

目录

| | |
|---------------------------|----|
| 一、 电力系统的基本概念 | 3 |
| 1. 电力系统的组成 | 3 |
| 2. 电力系统的额定电压和额定频率 | 5 |
| 3. 对电力系统运行的基本要求 | 7 |
| 4. 电力系统的接线方式 | 7 |
| 5. 电力系统的重要变量-功率 | 8 |
| 二、 电力网络元件的等值电路和参数计算 | 9 |
| 1. 架空输电线路的等值电路和参数 | 9 |
| 2. 变压器的等值电路 | 10 |
| 3. 负荷的等值电路和参数 | 12 |
| 4. 发电机的等值电路与参数 | 13 |
| 5. 标么值 | 14 |
| 三、 电力传输的基本概念 | 16 |
| 1. 网络元件的电压降落 | 16 |
| 2. 网络元件的功率损耗 | 17 |
| 四、 开式电力系统的潮流计算 | 18 |
| 1. 潮流计算的概念 | 18 |
| 2. 开式电力系统的潮流计算 | 18 |
| 五、 闭式电力系统的潮流计算 | 19 |
| 1. 闭式网络的基本概念 | 19 |
| 2. 两端供电网的基本功率分布 | 20 |
| 3. 环网的基本功率分布 | 21 |
| 六、 复杂电力系统潮流计算的数学模型 | 21 |
| 1. 电力网络的节点导纳矩阵 | 21 |
| 2. 电力系统潮流方程的建立 | 22 |
| 3. 潮流方程的定解及约束条件 | 22 |
| 4. 牛顿-拉夫逊法 | 23 |
| 5. 牛顿-拉夫逊法解潮流 | 24 |
| 6. PQ 分解法求解系统潮流 | 26 |
| 七、 电力系统的有功功率平衡和频率调整 | 27 |
| 1. 电力系统频率偏移的基本概念 | 27 |
| 2. 频率水平取决于什么? | 28 |
| 3. 现代大电力系统的频率如何控制? | 29 |
| 八、 电力系统的无功功率平衡和电压调整 | 30 |
| 1. 电力系统电压偏移的基本概念 | 30 |
| 2. 电压水平取决于什么 | 31 |
| 3. 电力系统中的无功电源 | 32 |
| 4. 现代大电网的电压如何控制 | 34 |
| 5. 调压方式概述 | 34 |
| 九、 电力系统短路分析绪论 | 36 |
| 1. 电力系统稳态和暂态的区别 | 36 |
| 2. 电力系统短路的后果及类型 | 36 |
| 3. 无穷大容量电源经阻抗短路的分析 | 37 |

| | |
|---------------------------|----|
| 4. 常用的短路电流计算指标 | 39 |
| 十、 电力系统三相短路的计算方法 | 40 |
| 1. 无限大容量电源三相短路的计算 | 40 |
| 2. 转移阻抗的概念及计算 | 40 |
| 3. 有限大容量电源三相短路的计算 | 41 |
| 十一、 电力系统的对称分量法 | 42 |
| 1. 不对称故障后电力系统的特点 | 42 |
| 2. 对称分量的定义与性质 | 43 |
| 3. 序分量对对称三相电力系统的性质 | 44 |
| 4. 电力系统各元件的序阻抗和序等值 | 44 |
| 十二、 电力系统各序网络的制定 | 46 |
| 1. 正序网络的制定 | 46 |
| 2. 负序网络的制定 | 47 |
| 3. 零序网络的制定（重点） | 47 |
| 十三、 电力系统不对称故障的计算 | 47 |
| 1. 不对称故障计算的基本思路 | 47 |
| 2. 不对称故障的边界条件 | 48 |
| 3. 单相接地故障的计算 | 50 |
| 4. 两相短路故障的计算 | 51 |
| 5. 两相短路接地故障的计算 | 52 |
| 6. 正序等效定则（对上述公式的总结） | 53 |
| 7. 不同类型短路时的电压分布 | 53 |
| 8. 非故障处的电压和电流的计算 | 54 |
| 十四、 电力系统稳定的基本概念 | 55 |
| 1. 稳定性的基本涵义 | 55 |
| 2. 电力系统稳定性的概念 | 56 |
| 3. 简单电力系统稳定性的详解 | 57 |
| 4. 电力系统稳定性的分析方法 | 59 |

电力系统分析

作者：22 级电气 1 班朱胜澳

(所有内容都来自电力系统分析课程张弦老师 PPT，作者只进行了摘抄操作)

