}}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_d & \alpha_m & \alpha_m \\ \alpha_m & \alpha_d & \alpha_m \\ \alpha_m & \alpha_m & \alpha_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix}$$

电位系数矩阵

上式求逆可得：

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_d & \beta_m & \beta_m \\ \beta_m & \beta_d & \beta_m \\ \beta_m & \beta_m & \beta_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

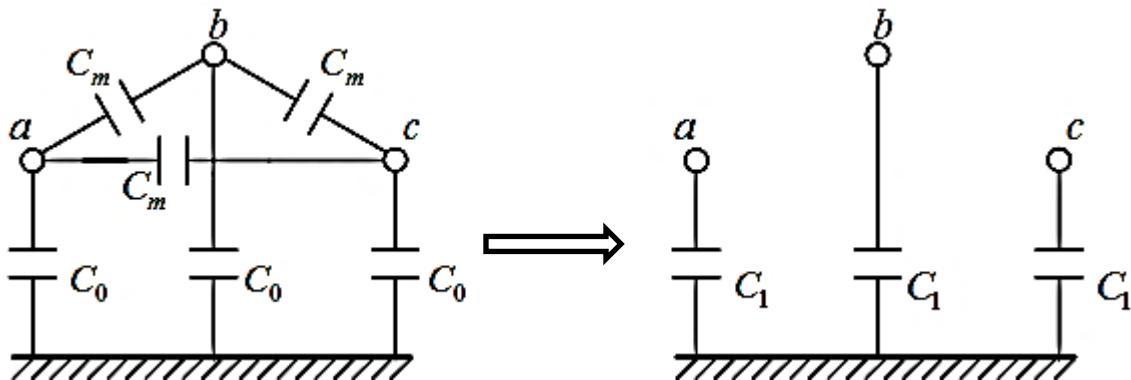
感应系数矩阵

其中

$$\begin{cases} \beta_d = \frac{\alpha_d + \alpha_m}{(\alpha_d - \alpha_m)(\alpha_d + 2\alpha_m)} \\ \beta_m = \frac{-\alpha_m}{(\alpha_d - \alpha_m)(\alpha_d + 2\alpha_m)} \end{cases} \quad \begin{cases} \alpha_d = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{sm}}{r} \\ \alpha_m = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{mm}}{D_m} \end{cases}$$



用集中参数表达时，可等价



$$q_a = C_0 u_a + C_m (u_a - u_b) + C_m (u_a - u_c) = \underbrace{(C_0 + 2C_m)}_{C_s} u_a - C_m u_b - C_m u_c$$

$$= C_s u_a - C_m u_b - C_m u_c$$

推广到三相导体，可得

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_s & -C_m & -C_m \\ -C_m & C_s & -C_m \\ -C_m & -C_m & C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} C_s = \beta_d \\ C_m = -\beta_m \end{cases} \Rightarrow \begin{aligned} C_0 &= C_s - 2C_m \\ &= \beta_d + 2\beta_m \end{aligned}$$

$$C_0 = \beta_d + 2\beta_m = \frac{\alpha_d + \alpha_m}{(\alpha_d - \alpha_m)(\alpha_d + 2\alpha_m)} + 2 \times \frac{-\alpha_m}{(\alpha_d - \alpha_m)(\alpha_d + 2\alpha_m)} = \frac{1}{\alpha_d + 2\alpha_m}$$



$$= \frac{1}{\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{sm}}{r} + 2 \times \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{mm}}{D_m}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{H_{sm} H_{mm}^2}{r D_m^2}} = \frac{10^{-6}}{18 \ln \frac{H_{sm} H_{mm}^2}{r D_m^2}}$$

$$C_m = \frac{\alpha_m}{(\alpha_d - \alpha_m)(\alpha_d + 2\alpha_m)} = \frac{\ln \frac{H_{mm}}{D_m} \times 10^{-6}}{18 \ln \frac{D_m H_{sm}}{r H_{mm}} \times \ln \frac{H_{sm} H_{mm}^2}{r D_m^2}}$$

电力系统正常运行时， $u_a + u_b + u_c = 0$ ，则

$$\begin{cases} q_a = (C_0 + 2C_m)u_a - C_m(u_b + u_c) = (C_0 + 3C_m)u_a = C_1 u_a \\ q_b = C_1 u_b \\ q_c = C_1 u_c \end{cases}$$

$$C_1 = C_0 + 3C_m = \frac{10^{-6}}{18 \ln \frac{H_{sm} H_{mm}^2}{r D_m^2}} + \frac{3 \ln \frac{H_{mm}}{D_m} \times 10^{-6}}{18 \ln \frac{D_m H_{sm}}{r H_{mm}} \times \ln \frac{H_{sm} H_{mm}^2}{r D_m^2}} = \frac{\ln \left(\frac{D_m H_{sm}}{r H_{mm}} \times \frac{H_{mm}^3}{D_m^3} \right)}{18 \ln \frac{D_m H_{sm}}{r H_{mm}} \times \ln \frac{H_{sm} H_{mm}^2}{r D_m^2}} \times 10^{-6}$$

$$= \frac{10^{-6}}{18 \ln \frac{D_m H_{sm}}{r H_{mm}}} \xrightarrow{\text{架空线路, } H_{sm} \approx H_{mm}} C_1 = \frac{10^{-6}}{18 \ln \frac{D_m}{r}} \text{ (F / km)}$$



当 $f=50\text{Hz}$ 时，考虑分裂导体对等值半径的影响，可得

$$b_1 = 2\pi f C_1 = \frac{17.45}{\ln \frac{D_m}{r_{eq}}} \times 10^{-6} \text{ (S / km)}$$

综合讨论：

1) 单位长度 (km) 四个参数 (r_1 、 x_1 、 g_1 、 b_1) 分别为：

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = \rho / S, \quad \begin{cases} \rho_{Al} = 31.2 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km} \\ \rho_{Cu} = 18.8 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km} \end{cases} \\ x_1 = 0.06283 \ln \frac{D_m}{r_{eq}} + \frac{0.0157}{n} \text{ (}\Omega / \text{km)} \\ g_1 = \frac{\Delta P_0}{U^2} \times 10^{-3} \text{ (S / km)} \\ b_1 = 2\pi f C_1 = \frac{17.45}{\ln \frac{D_m}{r_{eq}}} \times 10^{-6} \text{ (S / km)} \end{array} \right.$$

以上参数讨论基于三相正序，也适用于三相负序，对零序不适用。

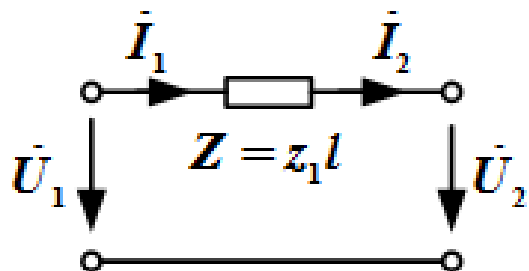


- 2) 分裂导体减小了导体的电晕损失，使得导体的等值半径加大，导体的正序等值串联（电感）电抗减小，正序等值并联（电容）电纳增大，从而减小输电线路的波阻抗，提高了输电能力；
- 3) 在先进输电系统中，常使用紧凑型布局，减小导体间的几何平均距离，输电线路的波阻抗减小，是提高输电线路输电能力的重要措施；
- 4) 导体换位使得三相参数彼此独立，是三相参数解耦的重要措施。

四、电力线路稳态方程与等值电路

电力线路 { 一般线路 { 短线路：架空线路 < 100km
中等长度线路：架空 100-300km，电缆 < 100km
长线路：超过 300km 的架空线路或超过 100km 的电缆线路

1. 短线路（按集中参数电路处理，不考虑并联支路）



$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 + Z\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

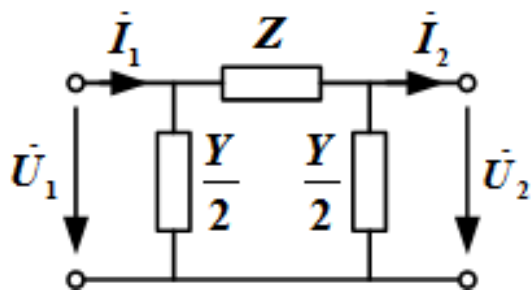
端口方程

传输参数矩阵



2. 中等长度线路（按集中参数电路处理，考虑并联支路）

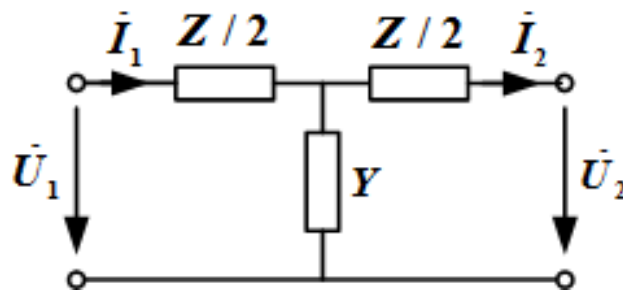
Π 型等值电路



$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{ZY}{2} + 1 & Z \\ Y(\frac{ZY}{4} + 1) & \frac{ZY}{2} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

传输参数矩阵

T 型等值电路



$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{ZY}{2} + 1 & Z(\frac{ZY}{4} + 1) \\ Y & \frac{ZY}{2} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

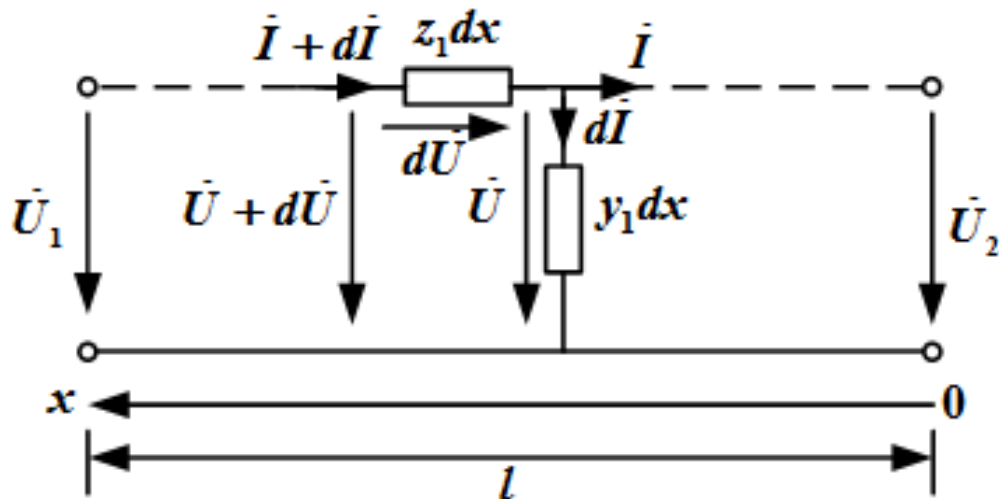
传输参数矩阵

可以看出：

- 1) 中等长度电力线路的两种等值电路具有对偶性，其端口方程也具有对偶关系；
- 2) 由于T型等值电路增加了一个节点，使电力网络的计算趋于复杂，在电力线路等值电路中通常使用 Π 型等值电路。



3, 长线路的稳态方程与等值电路 (考虑输电线路分布参数特征)



$$\begin{cases} d\dot{U} = (\dot{I} + d\dot{I})z_1 dx \\ d\dot{I} = \dot{U}y_1 dx \end{cases}$$

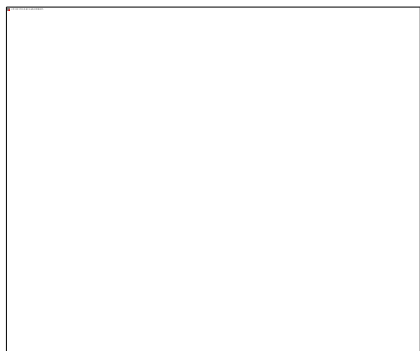
不计高阶无穷小, 则

$$\begin{cases} d\dot{U} = \dot{I}z_1 dx \\ d\dot{I} = \dot{U}y_1 dx \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}}{dx} = \dot{I}z_1 \\ \frac{d\dot{I}}{dx} = \dot{U}y_1 \end{cases} \xrightarrow{\text{两端同时对}x\text{求导}} \begin{cases} \frac{d^2\dot{U}}{dx^2} = z_1 \frac{d\dot{I}}{dx} = z_1 y_1 \dot{U} \\ \frac{d^2\dot{I}}{dx^2} = y_1 \frac{d\dot{U}}{dx} = z_1 y_1 \dot{I} \end{cases}$$

显然, 为一波动方程, 与电磁场理论中的均匀传输线正弦稳态方程一致。

令 $\gamma = \sqrt{z_1 y_1}$, 为一无量纲常数, 称为传播常数。则



$$\longrightarrow \begin{cases} \dot{U} = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x} \\ \dot{I} = \frac{1}{z_1} \frac{d\dot{U}}{dx} = \frac{\gamma C_1}{z_1} e^{\gamma x} - \frac{\gamma C_2}{z_1} e^{-\gamma x} \end{cases}$$

考虑 $\frac{\gamma}{z_1} = \frac{\sqrt{z_1 y_1}}{z_1} = \sqrt{y_1 / z_1}$, 令 $Z_c = \sqrt{z_1 / y_1} \Rightarrow \frac{\gamma}{z_1} = \frac{1}{Z_c}$, 称为**波阻抗**。则

$$\begin{cases} \dot{U} = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x} \\ \dot{I} = \frac{1}{Z_c} (C_1 e^{\gamma x} - C_2 e^{-\gamma x}) \end{cases} \xrightarrow{x=0, \dot{U}=\dot{U}_2, \dot{I}=\dot{I}_2} \begin{cases} C_1 = (\dot{U}_2 + Z_c \dot{I}_2) / 2 \\ C_2 = (\dot{U}_2 - Z_c \dot{I}_2) / 2 \end{cases}$$

$$\dot{U} = \frac{\dot{U}_2 + Z_c \dot{I}_2}{2} e^{\gamma x} + \frac{\dot{U}_2 - Z_c \dot{I}_2}{2} e^{-\gamma x} = \dot{U}_2 \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} + Z_c \dot{I}_2 \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}$$

$$= \dot{U}_2 \cosh \gamma x + Z_c \dot{I}_2 \sinh \gamma x$$

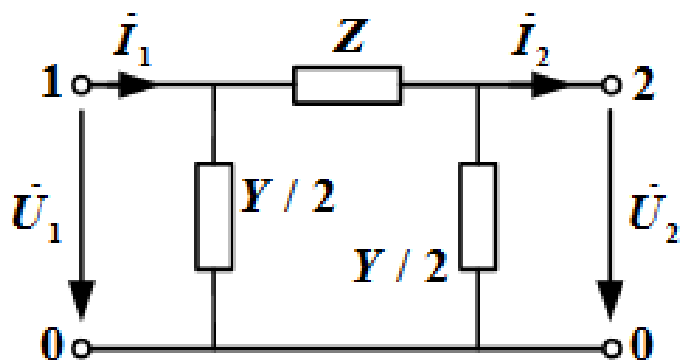
相似过程可得 $\dot{I} = \dot{U}_2 \frac{\sinh \gamma x}{Z_c} + \dot{I}_2 \cosh \gamma x$



$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma x & Z_c \sinh \gamma x \\ \frac{\sinh \gamma x}{Z_c} & \cosh \gamma x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

