

课后答案网：[www.hackshp.cn](http://www.hackshp.cn)  
若侵犯了您的版权利益，敬请来信告知！

课后答案网 您最真诚的朋友



[www.hackshp.cn](http://www.hackshp.cn)网团队竭诚为学生服务，免费提供各门课后答案，不用积分，甚至不用注册，旨在为广大学生提供自主学习的平台！

课后答案网：[www.hackshp.cn](http://www.hackshp.cn)

视频教程网：[www.efanjy.com](http://www.efanjy.com)

PPT课件网：[www.ppthouse.com](http://www.ppthouse.com)

## 《电气工程基础》题解（第1章）

### 1-1 简述我国电力工业的现状和发展前景？

答：建国以来我国的电力工业得到了飞速的发展，在电源建设、电网建设和电源结构建设等方面均取得了世人瞩目的成就。目前我国电力工业已进入“大机组”、“大电网”、“超高压”、“高自动化”的发展阶段。截至2000年，全国装机容量已达316GW，年发电量 $1.3 \times 10^{12}$  KW·h，均居世界第二位，成为一个电力大国。不过与发达国家相比仍有较大差距。主要体现在，我国电力工业的分布和发展还很不平衡，管理水平和技术水平都有待提高，人均占有电力也只有0.25KW。电力工业还需持续、稳步地发展。

我国电力工业地发展方针是一方面优先开发水电、积极发展火电、稳步发展核电、因地制宜利用其他可再生能源发电，搞好水电的“西电东送”和火电的“北电南送”建设；另一方面，要继续深化电力体制改革，实施厂网分开，实行竞价上网，建立竞争、开放、规范的电力市场。

随着总装机容量为18200MW的三峡水电站的建成，将为我国的电力工业发展注入强大的活力和深远的影响。2009年三峡电站全部建成投产后，将会通过15回500KV交流输电线路和3回500KV直流双极输电线路，将其巨大的电能向周围的区域电网辐射，逐步建成以三峡电站为核心的全国联合电网。

### 1-2 电能生产的主要特点是什么？组成电力系统运行有何优点？

答：电能生产主要有以下特点：

(1)电能的生产和使用同时完成。在任一时刻，系统的发电量只能取决于同一时刻用户的用电量。因此，在系统中必须保持电能的生产、输送、和使用处于一种动态的平衡。

(2)正常输电过程和故障过程都非常迅速。电能是以电磁波的形式传播的，所以不论是正常的输电过程还是发生故障的过程都极为迅速，因此，为了保证电力系统的正常运行，必须设置完善的自动控制和保护系统。

(3)具有较强的地区性特点。电力系统的规模越来越大，其覆盖的地区也越来越广，各地区的自然资源情况存在较大差别，因此制定电力系统的发展和运行规划时必须充分考虑地区特点。

(4)与国民经济各部门关系密切。电能被广泛的应用于国民经济的各个部门和人们生活的各个方面，且整个社会对电能的依赖性也越来越强，电力供应不足和电力系统故障造成的停电，给国民经济造成的损失和对人们日常生活的影响也越来越严重。

组成电力系统运行的优点有：

(1)合理利用资源，提高系统运行的经济效益。在电力系统中，通过不同类型的火电厂、水电厂、核电厂之间的调节和互补，可以充分利用水力资源、降低煤耗，保证系统有充足的电能供应，提高电力系统运行的整体效益。

(2)可以减小总负荷的峰值，充分利用系统的装机容量，减小备用容量。组成电力系统后，由于各个地区的负荷尖峰的相互交错，系统的最高负荷一定会比各地区的最高负荷之和要小，因此，系统的装机容量就可以得到充分利用。另一方面，组成系统后，由于系统中的所有发电机都并列运行，其负荷可以相互调节，各机组互为备用，所以整个系统实际所需的备用容量，要比按各个电厂孤立运行时所需的备用容量要小的多。

(3)可以大大提高供电的可靠性和电能质量。组成电力系统后，由于在系统中是多个发电厂并列运行，个别机组发生故障时对系统电能质量的影响甚微；且故障机组退出运行后，它所带的负荷可由系统中其它运行的机组和备用机组分担，因此可大大提高供电的可靠性和电能质量。

(4)可以采用高效率的大容量发电机组。运行经验表明，大容量发电机组的运行效率较高，而其单位容量的基建投资和运行费用均相对较低。组成大的电力系统后，由于有足够的备用容量可使大容量机组的运行无后顾之忧，可以充分发挥其效益，提高电力系统整体运行的经济性。

**1-3 动力系统、电力系统及电力网各自由哪些部分组成？对电力系统的运行有何要求？**

**答：**动力系统是由带动发电机转动的动力部分、发电机、升压变电所、输电线路、降压变电所和负荷等环节构成的整体；电力系统是由发电机、电力网和负荷组成的统一体；电力网则是由各类降压变电所、输电线路和升压变电所组成的电能传输和分配的网络，

对电力系统运行的基本要求有

(1)保证供电的安全可靠性。这是对电力系统运行的最基本要求。从发电到输电以及配电, 每个环节都必须保证安全可靠, 不发生故障, 以保证连续不断的为用户提供电能。为此, 电力系统各部门应加强现代化管理, 提高设备的运行和维护质量。

(2)保证电能的良好质量。电力系统不仅要满足用户对电能的需要, 而且还要保证电能的良好质量。频率、电压和波形是电能质量的三个基本指标, 其额定值是电气设备设计的最佳运行条件。电力系统要保证这三个指标符合其额定值的规定。

(3)保证电力系统运行的稳定性。电力系统在运行中不可避免地会发生短路事故, 此时系统地负荷将发生突变。当电力系统地稳定性较差, 或对事故处理不当时, 会导致整个系统的全面瓦解。因此稳定问题是影响大型电力系统运行可靠性的一个重要因素。

(4)保证运行人员和电气设备工作的安全。这是电力系统运行的基本原则, 为此要求不断提高运行人员的技术水平和保持电气设备始终处于完好状态。

(5)保证电力系统运行的经济性。电能成本的降低不仅会使各用电部门的成本降低, 更重要的是节省了能量资源, 因此会带来巨大的经济效益和长远的社会效益。

综上所述, 保证电力系统运行的稳定性, 安全可靠地向用户提供充足、优质而又经济地电能, 是人们对电力系统地基本要求,

#### 1-4 试述电力系统的质量指标及达标的基本措施。

答: 频率、电压和波形是电能质量地三个基本指标。我国规定电力系统的额定频率为 50HZ, 大容量系统允许频率偏差 $\pm 0.2\text{HZ}$ , 中小容量系统运行频率偏差 $\pm 0.5\text{HZ}$ ; 电压质量方面, 35KV 及以上的线路额定电压允许偏差 $\pm 5\%$ , 10KV 线路额定电压运行偏差 $\pm 7\%$ , 380/220V 线路额定电压运行偏差 $\pm 7\%$ ; 对于波形, 电压波形为正玄形, 10KV 线路波形总畸变率不大于 $4\%$ , 380/220V 线路电压波形总畸变率不大于 $\pm 5\%$ 。

电力系统的负荷是不断变化的, 系统的电压和频率必然会随之变动。这就要求调度必须时刻注视电压、频率变化情况和系统的有功和无功负荷平衡情况, 随时通过自动装置快速、及时地调节发电机地励磁电流或原动力, 停止或启动备用

电源及切除部分负荷等，使电力系统发出有功和无功功率与负荷的无功和有功功率保持平衡，以保持系统额定电压和额定频率地平衡。波形质量问题主要由谐波污染引起，为保证波形质量就必须限制系统中电压，电流中的谐波成分，确保电能质量。

### 1-5 我国标准额定电压等级有哪些？发电机、变压器和电力网的额定电压的选用原则是什么？

答：我国国家标准规定的额定电压等级为 3, 6, 10, 20, 35, 63, 110, 220, 330, 500, 750KV，均指三相交流系统的线电压。

由于发电机总是接在线路的首端，所以它的额定电压应比电网的额定电压高 5%，用于补偿电网上的电压损失；变压器一次绕组的额定电压规定等于电网的额定电压，但是当变压器的一次绕组直接与发电机的出线端相连时，其一次绕组的额定电压应与发电机的额定电压相同；变压器的二次绕组的额定电压规定应比同级电网的额定电压高 10%，当变压器的二次侧输电距离较短，或变压器阻抗较小时，则变压器二次绕组的额定电压可比同级电网的额定电压高 5%；电网的额定电压，国家规定各级电网电压在用户处的电压偏差不得超过 +5%，故在运行中可允许线路首端的电压比额定电压高 5%，而末端的电压比额定电压低 5%。

### 1-6 试述火电厂、水电厂、核电厂的基本生产过程及其特点。

答：火电厂通过固体、液体、气体燃料的化学能来生产电能。其生产过程如下：首先原煤由输煤皮带送入煤斗，通过磨煤机磨成煤粉，再由排粉风机将煤粉混同热空气经喷燃器送入锅炉的燃烧室燃烧，加热燃烧室四周水冷壁管中的水，使之变成蒸汽，此蒸汽再经过过热器变为高温高压的过热蒸汽经过蒸汽管道进入汽轮机，推动汽轮机的转子旋转，带动连轴的发电机发电。在汽轮机内做完功的蒸汽经凝汽器放出汽化热而凝结成水后，由凝结水泵送入低压加热器和除氧器加热和除氧，除氧后由水泵打入高压加热器加热，再经省煤器进一步提高温度后重新进入锅炉的水冷壁管中，如此重复，循环使用。火电厂的特点是：燃料需要量极大，同时还大量排放废气、粉尘和废渣，会对城市环境造成污染。

水电厂利用河流所蕴藏的水能资源来发电。水电厂分为堤坝式和引水式等，其中以堤坝式水电厂应用最为普遍。以堤坝式为例，水电厂的生产过程为：拦河坝将上游水位提高，形成水库，水库的水在高落差的作用下经压力水管高速进入

螺旋形涡壳推动水轮机旋转，水轮机的转子带动同轴发电机旋转发电。与火电厂相比，水电厂的生产过程相对简单，水能成本低廉，无污染，水电厂易于实现自动化控制和管理，能适应负荷的急剧变化，调峰能力强，且水电厂的兴建还可以同时解决防洪、灌溉、航运等多方面的问题，从而实现江河的综合利用。但是水电建设也存在投资大、建设工期长、受季节水量变化影响较大等缺点，且建设水电的过程中还会涉及到淹没农田、移民、破坏自然和人文景观以及生态平衡等一系列问题，都需要统筹考虑、合理解决。

核电厂利用核能发电，核能发电的过程和火力发电过程类似，只是其热能是利用置于核反应堆中的核燃料在发生核裂变时释放出的能量而得到的。核电厂的主要优点是可以大量节省煤、石油等燃料。

## 《电气工程基础》题解（第2章）

**2-1** 某电力系统的日负荷曲线如图 2-10 所示。试作如下计算：

- (1) 系统的日平均负荷  $P_{av}$ ；
- (2) 负荷率  $k_m$  和最小负荷系数  $\alpha$ ；
- (3) 峰谷差。

解：（1）系统的日平均负荷  $P_{av}$

$$\begin{aligned} P_{av} &= \frac{A_d}{24} = \frac{1}{24} \sum_{k=1}^8 P_k T_k = \frac{1}{24} (70 \times 2 + 50 \times 4 + 80 \times 2 + 100 \times 4 \\ &+ 80 \times 2 + 90 \times 4 + 120 \times 4 + 70 \times 2) \\ &= 85 MW \end{aligned}$$

- (2) 负荷率  $k_m$  和最小负荷系数  $\alpha$

$$P_{\max} = 120(MW)$$

$$K_m = \frac{P_{av}}{P_{\max}} = \frac{85}{120} = 0.708$$

$$\alpha = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{50}{120} = 0.42$$

$$(3) \text{ 峰谷差 } P_{\min} = 50(MW)$$

$$P = P_{\max} - P_{\min} = 120 - 50 = 70(MW)$$

## 2-2 何谓负荷特性? 负荷特性如何分类?

答: 电力系统综合负荷取用的功率一般要随系统运行参数(主要指电压  $U$  或频率  $f$ ) 的变化而变化, 反映这种变化规律的曲线或数学表达式称为负荷特性。

负荷特性有静态特性和动态特性之分。

## 2-3 何谓谐波含量、谐波总畸变率和谐波含有率?

答: 谐波含量是指各次谐波平方和的开方, 分为谐波电压含量和谐波电流含量。

谐波电压含量可表示为 
$$U_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}$$

谐波电流含量可表示为 
$$I_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$
 谐波总畸变率是指谐波含量与

基波分量的比值的百分数称为谐波总畸变率, 用 THD 表示。由此可得:

电压总畸变率为 
$$THD_U = \frac{U_H}{U_1} \times 100\%$$
 电流总畸变率为

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} \times 100\%$$

## 2-4 电力系统中有那些主要谐波源?

答: 根据负荷特点, 电力系统的谐波源大致可分为下面两类。

(1) 含电弧和铁磁非线性设备的谐波源。

(2) 整流和换流电子器件所形成的谐波源。

## 2-5 电力系统中的谐波可以造成哪些危害?

**答：**电力系统中的谐波会对电网产生严重污染，影响电能质量，增加能量损耗，甚至危害电气设备和电力系统的安全运行。主要危害有：

(1)谐波可使旋转电机附加损耗增加、出力降低，绝缘老化加速。谐波电流与基波磁场间的相互作用引起的振荡力矩严重时能使发电机产生机械共振，使汽轮机叶片疲劳损坏。当谐波电流在三相感应电动机内产生的附加旋转磁场与基波旋转磁场相反时，将降低电动机的效率，使电动机过热。在直流电机中，谐波处附加发热外，还会引起换相恶化和噪声。

(2)谐波电流流入变压器时，将因集肤效应和邻近效应，在变压器绕组中引附加铜耗。谐波电压可使变压器的磁滞及涡流损耗增加。3次谐波及其倍数的谐波在变压器三角形接法的绕组中形成的环流会使变压器绕组过热。此外，谐波还会使变压器的噪声增大，使绝缘材料中的电场强度增大，缩短变压器的使用寿命。

(3)谐波电压作用在对频率敏感（频率越高，电抗越低）的电容元件上，例如电容器和电缆等，会使之严重过电流，导致发热，介质老化，甚至损坏。

(4)高次谐波电流流过串联电抗器时，会在串联电抗器上形成过高的压降，使电抗器的匝间绝缘受损。

(5)谐波电流流过输电线（包括电缆）时，输电线的电阻会因集肤效应而增大，加大了线路的损耗。谐波电压的存在可能使导线的对地电压和相间电压增大，使线路的绝缘受到影响，或使线路的电晕问题变得严重起来。

(6)谐波电压和谐波电流将对电工仪表的测量正确度产生影响。过大的高次谐波电流流入电能表，可能烧坏电流线圈；频率过高（达到1000Hz以上）时，电能表可能停转。

(7)供电线路（尤其是电力机车2.5kv接触网）中存在的高次谐波所产生的静电感应和电磁感应会对与之平行的通信线路产生声频干扰，影响到通信质量。此外，谐波入侵电网，有可能会引起电力系统中继电保护的误动作，影响到电力系统的安全运行，也可能对使用中的电子设备产生影响，出现诸如使计算机的计算出错等故障。

## 《电气工程基础》题解 (第3章)

**3-1.** 双绕组变压器的  $\Gamma$  型等值电路由哪些等值参数组成? 分别写出它们的计算公式, 并说明各参数的物理意义。

**答:** 双绕组变压器的  $\Gamma$  型等值电路由短路电阻  $R_T$ 、短路电抗  $X_T$ 、励磁电导  $G_T$  和励磁电纳  $B_T$  四个等值参数组成。计算公式分别为:

$$R_T = \frac{\Delta P_S U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \quad (\Omega), \text{ 表示变压器的绕组的总电阻}$$

$$X_T = \frac{U_S \% U_N^2}{S_N} \times 10 \quad (\Omega), \text{ 表示变压器的绕组的总漏抗}$$

$$G_T = \frac{\Delta P_0}{U_N^2} \times 10^{-3} \quad (\text{S}), \text{ 表示变压器励磁支路的电导}$$

$$B_T = \frac{\Delta Q_0}{U_N^2} \times 10^{-3} = \frac{I_0 \% S_N}{U_N^2} \times 10^{-5} \quad (\text{S}), \text{ 表示变压器励磁支路的电纳}$$

以上公式中,  $U_N$  的单位为 kV;  $S_N$  的单位为 kVA,  $\Delta P_0$  和  $\Delta P_S$  的单位为 kW。

**3-2.** 某变电所装有两台并列运行的 OSFPSL-90000/220 型自耦变压器, 容量比为 100/100/50, 试计算变压器的等值参数, 并画出其等值电路。

**答:** 查手册得该型号变压器的参数为:  $\Delta P_0 = 77.7 \text{ kW}$ ,  $\Delta P'_{S1-2} = 323.7 \text{ kW}$ ,  $\Delta P'_{S1-3} = 315 \text{ kW}$ ,  $\Delta P'_{S2-3} = 253.5 \text{ kW}$ ,  $U'_{S1-2} \% = 9.76$ ,  $U'_{S1-3} \% = 18.31$ ,  $U'_{S2-3} \% = 12.12$ ,  $I_0 \% = 0.5$ 。

(1) 短路损耗的折算

$$\Delta P'_{S1-3} = \Delta P_{S1-3} \left( \frac{S_N}{S_{N3}} \right)^2 = 315 \left( \frac{90000}{45000} \right)^2 = 1260 (\text{kW})$$

$$\Delta P'_{S2-3} = \Delta P_{S2-3} \left( \frac{S_N}{S_{N3}} \right)^2 = 253.5 \left( \frac{90000}{45000} \right)^2 = 1014 (\text{kW})$$

(2) 短路电压百分数的折算

$$\Delta U_{S1-3} \% = \Delta U'_{S1-3} \% \left( \frac{S_N}{S_{N3}} \right) = 18.31 \left( \frac{90000}{45000} \right) = 36.62$$

$$\Delta U_{S2-3} \% = \Delta U'_{S2-3} \% \left( \frac{S_N}{S_{N3}} \right) = 12.12 \left( \frac{90000}{45000} \right) = 24.24$$

(3) 各绕组短路损耗的计算

$$\Delta P_{S1} = \frac{1}{2} (\Delta P_{S1-2} + \Delta P_{S1-3} - \Delta P_{S2-3}) = \frac{1}{2} (323.7 + 1260 - 1014) = 284.85 (\text{kW})$$

$$\Delta P_{S2} = \frac{1}{2} (\Delta P_{S1-2} + \Delta P_{S2-3} - \Delta P_{S1-3}) = \frac{1}{2} (323.7 + 1014 - 1260) = 38.85 (\text{kW})$$

$$\Delta P_{S3} = \frac{1}{2} (\Delta P_{S1-3} + \Delta P_{S2-3} - \Delta P_{S1-2}) = \frac{1}{2} (1260 + 1014 - 323.7) = 975.15 (\text{kW})$$

(4) 各绕组电阻的计算

$$R_{T1} = \frac{\Delta P_{S1} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 = \frac{284.85 \times 220^2}{90000^2} \times 10^3 = 1.702 (\Omega)$$

$$R_{T2} = \frac{\Delta P_{S2} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 = \frac{38.85 \times 220^2}{90000^2} \times 10^3 = 0.232 (\Omega)$$

$$R_{T3} = \frac{\Delta P_{S3} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 = \frac{975.15 \times 220^2}{90000^2} \times 10^3 = 5.826 (\Omega)$$

(5) 各绕组短路电压百分数的计算

$$U_{S1} \% = \frac{1}{2} (U_{S1-2} \% + U_{S1-3} \% - U_{S2-3} \%) = \frac{1}{2} (9.76 + 36.62 - 24.24) = 11.07$$

$$U_{S2} \% = \frac{1}{2} (U_{S1-2} \% + U_{S2-3} \% - U_{S1-3} \%) = \frac{1}{2} (9.76 + 24.24 - 36.62) = -1.31 \approx 0$$

$$U_{S3} \% = \frac{1}{2} (U_{S1-3} \% + U_{S2-3} \% - U_{S1-2} \%) = \frac{1}{2} (36.62 + 24.24 - 9.76) = 25.55$$

(6) 各绕组电抗的计算

$$X_{T1} = \frac{U_{S1} \% U_N^2}{S_N} \times 10 = \frac{11.07 \times 220^2}{90000} \times 10 = 59.532 (\Omega)$$

$$X_{T2} = \frac{U_{S2} \% U_N^2}{S_N} \times 10 = \frac{-1.31 \times 220^2}{90000} \times 10 = -7.044 (\Omega) \approx 0 (\Omega)$$

$$X_{T3} = \frac{U_{S3} \% U_N^2}{S_N} \times 10 = \frac{25.55 \times 220^2}{90000} \times 10 = 137.402 (\Omega)$$