稳态：电力系统正常的、相对静止的运行状态

暂态：电力系统从一种运行状态向另一种运行状态过渡的过程

电力系统分析的课程体系

◆ 电力系统的三大计算：

➤ 电力系统稳态分析：

电力系统的参数及等效电路；潮流计算；有功功率平衡；无功功率平衡。

➤ 潮流计算

➤ 电力系统电磁暂态分析：

电力系统对称短路故障分析、不对称短路故障分析。

➤ 短路计算

➤ 电力系统机电暂态分析：

电力系统的静态稳定性、暂态稳定性。

➤ 稳定计算

一、电力系统的基本概念

1. 电力系统的组成

(1) 为什么电能在众多能量形式中得到偏爱？

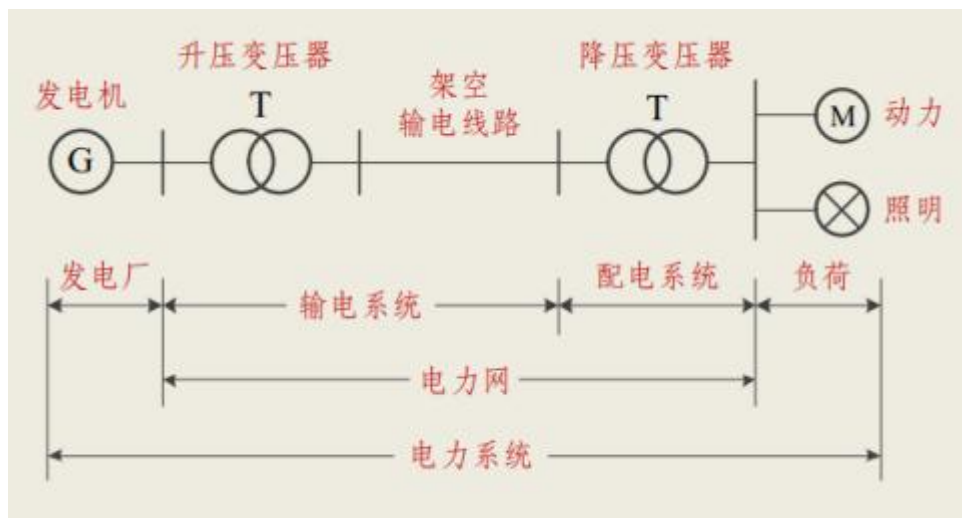
- ① 从用户看：方便转化为其他形式的能量
- ② 运输通道：输送和分配都较为容易
- ③ 规模大小：应用规模灵活，广泛应用于各行各业
- ④ 节能环保：能耗小，不同形式能量之间转换效率高，且保护环境

(2) 什么是电力系统？

将生产、输送、分配和消费电能的各种电气设备连接在一起而组成的整体

(3) 电力系统由什么组成？

发电机、变压器、线路、负荷等 4 类设备组成的有机整体



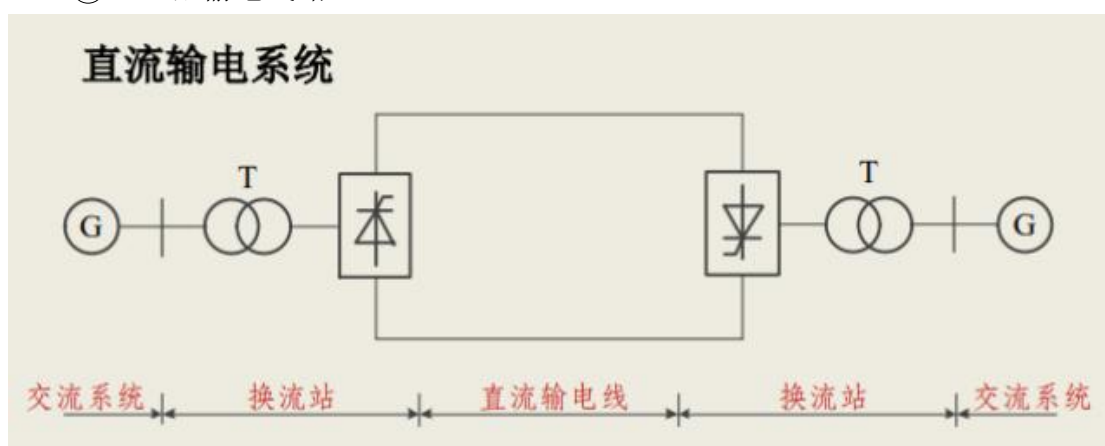
注：电（力）网：输送和分配电能的部分，包括变压器和线路
 输电网：包括升压变压器和输电线路，实现大范围内的电能传输
 配电网：包括降压变压器和配电线路，实现小范围内的电能分配
 送端：送出电能的一侧
 受端：接受电能的一侧

（4）有哪几种发电厂？怎么实现能量变换？

- ① 水电：水能-机械能-电能
- ② 火电：化学能-热能-机械能-电能
- ③ 核电：核能-热能-机械能-电能
- ④ 光伏发电：光能-电能
- ⑤ 光热发电：光能-热能-机械能-电能
- ⑥ 风力发电：风能-机械能-电能
- ⑦ 生物质发电：生物能-电能
- ⑧ 潮汐发电：潮汐能-电能

（5）直流输电系统的组成部分及功能？

- ① 换流变压器
- ② 换流阀（整流阀和逆变阀）
- ③ 直流输电线路



(6) 直流输电的优点有什么？

- ① 单位功率造价低
- ② 输送灵活，效率高，损耗小
- ③ 不需要串并联补偿
- ④ 不存在稳定性问题（没有无功功率）
- ⑤ 可以用来连接两个不同频率的系统，而且可以限制短路电流

(7) 现代电力系统有什么特点？

- ① 大机组、大电网、超/特高电压、交直流联合输电
- ② 电源成分多样
- ③ 负荷形式多样
- ④ 高度自动化、数字化、网络化、智能化

(8) 电力系统有哪些基本参量？其含义是什么？

- ① 总装机容量：额定有功功率之和
- ② 年发（用）电量：发电机组全年发出（消耗）的电能之和
- ③ 最大负荷：规定时间内负荷总有功功率的最大值
- ④ 额定频率：我国 50Hz，美国 60Hz