传输参数矩阵 $A = D$, $AD - BC = 1$, 仍具有对称且互易的属性, 可使用 π 型等值电路等价。

传输参数矩阵



根据电工理论：

$$\begin{cases} Z = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \Big|_{\dot{U}_2=0} = B = Z_c \sinh \gamma x \\ Y/2 = \frac{A-1}{B} = \frac{\cosh \gamma x - 1}{Z_c \sinh \gamma x} \end{cases}$$

设输电线路的长度为 l , 则

$$Z = Z_c \sinh \gamma l = \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} (\gamma l Z_c) \xrightarrow[k_z = (\sinh \gamma l) / (\gamma l)]{\gamma Z_c = \sqrt{z_1 y_1} \times \sqrt{\frac{z_1}{y_1}} = z_1} Z = k_z (z_1 l)$$

$$Y/2 = \frac{\cosh \gamma l - 1}{Z_c \sinh \gamma l} = \frac{2(\cosh \gamma l - 1)}{y_1 l Z_c \sinh \gamma l} \times \frac{y_1 l}{2} \xrightarrow{y_1 Z_c = y_1 \sqrt{\frac{z_1}{y_1}} = \sqrt{z_1 y_1} = \gamma}$$



$$Y / 2 = \frac{2(\cosh \gamma l - 1)}{\gamma l \sinh \gamma l} \times \frac{y_1 l}{2} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{(\gamma l / 2) \sinh \gamma l} \times \frac{y_1 l}{2} = \frac{\tanh(\gamma l / 2)}{\gamma l / 2} \times \frac{y_1 l}{2} = k_y \frac{y_1 l}{2}$$

由上讨论可得使用**金耐黎系数修正**的阻抗与导纳为：

$$\begin{cases} Z = k_z z_1 l \\ Y / 2 = k_y \frac{y_1 l}{2} \end{cases}, \text{其中} \begin{cases} k_z = (\sinh \gamma l) / (\gamma l), \text{阻抗修正系数} \\ k_y = \frac{\tanh(\gamma l / 2)}{\gamma l / 2}, \text{导纳修正系数} \end{cases}$$

按泰勒级数展开：

$$\sinh \gamma l = \gamma l + \frac{(\gamma l)^3}{3!} + \frac{(\gamma l)^5}{5!} + \dots$$

$$\tanh(\gamma l / 2) = \frac{\gamma l}{2} - \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma l}{2} \right)^3 + \frac{2}{15} \left(\frac{\gamma l}{2} \right)^5 + \dots$$

通常地：

$$\begin{cases} \text{架空线路 } \gamma \approx j10^{-3} (1 / \text{km}), \text{当线路长度不超过1000km时, } |\gamma l| < 1 \\ \text{电缆线路: 当线路长度不超过300km时, } |\gamma l| < 1 \end{cases}$$

级数展开式中保留前两项。则实用计算时可表达为：



$$\begin{cases} k_z = 1 + \frac{(\gamma l)^2}{6} \\ k_y = 1 - \frac{(\gamma l)^2}{12} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Z = k_z z_1 l = k_z (r_1 l + jx_1 l) = k_r r_1 l + jk_x x_1 l \\ \frac{Y}{2} = k_y \frac{y_1 l}{2} = k_y \left(\frac{g_1 l}{2} + j \frac{b_1 l}{2} \right) = k_g \frac{g_1 l}{2} + jk_b \frac{b_1 l}{2} \end{cases}$$

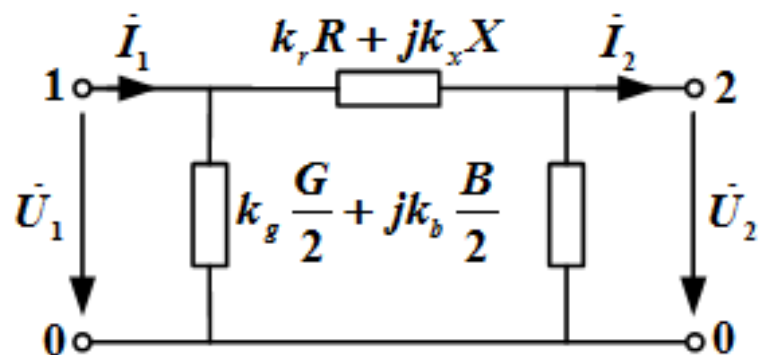
代入 k_z 、 k_y 表达式，修正系数分别为（**近似计算/实用计算**）：

$$k_r = 1 - \frac{l^2}{3} x_1 b_1 - \frac{l^2}{6} g_1 \left(\frac{x_1^2}{r_1} - r_1 \right)$$

$$k_x = 1 - \frac{l^2}{6} b_1 \left(x_1 - \frac{r_1^2}{x_1} \right) + \frac{l^2}{3} r_1 g_1$$

$$k_g = 1 + \frac{l^2}{6} x_1 b_1 + \frac{l^2}{12} r_1 \left(\frac{b_1^2}{g_1} - g_1 \right)$$

$$k_b = 1 + \frac{l^2}{12} x_1 b - \frac{l^2}{12} g_1 \left(2r_1 + g_1 \frac{x_1}{b_1} \right)$$



修正后的等值电路

显然，不考虑电晕损失（ $g_1 = 0$ ）时，上述表达式只有前两项。



4, 长线路的波阻抗与自然功率

- 1) 波阻抗与自然功率是衡量高压输电线路输电能力的重要参数；
- 2) 一般地，高压输电线路 $r \ll x, g \ll b$, 可忽略输电线路的有功功率损耗，即视高压输电线路为“无损传输线”或“理想传输线”。

波阻抗（特征阻抗）： $Z_c = \sqrt{Z_1 / Y_1} = \sqrt{L_1 / C_1}$ ，纯电阻属性

传播常数： $\gamma = j\omega\sqrt{L_1 C_1} = j\alpha$ ，纯虚数（相位常数）

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} + Z_c \dot{I}_2 \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} = \dot{U}_2 \frac{e^{j\alpha l} + e^{-j\alpha l}}{2} + Z_c \dot{I}_2 \frac{e^{j\alpha l} - e^{-j\alpha l}}{2} \\ &= \dot{U}_2 \cos \alpha l + jZ_c \dot{I}_2 \sin \alpha l\end{aligned}$$

同理可得： $\dot{I}_1 = j\dot{U}_2 \frac{\sin \alpha l}{Z_c} + \dot{I}_2 \cos \alpha l$

端口方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha l & jZ_c \sin \alpha l \\ j \frac{\sin \alpha l}{Z_c} & \cos \alpha l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$



当 $Z_L = Z_c$ (负荷阻抗为波阻抗) 时 , $\dot{U}_2 = Z_c \dot{I}_2$, 则

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \alpha l + j Z_c \dot{I}_2 \sin \alpha l = \dot{U}_2 (\cos \alpha l + j \sin \alpha l) = \dot{U}_2 e^{j \alpha l} \\ \dot{I}_1 = j \dot{U}_2 \frac{\sin \alpha l}{Z_c} + \dot{I}_2 \cos \alpha l = \dot{I}_2 (\cos \alpha l + j \sin \alpha l) = \dot{I}_2 e^{j \alpha l} \end{cases}$$

3) 自然功率 : 当负荷阻抗为波阻抗时 , 负荷阻抗所获得的功率。显然

$$S_n = P_e = \frac{3U_{N\varphi}^2}{Z_c} = \frac{U_N^2}{Z_c}$$

几点讨论 :

- 1) 当负荷阻抗为波阻抗时 , 沿输电线路电压、电流处处相等且保持同相 , 功率因数为1 , 线路两端相位差与线路长度成正比 (传输相位延迟) ;
- 2) 从传输线理论可知 , 当负荷阻抗为波阻抗时 (匹配状态) , 能量传送无反射波 , 传输效率最高。因此 , 在高压输电工程中 , 通常尽量使得负荷阻抗接近波阻抗 ;
- 3) 高压输电线路自然功率仅与输电线路电压等级、波阻抗有关 ; 据此可知 , 提高输电线路输电能力的措施为 :



以500kV输电线路为例

单导体：385-415欧姆
二分裂：285-305欧姆
三分裂：275-285欧姆
四分裂：255-265欧姆

提高输电线路电压等级

减小输电线路的波阻抗

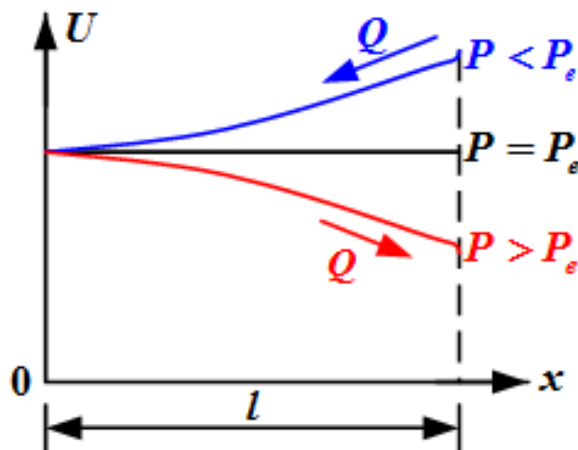
使用分裂导体

导体采用紧凑型布局

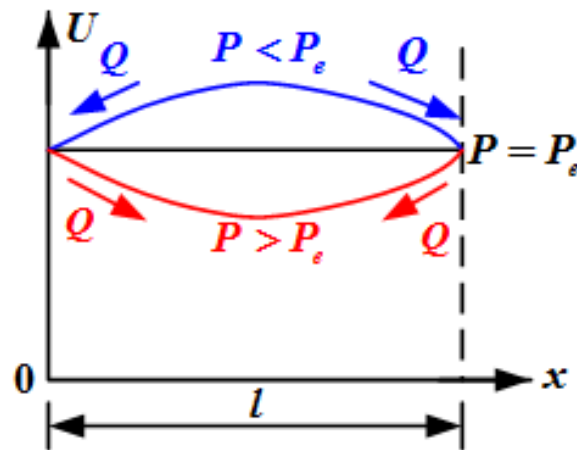
4) 当输电线路传输功率不等于自然功率时，反射波的存在将改变沿线电压分布：

输电功率大于自然功率：线路末端电压低于始端

输电功率小于自然功率：线路末端电压高于始端



线路末端无电压调节设备（无功补偿）时沿线电压分布

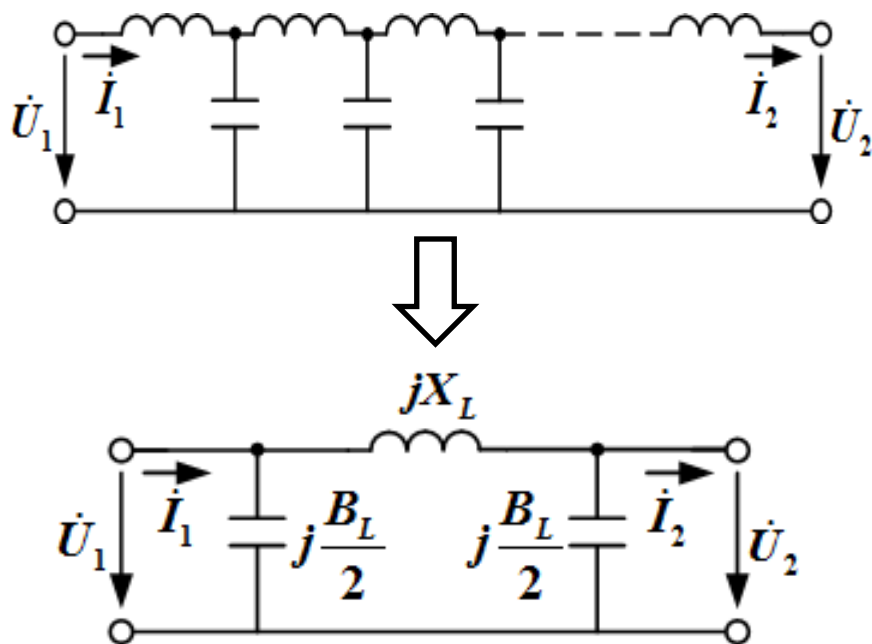


线路始末端具有电压调节设备（无功补偿）时沿线电压分布



补充：输电线路的充电功率

高压输电线路 $r \ll x, g \ll b$ ，输电线路近似为无损的：



充电功率：额定电压下，三相输电线路对地分布电容的无功功率之和，与输电线路的电压平方成正比，与输电线路并联电纳成正比。充电功率计算式为：

$$Q = 3U_{\varphi N}^2 B_L = U_N^2 B_L$$

显然：

- 1) 充电功率与输电线路的电压等级有关；
- 2) 任何影响输电线路电纳参数的因素均对充电功率有影响；
- 3) 与输电线路负荷无关。



超、特高压输电线路典型输电线路参数

参数 \ 电压等级(kV)	500	765	1100	1500
分裂导线	4×300mm	4×685mm	8×900mm	12×685mm
子导线间距或分裂导线直径 (cm)	42	64.8	106.9	128.0
相间距离(m)	13	13.9	22.0	23.8
$R_0(\Omega/\text{km})$	0.02625	0.01199	0.005261	0.004192
$X_0(\Omega/\text{km})$	0.284	0.278	0.2435	0.2433
$B_0(\text{S}/\text{km})$	3.910×10^{-6}	4.119×10^{-6}	4.650×10^{-6}	4.654×10^{-6}
$R_0^*(\text{p.u.}/\text{km})$	1.05×10^{-5} (1.00)	0.205×10^{-5} (0.195)	0.043×10^{-5} (0.0409)	0.019×10^{-5} (0.0180)
$X_0^*(\text{p.u.}/\text{km})$	1.136×10^{-4} (1.000)	0.475×10^{-4} (0.418)	0.201×10^{-4} (0.177)	0.108×10^{-4} (0.095)
$B_0^*(\text{p.u.}/\text{km})$	9.775×10^{-3} (1.000)	24.105×10^{-3} (2.466)	56.268×10^{-3} (5.756)	104.725×10^{-3} (10.713)

注 R_0^* 、 X_0^* 、 B_0^* 为以500kV、100MVA为基值的标么值。括号里的数值是以500kV的标么值为1的比较值。



例：一回600km的500kV架空线路，使用 $4 \times LGJ - 300 / 50$ 分裂导线，
导体直径 $24.26mm$ ，分裂间距 $450mm$ ，三相导体水平排列，相间距13m。
求下列三种情况下的等值电路（设无电晕）：