(7) 计算变压器激磁回路中的  $G_T$ 、 $B_T$  及功率损耗

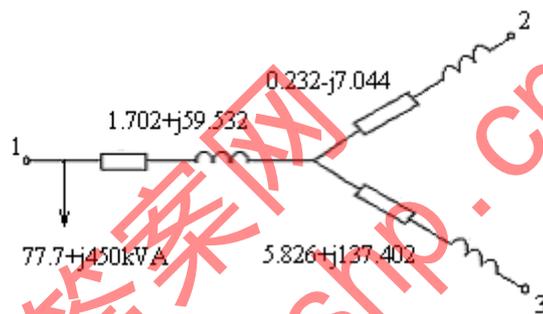
$$G_T = \frac{\Delta P_0}{U_N^2} \times 10^{-3} = \frac{77.7}{220^2} \times 10^{-3} = 1.605 \times 10^{-6} \text{ (S)}$$

$$B_T = \frac{I_0 \% S_N}{U_N^2} \times 10^{-5} = \frac{0.5 \times 90000}{220^2} \times 10^{-5} = 9.29 \times 10^{-6} \text{ (S)}$$

相应的功率损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P_0 + j\Delta Q_0 &= \Delta P_0 + j \frac{I_0 \%}{100} S_N = 77.7 + j \frac{0.5}{100} \times 90000 \\ &= 77.7 + j450 \text{ (kVA)} \end{aligned}$$

等值电路:



### 3-3. 架空线路主要由哪几部分组成? 各部分的作用是什么?

答: 架空线路主要由导线、避雷线、杆塔、绝缘子和金具等 5 部分组成。导线用于传导电流, 输送电能; 避雷线将雷电流引入大地, 对线路进行直击雷的保护; 杆塔能支撑导线和避雷线, 并使导线与导线之间、导线与接地体之间保持必要的安全距离; 绝缘子使导线与导线、导线与杆塔之间保持绝缘状态; 金具用来固定、悬挂、连接和保护架空线路各主要元件。

3-4. 有一长 **800km** 的 **500kV** 输电线路, 采用三分裂导线 **3×LGJQ-400**, 分裂间距为 **400mm**, 水平排列方式, 线间距离为 **12m**。试计算输电线路不计分布特性的等值参数, 并画出其  $\pi$  型等值电路。

答: 查手册得该导线的计算外径为 27.36mm。

(1) 每公里线路电阻  $r_1$  的计算

$$r_1 = \frac{\rho}{S} = \frac{31.5}{3 \times 400} = 0.0263 \text{ (}\Omega/\text{km)}$$

(2) 每公里线路电抗  $x_1$  的计算: 导线水平排列时的几何均距为

$$D_{ge} = 1.26D = 1.26 \times 12000 = 15119.1 \text{ (mm)}$$

分裂导线的等值半径为

$$r_{eq} = \sqrt[4]{rd_{12}d_{13}d_{14}} = \sqrt[4]{13.68 \times 400 \times 400 \times \sqrt{2} \times 400} = 187.58(\text{mm})$$

$$\text{故 } x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_{ge}}{r_{eq}} + \frac{0.0157}{n} = 0.1445 \lg \frac{15119.1}{187.58} + \frac{0.0157}{3} \\ = 0.280 (\Omega/\text{km})$$

(3) 每公里线路的电纳  $b_1$

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{ge}}{r_{eq}}} \times 10^{-6} = \frac{7.58}{\lg \frac{15119.1}{187.58}} \times 10^{-6} = 3.976 \times 10^{-6} (\text{S}/\text{km})$$

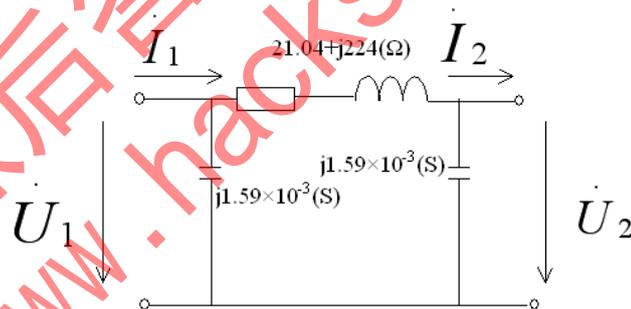
全线路的参数

$$R = r_1 l = 0.0263 \times 800 = 21.04 (\Omega)$$

$$X = x_1 l = 0.280 \times 800 = 224 (\Omega)$$

$$B = b_1 l = 3.976 \times 10^{-6} \times 800 = 3.18 \times 10^{-3} (\text{S})$$

线路的  $\pi$  型等值电路



### 3-5. 交流电弧的特点是什么? 采用哪些措施可以提高开关的熄弧能力?

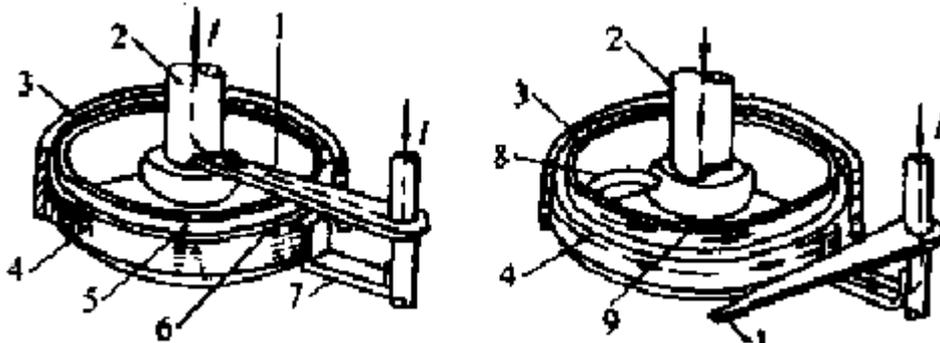
答: 交流电弧的特点是电流每半个周期要经过零值一次。在电流经过零值时, 电弧会自动熄灭。加速断口介质强度的恢复速度并提高其数值是提高开关熄弧能力的主要方法:

- (1) 采用绝缘性能高的介质
- (2) 提高触头的分断速度或断口的数目, 使电弧迅速拉长; (电弧拉长, 实际上是使电弧上的电场强度减小, 则游离减弱, 有利于灭弧, 伏安特性曲线抬高)
- (3) 采用各种结构的灭弧装置来加强电弧的冷却, 以加快电流过零后弧隙的去游离过程。

### 3-6. 简述旋弧式灭弧装置的工作原理。

答: 如下图所示, 旋弧式灭弧装置由处于轴心的静触杆和带动触杆的圆筒

电极组成，圆筒电极内部设置一向静触头凸出的圆环。圆筒电极上装设有磁场线圈。当动触头和静触头分开产生电弧后，电弧会很快转移到动触头和圆筒电极间，把磁场线圈接入电路，使被开断的电流流经线圈。由于电弧电流是沿半径方向流动的，而线圈生成的磁场是轴线方向的，所以电弧会沿圆周旋转而与 SF<sub>6</sub> 气体介质发生相对运动，实现吹弧。



### 3-7. 真空灭弧室的真空度对其工作性能有何影响？

答：真空灭弧室的真空度是保证真空断路器正常工作的重要参数。真空度对真空灭弧室的绝缘强度、灭弧性能都有很大影响。真空度降低，真空灭弧室的绝缘和灭弧性能下降。

### 3-8 简述扩散型电弧和集聚型电弧的特点。

答：真空电弧实为金属蒸汽电弧，在电流较小（通常为数千安以下）时，维持真空中电弧放电的金属蒸汽是由作为阴极的触头上的多个阴极斑点提供的。从阴极斑点蒸发出的金属蒸汽及其游离质点，在向阳极运动的过程中会向周围的低气压区扩散，形成从阴极斑点向阴极逐渐扩散的，由金属等离子体组成的光亮圆锥形弧柱。这种电弧称为扩散型真空电弧。扩散型真空电弧在电流过零后介质强度恢复十分迅速，极易开断。

当真空电弧的电流增大到超过某一值（不同电极材料其值不同，对铜电极来说，其值为 10<sup>4</sup>A）时，大量电子在电场作用下朝着阳极运动并撞击阳极后，会使阳极表面温度升高而出现阳极斑点，使阳极蒸发出金属蒸汽及其游离质点。阳极斑点的出现会使原来分散在阴极表面的阴极斑点集聚到正对阳极斑点处，成为集聚型电弧。实验证明：当出现集聚型电弧时，真空断路器就会失去开断能力。因此，提高出现阳极斑点的电流值，使电弧在大电流范围内仍能保持扩散型电弧的形态，是提高真空断路器开断能力的有效措施。

### 3-8. 简述对操动机构的要求。

答：断路器的分合闸操作靠操动机构实现。对操动机构的要求包括：

(1) 合闸元件必须有足够大的合闸力和合闸功，以得到足够的触头刚合速度，使断路器能顺利地关合短路故障；(2) 支持元件应能在合闸后把断路器保持

在合闸位置，不因外界震动或其他原因发生误分闸；(3) 断路器的分闸操作应能实现遥控并能做到自由脱扣，机构中应采取省力措施使分闸操作所需的功尽可能小；(4) 在关合预伏故障或重合闸不成功时要能防止断路器的跳跃。

### 3-9. 电压互感器与电力变压器有什么差别？电流互感器与电压互感器又有什么差别？

答：电压互感器在工作时二次侧接近开路，所以电压互感器实质上为一容量极小（额定容量在 1000VA 以下）的降压变压器，其一次绕组的匝数  $W_1$  远大于二次绕组的匝数  $W_2$ 。电压互感器和变压器的主要差别是设计和使用都要以能达到一定的精度为前提。即在磁路方面，电压互感器应采用优质的冷轧硅钢片，设计时磁通密度要取得低些；在使用方面，电压互感器所接负载应根据所需测量精度来决定，不能用到发热允许的最大容量。当有检测单相接地故障的需要时，电压互感器还需设第三绕组来获取零序电压。

电流互感器工作时，其一次绕组是串接在线路中的，互感器的负载则是串联后接到二次线圈上的仪表和继电器的电流线圈。由于这些电流线圈的阻抗很小，电流互感器在工作时接近短路状态。运行中的电流互感器的二次绕组必须通过仪表接成闭合回路或自行短路。电流互感器工作的另一个特点是：随着系统用电情况的变化，电流互感器所需变换的电流，可在零和额定电流间的很大范围内变动。在短路情况下，电流互感器还需变换比额定电流大数倍，甚至数十倍的短路电流。电流互感器应能在电流的这一很大的变化范围内保持所需的准确度。

### 3-10. 为什么可以采取变比和匝比不等的措施（也称匝补偿）来改善电压及电流互感器的误差特性。

答：电压互感器一次侧额定电压  $U_{N1}$  和二次侧额定电压  $U_{N2}$  之比称为电压互

感器的变比即  $k_N = \frac{U_{N1}}{U_{N2}}$ ，匝比  $k_w = \frac{W_1}{W_2}$ 。

根据电压互感器二次侧电压  $\dot{U}_2$  按额定电压比换算出的一次电压  $k_N \dot{U}_2$  即为相量图中的二次归算电压  $\dot{U}'_2$ 。 $\dot{U}'_2$  和一次电压  $\dot{U}_1$  在数值上和相位上的差别就是电压互感器误差的来源。为了提高电压互感器的测量精度，变比  $k_N$  通常要略小于其匝比  $k_w$ 。如取  $k_N = k_w$ ，则在规定的负载功率因数（0.8）附近， $k_N U_2$  均小于  $U_1$ 。即在任意负载电流下互感器的比值差均为负值。若要使比值差出现正值，必须使由额定电压换算所得的电压  $k_N U_2 > k_w U_2$ ，即变压器的变比  $k_N$  应大于匝比  $k_w$ 。

## 《电气工程基础》题解（第4章）

**4-1. 何谓无备用接线方式的电力网？有备用接线方式的电力网？各有何优缺点？**

**答：**用户只能从单方向的一条线路获得电源的电力网称为无备用接线方式的电力网。用户能从两个或两个以上方向获得电源的电力网称为有备用接线方式的电力网。

无备用接线方式电力网的优点是简单明了，运行方便，投资费用少。缺点是供电的可靠性较低，任何一段线路故障或检修都会影响对用户的供电。这种接线方式不适用于向重要用户供电，只适用于向普通负荷供电。

在有备用接线方式电力网中，双回路的放射式、干线式、链式网络的优点是供电可靠性和电压质量明显提高，操作简单和运行方便。缺点是设备费用增加多，经济指标差。

环形网络接线具有较高的供电可靠性和良好的经济性，缺点是当环网的节点较多时运行调度较复杂，且故障时电压质量较差。

两端电源供电网在有备用接线方式中最为常见，但采用这种接线的先决条件是必须有两个或两个以上独立电源。其供电可靠性相当于有两个电源的环形网络。

**4-2. 如何确定输电网的电压等级？**

**答：**输电网的电压等级是根据输送功率和输送距离，结合电力系统运行和发展的实际需要以及电力设备的制造水平来确定。当输送的功率一定时，线路的电压越高，线路中通过的电流就越小，所用导线的截面就可以减小，用于导线的投资可减少，而且线路中的功率损耗、电能损耗也都会相应降低。因此大容量、远距离输送电能要采用高压输电。但是，电压越高，要求线路的绝缘水平也越高，除去线路杆塔投资增大、输电走廊加宽外，所需的变压器、电力设备等的投资也要增加。我国国家标准规定的输电网额定电压等级为 110, 220, 330, 500, 750kV。

**4-3. 我国常用的配电网电压等级有几种？**

**答：**我国现行配电网的电压等级可分为三种，即高压配电网（35kV、110kV），中压配电网（6kV、10kV）和低压配电网（220V、380V）。

**4-4. 对主接线的基本要求是什么？在设计和评价主接线时，应从哪几方面分析和评述？**

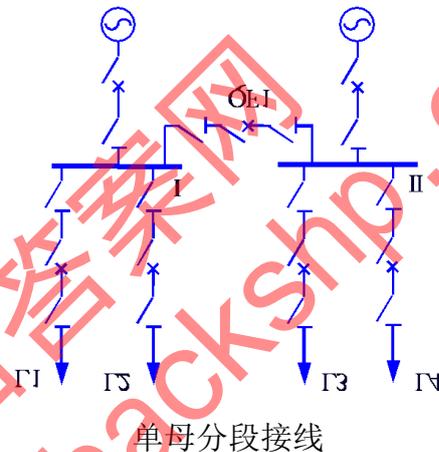
**答：**对主接线的基本要求是可靠性，灵活性和经济性。在设计和评价主接线时，也应从以上三方面进行分析和评述。

**4-5. 隔离开关与断路器配合操作时应遵守什么原则？举例说明对出线停、送电操作顺序。**

**答：**隔离开关与断路器配合操作时，隔离开关应严格遵循“先通后断”的原则。例如对线路进行送电操作的顺序应该是：先合母线隔离开关  $QS_B$ ，再合出线隔离开关  $QS_L$ ，最后合断路器  $QF$ ；而对出线进行停电操作时，则应先断开断路器  $QF$ ，再断开线路隔离开关  $QS_L$ ，最后断开母线隔离开关  $QS_B$ 。

**4-6. 画图说明什么是单母分段接线？从运行角度看它与两组汇流母线同时运行的双母线接线技术上有什么区别？**

**答：**



从运行角度看，单母分段接线可轮流检修一段汇流母线，使停电范围减小，因此采用单母分段接线时重要用户可同时从不同分段引接电源供电实现双路供电。而两组汇流母线同时运行的双母线接线可以轮流检修主母线而不停止供电。同时若有一组主母线故障，经倒闸操作可以将所有回路倒换至另一组主母线而迅速恢复供电。因此，两组汇流母线同时运行的双母线接线具有更高的供电可靠性。

**4-7. 在带旁路的双母线接线中，汇流母线和旁路母线的的作用各是什么？叙述检修与旁母相连的出线断路器的原则操作步骤。**

**答：**在带旁路的双母线接线中，汇流母线的作用是汇集和分配电能，旁路母线的的作用是检修断路器不停电。检修与旁母相连的出线断路器的原则操作步骤是：首先合旁路断路器两边的隔离开关，再合旁路断路器向旁路母线充电以判断旁路母线有否问题，如果旁路母线有故障，旁路断路器会立即跳闸，而不影响其他正常运行；若旁路母线正常，等充电 3~5min 再断开旁路断路器，在旁母无电压的情况下合旁路隔离开关，再合上旁路断路器，然后再断开出线断路器及两侧

隔离开关，实现对出线断路器的检修。

**4-8. 什么是单元接线？发电机与双绕组主变构成的单元接线中，发电机出口为什么可不装断路器？**

**答：**单元接线是发电机与变压器直接串联的接线形式。由于系统容量不断增大，发电机出口处短路电流太大，发电机侧断路器的开断容量不够（制造不出），采用单元接线，所有故障均由线路侧高压断路器开断，所以发电机出口可不装断路器。

**4-9. 什么是桥形接线？内桥和外桥接线在事故和检修时有何不同？它们的适用范围有何不同？**

**答：**由一台断路器和两组隔离开关组成连接桥，将两回变压器-线路组横向连接起来的电气主接线。

变压器检修时：

内桥：检修主变  $T_1$ ，内桥接线要断开  $QF$ 、 $QF_1$ ，再拉开  $QS_1$ ，这时出线  $L_1$  只得停电。要恢复  $L_1$  供电，需再关合  $QF$  和  $QF_1$ ，操作显得复杂。

外桥：要检修  $T_1$  仅停  $QF_1$  和  $QS_1$ ，做相应安全措施即可检修，操作就简单。

线路故障时：

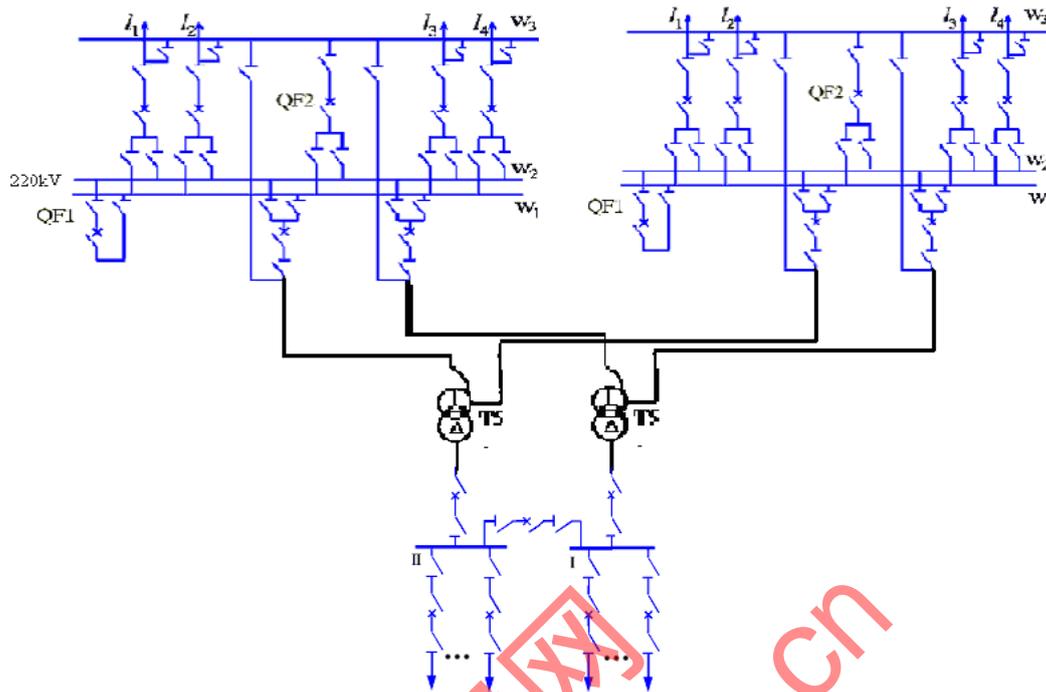
内桥接线仅  $QF_1$  跳闸， $T_1$  及其他回路继续运行。

外桥接线中， $QF$  和  $QF_1$  会同时自动跳闸，主变  $T_1$  被切除。要恢复  $T_1$  运行，必须断开  $QS_2$ ，合  $QF_1$  和  $QF$ 。

适用范围：内桥适用于线路长（则易发生故障），主变不常切除的火电系统。外桥适用于线路短，主变经常切除，有穿越功率（不经过变电厂）的水电系统。

**4-10. 一座 220kV 重要变电所共有 220kV、110kV、10kV 三个电压等级，安装两台 120MVA 自耦变压器，其 220kV 侧有 4 回出线，采用双母带旁路接线，110kV 侧有 6 回出线，采用双母带旁路接线，10kV 侧有 12 回出线，采用单母分段接线。试绘出该变电所的主接线图。**

**答：**



#### 4-11. 中性点接地方式有几种类型？概述它们的优缺点。

答：中性点的接地方式可分为两大类：一类是大电流接地系统（或直接接地系统），包括中性点直线接地或经小阻抗接地；另一类是小电流接地系统（或非直接接地系统），包括中性点不接地或经消弧线圈接地。

在大电流接地系统中发生单相接地故障时，接地相的电源将被短接，形成很大的单相接地电流。此时断路器会立即动作切除故障，从而造成停电事故。单相接地短路后，健全相的电压仍为相电压。

在小电流接地系统中发生单相接地故障时，不会出现电源被短接的现象，因此系统可以带接地故障继续运行（一般允许运行 2 小时），待做好停电准备工作后再停电排除故障。可见采用小电流接地的运行方式可以大大提高系统供电的可靠性。但这种运行方式的缺点是，发生单相接地时非接地相的对地电压将上升为线电压，因此线路及各种电气设备的绝缘均要按长期承受线电压的要求设计，这将使线路和设备的绝缘费用增大。电压等级愈高，绝缘费用在电力设备造价中所占的比重也愈大。

#### 4-12. 简述消弧线圈的作用，在什么情况下需加装消弧线圈。

答：接在中性点与地之间的铁芯有气隙的电感线圈，其作用是补偿电力系统单相接地电流及减缓接地故障点恢复电压的上升速度，从而增大接地故障点自动熄弧的概率。当 3~10kV 电网单相接地电流大于 30A；35~66kV 电网单相接地电流大于 10A；或发电机单相接地电流大于 5A 时应当在中性点安装消弧线圈，对电容电流进行补偿。

#### 4-13. 什么是消弧线圈的脱谐度，为什么消弧线圈一般应当运行在过补偿状

态?