2. 电力系统的额定电压和额定频率

(1) 额定频率和额定电压是什么？

- ① 额定频率：我国规定的工业用电的标准频率为 50Hz
- ② 额定电压：国家标准规定的标准电压

电力系统的额定电压（电压等级）分为以下：

1kV 以下的电压等级：220V、380V

1kV 以上的电压等级：3kV、6kV、10kV、35kV、66kV、110kV、220kV、330kV、500kV、750kV、1000kV

(2) 输电网和配电网的电压等级以什么为分界？

220kV，220kV 以上为输电网，220kV 以下为配电网

(3) 为什么远距离大容量输电系统要采用高压？

功率一定时，电压越高，电流越小，损耗大小与电流的平方成正比，故损耗越小（但电压越高，对绝缘的要求就越高，投资就越大。）

(4) 电力系统中为什么需要大量的变压器？

- ① 输电需要高电压等级
- ② 配电和用电需要合适的电压等级

(5) 输送距离和容量与电压等级的关系如何？

额定电压越高，输送功率越大，输送距离越远。对于一定的输送功率和输电距离，有一最合理的输电电压

(6) 为什么同一电压等级电气设备的额定电压存在电压配合问题？

因为沿功率输送方向存在电压降落

(7) 确定设备额定电压的原则是什么？

- ① 满足受电设备接入点的电压要求（允许电压偏移为 $\pm 5\%$ ）
- ② 线路存在沿功率传输方向的电压降，设计能够保证线路上最多损失额定电压的 10%

(8) 电力系统的任务是什么？

提供给用户可靠、高质量的电能

(9) 需要确定什么设备的额定电压？

- ① 发电机
- ② 升压变压器 T1、降压变压器 T2
- ③ 负荷

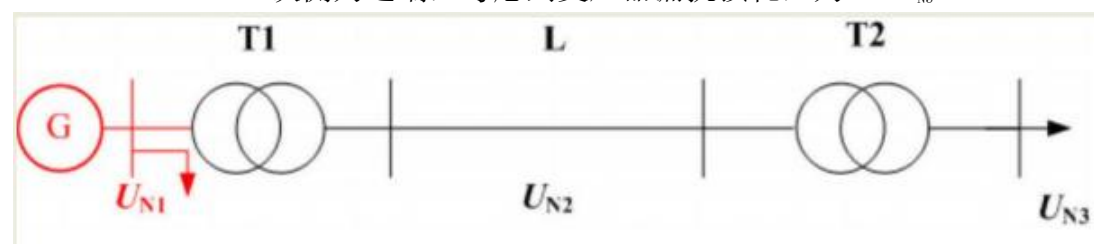
(10) 如何确定设备的额定电压？

前提：已知各部分电网等级 U_{N1} 、 U_{N2} 、 U_{N3}

发电机端： $U_{GN}=1.05U_{N1}$

升压变压器端：一次侧为受端，额定电压和发电机额定电压相同，为 $1.05U_{N1}$
二次侧为送端，负载时有电压损耗，故二次侧额定电压为 $1.1U_{N2}$

降压变压器端：一次侧为受端，额定电压与线路相同，为 U_{N2}
二次侧为送端，考虑到变压器漏抗损耗，为 $1.1U_{N3}$



发电机： $1.05U_{N1}$

变压器 T1: $1.05U_{N1}/1.1U_{N2}$

变压器 T2: $U_{N2}/1.1U_{N3}$

负荷： U_{N3}

(11) 变压器的分接头（为了满足电力系统的调压要求）一般都

设置在变压器哪一侧？为什么？

双绕组变压器：分接头设在高压侧

三绕组变压器：分接头分别设在高压侧和中压侧

原因：

- ① 高压侧电流小

- ② 抽头容易控制，精确控制
 - ③ 有些变压器的低压绕组装在内侧，从低压侧引出分接头比较困难
- 变压器实际运行变比举例：

例：一台220/10kV升压型变压器，运行在+5%分接头

则： $k_N=242\text{ kV}/10.5\text{ kV}$ ； $k=254\text{ kV}/10.5\text{ kV}$

一台220/10kV降压型变压器，运行在+5%分接头

则： $k_N=220\text{ kV}/11\text{ kV}$ ； $k=231\text{ kV}/11\text{ kV}$

3. 对电力系统运行的基本要求

(1) 电力系统运行有什么特点？

- ① 同时性：电能一般不能大量储存，电能的生产、输送、分配和消费实际上同时完成
- ② 瞬时性：电力系统的暂态过程十分短暂，电磁波在空气中的传播速度为光速，电气设备操作时间短暂
- ③ 密切性：与国民经济、人民生活、社会稳定关系极其密切，供电的突然中断带来的后果十分严重

(2) 对电力系统运行有什么基本要求？

- ① 保证安全可靠的供电（三级负荷：第一级负荷，双电源不允许断电；第二级负荷，双回线尽可能不断电；第三级负荷，单回线允许断电）
- ② 要有合乎要求的电能质量（电压偏移在允许范围内，频率偏移±0.2~0.7Hz，波形畸变率）
- ③ 要有良好的经济性（线（网）损率：电力网络中损耗的电能和向电力网络供应电能的百分比）
- ④ 尽可能减少对生态环境的有害影响