- 1) 不考虑线路分布参数特征；
 - 2) 近似考虑线路分布参数特征；
 - 3) 精确考虑线路分布参数特征；
- 并比较以上三种情况下的计算精度。

导体型号解释：

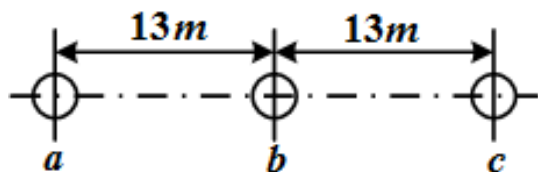
$4 \times LGJ - 300 / 50$

分裂导体数

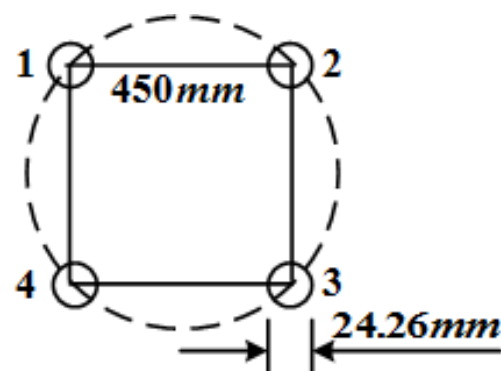
导体组成材料

钢芯标称面积

铝部标称面积



导体排列





解：计算导体单位长度的参数

$$r_1 = \frac{\rho}{S} = \frac{31.2}{4 \times 300} = 0.02625 \text{ } (\Omega / \text{km})$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}} = \sqrt[3]{13000 \times 13000 \times 26000} = 16380 \text{ (mm)}$$

$$r_{eq} = \sqrt[4]{rd_{12} d_{13} d_{14}} = \sqrt[4]{12.13 \times 450 \times 450 \times \sqrt{2} \times 450} = 198.8 \text{ (mm)}$$

$$x_1 = 0.06283 \ln \frac{D_m}{r_{eq}} + \frac{0.0157}{n} = 0.281 \text{ } (\Omega / \text{km})$$

$$b_1 = \frac{17.45}{\ln \frac{D_m}{r_{eq}}} \times 10^{-6} = 3.956 \times 10^{-6} \text{ (S / km)}, \quad g_1 = 0$$

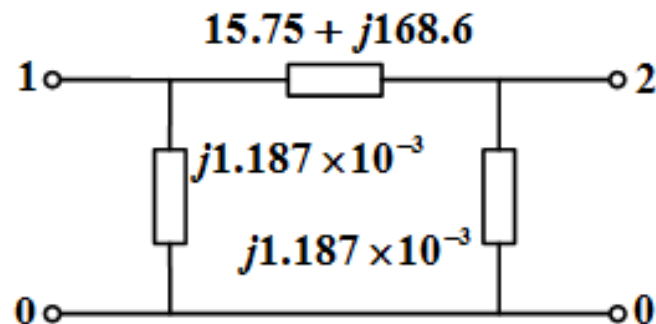
1) 不考虑线路分布参数特征

$$R = r_1 l = 0.02625 \times 600 = 15.75 \text{ } \Omega$$

$$X = x_1 l = 0.281 \times 600 = 168.6 \text{ } \Omega$$

$$B = b_1 l = 3.956 \times 10^{-6} \times 600 = 2.374 \times 10^{-3} \text{ S}$$

$$G = 0$$



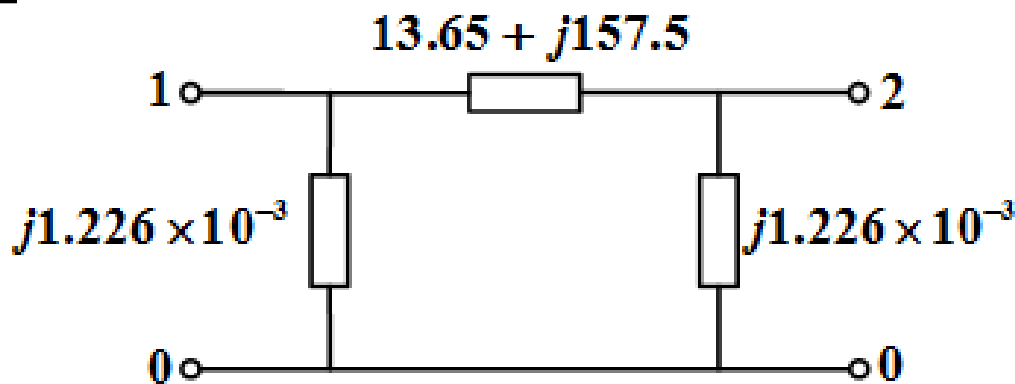
等值电路



2) 近似考虑线路分布参数特征 (使用近似计算金耐黎系数修正)

不考虑电晕，计算金耐黎修正系数：

$$\begin{cases} k_r = 1 - \frac{l^2}{3} x_1 b_1 = 0.867 \\ k_x = 1 - \frac{l^2}{6} b_1 \left(x_1 - \frac{r_1^2}{x_1} \right) = 0.934 \\ k_b = 1 + \frac{l^2}{12} x_1 b = 1.033 \end{cases} \quad \begin{cases} k_r R = 0.867 \times 15.75 = 13.65 \, (\Omega) \\ k_x X = 0.934 \times 168.6 = 157.5 \, (\Omega) \\ k_b B = 1.033 \times 2.374 \times 10^{-3} = 2.452 \times 10^{-3} \, (S) \end{cases}$$



等值电路



3) 精确考虑线路分布参数特征 (使用双曲函数金耐黎系数修正)

$$z_1 = r_1 + jx_1 = 0.02625 + j0.281 = 0.282 \angle 85.66^\circ (\Omega / km)$$

$$y_1 = jb_1 = j3.956 \times 10^{-6} = 3.956 \times 10^{-6} \angle 90^\circ (S / km)$$

$$Z_c = \sqrt{z_1 / y_1} = 267.1 \angle -2.67^\circ (\Omega)$$

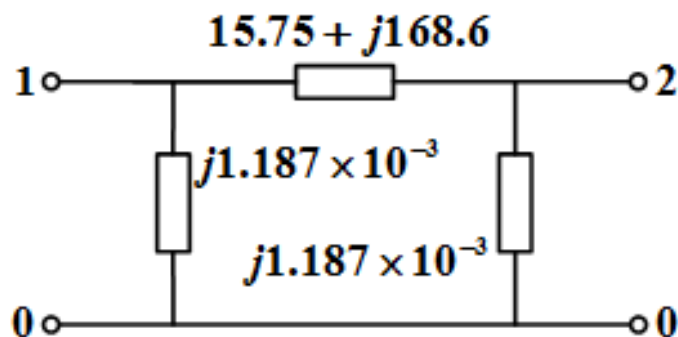
$$\gamma l = l \sqrt{z_1 y_1} = 600 \times \sqrt{0.282 \angle 85.66^\circ \times 3.956 \times 10^{-6} \angle 90^\circ} = 0.634 \angle 87.33^\circ$$

$$\sinh \gamma l = 0.593 \angle 87.7^\circ, \cosh \gamma l = 0.806 \angle 1.24^\circ$$

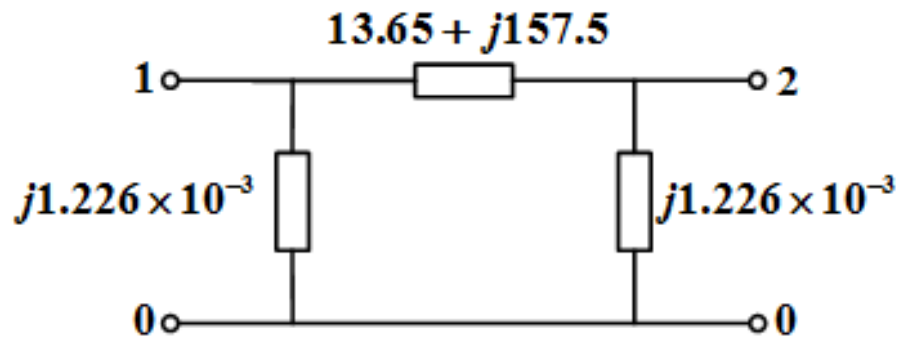
由此可得等值电路参数为：

$$\begin{aligned} Z &= Z_c \sinh \gamma l = 267.1 \angle -2.67^\circ \times 0.593 \angle 87.7^\circ = 158.4 \angle 85.03^\circ \\ &= 13.72 + j157.8 (\Omega) \end{aligned}$$

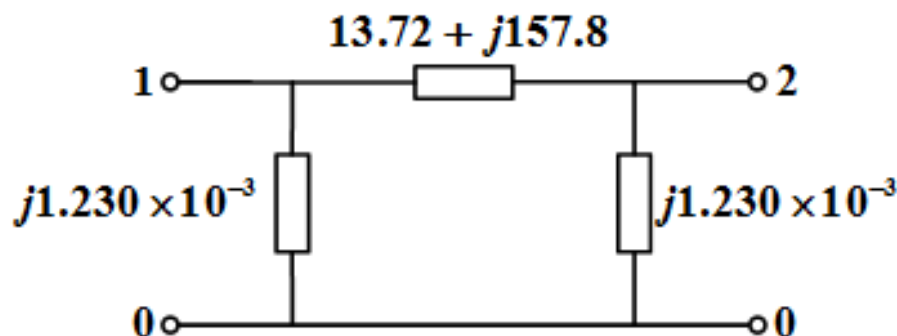
$$\frac{Y}{2} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{Z_c \sinh \gamma l} = 0.00123 \angle 89.82^\circ \approx j1.230 \times 10^{-3} (S)$$



不考虑分布参数特征



近似考虑分布参数特征



精确考虑分布参数特征

由上分析可以看出：

- (1) 当输电线路较长时，不考虑其分布参数特征计算误差较大。其中，R误差最大，X次之，B的计算误差最小；
- (2) 使用金耐黎系数修正，简化了参数计算，计算精度满足工程要求。



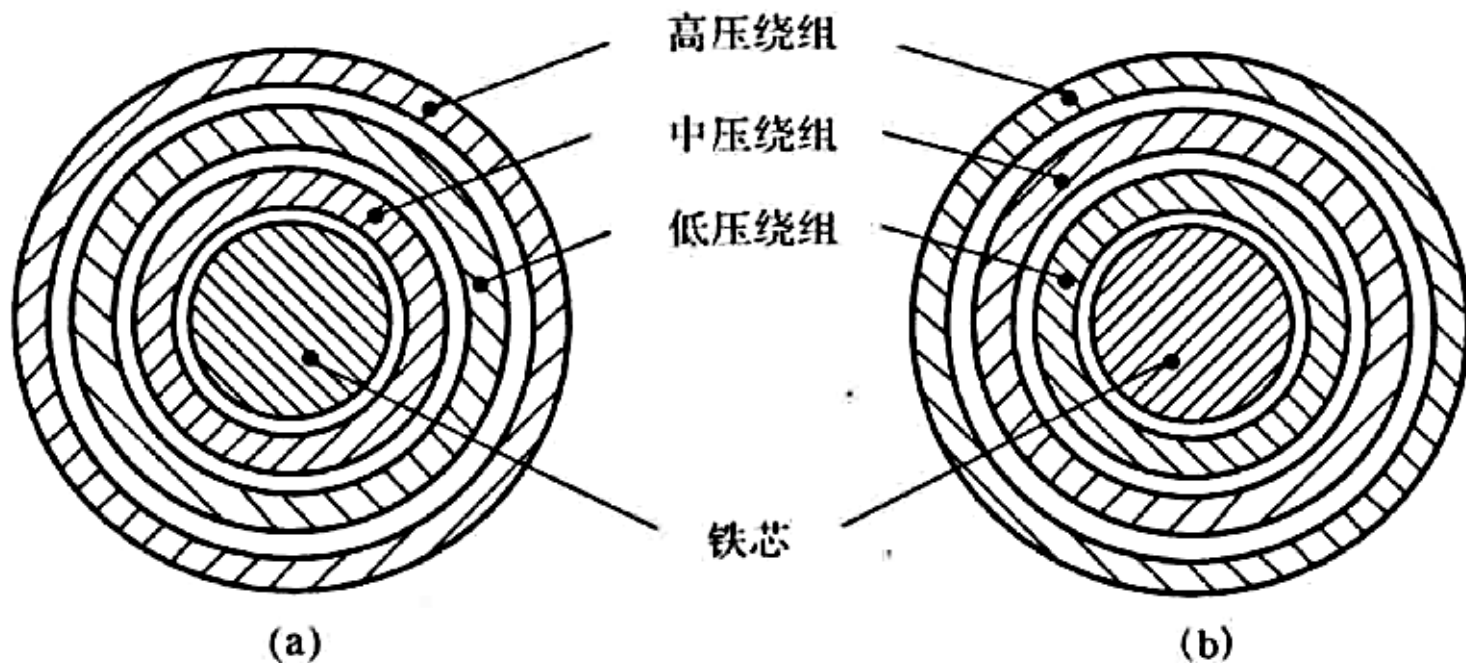
2.2 三相电力变压器

电力变压器的分类方法：

- 1, 磁路系统 { 单相磁路系统：大型或特大型变压器
三相磁路系统：三相三柱、三相五柱
- 2, 连接方式 { 双绕组变压器
三绕组变压器
- 3, 耦合方式 { 普通变压器：一次、二次绕组相互独立，电气隔离
自耦变压器：一次、二次绕组共用公共绕组，电气不隔离
- 4, 升、降压 { 升压变压器
降压变压器
- 5, 调压方式 { 普通分接头变压器
有载调压变压器



升、降压三绕组电力变压器的绕组排列



升压变压器

降压变压器

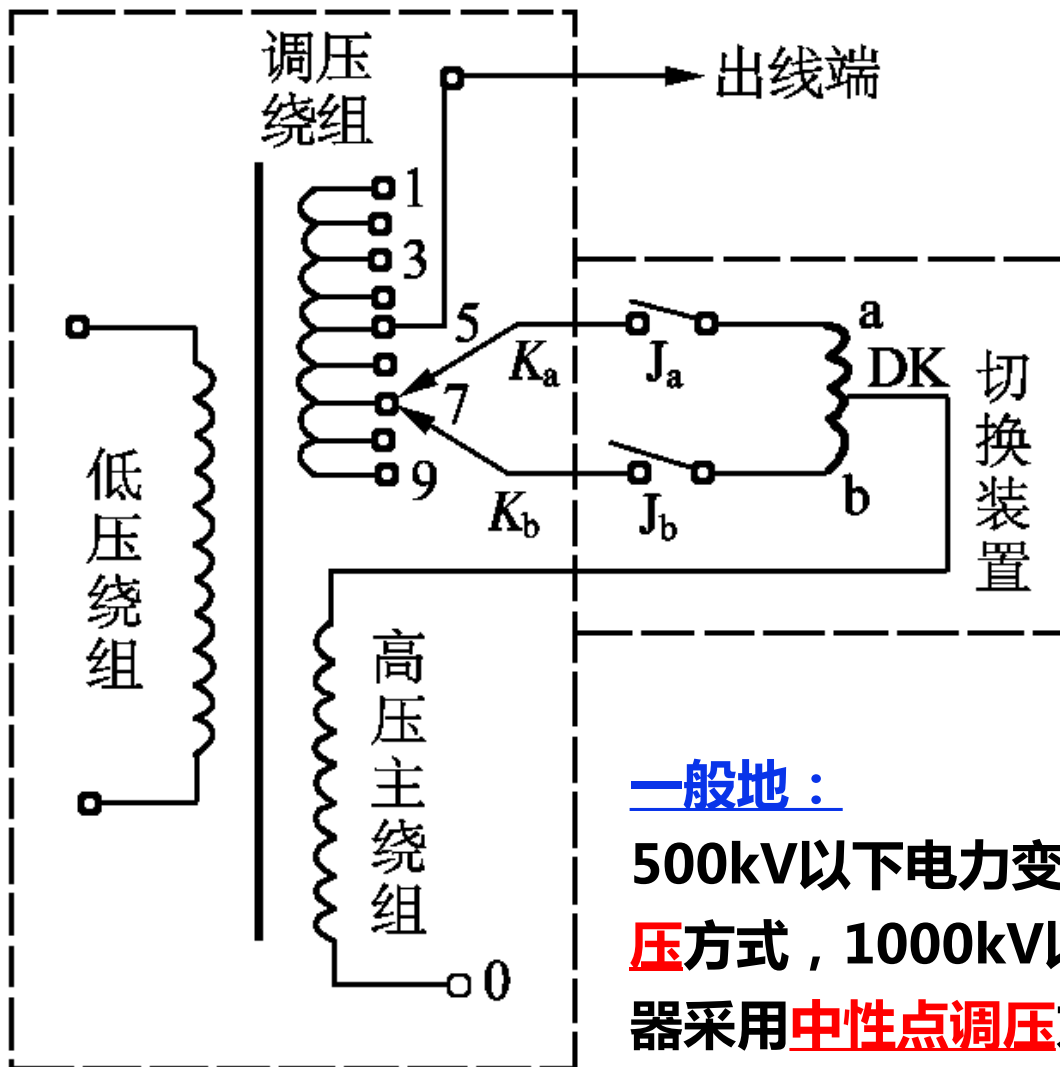
为满足电力系统调压要求，双绕组变压器在高压侧设有分接头，三绕组变压器高压侧和中压侧均设有分接头，低压侧无分接头。三绕组变压器可看作两个双绕组变压器：