答: 将消弧线圈的  $L$  值偏离调谐的程度用脱谐度  $\nu$  表示

$$\nu = (I_c - I_L) / I_c$$

$$\text{或 } \nu = \frac{\omega(C_{11} + C_{22} + C_{33}) - \frac{1}{\omega L}}{\omega(C_{11} + C_{22} + C_{33})}$$

在欠补偿的情况下, 如果电网有一条线路跳闸 (此时电网对地自部分电容减小) 时, 或当线路非全相运行 (此时电网一相或两相对地自部分电容减小) 时, 或  $U_0$  偶然升高使消弧线圈饱和而致  $L$  值自动变小时, 消弧线圈都可能趋近完全调谐, 从而产生严重的中性点位移。因此, 消弧线圈一般应采取过补偿的运行方式。

## 《电气工程基础》题解 (第 5 章)

### 5-1 什么是电压降落、电压损耗和电压偏移?

解: 电压降落: 电力网任意两点电压的矢量差称为电压降落, 记为  $\Delta \dot{U}$ 。阻抗支路中有电流 (或功率) 传输时, 首端电压  $\dot{U}_1$  和末端电压  $\dot{U}_2$  就不相等, 它们之间的电压降落为

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \sqrt{3} \dot{I}_2 (R + jX) = \sqrt{3} \dot{I}_1 (R + jX)$$

电压损耗: 电力网中任意两点电压的代数差, 称为电压损耗。工程实际中, 线路电压损耗常用线路额定电压  $U_N$  的百分数  $\Delta U\%$  表示, 即

$$\Delta U\% = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100$$

电压偏移: 电力网中任意点的实际电压  $U$  同该处网络额定电压  $U_N$  的数值差称为电压偏移。在工程实际中, 电压偏移常用额定电压的百分数  $m\%$  表示, 即

$$m\% = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100$$

### 5-2 何谓潮流计算？潮流计算有哪些作用？

**解：**潮流计算：电力系统的潮流计算是针对具体的电力网络结构，根据给定的负荷功率和电源母线电压，计算网络中各节点的电压和各支路中的功率及功率损耗。

在电力系统的设计和运行中都要用到潮流计算的结果，例如电力网规划设计时，要根据潮流计算的结果选择导线截面和电气设备，确定电力网主接线方案，计算网络的电能损耗和运行费用，进行方案的经济比较；电力系统运行时，要根据潮流计算的结果制定检修计划，校验电能质量，采取调频和调压措施，确定最佳运行方式，整定继电保护和自动装置。

### 5-3 何谓功率分点？如何确定功率分点？功率分点有何作用？

**解：**能从两个方面获取功率的节点，称之为功率分点。功率分点分为有功功率分点和无功功率分点，有功功率分点以“▼”标注在该节点处，无功功率分点则以“▽”标注。

通过计算初步功率分布，得到各负荷节点的有功功率与无功功率流向，找出能从两个方面获取功率的节点，即为功率分点。

确定了功率分点后，就可在功率分点处将闭式电力网拆开为开式电力网，然后应用开式电力网的方法计算其最大电压损耗。

**5-4** 有一额定电压为 **110kV** 的双回线路，如图 **5-54** 所示。已知每回线路单位长度参数为  $r_1 = 0.17\Omega/\text{km}$ ， $x_1 = 0.409\Omega/\text{km}$ ， $b_1 = 2.82 \times 10^{-6}\text{S}/\text{km}$ 。如果要维持线路末端电压  $\dot{U}_2 = 118\angle 0^\circ \text{ kV}$ ，试求：

- (1) 线路首端电压  $\dot{U}_1$  及线路上的电压降落、电压损耗和首、末端的电压偏移；
- (2) 如果负荷的有功功率增加 **5MW**，线路首端电压如何变化？
- (3) 如果负荷的无功功率增加 **5Mvar**，线路首端电压又将如何变化？

**解：**画出线路  $\pi$  型等值电路如下：  
线路参数为：

$$R = \frac{1}{2} r_1 \cdot l = \frac{1}{2} \times 0.17 \times 80 = 6.8\Omega$$

$$X = \frac{1}{2} x_1 \cdot l = \frac{1}{2} \times 0.409 \times 80 = 16.36\Omega$$

$$B = 2b_1 \cdot l = 2 \times 2.82 \times 80 \times 10^{-6} = 4.512 \times 10^{-4} \text{ S}$$

$$Q_C = \frac{1}{2} B U_N^2 = \frac{1}{2} \times 451.2 \times 110^2 = 2.72976 M \text{ var}$$

$$(1) P_2 = P_L = 25 MW$$

$$Q_2 = Q_L - Q_C = 10 - 2.72976 = 7.27024 M \text{ var}$$

$$\Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} = \frac{25 \times 6.8 + 7.27024 \times 16.36}{118} = 2.44865 kV$$

$$\delta U_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} = \frac{25 \times 16.36 - 7.27024 \times 6.8}{118} = 3.04714 kV$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta U_2 + j\delta U_2 = 118 + 2.45 + j3.05 = 120.49 \angle 1.45^\circ kV$$

电压降落为

$$d\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = 2.45 + j3.05 kV = 3.912 \angle 51.23^\circ kV$$

电压损耗为

$$|\dot{U}_1| - |\dot{U}_2| = 120.49 - 118 = 2.49 kV$$

或

$$\Delta U\% = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100 = \frac{120.49 - 118}{110} \times 100 = 2.264$$

首端电压偏移为

$$m_1\% = \frac{U_1 - U_N}{U_N} \times 100 = \frac{120.49 - 110}{110} \times 100 = 9.536$$

末端电压偏移为

$$m_2\% = \frac{U_2 - U_N}{U_N} \times 100 = \frac{118 - 110}{110} \times 100 = 7.273$$

$$(2) P_2 = P_L = 30 MW$$

$$Q_2 = Q_L - Q_C = 10 - 2.72976 = 7.27024 M \text{ var}$$

$$\Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} = \frac{30 \times 6.8 + 7.27024 \times 16.36}{118} = 2.73679 kV$$

$$\delta U_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} = \frac{30 \times 16.36 - 7.27024 \times 6.8}{118} = 3.74036 kV$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta U_2 + j\delta U_2 = 118 + 2.74 + j3.74 = 120.80 \angle 1.77^\circ kV$$

首端电压幅值变化不大, 相位变化较大

$$(3) P_2 = P_L = 25MW$$

$$Q_2 = Q_L - Q_C = 15 - 2.72976 = 12.27024M \text{ var}$$

$$\Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} = \frac{25 \times 6.8 + 12.27024 \times 16.36}{118} = 3.14187kV$$

$$\delta U_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} = \frac{25 \times 16.36 - 12.27024 \times 6.8}{118} = 2.75900kV$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta U_2 + j\delta U_2 = 118 + 3.14 + j2.76 = 121.17 \angle 1.31^\circ kV$$

首端电压幅值变化较大不大, 相位变化不大

**5-5** 如图 5-55 所示的简单电力网中, 已知变压器的参数为  $S_N=31.5MVA$ ,  $\Delta P_0=31kW$ ,  $\Delta P_S=190kW$ ,  $U_S\%=10.5$ ,  $I_0\%=0.7$ ; 线路单位长度的参数为  $r_1=0.21\Omega/km$ ,  $x_1=0.416\Omega/km$ ,  $b_1=2.74 \times 10^{-6}S/km$ 。当线路首端电压  $U_1=120kV$  时, 试求:

(1) 线路和变压器的电压损耗;

(2) 变压器运行在额定变比时的低压侧电压及电压偏移。

解: 线路参数为

$$R_l = r_1 l = 0.21 \times 40 = 8.4\Omega$$

$$X_l = x_1 l = 0.416 \times 40 = 16.64\Omega$$

变压器参数为

$$R_T = \frac{\Delta P_S U_N^2}{S_N^2} = \frac{190 \times 110^2}{31.5^2} \times 10^{-3} = 2.317\Omega$$

$$X_T = \frac{U_S \% U_N^2}{100 S_N} = \frac{10.5 \times 110^2}{100 \times 31.5} = 40.33\Omega$$

(1) 变压器的功率损耗为

$$\Delta P_T = \Delta P_S \left(\frac{S}{S_N}\right)^2 + \Delta P_0 = 190 \times \frac{25^2 + 15^2}{31.5^2} + 31 = 193.76kW = 0.19376MW$$

$$\Delta Q_T = \frac{U_S \% S^2}{100 S_N} + \frac{I_0 \% S_N}{100} = \frac{10.5 \times (25^2 + 15^2)}{100 \times 31.5} + \frac{0.7 \times 31.5}{100} = 3.0538M \text{ var}$$

1 点处线路充电功率为

$$Q_{C1} = \frac{1}{2} b U_N^2 = \frac{1}{2} \times 2.74 \times 40 \times 110^2 = 0.66308 M \text{ var}$$

1 点功率为

$$\begin{aligned} S_1 &= P_L + \Delta P_T + j(Q_L + \Delta Q_T - Q_{C1}) \\ &= 25 + 0.19376 + j(15 + 3.0538 - 0.66308) \\ &= 25.19 + j17.39 MVA \end{aligned}$$

线路阻抗中的功率损耗为:

$$\Delta P_l = \frac{S^2}{U^2} R \times 10^{-3} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \times 10^{-3} = \frac{25190^2 + 17390^2}{110^2} \times 0.21 \times 40 \times 10^{-3} = 0.65044 MW$$

$$\Delta Q_l = \frac{S^2}{U^2} X \times 10^{-3} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X \times 10^{-3} = \frac{25190^2 + 17390^2}{110^2} \times 0.416 \times 40 \times 10^{-3} = 1.2885 M \text{ var}$$

A 点处线路充电功率为

$$Q_{CA} = \frac{1}{2} b U_N^2 = \frac{1}{2} \times 2.74 \times 40 \times 120^2 = 0.78912 M \text{ var}$$

A 点功率为

$$\begin{aligned} S_A &= P_1 + \Delta P_l + j(Q_1 + \Delta Q_l - Q_{CA}) \\ &= 25.19 + 0.65044 + j(17.39 + 1.2885) \\ &= 25.84 + j18.68 MVA \end{aligned}$$

线路电压损耗

$$\Delta U_A = \frac{P_A R + Q_A X}{U_A} = \frac{25.84 \times 8.4 + 18.68 \times 16.64}{120} = 4.40 kV$$

1 点电压为

$$U_1 = U_A - \Delta U_A = 120 - 4.40 = 115.60 kV$$

变压器电压损耗

$$\Delta U_1 = \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} = \frac{25.19 \times 2.32 + 17.39 \times 40.33}{115.60} = 6.572 kV$$

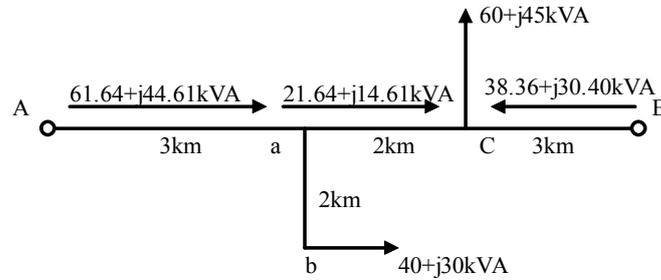
(2) 变压器低压侧电压为

$$U_2 = \frac{U_1 - \Delta U_1}{k_N} = \frac{115.60 - 6.572}{10} = 10.90 kV$$

电压偏移为

$$m_2 \% = \frac{U_2 - U_N}{U_N} \times 100 = \frac{10.90 - 10}{10} \times 100 = 9.0$$

**5-6** 如图 5-56 所示两端供电网, 网络额定电压为  $U=10\text{kV}$ , 干线单位长度的阻抗  $Z_1 = 0.63 + j0.4 (\Omega/\text{km})$ , 支线单位长度的阻抗  $Z_1 = 0.9 + j0.4 (\Omega/\text{km})$ , 各级线路长度、负荷有功功率及功率因数均标注在图中。若  $\dot{U}_A = 10.5\angle 0^\circ \text{kV}$ ,  $\dot{U}_B = 10.49\angle 0^\circ \text{kV}$ , 试求网络的功率分布及最大电压损耗。



解:

1. 计算网络功率分布

(1) 供载功率的计算

干线网为均一网, 使用网络拆开法

$$P_{Aa} = \frac{40 \times (2+3) + 60 \times 3}{3+2+3} = 47.5 \text{ kW}$$

$$Q_{Aa} = \frac{30 \times (2+3) + 45 \times 3}{3+2+3} = 35.625 \text{ k var}$$

$$\dot{S}_{Aa} = 47.5 + j35.625 \text{ kVA}$$

$$P_{BC} = \frac{60 \times (2+3) + 40 \times 3}{3+2+3} = 52.5 \text{ kW}$$

$$Q_{BC} = \frac{45 \times (2+3) + 30 \times 3}{3+2+3} = 39.375 \text{ k var}$$

$$\dot{S}_{BC} = 52.5 + j39.375 \text{ kVA}$$

验证,

$$\dot{S}_{Aa} + \dot{S}_{BC} = (47.5 + j35.625) + (52.5 + j39.375) = 100 + j75 \text{ kVA}$$

$$\dot{S}_a + \dot{S}_c = (40 + j30) + (60 + j45) = 100 + j75 \text{ kVA}$$

可见, 计算结果正确

进一步求得

$$\dot{S}_{ac} = \dot{S}_{Aa} - \dot{S}_a = (47.5 + j35.625) - (40 + j30) = 7.5 + j5.625 \text{ kVA}$$

(2) 循环功率的计算

A、B 之间电源的阻抗为

$$Z_{AB} = (0.63 + j0.4) \times (3+2+3) = 5.04 + j3.2 \Omega$$

因此,

$$\dot{S}_{ci} = \frac{(10.5 - 10.49) \times 10}{5.04 + j3.2} \times 10^3 = 14.14 + j8.98 \text{ (kVA)}$$

③ 网络中实际功率分布的计算:

$$\begin{aligned}\dot{S}_{Aa} &= \dot{S}_{Aa} + \dot{S}_{ci} = (47.5 + j35.625) + (14.14 + j8.98) \\ &= 61.64 + j44.61 \text{ (kVA)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{S}_{ac} &= \dot{S}_{ac} + \dot{S}_{ci} = (7.5 + j5.625) + (14.14 + j8.98) \\ &= 21.64 + j14.61 \text{ (kVA)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{S}_{BC} &= \dot{S}_{BC} - \dot{S}_{ci} = (52.5 + j39.375) - (14.14 + j8.98) \\ &= 38.36 + j30.40 \text{ (kVA)}\end{aligned}$$

实际功率分布如图所示。由图可见, 负荷点  $C$  既是有功功率分点, 也是无功功率分点。

(2) 网络最大电压损耗及最低点电压的确定。从  $C$  点将闭式电力网拆开为开式电力网

① 计算各段线路的参数:

$$Z_{Aa} = (0.63 + j0.4) \times 3 = 1.89 + j1.2 \text{ } (\Omega)$$

$$Z_{ab} = (0.9 + j0.4) \times 2 = 1.8 + j0.8 \text{ } (\Omega)$$

$$Z_{ac} = (0.63 + j0.4) \times 2 = 1.26 + j0.8 \text{ } (\Omega)$$

$$Z_{BC} = (0.63 + j0.4) \times 3 = 1.89 + j1.2 \text{ } (\Omega)$$

② 计算各段线路的电压损耗:

$$\Delta U_{Aa} = \frac{61.64 \times 1.89 + 44.61 \times 1.2}{10} = 17.00 \text{ (V)}$$

$$\Delta U_{ab} = \frac{40 \times 1.8 + 30 \times 0.8}{10} = 9.6 \text{ (V)}$$

$$\Delta U_{ac} = \frac{21.64 \times 1.26 + 14.61 \times 0.8}{10} = 3.90 \text{ (V)}$$

③ 计算网络的最大电压损耗。因为  $\Delta U_{ab} > \Delta U_{ac}$ , 所以网络的最大电压损耗为

$$\begin{aligned}\Delta U_{\max} &= \Delta U_{Ab} = \Delta U_{Aa} + \Delta U_{ab} \\ &= 17.00 + 9.6 = 26.60 \text{ (V)} = 0.027 \text{ (kV)}\end{aligned}$$

④ 电压最低点的电压

$$U_c = U_A - \Delta U_{\max} = 10.5 - 0.027 = 10.423(\text{kV})$$

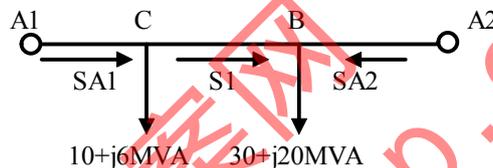
5-7 图 5-57 是一额定电压为 220kV 的环网, 已知  $Z_{AB} = 12 + j20(\Omega)$ ,

$Z_{AC} = 10 + j15(\Omega)$ ,  $Z_{BC} = 10 + j12(\Omega)$ 。试求:

(1) 环网的最终功率分布;

(2) 若  $U_C = 218\text{kV}$ ,  $U_A$ 、 $U_B$  将是多少?