4. 电力系统的接线方式

(1) 如何表示电力设备间的电气连接关系？

电气接线图能详细描述电力系统各元件之间的电气联系

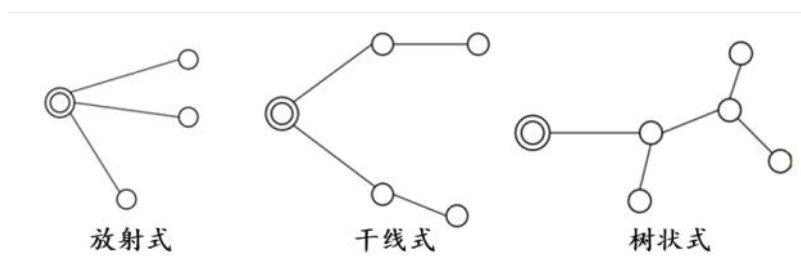
(2) 电力系统有哪些基本的接线形式？

由可靠性分为无备用接线（负荷只能从一个方向获取电能）和有备用接线（负荷至少能从两条线路获取电能）两种

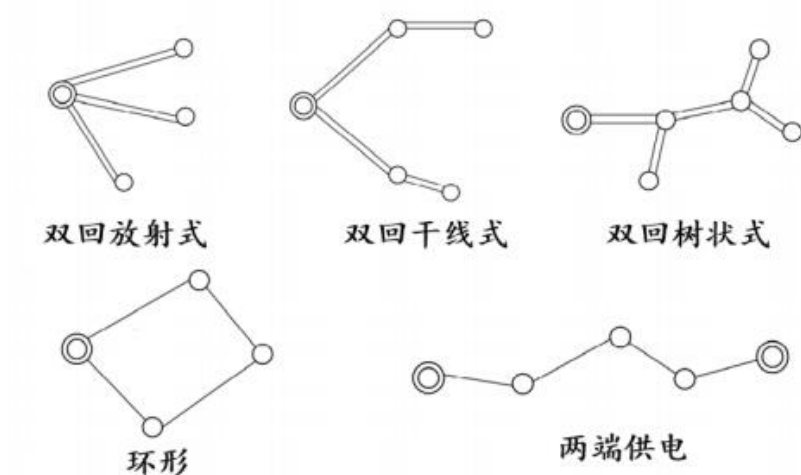
由供电路径是否唯一分为开式网络（每个负荷都只能从唯一路径取得电能）和闭式网络（每个负荷都能至少通过两条线路从不同方向取得电能）

| | | | |
|--|-------|--------|------|
| 1-开式网络都是无备用网络吗? 2-有备用网络都是闭式网络吗? A 是, 是 B 否, 是 C 否, 否 D 是, 是 | 无备用接线 | 单回路放射式 | 开式网络 |
| | | 单回路干线式 | |
| | | 单回路树状式 | |
| | 有备用接线 | 双回路放射式 | 闭式网络 |
| | | 双回路干线式 | |
| | | 双回路树状式 | |
| | | 环式 | |
| | | 两端供电网络 | |

无备用接线:



有备用接线:



(3) 无备用接线有哪些优缺点?

优点: 接线简单, 费用低, 运行方便

缺点: 可靠性差, 任何线路的故障都会导致部分负荷停电

(4) 有备用接线有哪些优缺点?

优点: 可靠性高, 电压好

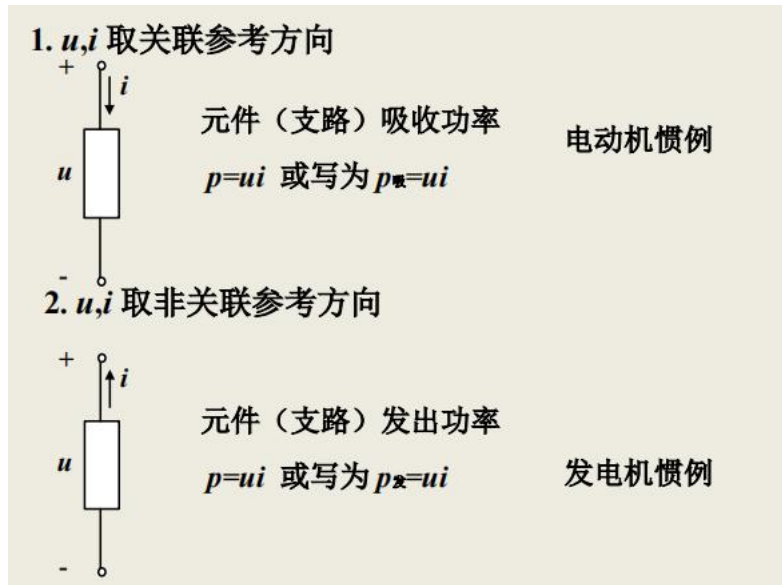
缺点: 双回线不够经济, 为避免电晕, 导线截面积也得选的大, 断路器多

5. 电力系统的重要变量-功率

(1) 电力系统为何用功率作为重要变量?