高、低压侧——确定高压绕组的分接头（根据低压侧要求）

高、中压侧——确定中压绕组的分接头（根据中压侧要求）。



有载调压电力变压器的工作原理



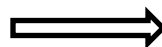
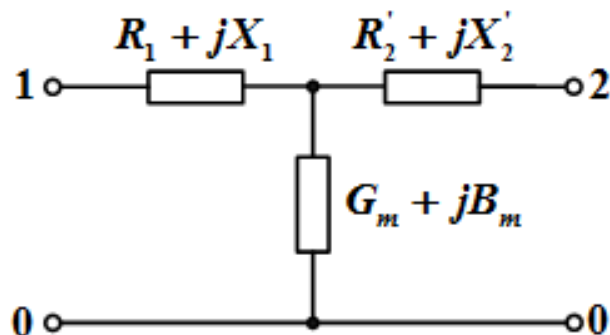
一般地：

500kV以下电力变压器采用**线端调压**方式，1000kV以上特高压变压器采用**中性点调压**方式。

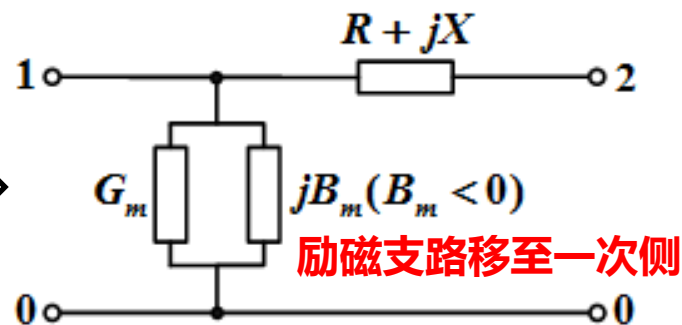


一、双绕组普通变压器的等值电路（与电机学讨论相同）

T 型等值电路



π 型等值电路



根据电机学理论，各参数的确定方法如下：

1. 短路试验：确定短路电压百分比（ $U_k\%$ ）和短路损耗（ P_k ）

使变压器二次三相绕组短路，调节施加于一次绕组的三相电压使一次绕组达到额定电流（二次绕组电流也达到了额定值），测量此时的电压和功率损耗。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{短路电压比：} U_k \% = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} \times 100\% \\ \text{短路损耗：} P_k \approx P_{cu} = 3I_{1N}^2 R = 3\left(\frac{S_N}{\sqrt{3}U_N}\right)^2 R = \frac{S_N^2}{U_N^2} R \end{array} \right.$$



在电力工程中，通常 S_N 单位取 MVA ， U_N 取 kV ， P_K 取 kW ，则：

$$R = \frac{P_k}{1000} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} (\Omega) \quad (\text{折算到一次侧})$$

考虑到电力变压器的阻抗主要以电抗为主，通常 $\sqrt{R^2 + X^2} / X = 1.002 - 1.006$

$$U_k \% = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} \times 100 = \frac{\sqrt{3} I_{1N} X}{U_{1N}} \times 100 = \frac{\sqrt{3} I_{1N} U_{1N} X}{U_{1N}^2} \times 100 = \frac{S_N X}{U_{1N}^2} \times 100$$

$$X = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} (\Omega) \quad (\text{折算到一次侧})$$

2. 空载试验：确定空载电流百分比（ $I_0\%$ ）和空载损耗（ P_0 ）

使变压器二次三相绕组空载，一次绕组施加额定电压，测量此时的空载电流和功率损耗。

$$G_m = \frac{P_0}{1000 U_{1N}^2} (S) \quad (\text{折算到一次侧})$$

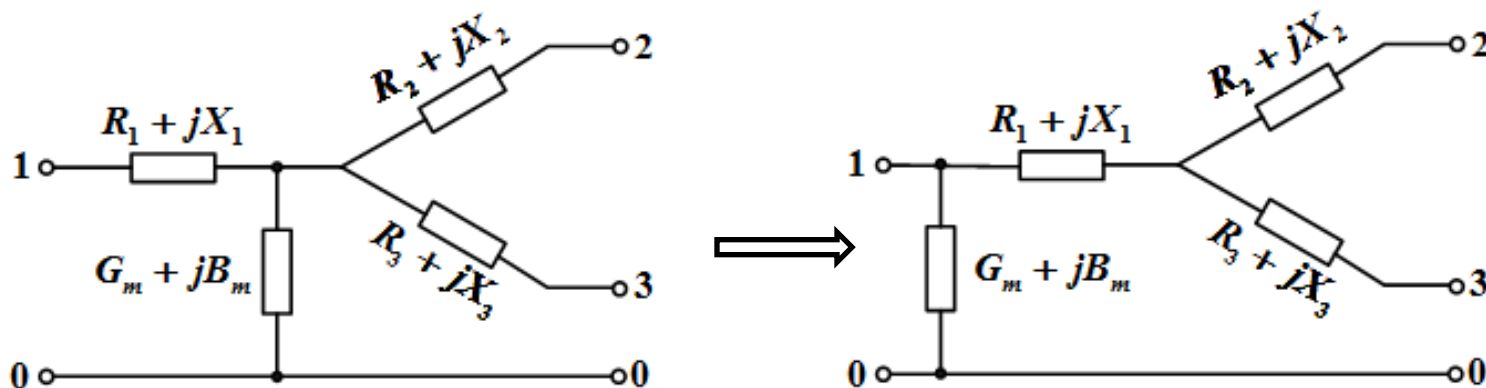
在励磁支路中， $G_m \ll B_m$ ，可近似认为励磁电流与电纳支路相同。则



$$I_0 \% = \frac{I_0}{I_{1N}} \times 100 = \frac{U_{1\varphi N} B_m}{I_{1N}} \times 100 = \frac{U_{1N} B_m}{\sqrt{3} I_{1N}} \times 100 = \frac{U_{1N}^2 B_m}{S_N} \times 100$$

$$B_m = \frac{I_0 \%}{100} \times \frac{S_N}{U_{1N}^2} (S) \quad (\text{折算到一次侧})$$

二、三绕组普通变压器的等值电路



$$R_2 + jX_2 = k_{12}^2 (r_2 + jx_2), \quad R_3 + jX_3 = k_{13}^2 (r_3 + jx_3)$$

三绕组变压器的三种类型：

- 1) 100/100/100型： $S_N = S_{1N} = S_{2N} = S_{3N}$ ，可用于升压也可用于降压
 - 2) 100/100/50型： $S_{1N} = S_{2N} = S_N, S_{3N} = 50\% S_N$
 - 3) 100/50/100型： $S_{1N} = S_{3N} = S_N, S_{2N} = 50\% S_N$
- } 降压使用



由电机学理论，励磁导纳支路参数的确定方法与双绕组变压器相同，即

$$\left. \begin{aligned} G_m &= \frac{P_0}{1000 U_{1N}^2} \text{ (S)} \\ B_m &= \frac{I_0 \%}{100} \times \frac{S_N}{U_{1N}^2} \text{ (S)} \end{aligned} \right\} \text{折算到第一绕组所在电压等级}$$

1. 100/100/100型阻抗确定方法

变压器两两绕组做短路试验（共三次），施压侧绕组达到额定电流时，另一侧也达到了额定电流。

$$\left\{ \begin{aligned} P_{k1-2} &= P_{k1} + P_{k2} \\ P_{k2-3} &= P_{k2} + P_{k3} \\ P_{k3-1} &= P_{k3} + P_{k1} \end{aligned} \right. \Longrightarrow \left\{ \begin{aligned} P_{k1} &= 0.5(P_{k1-2} + P_{k3-1} - P_{k2-3}) \\ P_{k2} &= 0.5(P_{k1-2} + P_{k2-3} - P_{k3-1}) \\ P_{k3} &= 0.5(P_{k2-3} + P_{k3-1} - P_{k1-2}) \end{aligned} \right.$$

$$R_1 = \frac{P_{k1}}{1000} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} \text{ (}\Omega\text{)}, \quad R_2 = \frac{P_{k2}}{1000} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$R_3 = \frac{P_{k3}}{1000} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} \text{ (}\Omega\text{)}$$



同样道理：

$$\begin{cases} U_{k1-2} \% = U_{k1} \% + U_{k2} \% \\ U_{k2-3} \% = U_{k2} \% + U_{k3} \% \\ U_{k3-1} \% = U_{k3} \% + U_{k1} \% \end{cases} \implies \begin{cases} U_{k1} \% = 0.5(U_{k1-2} \% + U_{k3-1} \% - U_{k2-3} \%) \\ U_{k2} \% = 0.5(U_{k1-2} \% + U_{k2-3} \% - U_{k3-1} \%) \\ U_{k3} \% = 0.5(U_{k2-3} \% + U_{k3-1} \% - U_{k1-2} \%) \end{cases}$$

$$X_1 = \frac{U_{k1} \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} (\Omega), \quad X_2 = \frac{U_{k2} \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} (\Omega)$$

$$X_3 = \frac{U_{k3} \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} (\Omega)$$

2. 100/50/100型、100/100/50型阻抗确定方法

变压器两两绕组做短路试验（共三次），半容量绕组达到额定电流时，全容量绕组仅达到了额定电流的一半。

以100/50/100型变压器为例：

$$\begin{cases} P_{k1-2} = P'_{k1-2} \left(\frac{I_N}{I_N / 2} \right)^2 = 4P'_{k1-2} \\ P_{k2-3} = P'_{k2-3} \left(\frac{I_N}{I_N / 2} \right)^2 = 4P'_{k2-3} \end{cases} \quad \begin{cases} U_{k1-2} \% = U'_{k1-2} \% \left(\frac{I_N}{I_N / 2} \right) = 2U'_{k1-2} \% \\ U_{k2-3} \% = U'_{k2-3} \% \left(\frac{I_N}{I_N / 2} \right) = 2U'_{k2-3} \% \end{cases}$$



要计算含半容量绕组三绕组变压器等值电路的参数，需将含半容量绕组的**实验数据** (P'_{k1-2} 、 P'_{k2-3} 、 $U'_{k1-2}\%$ 、 $U'_{k2-3}\%$) **向额定容量归算。**

按新国家标准，变压器制造厂只提供**最大短路损耗**数据：

- 1) **最大短路损耗** $P_{k\max}$ ：两个100%容量绕组的短路损耗，另一个100%或50%容量绕组空载时的损耗。
- 2) 按“**同一电流密度选择导体的通流面积**”原则，由一个100%或50%容量绕组的归算电阻可以求出另一个绕组的归算电阻。

$$R_{100} = \frac{P_{k\max}}{2000} \times \frac{U_N^2}{S_N^2}$$

$$R_{50} = 2R_{100}$$

例：一台容量比为100/100/50的三相三绕组升压变压器，额定容量120MVA，额定变比为220/121/10.5kV，空载时 $I_0\% = 0.9$ ， $P_0 = 123.1kW$ ，短路实验数据见下表。求变压器的等值电路（归算到中压侧）。



	高压—中压	高压—低压	中压—低压	
$P_k(kW)$	660	256	227	未归算
$U_k\%$	24.7	14.7	8.8	已归算

解：励磁支路的参数计算

$$G_m = \frac{P_0}{1000U_{2N}^2} = \frac{123.1}{1000 \times 121^2} = 8.41 \times 10^{-6} (S)$$

$$B_m = \frac{I_0\%}{100} \times \frac{S_N}{U_{2N}^2} = \frac{0.9}{100} \times \frac{120}{121^2} = 73.8 \times 10^{-6} (S)$$

由题给短路损耗，可得

$$\begin{cases} P_{k1-2} = 660kW \\ P_{k2-3} = 4 \times 256 = 1024kW \\ P_{k3-1} = 4 \times 227 = 908kW \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} P_{k1} = 0.5(660 + 1024 - 908) = 388kW \\ P_{k2} = 0.5(660 + 908 - 1024) = 272kW \\ P_{k3} = 0.5(1024 + 908 - 660) = 636kW \end{cases}$$

$$R_1 = \frac{P_{k1}}{1000} \times \frac{U_{2N}^2}{S_N^2} = \frac{388}{1000} \times \frac{121^2}{120^2} = 0.394 (\Omega)$$

$$R_2 = 0.277 (\Omega), R_3 = 0.647 (\Omega)$$



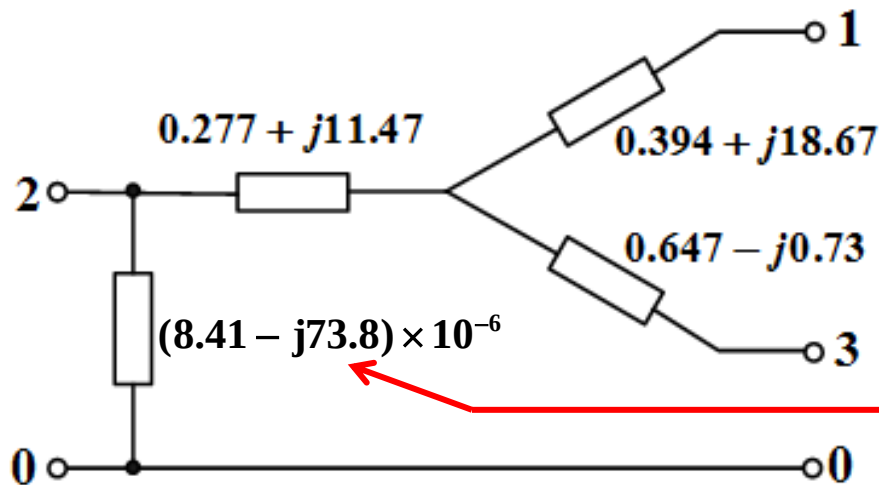
$$\begin{cases} U_{k1}\% = 0.5(U_{k1-2}\% + U_{k3-1}\% - U_{k2-3}\%) = 0.5(24.7 + 14.7 - 8.8) = 15.3 \\ U_{k2}\% = 0.5(U_{k1-2}\% + U_{k2-3}\% - U_{k3-1}\%) = 0.5(24.7 + 8.8 - 14.7) = 9.4 \\ U_{k3}\% = 0.5(U_{k2-3}\% + U_{k3-1}\% - U_{k1-2}\%) = 0.5(14.7 + 8.8 - 24.7) = -0.6 \end{cases}$$