在 A 点将环网解开, 成为一个两端供电网, 其两端为 A1, A2, 供电电压相等。



解: (1) 求出两端供电网的初步功率分布为

$$\dot{S}_{A1} = \dot{S}_{AB} + \dot{S}_{AC} = \frac{Z_{AB}^* \dot{S}_B + (Z_{AB}^* + Z_{BC}^*) \dot{S}_C}{Z_{AB}^* + Z_{BC}^* + Z_{CA}^*} = 19.567 + j11.614 \text{ MVA}$$

$$\dot{S}_{A2} = \dot{S}_{A2B} + \dot{S}_{A2C} = \frac{Z_{AC}^* \dot{S}_C + (Z_{AC}^* + Z_{BC}^*) \dot{S}_B}{Z_{AB}^* + Z_{BC}^* + Z_{CA}^*} = 20.433 + j14.386 \text{ MVA}$$

$$\dot{S}_1 = \dot{S}_{A1} - \dot{S}_C = 9.567 + j5.614 \text{ MVA}$$

由此可见, 节点 B 为功率分点, 将两端供电网从 B 点拆开, 成为两个开式网。

AB 段功率损耗:

$$\Delta \dot{S}_{AB} = \frac{P_{A2}^2 + Q_{A2}^2}{U_N^2} (R_{AB} + j X_{AB}) = 0.155 + j0.258 \text{ MVA}$$

BC 段功率损耗:

$$\Delta \dot{S}_{BC} = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_N^2} (R_{BC} + j X_{BC}) = 0.0254 + j0.0305 \text{ MVA}$$

AC 段功率损耗:

$$\Delta \dot{S}_{CA} = \frac{P_{A1}^2 + Q_{A1}^2}{U_N^2} (R_{CA} + j X_{CA}) = 0.107 + j0.161 \text{ MVA}$$

最终功率分布

$$\dot{S}_1 = (9.567 + j5.614) + (0.0254 + j0.0305) = 9.592 + j5.645 MVA$$

$$\begin{aligned}\dot{S}_{A1} &= (10 + j6) + (0.107 + j0.161) + (9.592 + j5.645) \\ &= 19.699 + j11.806 MVA\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{S}_{A2} &= (20.433 + j14.386) + (0.155 + j0.258) \\ &= 20.588 + j14.644 MVA\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{S}_A &= (19.699 + j11.806) + (20.588 + j14.644) \\ &= 40.287 + j26.650 MVA\end{aligned}$$

(1) AC 线路末端功率为

$$\dot{S}_{AC} = \dot{S}_1 + \dot{S}_C = 19.592 + j11.645 MVA$$

$$\Delta U_{AC} = \frac{19.592 \times 10 + 11.645 \times 15}{218} = 1.70 kV$$

$$U_A = U_C + \Delta U_{AC} = 219.70 kV$$

(2) CB 线路末端功率为

$$\dot{S}_{CB} = \dot{S}_1 = 9.592 + j5.645 MVA$$

$$\Delta U_{CB} = \frac{9.592 \times 10 + 5.645 \times 15}{218} = 0.75 kV$$

$$U_B = U_C - \Delta U_{CB} = 217.25 kV$$

**5-8** 如图 5-58 所示的两台变压器并联运行, 变压器的额定容量及归算到 110kV 侧的阻抗分别为  $S_{N1}=31.5MVA$ ,  $Z_{T1}=2.3+j40 (\Omega)$ ,  $S_{N2}=20MVA$ ,  $Z_{T2}=4+j64 (\Omega)$ 。试求:

解: (1) 两台变压器变比均为 110/11 时, 各变压器通过的负荷功率;

(2) 要使变压器 T<sub>2</sub> 满载运行, 应如何调整变压器的变比?

(1) 变比相同, 可等效为电压相等的两端供电网, 变压器的负载功率为:

$$\dot{S}_{T1} = \frac{Z_{T2}^* \dot{S}}{Z_{T1}^* + Z_{T2}^*} = 13.52 + j9.87 MVA$$

$$\dot{S}_{T2} = \frac{Z_{T1}^* \dot{S}}{Z_{T1}^* + Z_{T2}^*} = 8.48 + j6.13 MVA$$

(2) T<sub>2</sub> 满载运行时, 通过的负荷功率为

$$\dot{S}_{T2} = \frac{22}{\sqrt{22^2 + 16^2}} \times 20 + j \frac{16}{\sqrt{22^2 + 16^2}} \times 20 = 16.17 + j11.76 MVA$$

循环功率为

$$\dot{S}_c = \dot{S}_{T2} - \dot{S}_{T2} = 7.69 + j5.63 MVA$$

由

$$\dot{S}_c = \frac{(U_A - U_B) U_{NH}}{Z_{T1} + Z_{T2}} = \frac{\Delta E_H U_{NH}}{Z_{T1} + Z_{T2}}$$

得

$$\Delta E_H = \frac{\dot{S}_c (Z_{T1} + Z_{T2})}{U_{NH}} = 5.76 - j6.95 kV$$

$$\Delta E_H = 9.027 kV$$

由

$$\Delta E_H = U_2 k_1 \left(1 - \frac{k_2}{k_1}\right)$$

$$k_1 = 10$$

$$U_2 = 110 kV$$

得到

$$k_2 = 9.92$$

或

$$k_2 = 10$$

$$k_1 = 10.08$$

**5-9** 我国规定频率的额定值是多少？允许偏移值是多少？系统低频运行对用户和系统有什么危害？

**解：**为了确保电能的质量，我国《电力工业技术管理法规》中规定额定频率为 50 Hz，频率偏差范围为  $\pm(0.2 \sim 0.5)$  Hz，用百分数表示为  $\pm 0.4\% \sim \pm 1\%$ 。

在生产实际中，频率变化所引起的异步电动机转速的变化，会严重影响产品的质量和产量，例如在纺织厂中频率变化会使纱线运动速度变化而出现次品和废品；频率变化会影响现代工业、国防和科学研究部门广泛应用的各种电子技术设备的精确性；频率变化还会使计算机发生误计算和误打印。

频率的变化对电力系统的正常运行也是十分有害的。频率下降会使发电厂的许多重要设备如给水泵、循环水泵、风机等的出力下降，造成水压、风力不足，使整个发电厂的有功出力减少，导致频率进一步下降，如不采取必要措施，就会产生所谓“频率崩溃”的恶性循环；频率的变化可能会使汽轮机的叶片产生共振，降低叶片寿命，严重时会产生裂纹甚至断片，造成重大事故。另外，频率的下降，会使异步电动机和变压器的励磁电流增大，无功损耗增加，给电力系统的无功平衡和电压调整增加困难。

### 5-10 电力系统为何要设置有功备用？有功备用如何分类？

**解：**为了保证频率在额定值所允许的偏移范围内，电力系统运行中发电机组发出的有功功率必须和负荷消耗有功功率在额定频率下平衡。有功功率平衡通常用下式表示。

$$\Sigma P_G = \Sigma P_{LD} + \Sigma \Delta P + \Sigma P_p$$

为了保证供电的可靠性和良好的电能质量，电力系统的有功功率平衡必须在额定参数下确定，但是系统的负荷经常波动，有时还会出现突发事件，为了保证电力系统安全、优质和经济运行，还应留有一定的有功备用容量。

有功备用的分类

1) 备用容量按用途分。

1) 负荷备用。为了适应实际负荷的经常波动或一天内计划外的负荷增加而设置的备用。电力网规划设计时，一般按系统最大有功负荷的 2%~5% 估算，大系统取下限，小系统取上限。

2) 检修备用。为了保证电力系统中的机组按计划周期性地检修，又不影响此期间对用户正常供电而设置的备用。机组周期性的检修一般安排在系统最小负荷期间内进行，只有当最小负荷期间的空余容量不能保证全部机组周期性检修的需要时，才另设检修备用。检修备用容量的大小要视系统具体情况而定，一般为系统最大有功负荷的 8%~15%。

3) 事故备用。为了防止部分机组在系统或自身发生事故退出运行时，不影响系统正常供电而设置的备用。事故备用容量的大小要根据系统中的机组台数、容量、故障率及可靠性等标准确定。一般按系统最大有功负荷的 10% 考虑，且不小于系统内最大单机容量。

4) 国民经济备用。计及负荷的超计划增长而设置的备用容量，其大小一般为系统最大有功负荷的 3%~5%。

(2) 备用容量按备用形式分。

① 热备用(或称旋转备用)。热备用容量储存于运行机组之中，能及时抵偿系统的功率缺额。负荷备用容量和部分事故备用容量通常采用热备用形式，并分布在各电厂或各运行机组之中。

② 冷备用(或称停机备用)。冷备用容量储存于停运机组之中，检修备用和部分事故备用多采用冷备用形式。动用冷备用时，需要一定的启动、暖机和带负荷时间。火电机组需要的时间长，一般 25~50MW 的机组需 1~2h，100MW 的机组需 4h，300MW 机组需 10h 以上。水电机组需要的时间短，从启动到满负荷运行，一般不超过 30min，快的只需要几分钟。

### 5-11 什么是一次调频？二次调频？各有何特点？

**解：**进行一次调频时，仅发电机组的调速器动作，依靠发电机组调速器自动调节发电机组有功功率输出的过程来调整频率，此时发电机组输出功率增加，负荷吸收频率减少，直到二者平衡。

在一次调频的基础上，通过控制同步器调节发电机组输出功率来调整频率的方法，称为二次调频。

其特点为：

一次调频为有差调频，频率不会恢复到初始值。一次调频时，系统中所有发电机组均参与。

二次调频的调节范围比一次调频大，可将频率恢复到偏移的允许范围或初始值。

二次调频时，仅系统中特定的调频电厂(主调频厂与辅助调频厂)参与。

### 5-12 如何选择主调频厂？

**解：**主调频厂一般应按下列条件选择：

- ① 具有足够的调节容量和范围；
- ② 具有较快的调节速度；
- ③ 具有安全性与经济性。

除以上条件外，还应考虑电源联络线上的交换功率是否会因调频引起过负荷跳闸或失去稳定运行，调频引起的电压波动是否在电压允许偏移范围之内。

按照调频厂的选择条件，在火电厂和水电厂并存的电力系统中，枯水季节可选择水电厂为主调频厂，在丰水季节则选择装有中温中压机组的火电厂作为主调频厂。

### 5-13 $k_{LD}$ 和 $k_G$ 有何物理意义？二者有何区别？

**解：** $k_{LD}$  称为综合有功负荷的频率调节效应系数，其数值表示频率发生单位变化

时，有功负荷的变化量。实际系统中的 $k_{LD^*} = 1 \sim 3$ ，它表明频率变化1%时，有功负荷功率就相应变化1%~3%。

$k_{G^*}$ 为发电机组的功频静态特性系数，其数值表示频率发生单位变化时，发电机组输出功率的变化量。

$k_{LD^*}$ 不能人为整定，它的大小取决于全系统各类负荷的比重和性质。不同系统或同一系统的不同时刻， $k_{LD^*}$ 值都可能不同。与 $k_{LD}$ 不同的是， $k_G$ 可以人为调节整定，但其大小，即调整范围要受机组调速机构的限制。不同类型的机组， $k_G$ 的取值范围不同。一般汽轮发电机组， $k_{G^*} = 25 \sim 16.7$ ；水轮发电机组， $k_{G^*} = 50 \sim 25$ 。

#### 5-14 何谓发电机原动机调速器的有差特性？为什么要采用有差特性的调速器？

**解：**对应增大了的负荷，调速器调整的结果使发电机组输出功率增加，频率低于初始值；反之，如果负荷减小，调速器调整的结果使发电机组输出功率减小，频率高于初始值。这种调节特性称为发电机原动机调速器的有差特性。

有差特性的调速器，对发电机备用容量的要求相对较低，易于实现。而且可以避免发电机由于预留了较多的备用容量，而使发电机的利用率不高。

#### 5-15 什么叫电压中枢点？通常选什么母线作为电压中枢点？电压中枢点的调压方式有哪几种？

**解：**对电力系统电压的监视、控制和调整一般只在某些选定的母线上实行。这些母线称为电压中枢点。一般选择下列母线为电压中枢点：① 区域性发电厂和枢纽变电所的高压母线；② 枢纽变电所的二次母线；③ 有一定地方负荷的发电机电压母线；④ 城市直降变电所的二次母线。这种通过对中枢点电压的控制来控制全系统电压的方式称为中枢点调压。

根据电网和负荷的性质，中枢点电压的调整方式有顺调压、逆调压和恒调压三种。

#### 5-16 电力系统的调压措施有哪几种？

**解：**调整负荷端的电压 $U$ ，可采用如下措施：

- ① 改变发电机的励磁电流，从而改变发电机的机端电压 $U_G$ ；
- ② 改变升、降压变压器的变比 $k_1$ 、 $k_2$ ；
- ③ 改变网络无功功率 $Q$ 的分布；
- ④ 改变网络的参数 $R$ 、 $X$ 。

**5-17** 在无功不足的系统中, 为什么不宜采用改变变压器分接头来调压?

**解:** 由负荷的电压特性分析可知, 当改变变比提高用户端的电压后, 用电设备从系统吸取的无功功率就相应增大, 使得电力系统的无功缺额进一步增加, 导致运行电压进一步下降。如此恶性循环下去, 就会发生“电压崩溃”, 造成系统大面积停电的严重事故。因此, 在无功不足的电力系统中, 首先应采用无功功率补偿装置补偿无功的缺额。

**5-18** 某降压变压器的电压为  $35 \pm 2 \times 2.5\%/11\text{kV}$ , 最大及最小负荷时低压侧折算到高压侧的电压分别为  $33.5\text{kV}$  和  $35\text{kV}$ 。若变压器低压侧母线要求顺调压, 试选择变压器的分接头电压。

**解:** (1) 计算变压器分接头电压

$$U_{1t\max} = \frac{U_{1\max} - \Delta U_{T\max}}{U_{2\max}} U_{2N} = \frac{33.5}{10 \times 1.025} \times 11 = 35.95 \text{ (kV)}$$

$$U_{1t\min} = \frac{U_{1\min} - \Delta U_{T\min}}{U_{2\min}} U_{2N} = \frac{35}{10 \times 1.075} \times 11 = 35.81 \text{ (kV)}$$

$$U_{1t\text{av}} = \frac{1}{2} (U_{1t\max} + U_{1t\min}) = \frac{1}{2} (35.95 + 35.81) = 35.88 \text{ (kV)}$$

选最接近的标准分接头电压  $U_{1t0} = 35 \times (1 + 0.025) = 35.875 \text{ (kV)}$ 。

(2) 校验

① 变压器低压母线的实际运行电压

$$U_{2\max} = \frac{U_{1\max} - \Delta U_{T\max}}{U_{1t0}} U_{2N} = \frac{33.5}{35.875} \times 11 = 10.27 \text{ (kV)}$$

$$U_{2\min} = \frac{U_{1\min} - \Delta U_{T\min}}{U_{1t0}} U_{2N} = \frac{35}{35.875} \times 11 = 10.73 \text{ (kV)}$$

② 变压器低压母线的电压偏移

$$m_{2\max} = \frac{10.27 - 10}{10} \times 100\% = 2.7\% > 2.5\%$$

$$m_{2\min} = \frac{10.73 - 10}{10} \times 100\% = 7.3\% < 7.5\%$$

满足要求!

**5-19** 某升压变压器的额定容量为  $63\text{MVA}$ , 电压为  $121 \pm 2 \times 2.5\%/10.5 \text{ (kV)}$ ,

折算到高压侧的变压器阻抗为  $Z_T = 1 + j24(\Omega)$ 。已知最大运行方式下的负荷为 **50+j30 (MVA)**, 高压母线的电压为 **118kV**; 最小运行方式下的负荷为 **28+j20 (MVA)**, 高压母线的电压为 **116kV**。如果要求发电机的电压在 **10~10.5kV** 范围内变化, 试选择变压器的分接头电压。

**解** (1) 计算最大最小负荷时变压器的电压损耗。据题意可得

$$\Delta U_{T_{\max}} = \frac{50 \times 1 + 30 \times 24}{118} = 6.53 \text{ (kV)}$$
$$\Delta U_{T_{\min}} = \frac{28 \times 1 + 20 \times 24}{116} = 4.38 \text{ (kV)}$$

(2) 计算变压器分接头电压

$$U_{1t_{\max}} = \frac{118 + 6.53}{10 \sim 10.5} \times 10.5 = 130.76 \sim 124.53 \text{ (kV)}$$
$$U_{1t_{\min}} = \frac{116 + 4.38}{10 \sim 10.5} \times 10.5 = 126.40 \sim 120.38 \text{ (kV)}$$
$$U_{1t_{\text{tav}}} = \frac{1}{2}(124.53 + 126.40) = 125.47 \text{ (kV)}$$

(3) 选最接近  $U_{1t_{\text{tav}}}$  的标准分接头为 126.05 (kV)

(4) 校验

$$U_{2_{\max}} = \frac{118 + 6.53}{126.05} \times 10.5 = 10.37 \text{ (kV)}$$
$$U_{2_{\min}} = \frac{116 + 4.38}{126.05} \times 10.5 = 10.03 \text{ (kV)}$$

由计算结果可见, 所选分接头电压满足调压要求。

**5-20** 某降压变电所变压器额定变比为 **110/11**。已知最大、最小负荷运行方式时, 变压器低压侧折算到高压侧的电压分别为 **109kV** 和 **113kV**, 试作如下计算:

(1) 选择在变电所低压母线进行顺调压时的普通变压器分接头;

(2) 选择在变电所低压母线进行逆调压时的有载调压变压器分接头。

**1. 解:** (1) 计算变压器分接头电压

$$U_{1t_{\max}} = \frac{U_{1_{\max}} - \Delta U_{T_{\max}}}{U_{2_{\max}}} U_{2N} = \frac{109}{10 \times 1.025} \times 11 = 116.98 \text{ (kV)}$$
$$U_{1t_{\min}} = \frac{U_{1_{\min}} - \Delta U_{T_{\min}}}{U_{2_{\min}}} U_{2N} = \frac{113}{10 \times 1.075} \times 11 = 115.63 \text{ (kV)}$$
$$U_{1t_{\text{tav}}} = \frac{1}{2}(U_{1t_{\max}} + U_{1t_{\min}}) = \frac{1}{2}(116.98 + 115.63) = 116.31 \text{ (kV)}$$

选最接近的标准分接头电压  $U_{1t0} = 115.5 \text{ (kV)}$ 。

(2) 校验

① 变压器低压母线的实际运行电压

$$U_{2\max} = \frac{U_{1\max} - \Delta U_{T\max}}{U_{1t0}} U_{2N} = \frac{109}{115.5} \times 11 = 10.38(\text{kV})$$

$$U_{2\min} = \frac{U_{1\min} - \Delta U_{T\min}}{U_{1t0}} U_{2N} = \frac{113}{115.5} \times 11 = 10.75(\text{kV})$$

② 变压器低压母线的电压偏移

$$m_{2\max} = \frac{10.38 - 10}{10} \times 100\% = 3.8\% > 2.5\%$$

$$m_{2\min} = \frac{10.75 - 10}{10} \times 100\% = 7.5\% = 7.5\%$$

满足要求！

2. 由题意可知

$$U_{1t\max} = \frac{109}{10 \times 1.05} \times 11 = 114.19 \text{ (kV)}$$

$$U_{1t\min} = \frac{113}{10 \times 1.0} \times 11 = 124.3 \text{ (kV)}$$

选最接近  $U_{1t\max}$  的标准分接头为 112.75 kV，最接近  $U_{1t\min}$  的标准分接头为 123.75 kV。

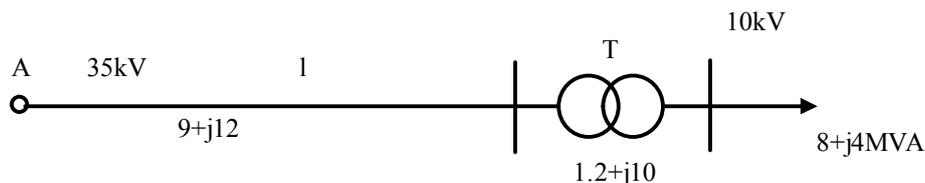
校验：

$$U_{2\max} = \frac{109}{112.75} \times 11 = 10.63 \text{ (kV)}$$

$$U_{2\min} = \frac{108}{123.75} \times 11 = 10.04 \text{ (kV)}$$

由计算结果可见，所选有载调压变压器的分接头满足逆调压的要求。

**5-21** 如图 5-59 所示 35kV 供电系统，变压器的阻抗为折算到高压侧的数值。线路首端电压  $U_A=37\text{kV}$ ，10kV 母线电压要求保持在 10.3kV，若变压器工作在额定分接头 35/11，试确定采用串联及并联补偿时所需的电容器容量，并比较计算结果。



**解：** 补偿前电压损耗为

$$\Delta U = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} = \frac{8 \times 10.2 + 4 \times 22}{35} = 4.85 \text{ kV}$$

补偿后低压母线折算到高压侧电压为

$$U_2' = \frac{35}{11} \times 10.3 = 32.77 \text{ kV}$$

补偿后电压损耗为

$$\Delta U_c = 37 - 32.77 = 4.23 \text{ kV}$$

(1) 串联补偿

串联电容后网络中减少的电压损耗为

$$\Delta U - \Delta U_c = 4.85 - 4.23 = 0.62 \text{ (kV)}$$

串联电容器的容抗为

$$X_c = \frac{32.77 \times 0.62}{4} = 5.08 \text{ } (\Omega)$$

串联电容器的补偿容量为

$$Q_c = \frac{8^2 + 4^2}{32.77^2} \times 5.08 = 0.378 \text{ (Mvar)}$$

(2) 并联补偿

$$\Delta U_c = \frac{P_2 R + (Q_2 - Q_c) X}{U_2} = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} - \frac{Q_c X}{U_2} = \Delta U - \frac{Q_c X}{U_2}$$

$$\frac{Q_c X}{U_2} = \Delta U - \Delta U_c$$

$$Q_c = \frac{\Delta U - \Delta U_c}{X} U_2 = \frac{0.62}{22} 32.77 = 0.924 \text{ M var}$$