- ① 实际系统的电源、负荷常以功率形式给出。
- ② 有功功率和无功功率可以分别直接相加，他们的比例反映了功率因数
- ③ 本质上来说，电力系统是一个能量系统，采用基于能量的分析方法更能反映电力系统的本质

(2) 功率怎么计算？



(3) 有功功率和无功功率的定义是什么？有什么物理意义？

有功功率 P 定义为瞬时有功功率的均值

无功功率 Q 定义为顺势无功功率的峰值（建立交变磁场和感应磁通，并非真正的“无用”）

P 的物理意义：无源网络消耗功率的均值

Q 的物理意义：无源网络与外界交换功率能力的大小（均值为 0）

二、电力网络元件的等值电路和参数计算

为什么要进行元件建模？任务是什么？

准确、实用的元件模型是分析电力系统的基础

抽象出各种元件的电路模型后，形成系统的模型，再应用电路理论、数学工具进行系统分析

任务：形成发电机、变压器、线路、负荷的等效电路模型，并准确得到模型参数

1. 架空输电线路的等值电路和参数

(1) 线路具有哪些电磁现象？可以用哪些参数表征？

线路通入交流电流：（电流效应是串联的）

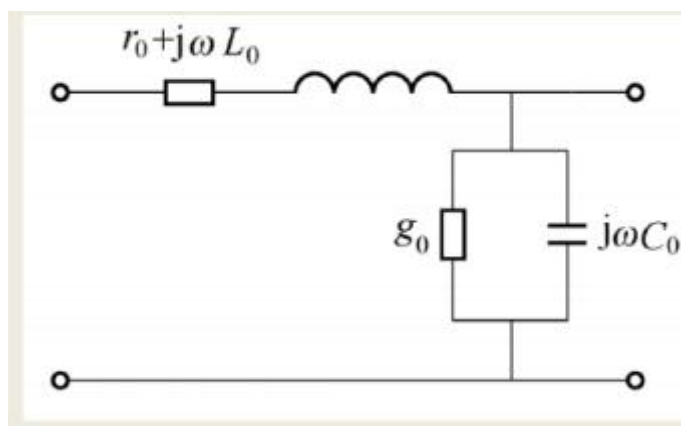
- ① 发热、消耗有功功率—— $\rightarrow R$
- ② 交流电流产生交变磁场，交变磁场感应出感应电势—— $\rightarrow L, M$

线路加交流电压：（电压效应是并联的）

① 绝缘漏电，一定电压下发电、放电（电晕）——>G

② 交变电压产生电容电流——>C

架空线路的等值电路模型：



以上参数中，在一般的电力系统计算中可以忽略电晕损耗，即 $g=0$ ，当架空线路长度不超过 100km、电压等级在 35kV 以下时，电容也可以忽略不计，即 $C=0$

（2）为什么要采用循环换位？

为了消除不平衡的电压和电流，避免对发电机的运行及无线电通信产生不良影响

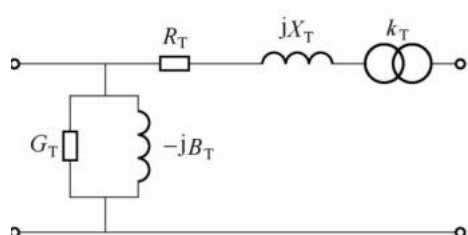
（3）为什么要采用分裂导线？

① 减小电晕效应（等值电导较小）

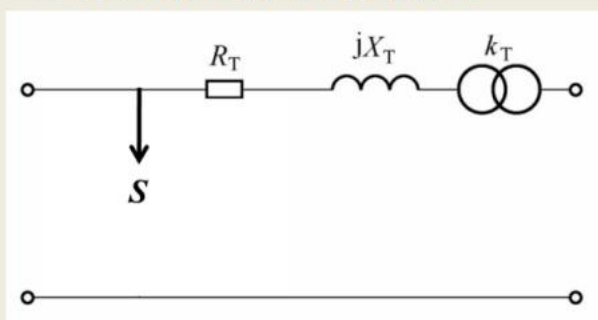
② 减小电抗

③ 减小无线电干扰

2. 变压器的等值电路



变压器的简化电路



（忽略励磁支路）

(1) 如何通过短路实验测得的数据（短路损耗 ΔP_S 和短路电压 $V_S\%$ （短路电压占额定电压的百分比））得到变压器参数？

$$R_T = \frac{\Delta P_S V_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \quad X_T = \frac{V_S \%}{100} \times \frac{V_N^2}{S_N} \times 10^3$$

（忽略了 GT, BT 支路）

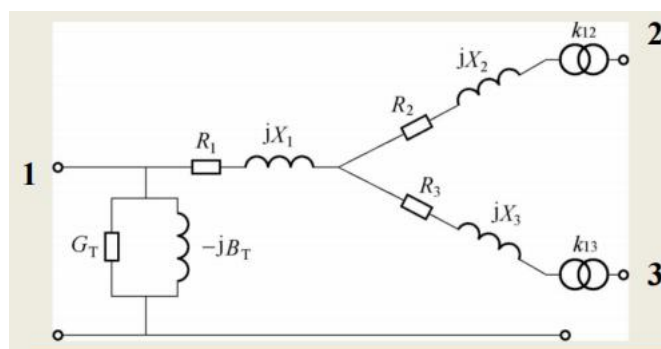
上述公式的 S_N 的单位为 kVA, V_N 的单位为 kV, 实际计算时注意单位

(2) 如何通过空载实验测得的数据（空载损耗 ΔP_0 和空载电流 $I_0\%$ （空载电流占额定电流的百分比））得到变压器参数？

$$G_T = \frac{\Delta P_0}{V_N^2} \times 10^{-3} \quad B_T = \frac{I_0 \%}{100} \times \frac{S_N}{V_N^2} \times 10^{-3}$$