各绕组电抗如下：

$$X_1 = \frac{U_k\%}{100} \times \frac{U_{2N}^2}{S_N} = \frac{15.3}{100} \times \frac{121^2}{120} = 18.67 (\Omega)$$

$$X_2 = 11.47 (\Omega), \quad X_3 = -0.73 (\Omega)$$

三绕组变压器归算至中压侧的等值电路为

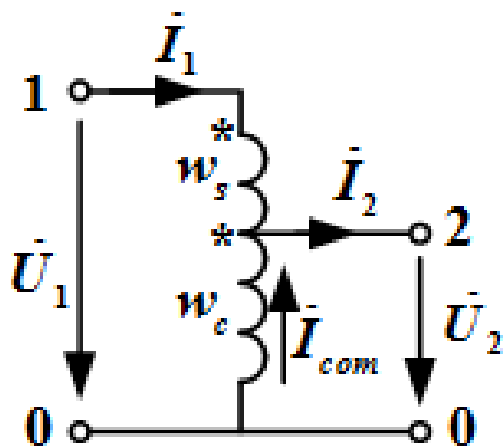


变压器并联支路为励磁支路，
属感性，取负值；
输电线路并联支路为分布电
容支路，属容性，取正值。



三、自耦变压器的等值电路

1. 工作原理与特殊问题



自耦变压器变比 $k_{12} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{w_s + w_c}{w_c}$

公共绕组电流： $\dot{I}_{com} = -\dot{I}_1 + \dot{I}_2$

忽略励磁电流，由磁势平衡可得：

$$(w_s + w_c)\dot{I}_1 = w_c\dot{I}_2 \Rightarrow w_s\dot{I}_1 = w_c(-\dot{I}_1 + \dot{I}_2) = w_c\dot{I}_{com}$$

$$\frac{\dot{I}_{com}}{\dot{I}_1} = \frac{w_s}{w_c} = k_{12} - 1$$

$$\frac{\dot{I}_{com}}{\dot{I}_2} = \frac{\dot{I}_{com}}{\dot{I}_{com} + \dot{I}_1} = \frac{1}{1 + \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_{com}}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_{12} - 1}} = \frac{k_{12} - 1}{k_{12}} = 1 - \frac{1}{k_{12}} = K_b$$

定义： $K_b = 1 - \frac{1}{k_{12}} = \frac{U_{1N}/U_{2N} - 1}{U_{1N}/U_{2N}} = \frac{U_{1N} - U_{2N}}{U_{1N}} = \frac{w_s}{w_s + w_c}$ 为效益系数。

$\dot{I}_{com} = K_b \dot{I}_2$ ，公共绕组电流小于二次电流。



自耦变压器的端口功率关系

$$\tilde{S}_2 = \dot{U}_2^* I_2^* = \dot{U}_2^* (I_1^* + I_{com}^*) = \dot{U}_2^* I_1^* + \dot{U}_2^* I_{com}^*$$

串联绕组传送的功率

磁耦合传送的功率

公共绕组功率： $\tilde{S}_{com} = \dot{U}_2^* I_{com}^* = \dot{U}_2^* I_2^* K_b = K_b \tilde{S}_2$ ，额定运行时

$$S_{com} = K_b U_{2N} I_{2N} = K_b S_N = S_{st}$$

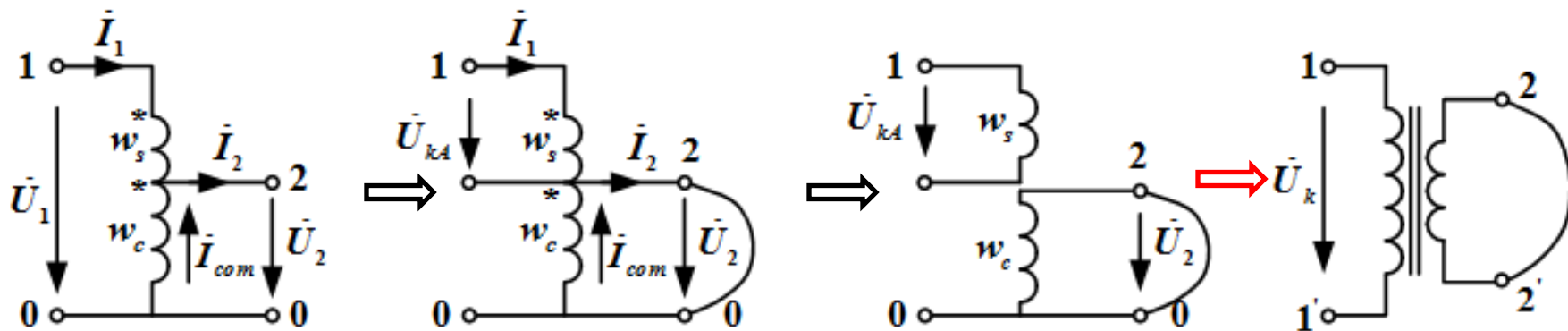
S_{st} 称为自耦变压器的**标准容量（设计容量、结构容量）**，也是公共绕组的额定容量，是变压器额定容量的 K_b 倍。

（1）同容量自耦变压器与普通变压器相比省铜、铁，通常当 $k_{12} = 1.5 - 3$ 时，经济效益最为显著；

（2）自耦变压器运行于 $Y_0 / Y_0 - 12$ 连接组，且中性点应直接接地，以避免高压侧过电压引入低压侧（通常双侧加装避雷器）。



2. 双绕组自耦变压器等值电路的参数



比较同容量自耦变压器与普通变压器。设两种变压器的漏磁系数相同，可得

$$\frac{U_{kA}}{U_{1N} - U_{2N}} = \frac{U_k}{U_{1N}}$$

$$\frac{U_{kA}}{U_{1N}} = \frac{U_{kA}}{U_{1N} - U_{2N}} \times \frac{U_{1N} - U_{2N}}{U_{1N}} = K_b \frac{U_{kA}}{U_{1N} - U_{2N}} = K_b \frac{U_k}{U_{1N}}$$

显然， $U_{kA} \% = K_b U_k \%$ ，自耦变压器短路电压比是同容量普通变压器的 K_b 倍。

串联绕组损耗： $P_{ks} = \frac{w_s}{w_s + w_c} P_{k1} = K_b P_{k1}$

公共绕组损耗（公共绕组通流面积为普通变压器的 K_b 倍）： $P_{kc} = K_b P_{k2}$



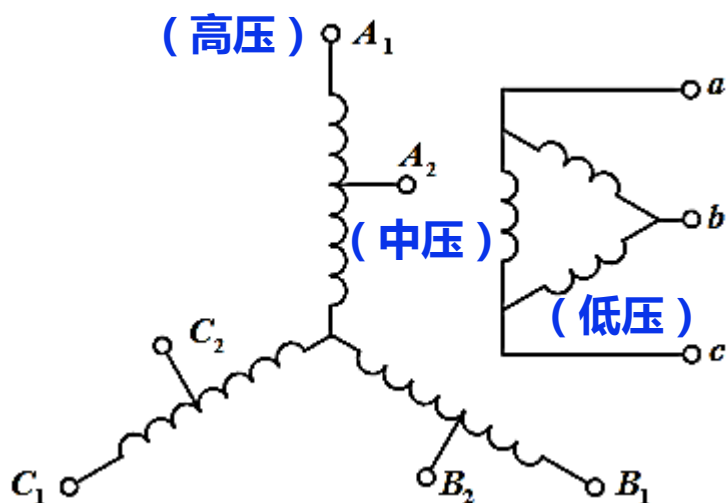
$$P_{kA} = P_{ks} + P_{kc} = K_b (P_{k1} + P_{k2}) = K_b P_k$$

即，自耦变压器的短路损耗为同容量普通变压器的 K_b 倍。因此

$$R_A + jX_A = K_b (R + jX)$$

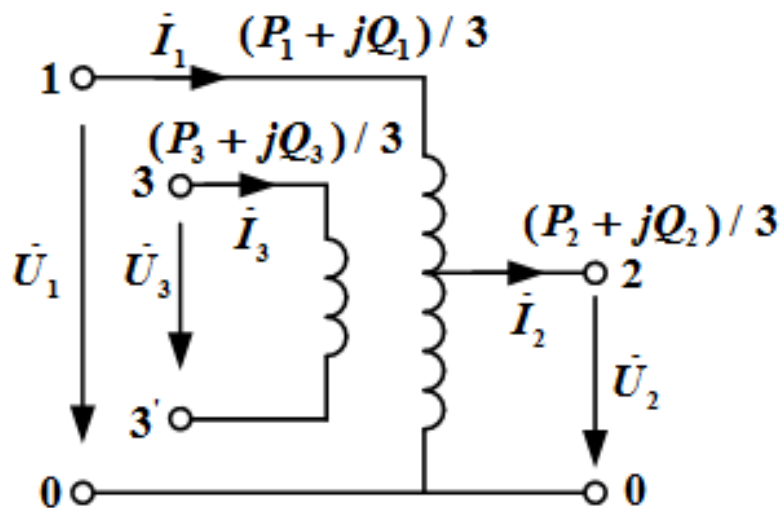
自耦变压器较普通变压器，具有较小的短路阻抗，且省铜、铁。

3，三绕组自耦变压器



- 1) 通常低压绕组与高、中压绕组只有磁耦合，其容量不大于自耦变压器的标准容量，一般取 $S_{3N} = S_{st}$ ；
- 2) 等值电路与三绕组普通变压器相类似；
- 3) 一般地，第3绕组为三角形接法，用于消除系统的三次谐波。

4) 三绕组自耦变压器的特殊问题：公共绕组过载问题。



设变压器1、3绕组同时向第2绕组供电

$$\begin{cases} P_2 = P_1 + P_3 \\ Q_2 = Q_1 + Q_3 \\ U_1 = k_{12} U_2 \end{cases}$$

高压侧输入的三相复功率为

$$\tilde{S}_1 = 3\dot{U}_1 \dot{I}_1^* = 3k_{12} \dot{U}_2 \dot{I}_1^* = P_1 + jQ_1$$

中压侧输出的复功率为

$$\tilde{S}_2 = 3\dot{U}_2 \dot{I}_2^* = P_2 + jQ_2 = (P_1 + P_3) + j(Q_1 + Q_3)$$

公共绕组的复功率为

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{com} &= 3\dot{U}_2 \dot{I}_{com}^* = 3\dot{U}_2 (-\dot{I}_1^* + \dot{I}_2^*) = 3\dot{U}_2 \dot{I}_2^* - 3\dot{U}_2 \dot{I}_1^* \\ &= (P_1 + P_3) + j(Q_1 + Q_3) - (P_1 + jQ_1) / k_{12} \\ &= (P_1 + P_3 - P_1 / k_{12}) + j(Q_1 + Q_3 - Q_1 / k_{12}) \end{aligned}$$

考虑到 $K_b = 1 - 1 / k_{12}$, 则

$$\tilde{S}_{com} = (K_b P_1 + P_3) + j(K_b Q_1 + Q_3)$$



关于三绕组自耦变压器公共绕组容量推导的释疑

$$\text{由} \begin{cases} \frac{I_{com}}{I_1} = k_{12} - 1 \\ \frac{I_{com}}{I_2} = 1 - \frac{1}{k_{12}} \end{cases} \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = k_{12} = \frac{I_2^*}{I_1^*}$$

$$\text{已知} \tilde{S}_2 = 3\dot{U}_2 I_2^* = (P_1 + P_3) + j(Q_1 + Q_3)$$

$$3\dot{U}_2 I_1^* = 3\dot{U}_2 \cdot \frac{I_2^*}{k_{12}} = \frac{1}{k_{12}} \cdot 3\dot{U}_2 I_2^* = \frac{1}{k_{12}} \tilde{S}_2$$

$$\therefore \text{公共绕组} \tilde{S}_{com} = 3\dot{U}_2 I_{com}^* = 3\dot{U}_2 \cdot (I_2^* - I_1^*)$$

$$= 3\dot{U}_2 I_2^* - 3\dot{U}_2 I_1^*$$

$$= \tilde{S}_2 - \frac{1}{k_{12}} \tilde{S}_2$$

$$= (1 - \frac{1}{k_{12}}) \tilde{S}_2$$

$$= K_b \tilde{S}_2$$

$$= K_b \cdot [P_1 + P_3 + j(Q_1 + Q_3)]$$

$$\Rightarrow \tilde{S}_{com} = K_b \cdot [P_1 + P_3 + j(Q_1 + Q_3)]$$

而课本为:

$$\tilde{S}_{com} = K_b P_1 + P_3 + j(K_b Q_1 + Q_3)$$

同学的推导过程:

$$\tilde{S}_2 = 3\dot{U}_2 \hat{I}_2 = P_2 + jQ_2 = (P_1 + P_3) + j(Q_1 + Q_3)$$

$$3\dot{U}_2 \hat{I}_1 = 3\dot{U}_2 \hat{I}_2 / k_{12} = \tilde{S}_2 / k_{12}$$

$$\tilde{S}_{com} = 3\dot{U}_2 \hat{I}_{com} = 3\dot{U}_2 (\hat{I}_2 - \hat{I}_1) = 3\dot{U}_2 \hat{I}_2 - 3\dot{U}_2 \hat{I}_1$$

$$= \tilde{S}_2 - \tilde{S}_2 / k_{12}$$

$$= (1 - 1/k_{12}) \tilde{S}_2$$

$$= K_b \tilde{S}_2 = K_b [(P_1 + P_3) + j(Q_1 + Q_3)]$$

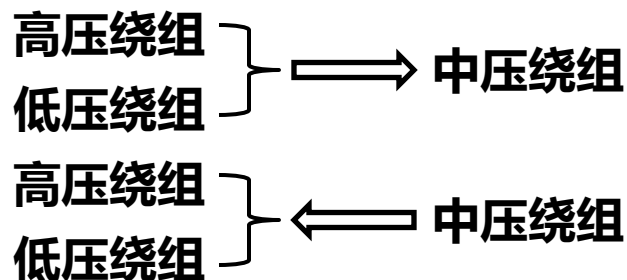
教材中, $\tilde{S}_{com} = (K_b P_1 + P_3) + j(K_b Q_1 + Q_3)$



$$S_{com} = \sqrt{(K_b P_1 + P_3)^2 + (K_b Q_1 + Q_3)^2}$$

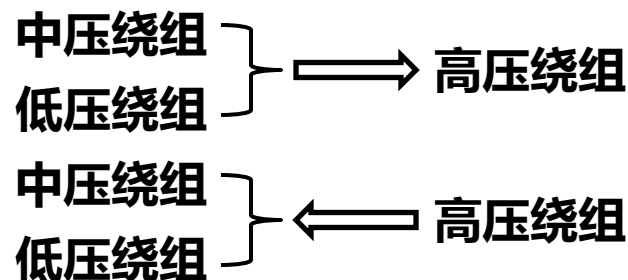
- 1) 欲使公共绕组不过载, 须 $S_{com} \leq K_b S_N$;
- 2) 公共绕组功率与自耦变压器的运行方式直接相关。

运行方式1



此时 $(P_1, P_3), (Q_1, Q_3)$ 同时
为正或负, 应进行过载校验。

运行方式2



此时 $(P_1, P_3), (Q_1, Q_3)$ 总是
符号相反, 无需过载校验。

综上所述讨论小结如下:

- 1) 变压器的等值电路及等值电路参数的确定方法与电机学讨论相同;
- 2) 自耦变压器与同容量普通变压器相比, 具有较小的串联阻抗, 其电压损失与功率损失均较小;
- 3) 两个特殊问题: 三绕组变压器的容量归算、三绕组自耦变压器公共绕组过载。