可见, 电压调整幅度相同时, 采用串联补偿所需的电容量远小于采用并联补偿所需的电容量

**5-22** 某 **110kV** 线路长 **100km**, 其单位长度参数为  $r_1 = 0.17 \Omega / \text{km}$ ,  $x_1 = 0.4 \Omega / \text{km}$ ,

$b_1 = 2.8 \times 10^{-6} \text{ S/km}$ 。线路末端最大负荷为 **30+j20 (MVA)**, 最大负荷利用小时数为  **$T_{\max} = 5000\text{h}$** , 试计算全年的电能损耗。

解: 依题意得

线路末端充电功率为

$$Q_{c2} = -\frac{b_0 l}{2} U_N^2 = -0.5 \times 2.8 \times 10^{-6} \times 100 \times 110^2 = -1.694 \text{ (Mvar)}$$

等值电路中用以计算线路损失的功率为

$$\begin{aligned} S_1 &= S + jQ_{c2} = 30 + j20 - j1.694 \\ &= 30 + j18.306 \text{ (MVA)} \end{aligned}$$

线路上的有功功率损耗为

$$\Delta P_l = \frac{S_1^2}{U_N^2} R_l = \frac{30^2 + 18.306^2}{110^2} \times 0.17 \times 100 = 1.7353 \text{ (MW)}$$

$$\cos \varphi = \frac{30}{\sqrt{30^2 + 20^2}} = 0.832$$

已知  $T_{\max} = 5000\text{h}$  和  $\cos \varphi = 0.832$ , 由表 5-10 可查得  $\tau = 3536\text{h}$ 。

线路中全年能量损耗为

$$\Delta A_l = \Delta P_l \times 3492 = 1735.3 \times 3536 = 6136021 \text{ (kW} \cdot \text{h)}$$

**5-23** 某变电所有两台形号为 **SFL1-31500/110** 的变压器并联运行, 如图 5-58 所示。已知每台变压器的铭牌参数为:  $\Delta P_0=31\text{kW}$ ,  $P\%=0.7$ ,  $\Delta P_s=190\text{kW}$ ,  $U_s\%=10.5$ 。最大负荷功率  $S_{\max}=40+j25 \text{ MVA}$ , 最大负荷利用小时数  $T_{\max}=4500\text{h}$ , 试计算变电所全年的电能损耗。

解  $S_{\max} = \sqrt{40^2 + 25^2} = 47.17 \text{ MVA}$

最大负荷时变压器的绕组功率损耗为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{S}_T &= \Delta P_T + jQ_T = 2 \left( \Delta P_s + j \frac{U_s\%}{100} S_N \right) \left( \frac{S}{2S_N} \right)^2 = 2 \left( 190 + j \frac{10.5}{100} \times 31500 \right) \left( \frac{47.17}{2 \times 31.5} \right)^2 \\ &= 213.03 + j3708.33 \text{ (kVA)} \end{aligned}$$

变压器的铁芯功率损耗为

$$\Delta \dot{S}_0 = 2 \left( \Delta P_0 + j \frac{I_0\%}{100} S_N \right) = 2 \left( 31 + j \frac{0.7}{100} \times 31500 \right) = 62 + j441 \text{ (kVA)}$$

$$\cos \varphi = \frac{40}{\sqrt{40^2 + 25^2}} = 0.848$$

已知  $T_{\max} = 4500\text{h}$  和  $\cos \varphi = 0.8$ , 由表 5-10 可查得  $\tau = 3006\text{h}$ 。假定变压器全年投入运行, 则变压器全年的能量损耗为

$$\Delta A_T = 2\Delta P_0 \times 8760 + \Delta P_T \times 3004 = 62 \times 8760 + 213 \times 3004 = 1183398 \text{ (kW} \cdot \text{h)}$$

## 《电气工程基础》题解（第6章）

### 6-1 何谓短路冲击电流？什么情况下短路产生的短路冲击电流有最大值？

**答：**短路电流最大可能的瞬时值称为短路冲击电流。取  $I_m = 0$ ,  $R = 0$ ,  $\varphi = 90^\circ$  时，当  $\alpha = 0$ ，即短路恰好发生在电源电势过零时，短路后  $T/2$  时刻左右出现短路电流的最大值。

### 6-2 何谓短路电流有效值？有何作用？

**答：**短路电流有效值  $I_t$  是指以任一时刻  $t$  为中心的一个周期内瞬时电流的均方根值。即：

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i_t^2 dt}$$

短路电流有效值主要用于校验某些电器的断流能力。例如在选择断路器时必须使断路器的额定开断电流大于断路器开断瞬间的短路电流有效值。

### 6-3 何谓冲击系数？工程计算中一般如何取值？

**答：**根据推导可得短路冲击电流的计算式为

$$i_m = I_{pm} + I_{pm}e^{-0.01/T_a} = (1 + e^{-0.01/T_a})I_{pm}$$

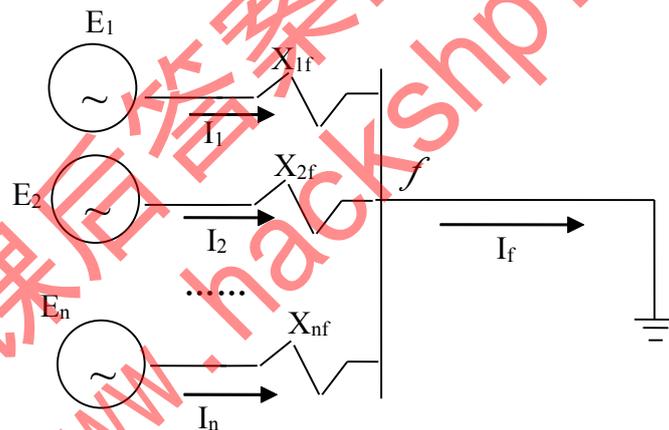
令  $k_{im} = 1 + e^{-0.01/T_a}$ , 称为冲击系数。

工程计算中一般按以下情况确定  $k_{im}$  的值:

- (1) 在发电机端部发生短路时,  $k_{im} = 1.9$
- (2) 在发电厂高压侧母线上发生短路时,  $k_{im} = 1.85$
- (3) 在其他地点短路时,  $k_{im} = 1.8$

#### 6-4 何谓输入阻抗? 转移阻抗?

答: 当网络化简为具有若干个电源的等值电路后, 如下图



图中:  $X_{if}$  称为节点  $i$  和节点  $f$  之间的转移电抗。即如果仅在  $i$  路中加电势  $\dot{E}_i$ , 其他电源电势均为零时, 则  $\dot{E}_i$  与在  $f$  支路中所产生的电流的比值就是  $i$  支路与  $f$  支路之间的转移电抗。

若所有的电源电势  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = \dots = \dot{E}_i = \dots = \dot{E}_n = 0$ , 并在短路点  $f$  反向接入电势  $\dot{E}_f$ ,

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{E}_f}{jX_{ff}}$$

$X_{ff}$  称为短路点  $f$  的输入电抗。在所有电源电势均相等时，短路点的输入电抗为其自导纳的倒数，其值等于短路点  $f$  对其余所有电源节点的转移电抗的并联值。

$$jX_{ff} = \frac{1}{Y_{ff}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{jX_{if}}}$$

### 6-5 何谓电流分布系数？它有何特点？

**答：**网络中的某一支路的电流  $\dot{I}_i$  和短路电流  $\dot{I}_f$  的比值为电流分布系数，记为  $C_i$ 。电流分布系数表示所有电源的电势都相等时，各电源所提供的短路电流占总短路电流的比例数。

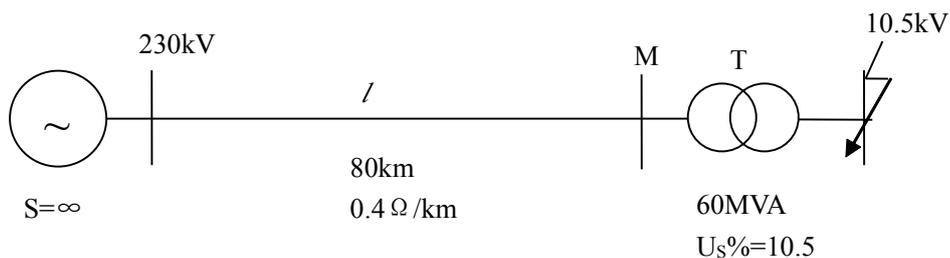
所有电源点的电流分布系数之和应等于 1，即

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq f}}^n C_i = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq f}}^n \frac{\dot{I}_i}{\dot{I}_f} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq f}}^n \frac{X_{ff}}{X_{if}} = 1$$

通常可利用这一特点来校验分布系数的计算是否正确。若  $f$  支路的短路电流  $\dot{I}_f = 1$ ，则  $C_i = \dot{I}_i$ ，可见电流分布系数实际上可以代表电流，所以  $C_i$  也有方向、大小，并且符合节点电流定律。

### 6-6 已知无穷大供电系统如图 6-29 所示。当变电所低压母线发生三相短路时，

试做以下计算：



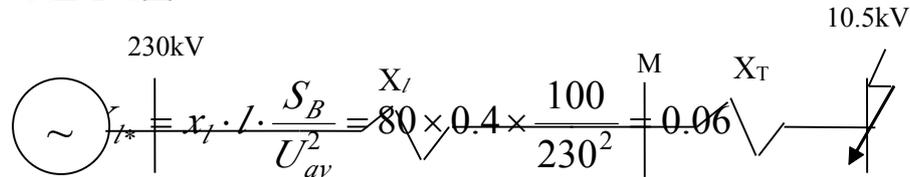
(1) 短路点短路电流的周期分量；

**(2) 短路冲击电流；**

**(3) M 点的残压。**

解： 设  $S_B = 100 \text{ MVA}$ ,  $U_B = U_{av}$

(1) 作等值电路图



$$X_{T*} = \frac{U_S \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_N} = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{60} = 0.175$$

$$X_{\Sigma*} = X_{l*} + X_{T*} = 0.06 + 0.175 = 0.235$$

(2) 短路点短路电流的周期分量

因为系统为无穷大电源，所以有

$$I_{P*} = \frac{1}{X_{\Sigma*}} = \frac{1}{0.235} = 4.25$$

$$I_P = I_{P*} \cdot I_B = 4.25 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 23.37 \text{ kA}$$

(3) 短路冲击电流

在变压器低压侧短路， $k_{im} = 1.8$

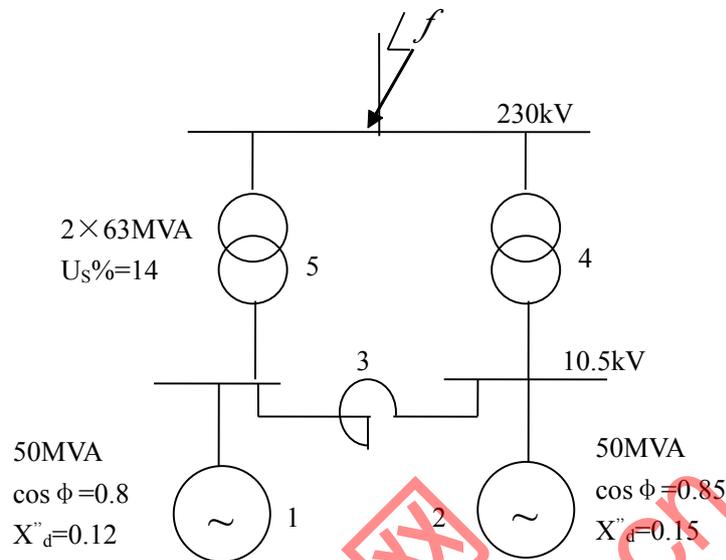
$$i_{im} = k_{im} \cdot \sqrt{2} I_P = 1.8 \times \sqrt{2} \times 23.37 = 59.48 \text{ kA}$$

(4) M 点的残压

$$U_{M*} = I_{P*} X_{T*} = 4.25 \times 0.175 = 0.74$$

$$U_M = U_{M*} \cdot U_{av} = 0.74 \times 230 = 170.2 \text{ kV}$$

**6-7 系统接线如图 6-30 所示。试计算 f 点发生短路时各电源支路的转移电抗以及 f 点的输入电抗。**



解: 设  $S_B = 100\text{MVA}$ ,  $U_B = U_{av}$

(1) 计算元件参数标么值

$$X_1 = X''_d \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.12 \times \frac{100 \times 0.8}{50} = 0.192$$

$$X_2 = X''_d \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.15 \times \frac{100 \times 0.85}{50} = 0.255$$

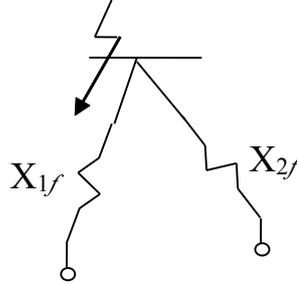
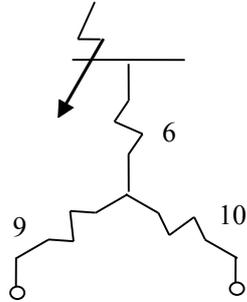
$$X_3 = \frac{X_L \%}{100} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} \cdot \frac{S_B}{U_{av}^2} = 0.12 \times \frac{10}{\sqrt{3} \times 2} \times \frac{100}{10.5^2} = 0.314$$

$$X_4 = X_5 = \frac{U_S \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.14 \times \frac{100}{63} = 0.222$$

$$X_6 = \frac{X_5 \cdot X_4}{X_3 + X_4 + X_5} = \frac{0.222 \times 0.222}{0.314 + 0.222 + 0.222} = 0.065$$

$$X_6 = \frac{X_3 \cdot X_5}{X_3 + X_4 + X_5} = \frac{0.314 \times 0.222}{0.758} = 0.092$$

$$X_6 = \frac{X_3 \cdot X_4}{X_3 + X_4 + X_5} = \frac{0.314 \times 0.222}{0.758} = 0.092$$



$$X_9 = X_7 + X_1 = 0.092 + 0.192 = 0.284$$

$$X_{10} = X_8 + X_2 = 0.092 + 0.255 = 0.347$$

$$X_{1f*} = X_6 \cdot X_9 \cdot \left( \frac{1}{X_6} + \frac{1}{X_9} + \frac{1}{X_{10}} \right) = 0.065 \times 0.284 \times 21.78 = 0.402$$

$$X_{2f*} = X_6 \cdot X_{10} \cdot \left( \frac{1}{X_6} + \frac{1}{X_9} + \frac{1}{X_{10}} \right) = 0.065 \times 0.347 \times 21.78 = 0.491$$

$$X_{ff*} = X_{1f*} // X_{2f*} = 0.221$$

$$\text{有名值为：} X_{1f} = X_{1f*} \cdot X_B = 0.402 \times \frac{230^2}{100} = 212.658$$

$$X_{2f} = X_{2f*} \cdot X_B = 0.491 \times \frac{230^2}{100} = 259.739$$

$$X_{ff} = X_{ff*} \cdot X_B = 0.221 \times \frac{230^2}{100} = 116.909$$

## 6-8 何谓计算电抗？

答：计算电抗是指发电机的纵轴次暂态电抗  $X_d''$  和归算到发电机额定容量的

外接电抗  $X_e$  的标么值之和。

$$X_{js} = X_d'' + X_e$$

### 6-9 简述应用计算曲线(表)解题的基本步骤

答:(1) 选取准功率  $S_B$  和基准电压  $U_B = U_{av}$ , 计算元件参数, 绘制等值网络。

(2) 行网络变换。根据所讲的原则, 将网络中的电源合并为若干组, 求出各等值发电机对短路点的转移电抗  $X_{fi}$  和无限大电源对短路点的转移电抗  $X_{fS}$ 。

(3) 各电源的转移电抗  $X_{fi}$  进行归算, 得到各电源点对短路点的计算电抗  $X_{jsi}$

$$X_{jsi} = X_{fi} \cdot \frac{S_{Ni}}{S_B}$$

(4) 由计算电抗  $X_{jsi}$  分别根据合适的(汽轮机或水轮机)计算曲线找出制定时刻  $t$ , 各等值发电机提供的短路周期电流的标么值  $I_{pti}^*$ 。

(5) 无限大功率电源提供的短路周期电流不衰减。

$$I_{pS}^* = \frac{1}{X_{fS}}$$

(6) 计算短路电流周期分量的有名值。

$$\text{第 } i \text{ 台等值发电机提供的短路电流 } I_{pti} = I_{pti}^* \cdot I_{Ni} = I_{pti}^* \frac{S_{Ni}}{\sqrt{3}U_{av}}$$

无限大功率电源提供的短路电流

$$I_{pS} = I_{pS}^* \cdot I_B = I_{pS}^* \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{av}}$$

(7) 短路点周期分量电流的有名值为

$$I_{pt} = \sum_{i=1}^g I_{pti}^* \frac{S_{Ni}}{\sqrt{3}U_{av}} + I_{pS}^* \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{av}}$$

**6-10 对称三相电力系统中发生三相短路时，短路电流的周期分量和非周期分量的初始值 (t=0) 是否对称？为什么？**

答：要看电路短路前的状态。若短路前电路处于空载状态下，则可认为  $I_m = 0$ ，当  $t=0$  时，短路电流的周期分量为  $I_{pm} \sin(\alpha - \varphi)$ ，非周期分量的初始值  $C = -I_{pm} \sin(\alpha - \varphi)$ ，因此是对称的。

**6-11 有限容量电源供电系统三相短路暂态过程中，短路电流各分量的变化特点与恒定电势源供电系统有什么不同？**

答：周期分量：有限容量电源短路电流周期分量的幅值随时间而衰减。恒定电势源供电系统短路电流周期分量的幅值不衰减。

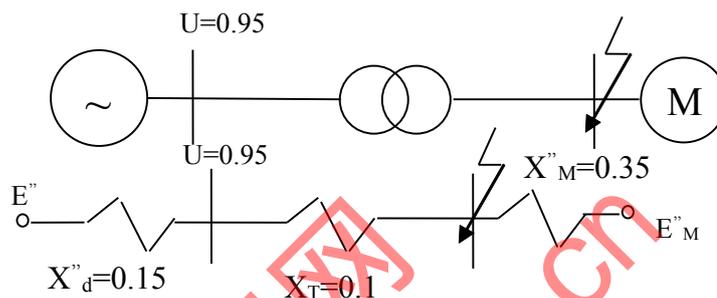
有限容量电源供电系统的短路电流非周期分量的衰减性质及它的初始值的确定，与恒定电势源系统相同。

**6-12 电力系统中发生三相短路时，短路点附近的异步电动机为什么会提供短路电流？**

答：正常运行时，异步电动机从系统中吸取无功功率以建立磁场，电动机的电流方向是从系统流向电动机的，此时电动机的电势  $E_M''$  小于其端电压  $U$ 。

当系统中发生短路时，系统中各点的电压降低，短路点附近的异步电动机会出现  $U < E_M''$  的情况，因此，电动机将向系统提供短路电流。

**6-13 一台同步发电机经变压器连接到一台异步电动机。归算到同一基准值时各元件参数为：发电机， $X_d'' = 0.15$ ；电动机  $X_M'' = 0.35$ ；变压器  $X_T = 0.1$ 。在电动机的机端发生三相短路，故障时发电机的端电压为 0.95，电流为 1.0，功率因数为 0.85（超前）。试计算发电机、电动机的次暂态电流。**



**解：**(1) 按系统正常运行，计算发电机和异步电动机的次暂态电势

设发电机机端电压  $\dot{U} = 0.95 \angle 0^\circ$ ，则  $\dot{I} = 1.0 \angle 31.79^\circ$

$$\begin{aligned} \dot{E}'' &= \dot{U} + jIX_d'' = 0.95 \angle 0^\circ + j1.0 \angle 31.79^\circ \times 0.15 \\ \therefore &= 0.8705 + j0.1275 \\ &= 0.88 \angle 8.33^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_M'' &= \dot{U} - jI(X_T + X_M'') \\ &= 0.95 \angle 0^\circ - j1.0 \angle 31.79^\circ \times (0.1 + 0.35) \\ &= 1.1885 - j0.3825 \\ &= 1.25 \angle -17.84^\circ \end{aligned}$$

(2) 短路时，发电机支路的次暂态电流为

$$\dot{I}_{G^*}'' = \frac{\dot{E}''}{j(X_d'' + X_T)} = \frac{0.88 \angle 8.33^\circ}{0.25 \angle 90^\circ} = 3.52 \angle -81.67^\circ$$

电动机支路的次暂态电流为

$$\dot{I}_{M^*}'' = \frac{\dot{E}_M''}{jX_M''} = \frac{1.25 \angle -17.84^\circ}{0.35 \angle 90^\circ} = 3.57 \angle -107.84^\circ$$