上述公式的 S_N 的单位为 kVA, V_N 的单位为 kV, 实际计算时注意单位

(3) 三绕组变压器参数需要几次短路实验？几次空载实验？



需要 3 次短路实验，1 次空载实验

① 绕组电阻的计算

若三相容量相同，则直接使用以下公式计算每一相的短路损耗

$$\begin{cases} \Delta P_{S1} = (\Delta P_{S(1-2)} + \Delta P_{S(1-3)} - \Delta P_{S(2-3)})/2 \\ \Delta P_{S2} = (\Delta P_{S(1-2)} + \Delta P_{S(2-3)} - \Delta P_{S(1-3)})/2 \\ \Delta P_{S3} = (\Delta P_{S(1-3)} + \Delta P_{S(2-3)} - \Delta P_{S(1-2)})/2 \end{cases}$$

若三相容量不同，则使用以下公式修正测量的短路损耗后再代入上式

$$\Delta P_{S(a-b)} = \left(\frac{S_N}{\min \{S_{Na}, S_{Nb}\}} \right)^2 \Delta P'_{S(a-b)} \rightarrow \text{实测值}$$

放大系数

计算好每一相的容量后再代入（1）中的公式计算绕组电阻

② 绕组漏抗的计算

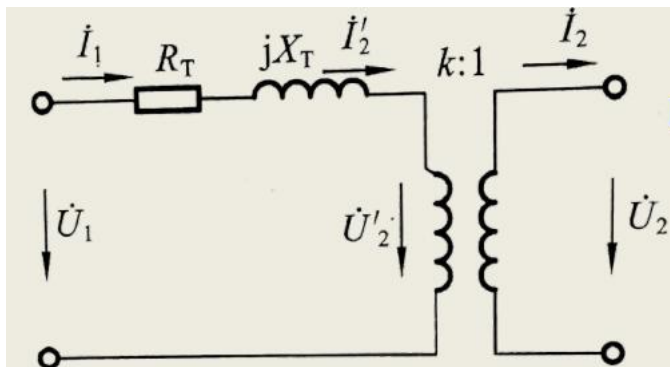
由下述公式计算每一相的短路电压，再代入（1）中的公式计算绕组漏抗（国家规定不需要折算）

折算吗？

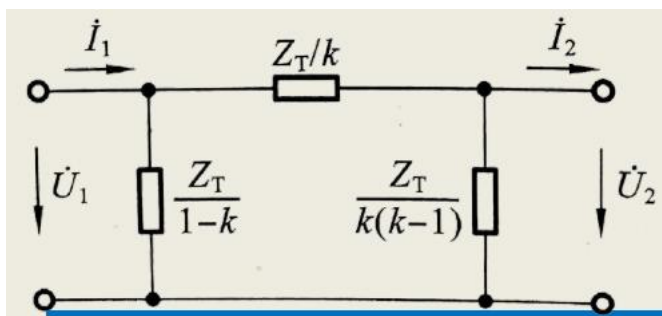
$$\begin{cases} V_{S1} \% = \frac{1}{2} (V_{S(1-2)} \% + V_{S(1-3)} \% - V_{S(2-3)} \%) \\ V_{S2} \% = \frac{1}{2} (V_{S(1-2)} \% + V_{S(2-3)} \% - V_{S(1-3)} \%) \\ V_{S3} \% = \frac{1}{2} (V_{S(1-3)} \% + V_{S(2-3)} \% - V_{S(1-2)} \%) \end{cases}$$

（4）变压器等效模型如何消除磁耦合，变成纯电路？

变压器等值模型（忽略励磁支路）：



变压器的Π等值模型：



上述模型完全是由公式化简等效出来的，没有物理含义
Π模型去掉了磁耦合，适用于计算机计算

3. 负荷的等值电路和参数

（1）如何理解负荷建模的难度？

① 复杂性：电力系统的负荷种类繁多，实际综合负荷由许许多多各不相同的用电设备集合而成

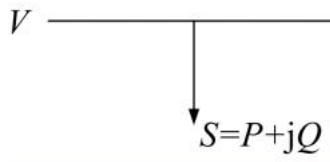
② 随机性：负荷组成以及负荷大小都是随着时间随机变化的

③ 不确定性：很多负荷具有不确定性，负荷随电压及频率变化而变化

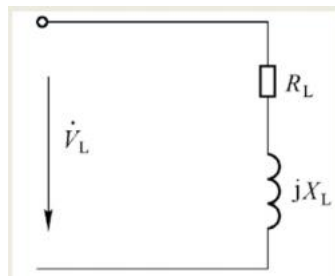
④ 不准确性：工程实际中对负荷的组成缺乏准确数据

稳态分析中常用两种等值：

恒功率等值 $S=P+jQ$



恒阻抗等值 $Z=RL+jX_L$



4. 发电机的等值电路与参数

(1) 同步发电机的定子、转子有哪些绕组？

励磁绕组（客观存在）：在 d 轴

阻尼绕组：对于水轮发电机，阻尼绕组是等效实际存在的阻尼条，一般在 d 轴和 q 轴分别设一个等值绕组，分别记作 D 绕组和 Q 绕组；对于汽轮发电机，是等效转子铁芯的涡流阻尼作用，q 轴还会等效出一个时间常数较大的 g 绕组