例：一台三绕组自耦变压器，额定电压比为 $242 / 121 / 10.5kV$ ，额定容量为 $120MVA$ ，容量比为 $100 / 100 / 50$ ， $I_0\% = 0.5$ ， $P_0 = 90kW$ 。
短路实验数据为：

$$P_{k1-2} = 430kW, P'_{k1-3} = 228.8kW, P'_{k2-3} = 280.3kW$$

$$U_{k1-2}\% = 12.8, U_{k1-3}\% = 11.8, U_{k2-3}\% = 17.58$$

1) 等值电路（归算至中压侧）；

2) 变压器某一运行方式（高压、低压侧向中压侧供电），校验过载。

$$P_1 + jQ_1 = 108 + j15.4MVA, P_2 + jQ_2 = 101.8 + j40.2MVA$$

$$P_3 + jQ_3 = -6 + j42.3MVA$$

解：由题可知

$$S_N = S_{1N} = S_{2N} = 120MVA, S_{3N} = 50\%S_N = 60MVA$$

$$k_{12} = 242 / 121 = 2, K_b = 1 - 1 / k_{12} = 0.5, S_{com} = K_b S_N = 60MVA$$

1) 计算励磁支路参数

$$G_m = \frac{P_0}{1000U_{2N}^2} = \frac{90}{1000 \times 121^2} = 6.15 \times 10^{-6}(S)$$

$$B_m = \frac{I_0\%}{100} \times \frac{S_N}{U_{2N}^2} = \frac{0.5}{100} \times \frac{120}{121^2} = 41.0 \times 10^{-6}(S)$$



2) 计算串联阻抗参数

向额定容量归算实验数据，可得

$$\begin{cases} P_{k1-2} = 430 \text{ kW} \\ P_{k1-3} = 4P'_{k1-3} = 4 \times 228.8 = 915.2 \text{ kW} \\ P_{k2-3} = 4P'_{k2-3} = 4 \times 280.3 = 1121.2 \text{ kW} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{k1} = 112 \text{ kW} \\ P_{k2} = 318 \text{ kW} \\ P_{k3} = 803.2 \text{ kW} \end{cases}$$

$$R_1 = \frac{P_{k1}}{1000} \times \frac{U_{2N}^2}{S_N^2} = \frac{112}{1000} \times \frac{121^2}{120^2} = 0.1139 \text{ } (\Omega)$$

$$R_2 = 0.323 \text{ } (\Omega), R_3 = 0.816 \text{ } (\Omega)$$

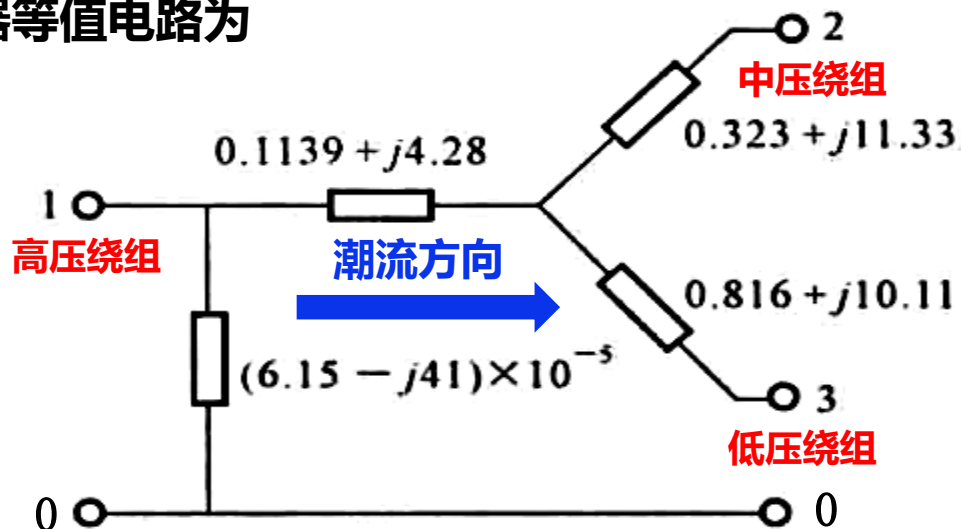
$$\begin{cases} U_{k1-2} \% = 12.8 \\ U_{k1-3} \% = 11.8 \\ U_{k2-3} \% = 17.58 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_{k1} \% = 0.5(U_{k1-2} \% + U_{k1-3} \% - U_{k2-3} \%) = 3.51 \\ U_{k2} \% = 9.29 \\ U_{k3} \% = 8.29 \end{cases}$$

$$X_1 = \frac{U_{k1} \%}{100} \times \frac{U_{2N}^2}{S_N} = \frac{3.51}{100} \times \frac{121^2}{120} = 4.28 \text{ } (\Omega)$$

$$X_2 = 11.33 \text{ } (\Omega), X_3 = 10.11 \text{ } (\Omega)$$



自耦变压器等值电路为



3) 过载校验

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{108^2 + 15.4^2} = 109.1 \text{ MVA} < S_{1N}$$

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{101.8^2 + 40.2^2} = 109.4 \text{ MVA} < S_{2N}$$

$$S_3 = \sqrt{P_3^2 + Q_3^2} = \sqrt{6^2 + 42.3^2} = 42.7 \text{ MVA} < S_{3N} = 50\% S_N$$

$$S_{com} = \sqrt{(K_b P_1 + P_3)^2 + (K_b Q_1 + Q_3)^2} = 69.3 \text{ MVA} > K_b S_N$$

公共绕组已过载。



2.5 电力系统负荷

一、综合负荷的划分方法和数学模型

划分方法 { 按区域划分
按电压等级划分

负荷数学模型：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{动态模型} \\ \text{静态模型} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} P = f_P(t, U, f, dU/dt, df/dt, \dots) \\ Q = f_Q(t, U, f, dU/dt, df/dt, \dots) \\ P = F_P(U, f) \\ Q = F_Q(U, f) \end{array} \right.$$

二、用电压静态特性表示综合负荷数学模型 ($f = \text{const.}$)

$$\left\{ \begin{array}{l} P = P_N [a_p (\frac{U}{U_N})^2 + b_p (\frac{U}{U_N}) + c_p] \\ Q = Q_N [a_q (\frac{U}{U_N})^2 + b_q (\frac{U}{U_N}) + c_q] \end{array} \right. \quad \text{其中,} \quad \left\{ \begin{array}{l} a_p + b_p + c_p = 1 \\ a_q + b_q + c_q = 1 \end{array} \right.$$

各行业设备组成不同，其综合负荷拟合函数也不同，具有**行业特征**。



$$P = P_N \left[a_p \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 + b_p \left(\frac{U}{U_N} \right) + c_p \right] \quad \text{恒定功率负荷}$$

恒定阻抗负荷 $\xrightarrow{\quad \uparrow \quad}$ $\xrightarrow{\quad \uparrow \quad}$ 恒定电流负荷

当负荷电压与额定电压相差不大时，可在额定电压处按线性化处理。即

$$\begin{cases} P = P_N \left[1 + K_{pU} \frac{U - U_N}{U_N} \right] \\ Q = Q_N \left[1 + K_{qU} \frac{U - U_N}{U_N} \right] \end{cases}$$

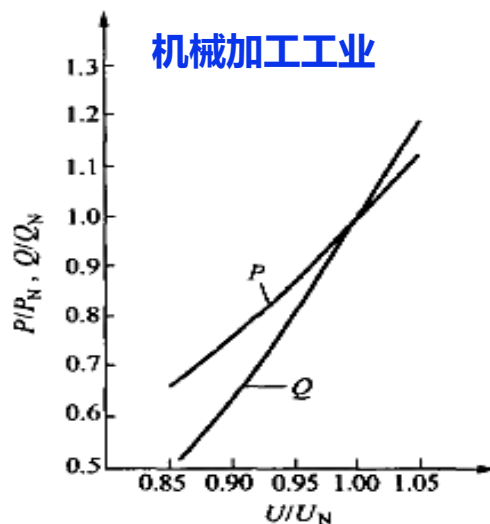
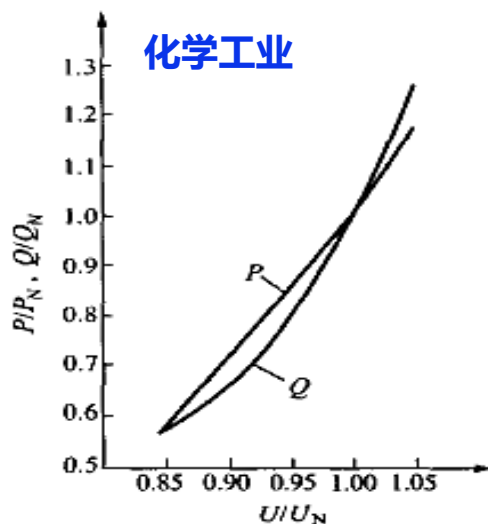
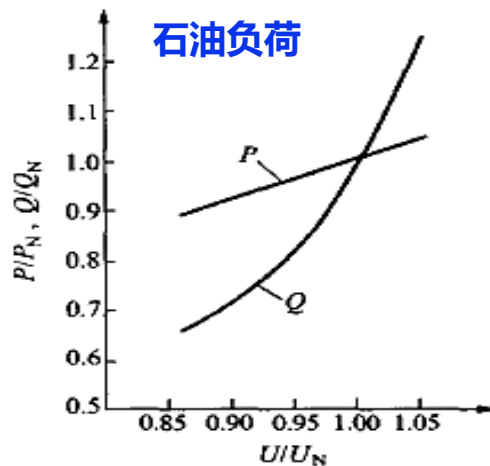
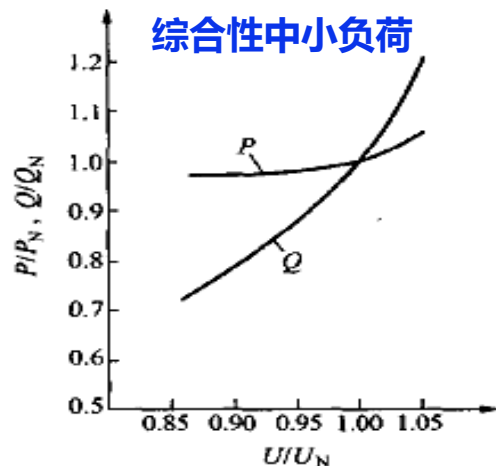
三、用电压、频率特性表示综合负荷数学模型

$$\begin{cases} P = P_N \left[a_p \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 + b_p \left(\frac{U}{U_N} \right) + c_p \right] \left(1 + K_{pf} \frac{f - f_N}{f_N} \right) \\ Q = Q_N \left[a_p \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 + b_p \left(\frac{U}{U_N} \right) + c_p \right] \left(1 + K_{qf} \frac{f - f_N}{f_N} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P = P_N \left(1 + K_{pU} \frac{U - U_N}{U_N} \right) \left(1 + K_{pf} \frac{f - f_N}{f_N} \right) \\ Q = Q_N \left(1 + K_{qU} \frac{U - U_N}{U_N} \right) \left(1 + K_{qf} \frac{f - f_N}{f_N} \right) \end{cases}$$



典型行业负荷功率与电压的静态特性

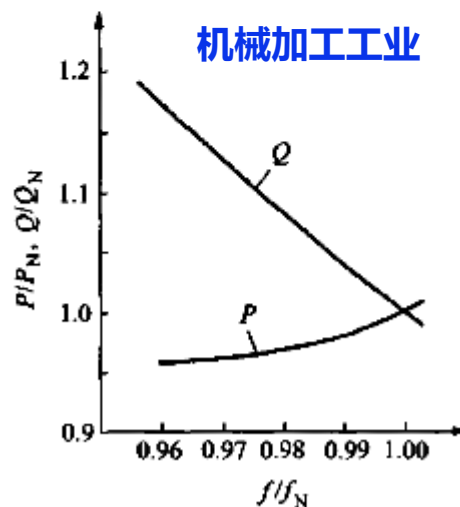
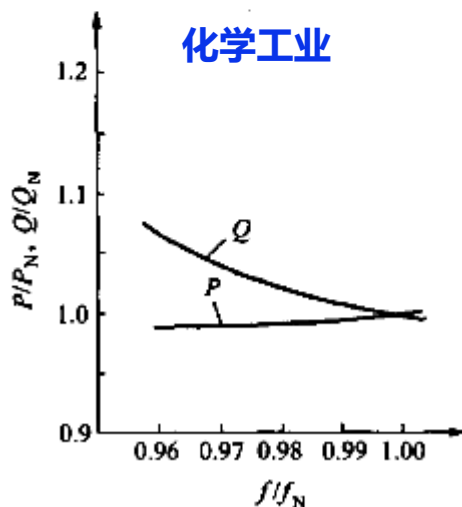
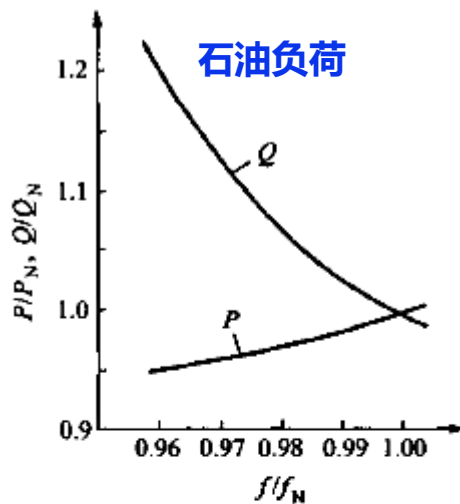
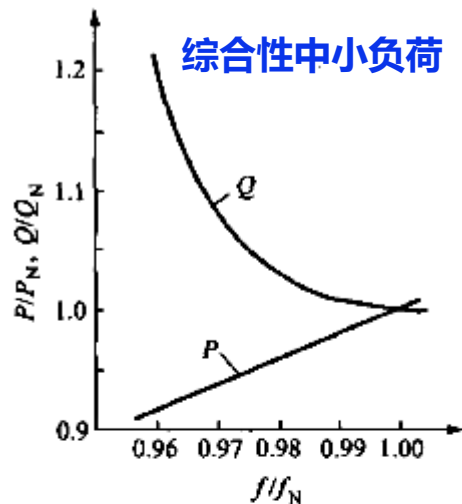