**6-14 已知某发电机短路前满载运行，以本身额定值为基准的标么值参数为**

$U_{G(0)} = 1.0, I_{G(0)} = 1.0, \cos \varphi_{G(0)} = 0.8, X''_d = 0.125$ ，冲击系数取

$k_{im} = 1.85$ ，发电机额定相电流有效值为 **3.45kA**。试计算发电机机端发生三相

短路时的起始次暂态电流  $I''_G$  和冲击电流  $i_{im}$  的有名值。

解：

$$\begin{aligned} E''_* &= \sqrt{(U_{G(0)} + I_{G(0)} X''_d \sin \varphi_{G(0)})^2 + (I_{G(0)} X''_d \cos \varphi_{G(0)})^2} \\ &= \sqrt{(1 + 0.125 \times 0.6)^2 + (0.125 \times 0.8)^2} \\ &= 1.08 \end{aligned}$$

$$\text{则： } I''_{G*} = \frac{E''_*}{X''_d} = \frac{1.08}{0.125} = 8.64$$

$$i_{im*} = k_{im} \cdot \sqrt{2} I''_{G*} = 1.85 \times \sqrt{2} \times 8.64 = 22.60$$

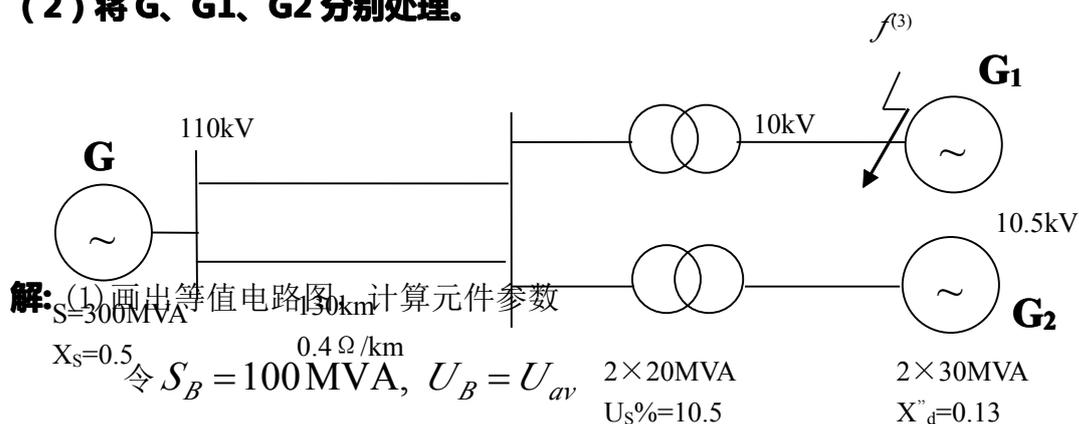
$$\text{有名值为 } I''_G = 8.64 \times 3.45 = 29.8 \text{ kA}$$

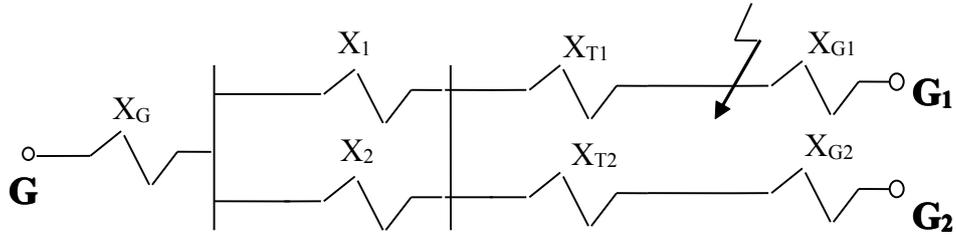
$$i_{im} = 22.60 \times 3.45 = 77.97 \text{ kA}$$

**6-15 某系统接线如图 6-31 所示，有关参数标注在图中。图中的 G 为恒定电势源；G1、G2 为汽轮发电机，且均有自动电压调节装置。当 f 点发生三相短路时，试分别按下列条件计算  $I''$ 、 $I_{0.2}$  和  $I_\infty$ ，并比较结果。**

(1) 将恒定电势源 G、G1、G2 合并为一台等值机；

(2) 将 G、G1、G2 分别处理。





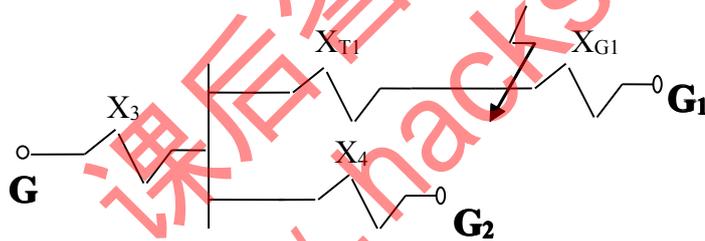
$$X_G = X_S \cdot \frac{S_B}{S} = 0.5 \times \frac{100}{300} = 0.167$$

$$X_1 = X_2 = x \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{av}^2} = 0.4 \times 130 \times \frac{100}{115^2} = 0.393$$

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{U_S \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{TN}} = 0.105 \times \frac{100}{20} = 0.525$$

$$X_{G1} = X_{G2} = X'_d \cdot \frac{S_B}{S_{GN}} = 0.13 \times \frac{100}{30} = 0.433$$

(2) 网络化简



$$X_3 = X_G + \frac{X_1}{2} = 0.167 + 0.393/2 = 0.364$$

$$X_4 = X_{T2} + X_{G2} = 0.525 + 0.433 = 0.958$$

(3) 将 G、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> 合并为一台等值机

$$\begin{aligned} X_{\Sigma} &= [(X_3 // X_4) + X_{T1}] // X_{G1} \\ &= \left( \frac{0.364 \times 0.958}{0.364 + 0.958} + 0.525 \right) // 0.433 \\ &= (0.264 + 0.525) // 0.433 \\ &= 0.28 \end{aligned}$$

$$S_{\Sigma} = S + S_{G1} + S_{G2} = 300 + 2 \times 30 = 360 \text{ MVA}$$

$$X_{js} = X_{\Sigma} \cdot \frac{S_{\Sigma}}{S_B} = 0.28 \times \frac{360}{100} = 1.01$$

查汽轮机短路电流计算曲线:

$$I''_* = 1.025$$

$$I_{0.2}^* = 0.945$$

$$I_{\infty}^* = 1.117$$

$$I_B = \frac{S_{\Sigma}}{\sqrt{3}U_{av}} = \frac{360}{\sqrt{3} \times 10.5} = 19.79 \text{ kA}$$

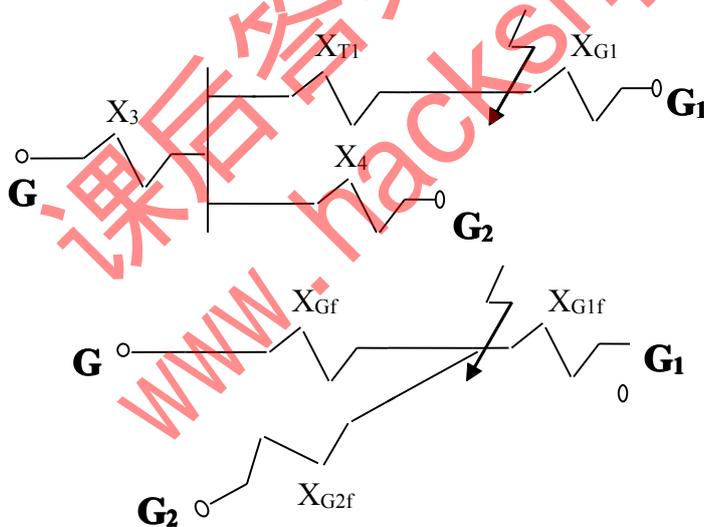
短路电流的有名值为

$$I'' = 1.025 \times 19.79 = 20.28 \text{ kA}$$

$$I_{0.2} = 0.945 \times 19.79 = 18.70 \text{ kA}$$

$$I_{\infty} = 1.117 \times 19.79 = 22.10 \text{ kA}$$

(4) 将 G、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> 分别处理



$$X_{Gf} = X_3 + X_{T1} + \frac{X_3 \cdot X_{T1}}{X_4} = 0.364 + 0.525 + \frac{0.364 \times 0.525}{0.958} = 1.088$$

$$X_{G_2f} = X_4 + X_{T1} + \frac{X_4 \cdot X_{T1}}{X_3} = 0.958 + 0.525 + \frac{0.958 \times 0.525}{0.364} = 2.865$$

$$X_{G_1f} = X_{G1} = 0.433$$

$$\text{对 G: } X_{jS} = X_{Gf} \cdot \frac{S}{S_B} = 1.088 \times \frac{300}{100} = 3.264$$

$$I''_* = I_{0.2*} = I_{\infty*} = \frac{1}{3.264} = 0.306$$

$$\text{对 G}_2: X_{jS} = X_{G2f} \cdot \frac{S_{G2}}{S_B} = 2.865 \times \frac{30}{100} = 0.860$$

$$I''_* = 1.208$$

$$I_{0.2*} = 1.102$$

$$I_{\infty*} = 1.352$$

$$\text{对 G}_1: X_{jS} = X_{G1f} \cdot \frac{S_{G1}}{S_B} = 0.433 \times \frac{30}{100} = 0.13$$

$$I''_* = 8.340$$

$$I_{0.2*} = 5.049$$

$$I_{\infty*} = 2.519$$

短路电流的有名值为

$$I'' = 0.306 \times \frac{300}{\sqrt{3} \times 10.5} + (1.208 + 8.34) \times \frac{30}{\sqrt{3} \times 10.5} = 20.80 \text{ kA}$$

$$I_{0.2} = 0.306 \times \frac{300}{\sqrt{3} \times 10.5} + (1.102 + 5.049) \times \frac{30}{\sqrt{3} \times 10.5} = 15.19 \text{ kA}$$

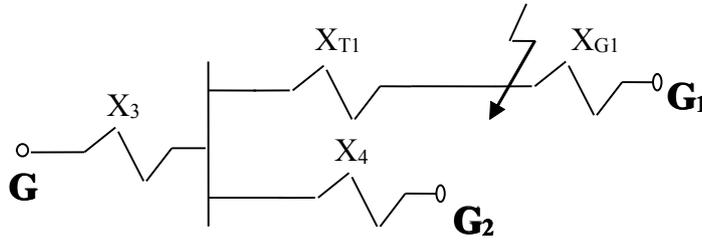
$$I_{\infty} = 0.306 \times \frac{300}{\sqrt{3} \times 10.5} + (1.352 + 2.519) \times \frac{30}{\sqrt{3} \times 10.5} = 11.43 \text{ kA}$$

将 G、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> 合并为一台等值机时的短路电流和将 G、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> 分别处理时的短路电流有很大差别。主要是忽略了发电机类型不同及发电机距短路点远近不同所产生的误差。

**6-16 系统接线图和已知条件同题 6-15 但 G<sub>2</sub> 为一水轮发电机 试计算  $I''$ ,  $I_{0.2}$  和  $I_{\infty}$ 。**

**解：**将 G、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> 分别处理，电源 G、G<sub>1</sub> 所提供的短路电流不变，G<sub>2</sub> 查水轮发

电机短路电流计算曲线可得：



对 G<sub>2</sub>:  $X_{jS} = 0.860$

$$I''_* = 1.240$$

$$I_{0.2}^* = 1.186$$

$$I_{\infty}^* = 1.491$$

短路电流的有名值为

$$I'' = 0.306 \times \frac{300}{\sqrt{3} \times 10.5} + (1.240 + 8.34) \times \frac{30}{\sqrt{3} \times 10.5} = 20.85 \text{ kA}$$

$$I_{0.2} = 0.306 \times \frac{300}{\sqrt{3} \times 10.5} + (1.186 + 5.049) \times \frac{30}{\sqrt{3} \times 10.5} = 15.33 \text{ kA}$$

$$I_{\infty} = 0.306 \times \frac{300}{\sqrt{3} \times 10.5} + (1.491 + 2.519) \times \frac{30}{\sqrt{3} \times 10.5} = 11.66 \text{ kA}$$

## 《电气工程基础》题解（第 7 章）

7-1 设已知三相不对称电压为： $\dot{U}_a = 80 \angle 10^\circ \text{V}$ ,  $\dot{U}_b = 70 \angle 135^\circ \text{V}$ ,  $\dot{U}_c = 85 \angle 175^\circ \text{V}$ 。

求正序、负序和零序电压对称分量。

解：

计算 m 文件

```
%conj(Z) = real(Z) - i*imag(Z)
```

```
Ua=80*exp(j*10*pi/180)
```

$$U_b = 70 \exp(j \cdot 135 \cdot \pi / 180)$$

$$U_c = 85 \exp(j \cdot 175 \cdot \pi / 180)$$

$$a = \exp(j \cdot 120 \cdot \pi / 180)$$

$$aa = \exp(j \cdot 240 \cdot \pi / 180)$$

$$U_{a0} = 1/3 \cdot (U_a + U_b + U_c)$$

$$U_{a1} = 1/3 \cdot (U_a + a \cdot U_b + aa \cdot U_c)$$

$$U_{a2} = 1/3 \cdot (U_a + aa \cdot U_b + a \cdot U_c)$$

$$R_{Ua0} = \text{abs}(U_{a0})$$

$$R_{Ua1} = \text{abs}(U_{a1})$$

$$R_{Ua2} = \text{abs}(U_{a2})$$

$$\text{Ag}U_{a0} = \text{angle}(U_{a0}) / \pi \cdot 180$$

$$\text{Ag}U_{a1} = \text{angle}(U_{a1}) / \pi \cdot 180$$

$$\text{Ag}U_{a2} = \text{angle}(U_{a2}) / \pi \cdot 180$$

结果：

$$a = -0.5000 + 0.8660i$$

$$aa = -0.5000 - 0.8660i$$

$$U_{a0} = -18.4631 + 23.5992i$$

$$U_{a1} = 36.4738 + 5.3017i$$

$$U_{a2} = 60.7740 - 15.0090i$$

$$R_{Ua0} = 29.9635$$

$$R_{Ua1} = 36.8571$$

$$R_{Ua2} = 62.5999$$

$$\text{Ag}U_{a0} = 128.0383$$

$$\text{Ag}U_{a1} = 8.2703$$

$$\text{Ag}U_{a2} = -13.8724$$

$$\text{因为：} \begin{cases} \dot{U}_{a1} = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + \alpha \dot{U}_b + \alpha^2 \dot{U}_c) \\ \dot{U}_{a2} = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + \alpha^2 \dot{U}_b + \alpha \dot{U}_c) \\ \dot{U}_{a0} = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c) \end{cases}$$

$a = e^{j120}$  所以

$$U_a = 80 \angle 10^\circ = 78.7846 + j 13.8919$$

$$U_b = 70 \angle 135^\circ = -49.4975 + j 49.4975$$

$$U_c = 85 \angle 175^\circ = -84.6765 + j 7.4082$$

零序分量:  $\dot{U}_{a0} = -18.4631 + j23.5992 = 29.9635 \angle 128.0383$

正序分量:  $\dot{U}_{a1} = 36.4738 + j5.3017 = 36.8571 \angle 8.2703$

负序分量:  $\dot{U}_{a2} = 60.7740 - j15.0090 = 62.5999 \angle -13.8724$

验证:  $\dot{U}_{a0} + \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} = 78.7846 + j13.8919 = 80 \angle 10^\circ$

**7-2 某330kV线路, 三根导线水平布置。相间距离为8m, 每根导线采用LGJQ-600型(轻型钢芯绞线, 额定截面为600 mm<sup>2</sup>), 大地电阻率为100 Ω·m, 试计算输电线路的零序电抗。**

解:

采用有架空地线的单回架空输电线的零序阻抗  
首先不考虑架空地线

返回电路的等效深度:  $D_e = 600 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 600 \sqrt{\frac{100}{50}} = 848.5281 \text{ (m)}$

几何均距:  $D_{ge} = \sqrt[3]{2D^3} = 1.26D = 1.26 \times 8 = 11.34$

$r_e = \omega \frac{\pi}{2} \times 10^{-7} = \pi^2 f \times 10^{-4} = 0.05 \text{ (}\Omega\text{)}$

零序分量:  $Z_0 = Z_a + 2Z_m = r_a + 2r_e + j3 \times 0.1445 \lg \frac{D_e}{\sqrt[3]{a_m D_{ge}^2}}$

架空导线自身的电阻:  $r_a = \frac{\rho}{S} = \frac{31.5}{600} = 0.0525 \text{ (}\Omega / \text{km)}$

导线的半径:  $a_m = \sqrt{\frac{600}{\pi}} = 13.8198 \text{ (mm)}$

$$\begin{aligned} Z_0 &= Z_a + 2Z_m = r_a + 3r_e + j3 \times 0.1445 \lg \frac{D_e}{\sqrt[3]{a_m D_{ge}^2}} \\ &= 0.0525 + 3 \times 0.05 + j3 \times 0.1445 \lg \frac{848.528}{\sqrt[3]{13.8198 \times 11.34^2}} \\ &= 0.2025 + j1.8413 \end{aligned}$$

LGJQ\_600 300kV 电阻. 0.0527 (Ω/km) 电抗 0.310 (Ω/km)

**7-3 如本题图示系统, 当分别在  $f_1$  处和  $f_2$  处发生不对称接地短路时, 制定出下**

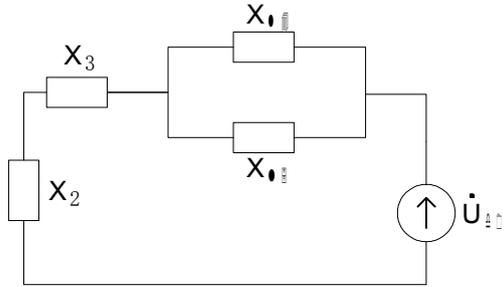
述两种运行条件下的零序网络

- (1) T3 高压绕组 9 中性点不接地
- (2) T3 高压绕组 9 中性点直接接地

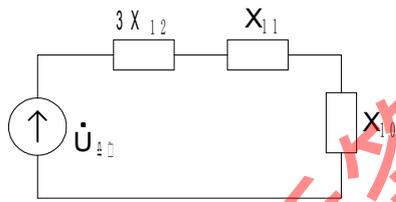
解：

- (1) T3 高压绕组 9 中性点不接地

$f_1$  处发生不对称接地短路：

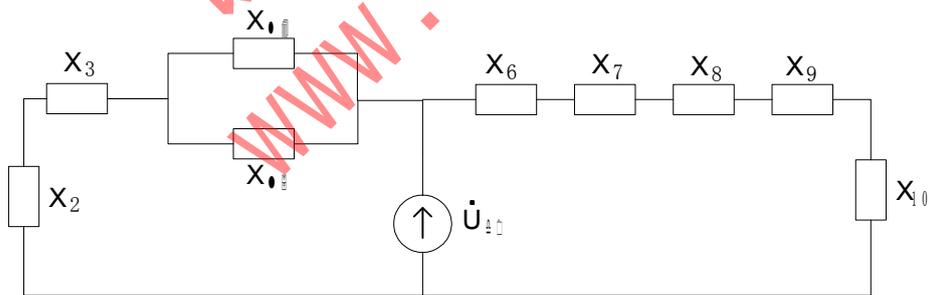


$f_2$  处发生不对称接地短路：

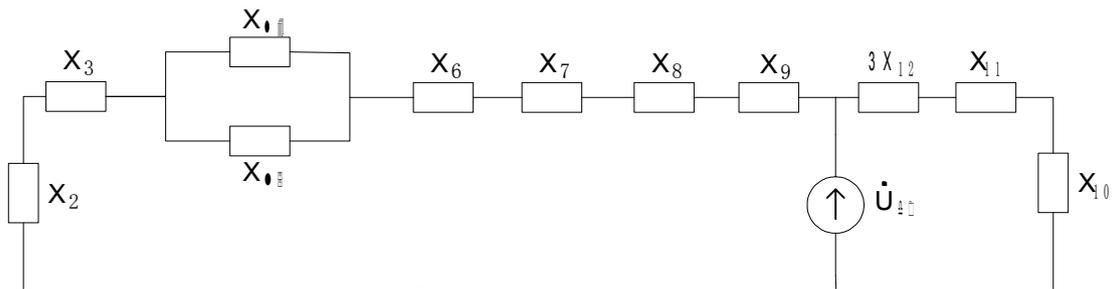


- (2) T3 高压绕组 9 中性点直接接地

$f_1$  处发生不对称接地短路：



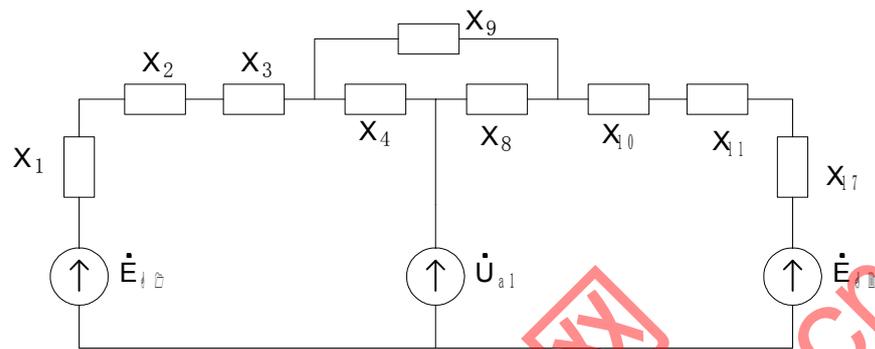
$f_2$  处发生不对称接地短路：



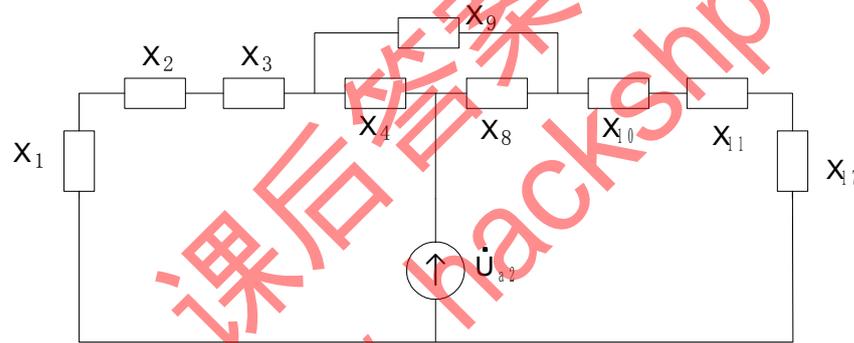
7-4 如本题图示系统。当分别在  $f_1$  和  $f_2$  处发生不对称接地短路时，指定出正序网络、负序网络和零序网络。