(2) 同步发电机的理想化假设？

① 线性：忽略磁路饱和效应，可以应用叠加定理进行分析

② 对称：定子三相绕组结构对称，它们的磁轴在空间位置上依次相差 120° 电角度；转子对自身的直轴和交轴结构对称

③ 正弦：发电机定子电流产生的磁动势以及转子绕组和定子绕组间的互感磁通在气隙中按正弦分布，假定通过适当安排绕组的分布和节距可以使气隙磁通的谐波分量完全消除

④ 光滑：定子和转子的槽和通风沟不影响定子和转子的电感系数

(3) 凸极发电机和隐极发电机定子绕组的自感和互感？转子绕

组的自感和互感？定子和转子之间的互感？

① 定子绕组的自感和互感：凸极电机均以 180° 为周期按正弦规律脉动变化，其脉动由转子凸极引起；隐极电机自感和互感都是常数

② 转子绕组的自感和互感：d 和 q 轴正交使得 d、q 轴上绕组之间的互感为 0，属于同一条轴上的绕组之间的互感为正值；自感均为恒定值

③ 定子和转子之间的互感：以 360° 为周期正弦变化（与凸隐极无关）

（4）Park 变换的公式？

$$i_d = \frac{2}{3}(i_a \cos \alpha + i_b \cos(\alpha - 120^\circ) + i_c \cos(\alpha + 120^\circ))$$

$$i_q = \frac{2}{3}(i_a \sin \alpha + i_b \sin(\alpha - 120^\circ) + i_c \sin(\alpha + 120^\circ))$$

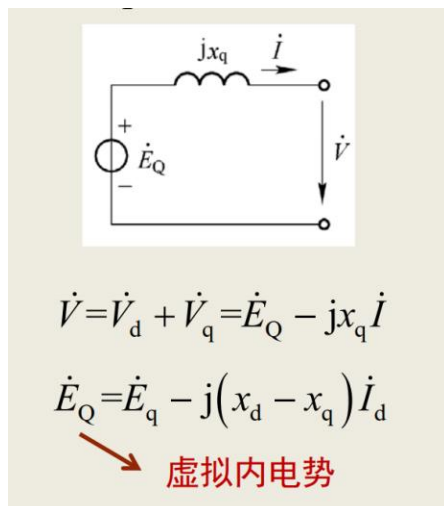
$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c)$$

直流经过 park 变换得到基频交流

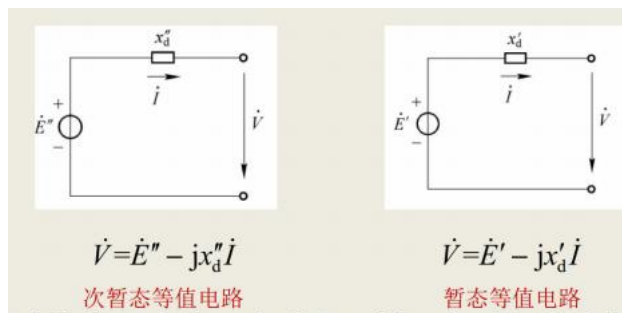
基频交流通过 park 变换得到直流

（5）同步发电机的等值电路？

稳态情况：（参考电机学）



暂态情况：



电路结构相同，但参数不同

5. 标么值

（1）标么值的定义及标么值的特点？

$$\text{标么值} = \frac{\text{有名值（有具体物理单位的量值）}}{\text{选定基值（与有名值有同一单位）}}$$

特点：无量纲；不唯一（随基值变化）

基值一般选定 S_B 和 U_B （电抗器没有 S_B ，选用 U_B 和 I_B ）

（2）不同基值的标么值之间的换算原则？

有名值不变原则

举例：

例：已知原基值为 S_{BI}, U_{BI} ，相应阻抗标么值 Z_{*I} ，
新基值为 S_{BII}, U_{BII} ，求：新阻抗标么值 Z_{*II}

$$Z_{*II} \frac{U_{BII}^2}{S_{BII}} = Z_{*I} \frac{U_{BI}^2}{S_{BI}}$$

（3）基值的选取原则？

全网统一选择一个基准功率 S_B ，各电压等级分别选择 U_B
 U_B 的选择使用平均标称电压法

| 电网额定值电压（kV） | 平均标称电压（kV） |
|-------------|----------------------|
| 1000 | $(1100+1000)/2=1050$ |
| 500 | $(550+500)/2=525$ |
| 220 | $(242+220)/2=230$ |
| 110 | $(121+110)/2=115$ |
| 10 | $(11+10)/2=10.5$ |

（4）标么值的实际应用？

变压器铭牌数据与标么值一一对应！

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{S*} = \Delta P_S / S_N \\ R_{T*} = \frac{\Delta P_S U_N^2 \times 10^3}{S_N^2} / \left(\frac{U_N^2}{S_N} \times 10^3 \right) = \frac{\Delta P_S}{S_N} = \Delta P_{S*} \\ U_{S*} = U_S / U_N = \frac{U_S \%}{100} \\ X_{T*} = \frac{U_S \% U_N^2 \times 10^3}{100 S_N} / \left(\frac{U_N^2}{S_N} \times 10^3 \right) = \frac{U_S \%}{100} = U_{S*} \end{array} \right.$$

有名值

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta P_{0*} &= \Delta P_0 / S_N \\ G_{T*} &= \frac{\Delta P_0}{U_N^2} \times 10^{-3} / \left(\frac{S_N}{U_N^2} \times 10^{-3} \right) = \frac{\Delta P_0}{S_N} = \Delta P_{0*} \\ I_{0*} &= I_0 / I_N = \frac{I_0 \%}{100} \\ B_{T*} &= \frac{I_0 \% S_N}{100 U_N^2} \times 10^{-3} / \left(\frac{S_N}{U_N^2} \times 10^{-3} \right) = \frac{I_0 \%}{100} = I_{0*} \end{aligned} \right.$$