可以看出：

不同行业负荷的有功功率与无功功率和电压水平间存在正相关关系，电压降低时负荷的有功功率与无功功率均下降。



典型行业负荷功率与频率的静态特性



可以看出：

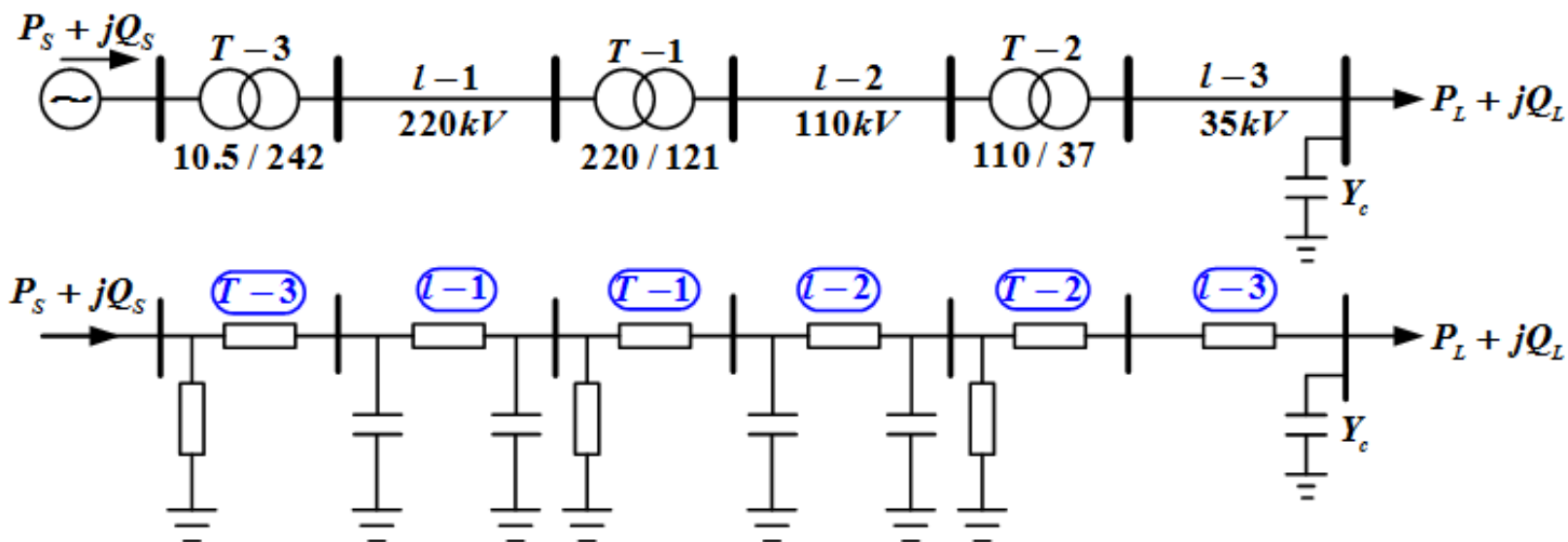
不同行业负荷的有功功率与频率间存在正相关关系；无功功率和频率间存在反相关关系。即随着频率下降，负荷的有功功率下降，但无功功率却上升。



2.6 多级电压电力系统 ——电力网络的数学模型（等值电路）

一、有名值电力网络数学模型

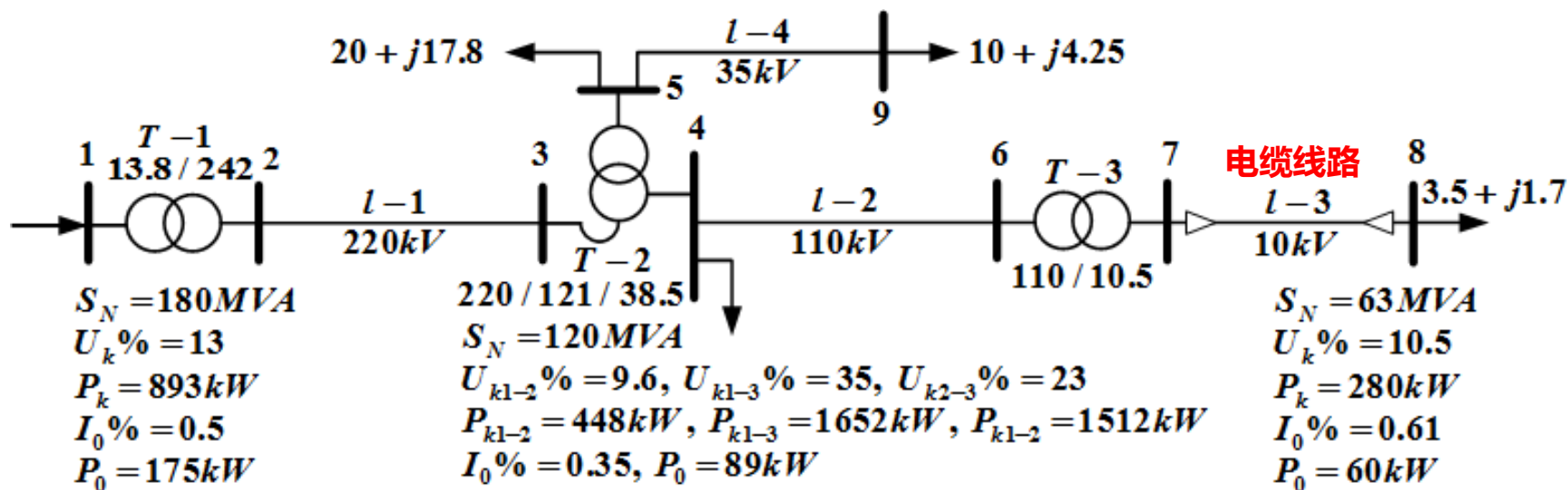
某电力系统如下图所示，制定其等值电路。



- 1) 等值电路中只能保留一个电压等级，称为基本级（基准级）。为了减少计算，通常取含电力元件的电压等级作为基本级。
- 2) 各元件参数按变压器变比向基本级归算（功率不存在归算问题）。



例：某电力网络如下图所示，制定等值电路（元件参数、各元件数据见P82）。



运行于-2.5%分接头，试验数据已归算至额定容量

解：取220kV为基本级，制定等值电路

(1) 变压器T-1的参数（向基本级归算）

$$R_{T-1} = \frac{P_k}{1000} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} = \frac{893}{1000} \times \frac{242^2}{180^2} = 1.614 (\Omega)$$

$$X_{T-1} = \frac{U_k\%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} = \frac{13}{100} \times \frac{242^2}{180} = 42.3 (\Omega)$$

$$Y_{m1} = \frac{P_0}{1000U_{1N}^2} - j \frac{I_0\%}{100} \times \frac{S_N}{U_{1N}^2} = (2.99 - j15.37) \times 10^{-6} (\text{S})$$



(2) 220kV线路L-1的参数 (基本级)

$$Z_{l-1} = (r_1 + jx_1)l = (0.08 + j0.406) \times 150 = 12 + j60.9 (\Omega)$$

$$Y_{l-1} = j \frac{B_{l-1}}{2} = j \frac{b_1}{2} l = j2.11 \times 10^{-4} (S)$$

(3) 自耦变压器T-2的参数 (向基本级归算)

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{k1} = 0.5(P_{k1-2} + P_{k1-3} - P_{k2-3}) = 295kW \\ P_{k2} = P_{k1-2} - P_{k1} = 154kW \\ P_{k3} = P_{k2-3} - P_{k2} = 1358kW \end{array} \right. \Longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_{12} = \frac{P_{k1}}{1000} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} = 0.988 (\Omega) \\ R_{22} = 0.517 (\Omega) \\ R_{32} = 4.56 (\Omega) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{k1} \% = 0.5(U_{k1-2} \% + U_{k1-3} \% - U_{k2-3} \%) = 10.8 \\ U_{k2} \% = U_{k1-2} \% - U_{k1} \% = -1.2 \\ U_{k3} \% = U_{k2-3} \% - U_{k2} \% = 24.2 \end{array} \right. \Longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} X_{12} = \frac{U_{k1} \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} = 43.6 (\Omega) \\ X_{22} = -4.84 (\Omega) \\ X_{32} = 97.6 (\Omega) \end{array} \right.$$



$$Y_{m2} = \frac{P_0}{1000U_{1N}^2} - j \frac{I_0 \%}{100} \times \frac{S_N}{U_{1N}^2} = (1.84 - j8.68) \times 10^{-6} \text{ (S)}$$

$$\text{自耦变压器实际变比: } k_{12} = \frac{220(1 - 0.025)}{121} = \frac{214.5}{121}, k_{13} = \frac{214.5}{38.5}$$

(4) 110kV线路L-2的参数 (按实际变比向基本级归算)

$$Z_{l-2} = (0.105 + j0.383) \times 60 \times \left(\frac{214.5}{121} \right)^2 = 19.8 + j72.2 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$Y_{l-2} = j \frac{B_{l-2}}{2} = j2.98 \times 10^{-6} \times \frac{60}{2} \times \left(\frac{121}{214.5} \right)^2 = j2.84 \times 10^{-5} \text{ (S)}$$

(5) 变压器T-3的参数 (向高压侧归算后按实际变比向基本级归算)

$$R_{T-3} = \left(\frac{280}{1000} \times \frac{110^2}{63^2} \right) \times \left(\frac{214.5}{121} \right)^2 = 2.86 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$X_{T-3} = \left(\frac{10.5}{100} \times \frac{110^2}{63} \right) \times \left(\frac{214.5}{121} \right)^2 = 63.4 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$Y_{m3} = \left(\frac{60}{1000 \times 110^2} - j \frac{0.61}{100} \times \frac{63}{110^2} \right) \times \left(\frac{121}{214.5} \right)^2 = (1.58 - j10.1) \times 10^{-6} \text{ (S)}$$



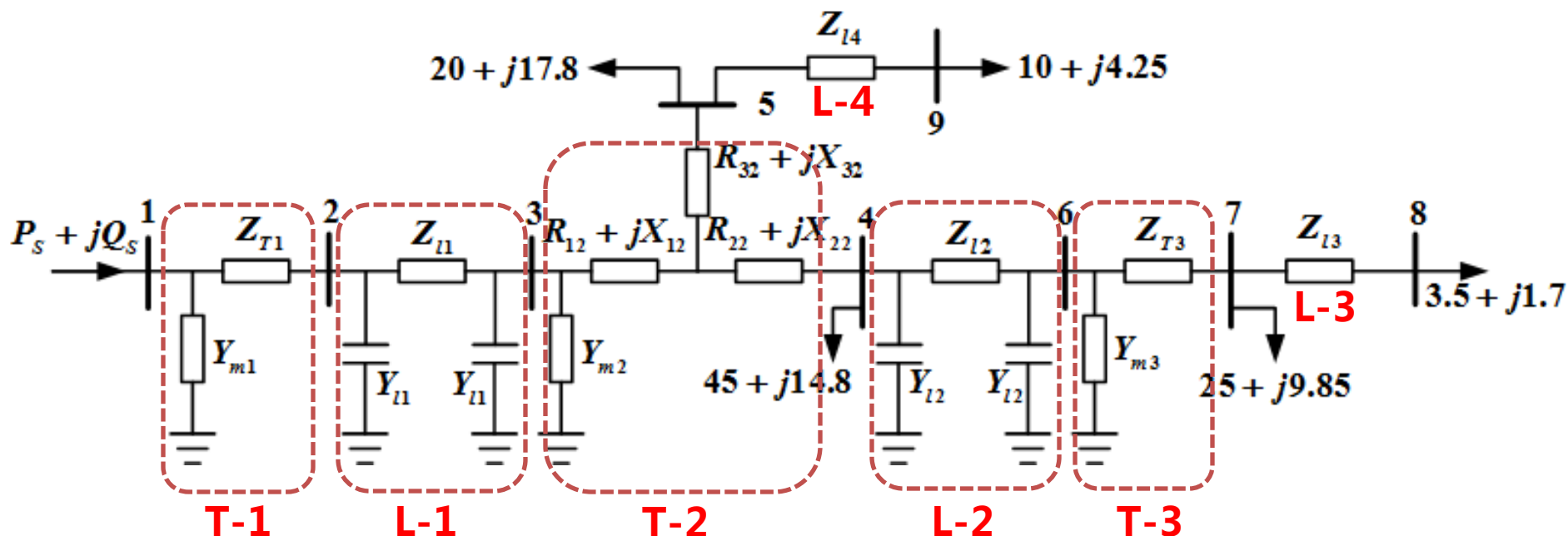
(6) 10kV线路L-3的参数 (按实际变比向基本级归算)

$$Z_{l-3} = (0.45 + j0.08) \times 2.5 \times \left(\frac{214.5}{121} \times \frac{110}{10.5} \right)^2 = 388 + j69 (\Omega)$$

(7) 35kV线路L-4的参数 (按实际变比向基本级归算)

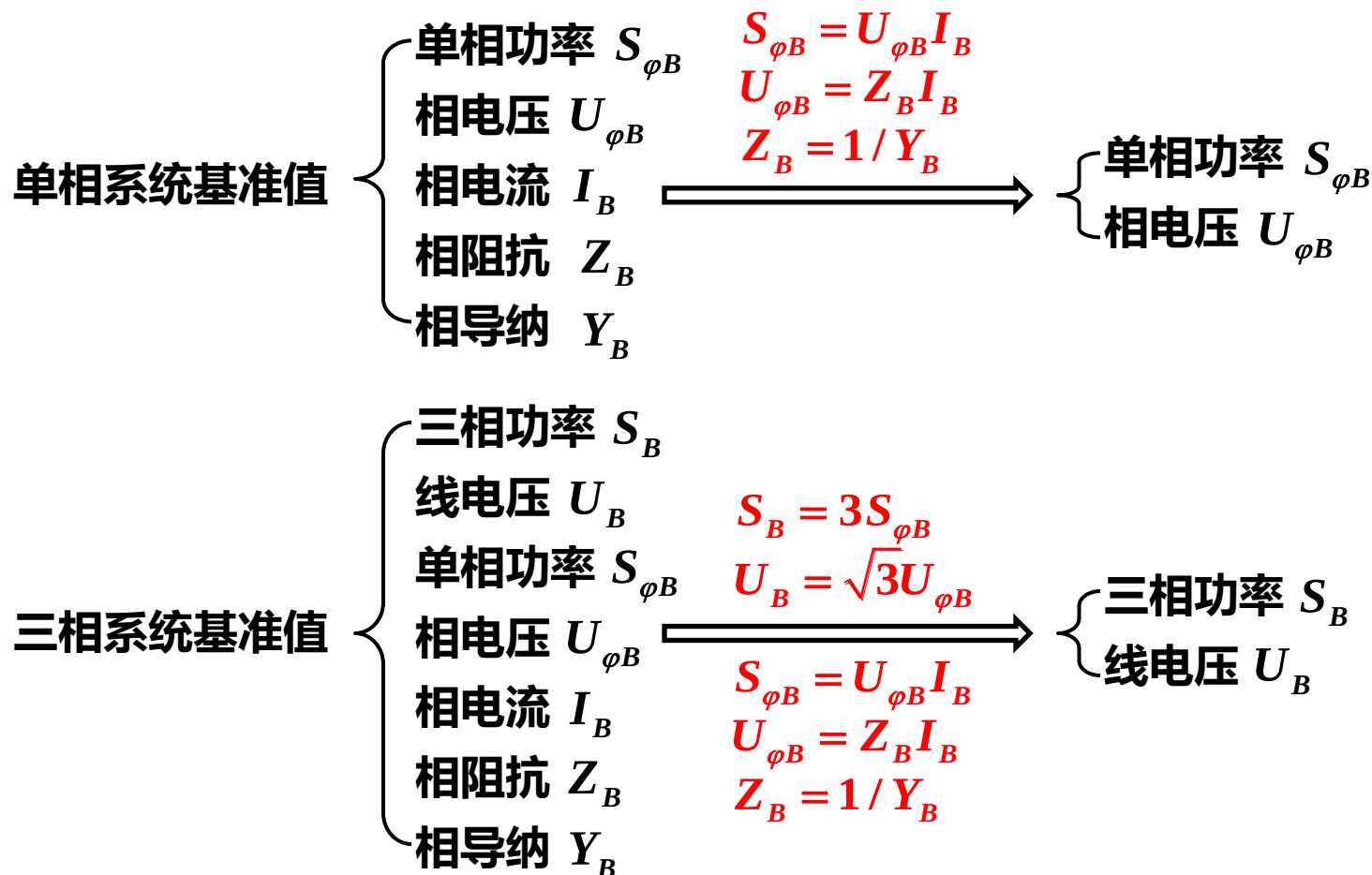
$$Z_{l-4} = (0.17 + j0.38) \times 13 \times \left(\frac{214.5}{38.5} \right)^2 = 68.6 + j153.3 (\Omega)$$