解：

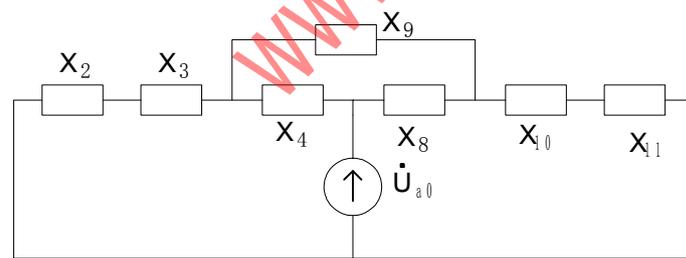
$f_1$  处发生不对称接地短路： 正序



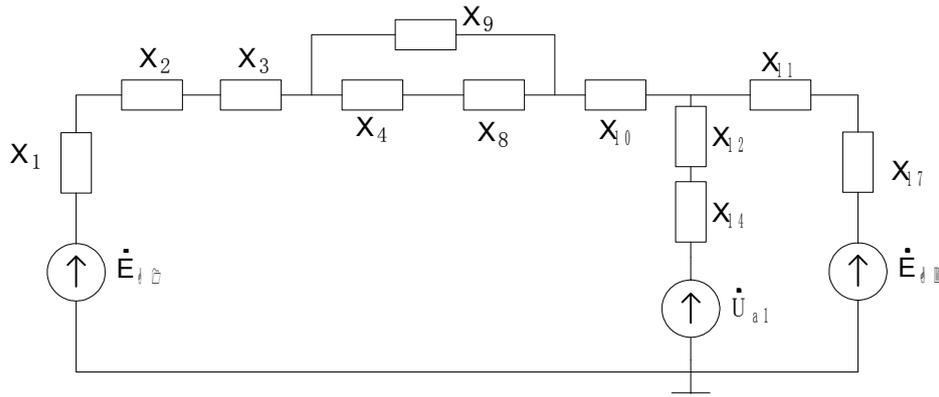
负序：



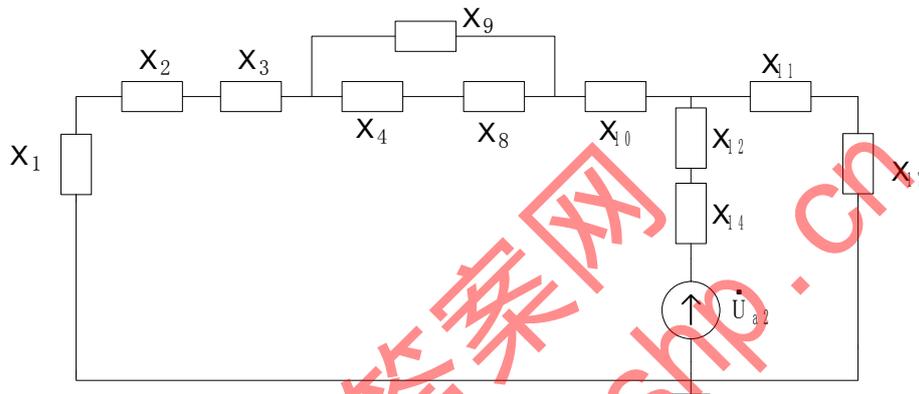
零序：



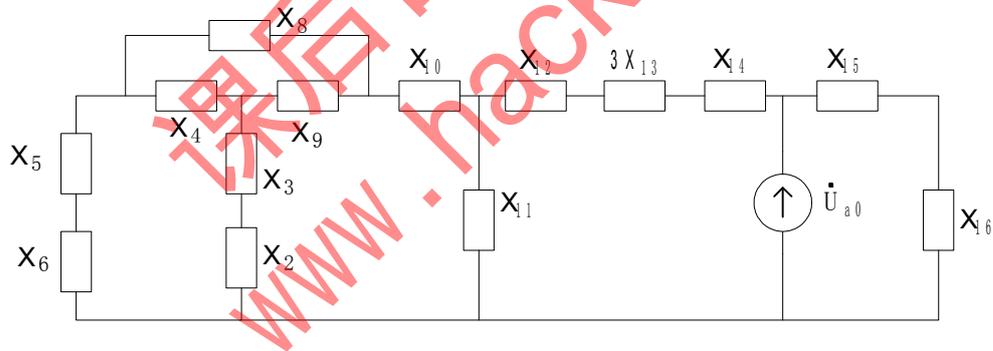
$f_2$  处发生不对称接地短路： 正序



负序:



零序:

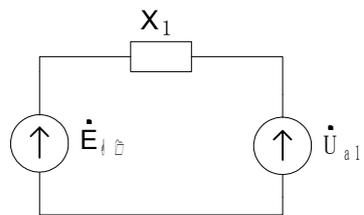


7-5 如本题图示系统, 当  $f$  点发生单相接地短路时, 试作出正序、负序和零序网

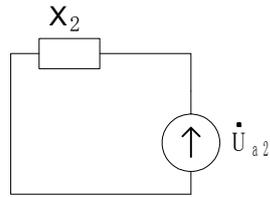
络。

解:

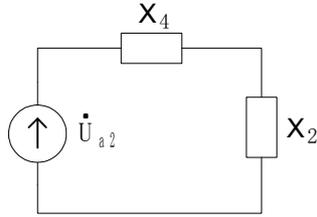
正序



负序



零序



## 《电气工程基础》题解（第8章）

### 8.1 不对称短路时的基准相一般应如何选择？

答：在简单不对称短路的分析计算中，一般均选三相中的特殊相（即故障处的状况不同于另外两相的那一相）为基准相。如发生的为单相接地故障，则故障相为特殊相；如发生的为两相或两相接地故障，则非故障相为特殊相。

### 8.2 何谓正序等效定则？

答：简单不对称短路时，短路点正序电流分量的大小与在短路点每一相中串接一附加电抗  $X_{\Delta}^{(n)}$ ，并在其后面发生三相短路时的电流相等。这称为正序等效定则。

### 8.3 各序分量经变压器后，相位是如何变化的？

答：当网络中接有变压器时，由于变压器两侧绕组的联接组别不同，故两侧的序电压或序电流可能有相位变化。针对变压器常用的两种联接组别 Yy 和 Yd 来讨论。在图 8-20 (a) 所示的 Yy 接法的变压器中，当在绕组 I 的出线端 A、B、C 上施加正序电压时，绕组 II 的相电压与绕组 I 的相电压是同相位的，如图 8-20

(b) 所示。当在绕组 I 施加负序电压时, 绕组 II 的相电压与绕组 I 的相电压也是同相位的, 如图 8-18 (c) 所示。如果变压器接成 YN yn, 且又存在零序电流通路时, 变压器两侧的零序电流 (或零序电压) 也是同相位的。所以电压和电流的各序分量经过 Y y 联接的变压器变换时, 不会发生相位的移动。

对图 8-21 (a) 所示的 Y d 接法的变压器来说, 其三角形侧的外电路中不含零序分量。若在其 Y 侧施加正序电压, 则三角形侧的线电压与 Y 侧的相电压同相位, 此时三角形侧的相电压将超前 Y 侧的相电压  $30^\circ$ , 如图 8-21 (b) 所示。当在 Y 侧施加负序电压时, 则三角形侧的相电压将滞后 Y 侧的相电压  $30^\circ$ , 如图 8.19 (c) 所示。即

$$\dot{U}_{a1} = \dot{U}_{A1} \angle 30^\circ \quad (8-61)$$

$$\dot{U}_{a2} = \dot{U}_{A2} \angle -30^\circ \quad (8-62)$$

同理可得正序、负序电流间的关系式为

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{A1} \angle -30^\circ \quad (8-63)$$

$$\dot{I}_{a2} = \dot{I}_{A1} \angle 30^\circ \quad (8-64)$$

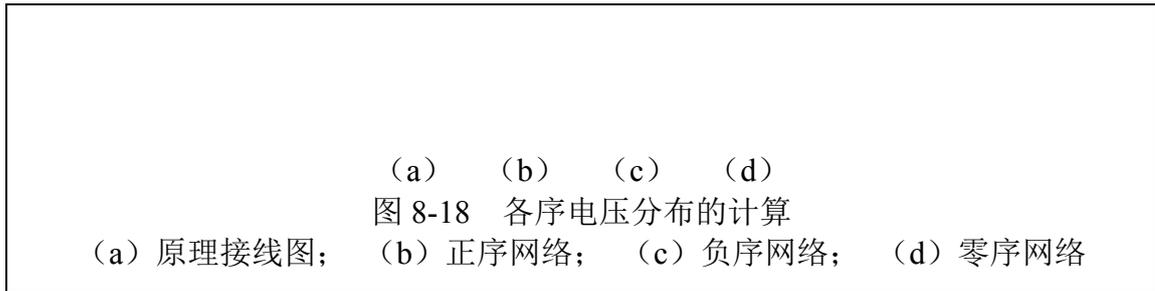
可见, 正、负序的电压、电流分量经 Y d 联接的变压器后, 均会有相位的移动。

#### 8.4 不对称短路时的各序电压分布有何规律?

答: 网络中任意节点的各序电压等于短路点的各序电压, 加上该节点至短路点间的同一序电流产生的电压降。

以图 8-18 所示的简单网络为例, 节点  $m$  在正序、负序和零序网络中, 分别经  $X_{11}$ 、 $X_{22}$  和  $X_{00}$  与短路点  $f$  相联。据此即可写出  $m$  点处以基准相表示的正、负、零序电压  $\dot{U}_{m1}$ 、 $\dot{U}_{m2}$ 、 $\dot{U}_{m0}$  与故障处序电压和序电流的关系为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{m1} &= \dot{U}_{a1} + j \dot{I}_{a1} X_{11} \\ \dot{U}_{m2} &= \dot{U}_{a2} + j \dot{I}_{a2} X_{22} \\ \dot{U}_{m0} &= \dot{U}_{a0} + j \dot{I}_{a0} X_{00} \end{aligned} \right\} \quad (8.59)$$



而  $m$  点的各相电压则为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{ma} &= \dot{U}_{m0} + \dot{U}_{m1} + \dot{U}_{m2} \\ \dot{U}_{mb} &= \dot{U}_{m0} + a^2 \dot{U}_{m1} + a \dot{U}_{m2} \\ \dot{U}_{mc} &= \dot{U}_{m0} + a \dot{U}_{m1} + a^2 \dot{U}_{m2} \end{aligned} \right\} \quad (8.60)$$

由于在正序网络中电压降  $j\dot{I}_{a1}X_{l1}$  与  $\dot{U}_{a1}$  同相，在负序网络和零序网络中的电压降  $j\dot{I}_{a2}X_{l2}$  和  $j\dot{I}_{a0}X_{l0}$  分别与  $\dot{U}_{a2}$ 、 $\dot{U}_{a0}$  反相，因而正序电压将随着与短路点距离的增加而升高，而负序和零序电压则随着与短路点距离的增加而降低。图 8-19 给出了上述简单网络在发生各种不对称短路时的各序电压分布。由图可见正序电压在电源处最高，随着与短路点的接近而逐渐降低，在短路点处降到最低值。负序电压和零序电压则在短路点处最高，随着与短路点距离的增加而降低。零序电压在变压器三角形出线处降到零值，而负序电压则在电源点处降到零值。

**8.5** 如图 8-22 所示简单电力系统，各元件参数的标幺值为：

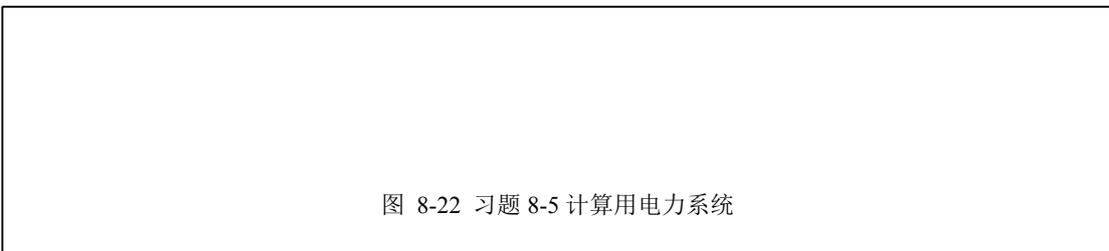
$$G_1: \dot{E}_{G1} = j1.0, X_{G11} = X'_d = j0.13, X_{G12} = j0.2$$

$$G_2: \dot{E}_{G2} = j1.0, X_{G21} = X'_d = j0.13, X_{G22} = j0.2$$

$$l: X_{l1} = j0.06, X_{l0} = 3X_{l1}$$

$$T_1: X_{T1} = j0.12$$

$$T_2: X_{T2} = j0.14$$

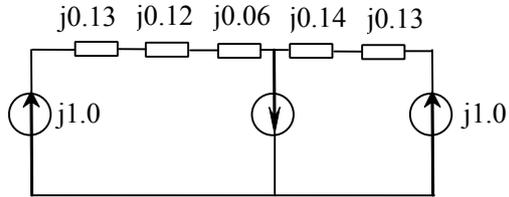


试计算  $f$  点发生下列短路时的各相电流、电压标幺值，并画出相量图，比较结果。

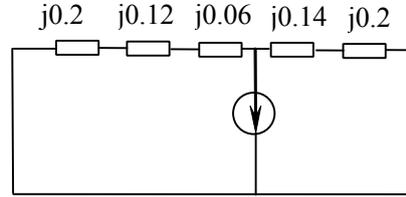
1.  $c$  相直接接地短路

2.  $a$ 、 $b$  两相直接短路
3.  $a$ 、 $b$  两相直接接地短路

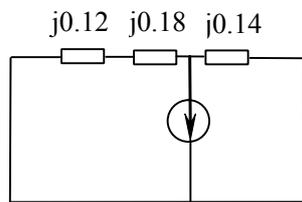
解：(1) 制定各序网络。



正序图



负序图



零序图

$$x_{1\Sigma} = 0.27 // 0.31 = 0.144 \quad x_{2\Sigma} = 0.34 // 0.38 = 0.179$$

$$x_{0\Sigma} = 0.3 // 0.14 = 0.095$$

(2) C 相直接接地短路 取 C 相为基准相

$$\dot{I}_{c1} = \dot{I}_{c2} = \dot{I}_{c0} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})} = \frac{j1.0}{j(0.144 + 0.179 + 0.095)} = 2.392$$

$$\dot{I}_c = 3\dot{I}_{c1} = 7.177 \quad \dot{I}_a = \dot{I}_b = 0$$

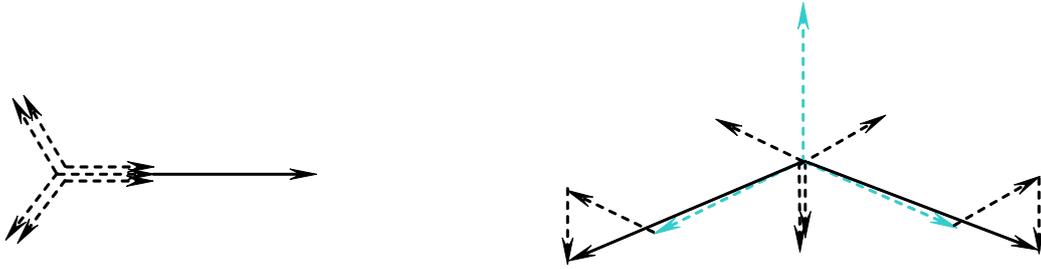
$$\dot{U}_{c1} = j(x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma})\dot{I}_{c1} = j(0.179 + 0.095) \times 7.177 = 1.966$$

$$\dot{U}_{c2} = -jx_{2\Sigma}\dot{I}_{c1} = -j0.179 \times 7.177 = -j1.285$$

$$\dot{U}_{c0} = -jx_{0\Sigma}\dot{I}_{c1} = -j0.095 \times 7.177 = -j0.682$$

$$\dot{U}_a = \dot{U}_{c0} + a^2\dot{U}_{c1} + a\dot{U}_{c2} = 2.815 - j1.0225 = 2.995 \angle -19.96^\circ$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_{c0} + a\dot{U}_{c1} + a^2\dot{U}_{c2} = -2.815 - j1.0225 = 2.995 \angle -199.96^\circ$$



(3) a、b 两相直接短路

$$\dot{I}_{c1} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})} = \frac{j1.0}{j(0.144 + 0.179)} = 3.096$$

$$\dot{I}_{c2} = -\dot{I}_{c1} = -3.096 \quad \dot{I}_c = 0$$

$$\dot{I}_a = a^2 \dot{I}_{c1} + a \dot{I}_{c2} = -j5.362$$

$$\dot{I}_b = a \dot{I}_{c1} + a^2 \dot{I}_{c2} = j5.362$$

$$\dot{U}_{c1} = \dot{U}_{c2} = jx_{2\Sigma} \dot{I}_{c1} = j0.554 \quad \dot{U}_c = 2\dot{U}_{c1} = j1.108$$

$$\dot{U}_a = \dot{U}_b = (a^2 + a)\dot{U}_{c1} = -j0.554$$



(4)a、b 两相直接接地短路

$$\dot{I}_{c1} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + \frac{x_{2\Sigma}x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}})} = \frac{j1.0}{j(0.144 + \frac{0.179 \times 0.095}{0.179 + 0.095})} = 4.853$$

$$\dot{I}_{c2} = -\frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \dot{I}_{c1} = -\frac{0.095}{0.179 + 0.095} \times 4.853 = -1.683$$

$$\dot{I}_{c0} = -\frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \dot{I}_{c1} = -\frac{0.179}{0.179 + 0.095} \times 4.853 = -3.170$$

$$\dot{I}_c = 0$$

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{c0} + a^2 \dot{I}_{c1} + a \dot{I}_{c2} = 4.755 - j5.66 = 7.392 \angle 229.97^\circ$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{c0} + a \dot{I}_{c1} + a^2 \dot{I}_{c2} = -4.755 + j5.66 = 7.392 \angle 130.03^\circ$$

$$\dot{U}_{c0} = \dot{U}_{c1} = \dot{U}_{c2} = j \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \dot{I}_{c1}$$

$$\dot{U}_c = j3 \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \dot{I}_{c1} = j3 \times \frac{0.179 \times 0.095}{0.179 + 0.095} \times 4.853 = j0.904$$

$$\dot{U}_a = \dot{U}_b = 0$$



**8.6** 简单电力系统如图 8-23 所示,各元件参数的标么值为  $E_G = j1.1$ ,  $X_{G1} = j0.25$ ,  $X_{G2} = j0.3$ ;  $X_T = j0.2$ ,  $X_L = j0.4$ 。当  $f$  点发生  $b$  相接地短路时试计算