由以上计算，可得以220kV为基本级的电力网络等值电路为：





二、标么值电力网络数学模型



在电力系统中，通常取 S_B 、 U_B 作为独立基准值，按照基本定理、定律确定其他变量基准值。



取 S_B 、 U_B 作为基准值，则

$$S_B = 3U_{\phi B}I_B = \sqrt{3}U_B I_B \Rightarrow I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B}$$

$$U_B = \sqrt{3}U_{\phi B} = \sqrt{3}Z_B I_B \Rightarrow Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3}I_B} = \frac{U_B^2}{S_B}, Y_B = \frac{1}{Z_B}$$

显然，线电压与相电压标么值相同，单相功率与三相功率标么值相同。

设取基本级的电压作为电压基准值，非基本级元件向基本级折算时（设经 n 台变压器相连接）有如下关系：

$$\dot{U}_* = \frac{\dot{U}'}{U_B} = \frac{(k_1 k_2 \dots k_n) \dot{U}}{U_B}, \dot{I}_* = \frac{\dot{I}'}{I_B} = \frac{\dot{I}}{I_B (k_1 k_2 \dots k_n)}$$
$$Z_* = \frac{Z'}{Z_B} = \frac{Z (k_1 k_2 \dots k_n)^2}{Z_B}, Y_* = \frac{Y'}{Y_B} = \frac{Y (k_1 k_2 \dots k_n)^{-2}}{Y_B}$$

方法1：按变压器变比将非基本级元件参数归算至基本级，使用基本级基准值进行标么。



$$\text{令} \begin{cases} U'_B = U_B / (k_1 k_2 \dots k_n) \\ I'_B = I_B (k_1 k_2 \dots k_n) \\ Z'_B = Z_B / (k_1 k_2 \dots k_n)^2 \\ Y'_B = Y_B (k_1 k_2 \dots k_n)^2 \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} U_* = \dot{U} / U'_B \\ I_* = \dot{I} / I'_B \\ Z_* = Z / Z'_B \\ Y_* = Y / Y'_B \end{cases}$$

方法2：按变压器变比将基本级的基准值归算至各非基本级进行标么。

$$S_B = \sqrt{3} U_B I_B = \sqrt{3} \frac{U_B}{k_1 k_2 \dots k_n} \times I_B (k_1 k_2 \dots k_n) = \sqrt{3} U_B I_B$$

即，不同电压等级功率基准值相同，不存在归算关系。

综上所述，制定电力网络标么值下等值电路方法为（参看88页计算例题）：

1) 确定基本级及基本级基准值 S_B 、 U_B ；

2) 可按下述两种方法任一种计算：

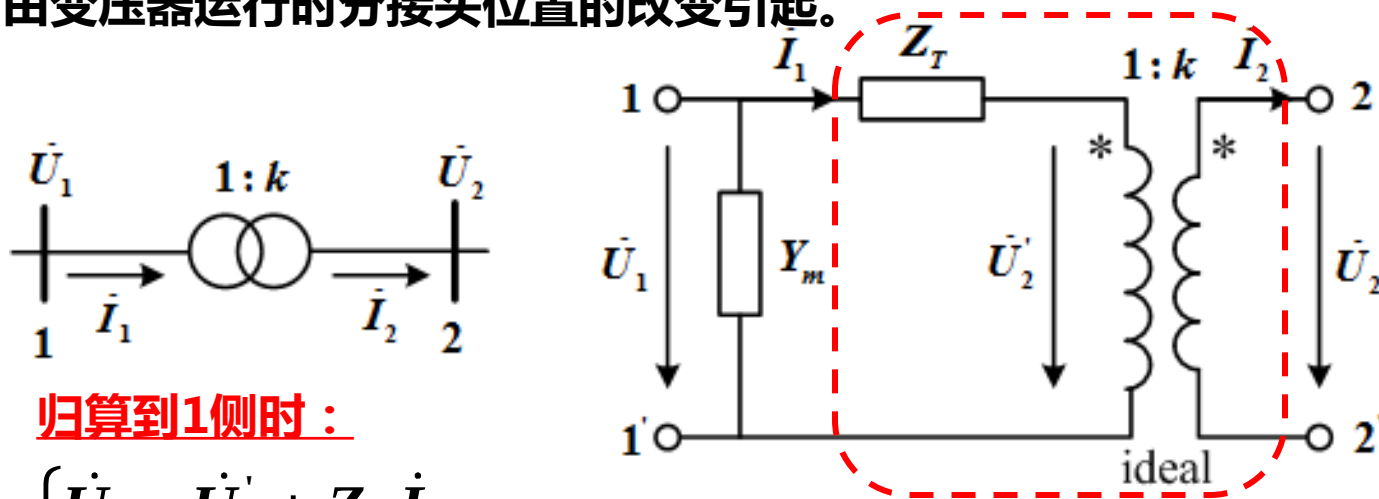
{ 按变压器变比将其它非基本级元件参数归算至基本级后统一标么
按变压器变比将基本级电压基准值归算至其它非基本级后标么

3) 功率基准值不存在归算关系。



三、具有非标准变比变压器的电力网络等值电路

变压器实际变比与其各侧系统额定电压（或称标准电压）之比不同，通常由变压器运行时分接头位置的改变引起。



归算到1侧时：

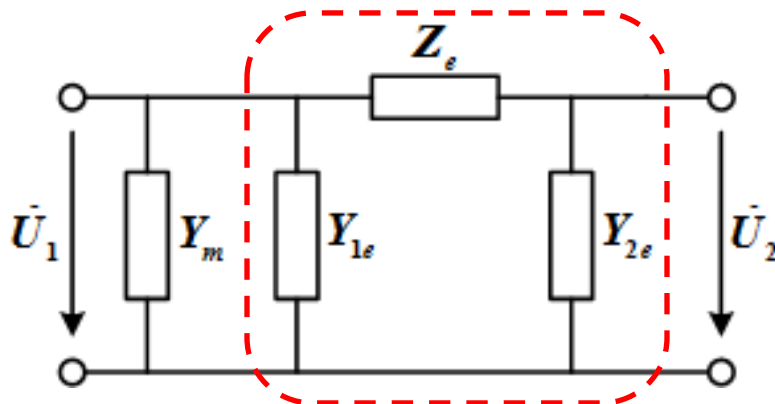
$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2' + Z_T \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 = k \dot{U}_2' \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_1 / k \end{cases} \quad \Longrightarrow \quad \begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 / k + k Z_T \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = k \dot{I}_2 \end{cases}$$

$$\Longrightarrow \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/k & kZ_T \\ 0 & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}$$

传输参数矩阵互易但不
对称，可使用非对称互
易等值电路等效。



可使用如下 Π 型等值电路等效。按二端口网络理论，其中



$$Z_e = B = kZ_T$$

$$Y_{1e} = \frac{D-1}{B} = \frac{k-1}{kZ_T}$$

$$Y_{2e} = \frac{A-1}{B} = \frac{1-k}{k^2 Z_T}$$

以 Π 型等值电路等价非标准变比变压器，将变压器分接头（变比）改变对电力网络的影响用与变比相关联的可变阻抗与导纳支路代替，其目的：

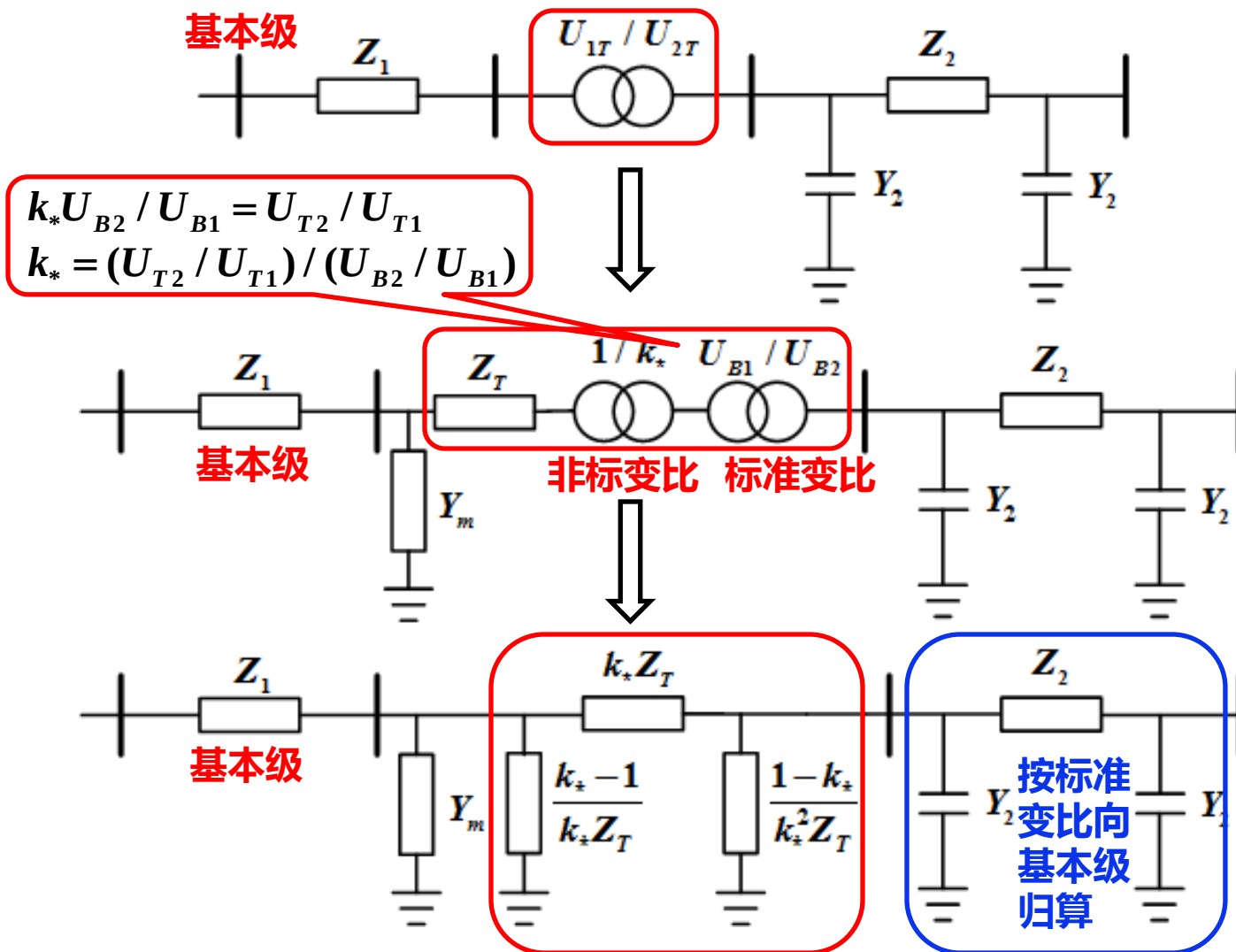
1) 以可变阻抗与导纳支路等价变压器分接头改变对电力网络有功、无功潮流的影响；

2) 变压器变比改变只影响本身等价参数的计算，不影响电力网络经变压器后的参数归算；

3) 等值电路互易但不对称！

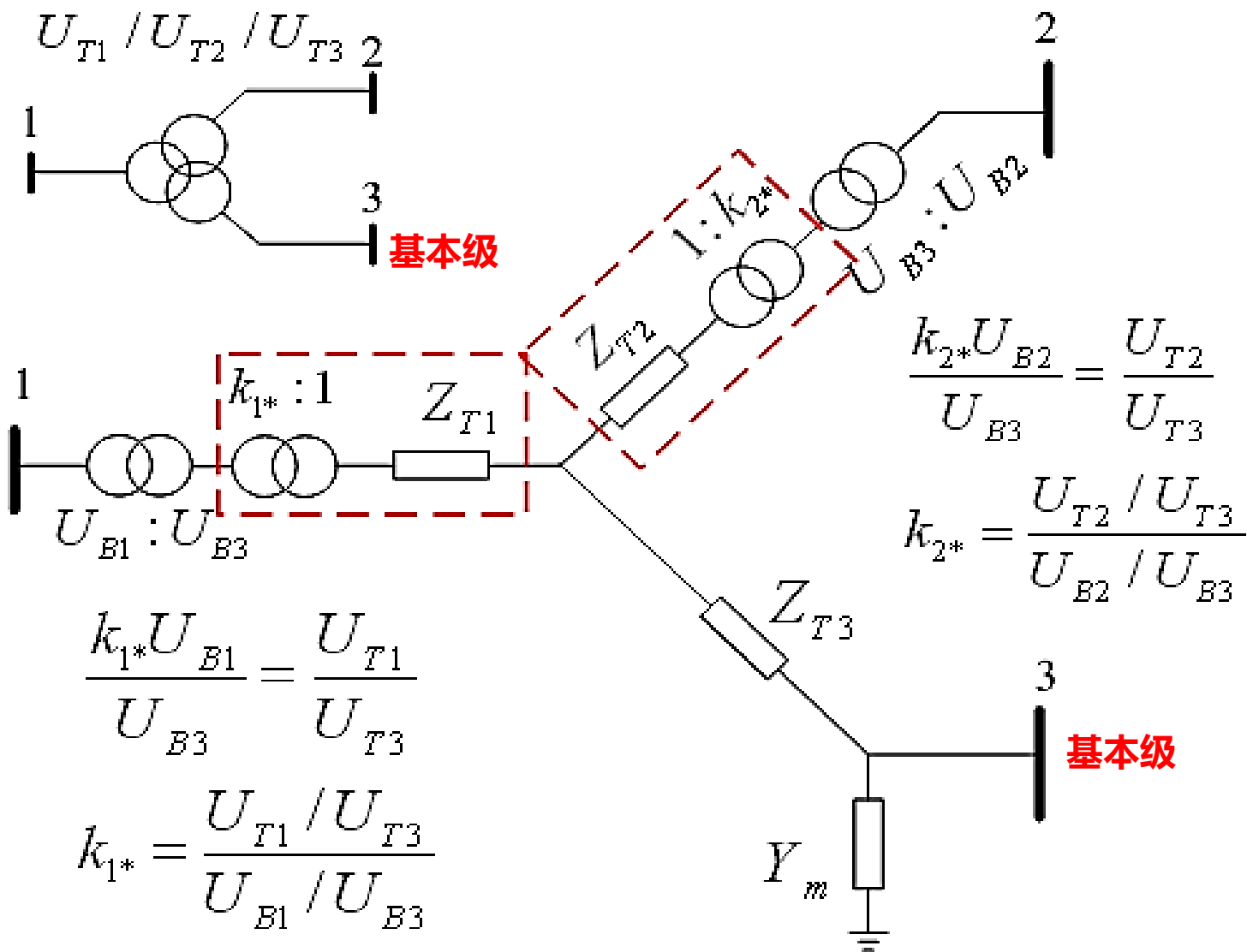


1) 使用 Π 型等值电路等价双绕组变压器的说明





2) 使用 Π 型等值电路等价三绕组变压器的说明





等值电路形式：