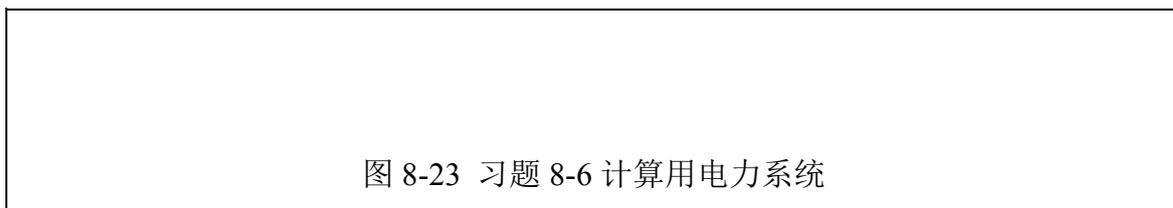
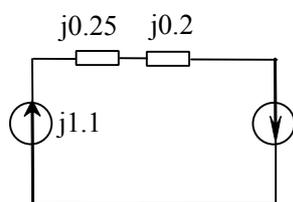


图 8-23 习题 8-6 计算用电力系统

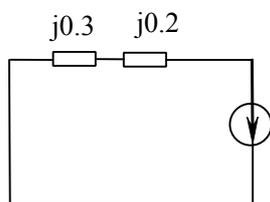
1. 短路点的故障相电流
2. 变压器中性点电压  $\dot{U}_0$

### 3. 发电机侧的各相电流标么值

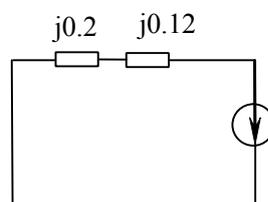
8-6 解:



正序图



负序图



零序图

b 相接地短路

$$\dot{I}_{b1} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})} = \frac{j1.1}{j(0.45 + 0.5 + 1.4)} = 0.468$$

$$\dot{I}_{b2} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{b1} \quad \dot{I}_a = \dot{I}_c = 0$$

$$\dot{I}_b = 3\dot{I}_{b1} = 1.404$$

$$\text{变压器中性点电压 } \dot{U}_0 = j3x_L \dot{I}_{b0} = j1.685$$

发电机侧各相电流

$$\dot{I}'_{b1} = \dot{I}_{b1} \angle 30^\circ \quad \dot{I}'_{b2} = \dot{I}_{b2} \angle -30^\circ \quad \dot{I}'_{b0} = 0$$

$$\dot{I}'_b = \dot{I}'_{b1} + \dot{I}'_{b2} = 0.811$$

$$\dot{I}'_a = a\dot{I}'_{b1} + a^2\dot{I}'_{b2} = -0.811$$

$$\dot{I}'_c = a^2\dot{I}'_{b1} + a\dot{I}'_{b2} = 0$$

**8.7** 在图 8-24 所示电力系统中,  $f$  点  $a$ 、 $c$  相发生接地短路故障, 以  $S_B=100\text{MVA}$ ,  $U_B=U_{av}$  为基准值计算的各元件参数标么值为

$$\text{发电机: } \dot{E}_G = j1.22, X'_d = j0.66, X_{G2} = j0.27$$

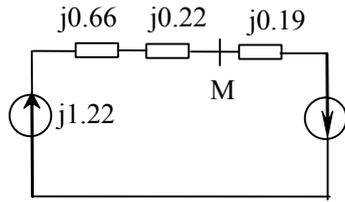
$$\text{变压器: } X_T = j0.22, \text{变比 } k = \frac{10.5}{121}$$

$$\text{线路: } X_{l1} = j0.19, X_0 = j3X_{l1}$$

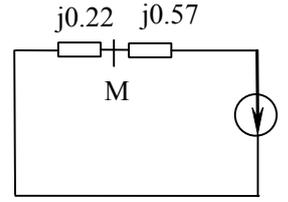
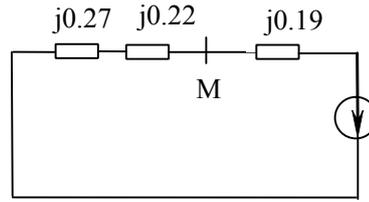
图 8-24 习题 8-7 和 8-8 计算用电力系统

试计算故障点的电流和  $M$  点各相电压有名值。

解：（1）制定各序网络。



正序图



负序图

零序图

$$x_{1\Sigma} = j1.07 \quad x_{2\Sigma} = j0.68 \quad x_{0\Sigma} = j0.79$$

（2）计算短路点正序、负序、零序电流

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \dot{E}_{1\Sigma} / j \left( X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma}(X_{0\Sigma} + 3X_f)}{X_{2\Sigma} + (X_{0\Sigma} + 3X_f)} \right) \\ &= j1.22 / \left[ j \left[ j1.07 + \frac{j0.68 * j0.79}{j(0.68 + 0.79)} \right] \right] = \frac{1.22}{j1.435} = -j0.85 \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{a2} = -\frac{X_{0\Sigma} + 3X_f}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} + 3X_f} \dot{I}_{a1} = -\frac{j0.79}{j0.68 + j0.79} * (-j0.85) = j0.457$$

$$\dot{I}_{a0} = -\frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} + 3X_f} \dot{I}_{a1} = -\frac{j0.68}{j0.68 + j0.79} * (-j0.85) = j0.393$$

3) 计算故障相电流  $j$  及故障相电压

$$\dot{I}_b = a^2 \dot{I}_{a1} + a \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = a^2 (-j0.85) + a(j0.457) + j0.393 = -1.136 + j0.59 = 1.28 \angle 152.56^\circ$$

$$\dot{I}_c = a \dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = a(-j0.85) + a^2(j0.457) + j0.393 = 1.136 + j0.59 = 1.28 \angle 27.44^\circ$$

$$\text{所以故障相电流的数值为 } I_f^{(1,1)} = I_b = I_c = 1.28 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 230} = 0.32 \text{ (kA)}$$

$$\dot{U}_{a1} = \dot{U}_{a2} = \dot{U}_{a0} = j \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \dot{I}_{a1} = j \frac{j0.68 \times j0.79}{j0.68 + j0.79} = -0.365$$

$$(4) \dot{U}_{m1} = \dot{U}_{a1} + j\dot{I}_{a1}X_{l1} = -0.365 + j(-j0.85)(j0.19) = -0.365 + j0.16$$

$$\dot{U}_{m2} = \dot{U}_{a2} + j\dot{I}_{a2}X_{l2} = -0.365 + j(j0.457)(j0.19) = -0.365 + j0.087$$

$$\dot{U}_{m0} = \dot{U}_{a0} + j\dot{I}_{a0}X_{l0} = -0.365 + j(j0.393)(j0.57) = -0.365 + j0.224$$

m 点各相电压

$$\dot{U}_{ma} = \dot{U}_{m0} + \dot{U}_{m1} + \dot{U}_{m2} = -1.095 + j0.471 = 1.254 \angle 150.83^\circ$$

$$\dot{U}_{mb} = \dot{U}_{m0} + a^2\dot{U}_{m1} + a\dot{U}_{m2} = 0.06 + j0.1 = 0.117 \angle 59.15^\circ$$

$$\dot{U}_{mc} = \dot{U}_{m0} + a\dot{U}_{m1} + a^2\dot{U}_{m2} = -0.06 + j0.1 = 0.117 \angle 120.85^\circ$$

有名值  $U_{ma} = 1.254 \times 121 / \sqrt{3} = 87.60 (kV)$

$$U_{mb} = 0.117 \times 121 / \sqrt{3} = 8.17 (kV)$$

$$U_{mc} = 0.117 \times 121 / \sqrt{3} = 8.17 (kV)$$

**8.8** 已知条件同习题 8.7, 试计算 f 点 a 相经  $X_f = j30\Omega$  发生接地短路时的故障点的各相电流和电压有名值。

解

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} + 3X_f)} = j1.22 / j(j1.07 + j0.68 + j0.79 + j90) = j0.013$$

$$\dot{U}_{a1} = j(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} + 3X_f)\dot{I}_{a1} = j(j0.68 + j0.79 + j90)j0.013 = -j1.19$$

$$\dot{U}_{a2} = -jX_{2\Sigma}\dot{I}_{a1} = -j \times j0.68 \times j0.013 = j0.009$$

$$\dot{U}_{a0} = -jX_{0\Sigma}\dot{I}_{a1} = -j \times j0.79 \times j0.013 = j0.01$$

短路点各相电流为

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 3\dot{I}_{a1} = j0.039$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{a0} + a^2\dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2} = 0 \quad \dot{I}_c = 0$$

有名值  $I_a = 0.039 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 121} = 0.02 (kA)$

$$\dot{U}_a = j3\dot{I}_{a1}X_f = j3 \times j0.013 \times j30 = -j1.17$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_b &= \mathcal{A}(a^2 - a)X_{2\Sigma} + (a^2 - 1)X_{0\Sigma} + a^2 3X_f] \dot{I}_{a1} \\ &= \mathcal{A}[-j\sqrt{3} \times j0.68 + (-1.5 - j0.866)j0.79 + (-0.5 - j0.866) \times j90]j0.013 \\ &= -1.04 + j0.6 = 1.2 \angle 30^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_c &= \mathcal{A}(a - a^2)X_{2\Sigma} + (a - 1)X_{0\Sigma} + 0.3X_f] \dot{I}_{a1} \\ &= \mathcal{A}[j\sqrt{3} \times j0.68 + (-1.5 + j0.866)j0.79 + j9]j0.013 = 0.024 - j0.1 \\ &= 0.1 \angle 76.11^\circ\end{aligned}$$

有名值

$$U_a = 1.17 \times 121 / \sqrt{3} = 81.74 (\text{kV})$$

$$U_b = 1.2 \times 121 / \sqrt{3} = 83.83 (\text{kV})$$

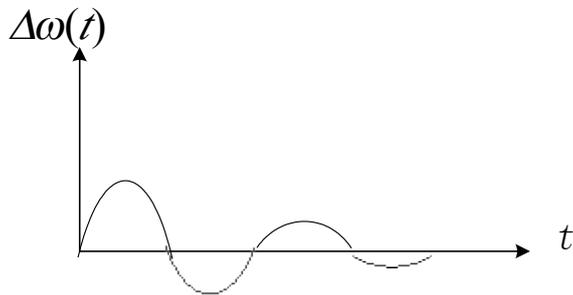
$$U_c = 0.1 \times 121 / \sqrt{3} = 7 (\text{kV})$$

## 《电气工程基础》题解 (第9章)

9-1 试比较电力系统功角静态稳定与暂态稳定的特点。

答: 在小干扰作用下, 系统运行状态将有小变化而偏离原来的运行状态, 即平衡点, 如干扰不消失, 系统能在偏离原来平衡点很小处建立新的平衡点, 或当干扰消失后, 系统能回到原有的平衡点, 则电力系统是静态稳定的。反之, 若受干扰后系统运行状态对原平衡状态的偏离不断扩大, 不能恢复平衡, 则称电力系统是静态不稳定的。对于简单电力系统且发电机无励磁调节的情况, 系统的功角静态稳定条件可以用  $\frac{dp}{d\delta}$  的符号来判定。电力系统的暂态稳定是指电力系统在正常工作情况下, 受到一个较大的扰动后, 能从原来的运行状态过渡到新的运行状态, 并能新的运行状态下稳定地工作。而保持暂态稳定的条件就是转子在加速过程中所积累的动能在减速过程中能为系统所吸收。

9-2 试按照图 9-7 所示的  $\delta = f(t)$  曲线画出相对速度随时间变化的曲线  $\Delta\omega(t)$ 。



9-3 简单电力系统如图 9-18 所示, 各元件参数如下。

发电机 G:  $P_N=250\text{MW}$ ,  $\cos\varphi_N=0.85$ ,  $U_N=10.5\text{kV}$ ,  $x_d=x'_d=1.7$ ,  $x_d=0.25$ ,  $T_f=8\text{s}$ ;  
变压器  $T_1$ :  $S_N=300\text{MVA}$ ,  $V_S=15\%$ ,  $K_T=10.5/242$ ; 变压器  $T_2$ :  $S_N=300\text{MVA}$ ,  $V_S=15\%$ ,  
 $K_T=220/121$ ; 线路  $l$ :  $l=250\text{km}$ ,  $U_N=220\text{kV}$ ,  $x_l=0.42\ \Omega/\text{km}$ 。运行初始状态:  $U_0=115\text{kV}$ ,  
 $P_0=220\text{MW}$ ,  $\cos\varphi_0=0.98$ 。发电机无励磁调节,  $E_q=E_{q0}=\text{常数}$ , 试求功率特性  $P_{Eq}(\delta)$ ,  
功率极限  $P_{Eqm}$ 。

解: (1)各段的基准电压计算

取  $S_n = 250\text{MVA}$ ,  $U_{n(3)} = 115\text{kV}$ , 则各段的基准电压

$$U_{n(2)} = U_{n(3)} k_{T2} = 115 \times \frac{220}{121} \text{kV} = 209.1 \text{kV}$$

$$U_{n(1)} = U_{n(2)} k_{T1} = 209.1 \times \frac{10.5}{242} \text{kV} = 9.07 \text{kV}$$

(2)各元件的参数的标么值

$$S_{GN} = \frac{P_N}{\cos\varphi} = \frac{250}{0.85} \text{MVA} = 294 \text{MVA}$$

$$X_d = X_q = X_d \frac{S_n}{U_{n(1)}^2} = 1.7 \times \frac{250}{9.07^2} = 5.166$$

$$X'_d = X'_d \frac{S_n}{S_{Gn}} \frac{U_{GN}^2}{U_{n(1)}^2} = 0.25 \times \frac{250}{9.07^2} = 0.760$$

$$X_{T1} = \frac{U_k \%}{100} \frac{S_n}{S_{Tn}} \frac{U_{TN}^2}{U_{n(2)}^2} = \frac{15}{100} \times \frac{250}{300} \times \frac{242^2}{209.1^2} = 0.167$$

$$X_l = x_{l1} \frac{S_n}{U_{n(2)}^2} = 0.42 \times 250 \times \frac{250}{209.1^2} = 0.60$$

$$X_{T2} = \frac{U_k \%}{100} \frac{S_n}{S_{Tn}} \frac{U_{TN}^2}{U_{n(3)}^2} = \frac{15}{100} \times \frac{250}{300} \times \frac{220^2}{209.1^2} = 0.138$$

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_c = 5.166 + 0.605 = 5.771$$

$$X_{q\Sigma} = X_q + X_c = 5.166 + 0.605 = 5.771$$

$$X'_{d\Sigma} = X'_d + X_c = 0.760 + 0.605 = 1.365$$

(3) 运行参数计算

$$U_0 = \frac{115}{U_{n(3)}} = \frac{115}{115} = 1.0 \quad \varphi_0 = \arccos 0.98 = 11.48^\circ$$

$$P_0 = \frac{220}{250} = 0.88 \quad Q_0 = P_0 \tan \varphi_0 = 0.88 \times \tan 11.48^\circ = 0.179$$

$$E_{q0} = E_{\varphi 0} = \sqrt{\left[ U_0 + \frac{Q_0 X_{q\Sigma}}{U_0} \right]^2 + \left[ \frac{P_0 X_{q\Sigma}}{U_0} \right]^2}$$
$$= \sqrt{(1 + 0.179 \times 5.771)^2 + (0.88 \times 5.771)^2} = 5.470$$

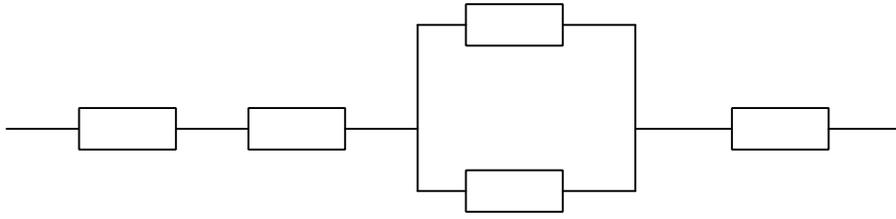
$$P_{Eq} = \frac{E_{q0} U_0}{X_{d\Sigma}} \sin \delta = 0.948 \sin \delta$$

$$P_{Eqm} = 0.948$$

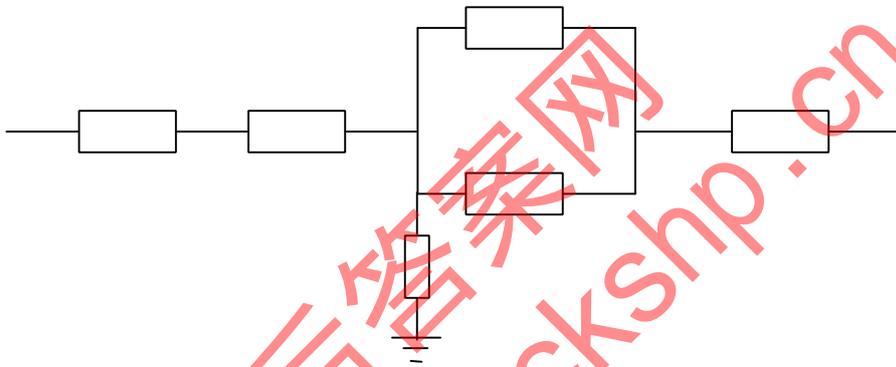
9-4 系统接线如图 9-18 所示。 $t=0$  时在一回线路的 K 点发生突然单相短路, 经过 0.2" 切除线路, 试作:

- (1) 正常、故障及故障切除后的等值电路图
- (2) 三种情况下功角特性曲线 (定性画出)
- (3) 利用面积定则在功角特性图上表示系统有暂态稳定

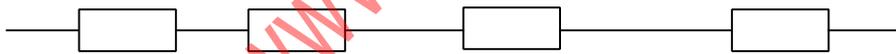
解: (1) 正常情况等值电路图



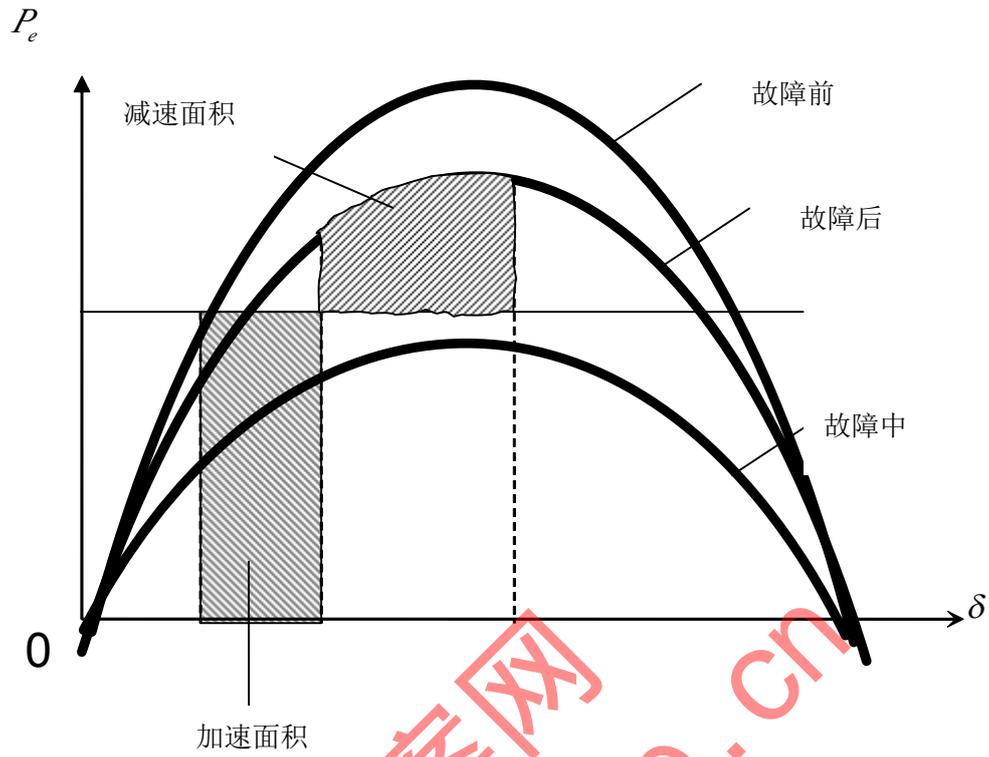
故障时等值电路图



故障后等值电路图



(2)



(3) 如上图所示，经过  $t=0.2s$  后切除故障，加速面积=减速面积时，系统具有暂态稳定。