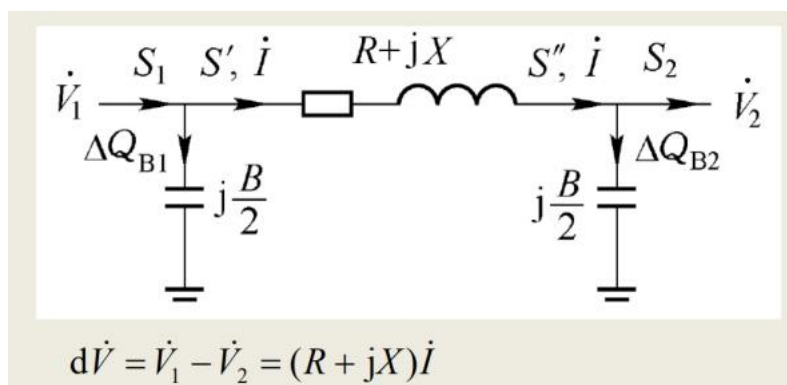
有名值

三、电力传输的基本概念

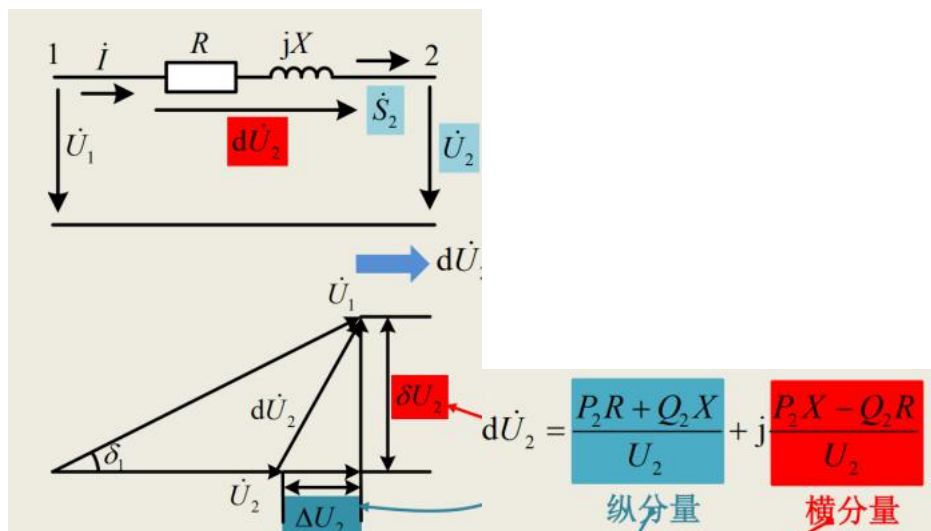
1. 网络元件的电压降落

(1) 什么是电压降落？已知某一端的电压和功率的情况下怎么推电压降落？

元件（电力线路、变压器）首末端电压的相量差



若已知末端电压和功率：（首端同理）



注意区分纵分量和横分量

对于 U_1 和 U_2 的幅值差，纵分量的影响更大

(2) 什么是电压损耗？什么是电压偏移？

电压损耗 $\Delta U = U_1 - U_2$

$\approx \Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2}$

首末端幅值差

电压偏移 $= \frac{U_1 - U_N}{U_N} \times 100\%$

电压与额定电压的偏移百分比

(3) 在高电压电网（35kV 及以上）情况下，电压偏移的公式可以做什么化简？

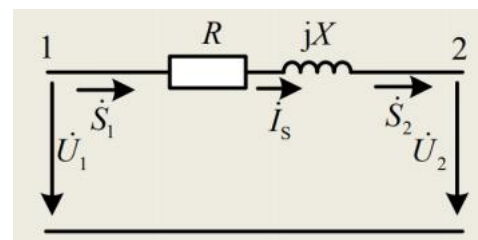
在高电压电网情况下， $X \gg R$

$\Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \approx \frac{Q_2 X}{U_2}$ $\delta U_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \approx \frac{P_2 X}{U_2}$

因此首末电压的大小差和无功功率有关

首末电压的相角差和有功功率有关

2. 网络元件的功率损耗



$$\Delta P_s = \frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} R$$
$$\Delta Q_s = \frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} X$$

公式：

(1) 串联支路的有功功率损耗同谁有关？

电阻

电压越高，有功功率损耗越小

与传输的有功功率和无功功率有关（故为了降低电压损耗和有功损耗对无功功率采用就地补偿措施）

输电效率: $\eta_L \% = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% < 1$

(P_2 为末端输出功率, P_1 为首端输入功率)

(2) 如果定义首末端的无功功率之比是无功传输效率, 那么该效率也小于 1 吗?

有可能出现大于 1 的情况, 系统电容发出的感性无功大于电感消耗的感性无功时无功传输效率就有可能大于 1

此时会发生容升效应

容升效应: 电压损耗为负, 末端电压更高

四、开式电力系统的潮流计算

1. 潮流计算的概念

(1) 什么是潮流计算?

潮流: 电力系统中各节点的电压和各支路的功率的稳态分布

潮流计算: 给定系统运行条件计算系统运行状态

系统运行条件: 发电机的功率、机端电压、负荷的功率、负荷侧要求的电压

系统运行状态: 系统中所有节点的电压相量、线路的电压降落、线路的功率分布、功率损耗等

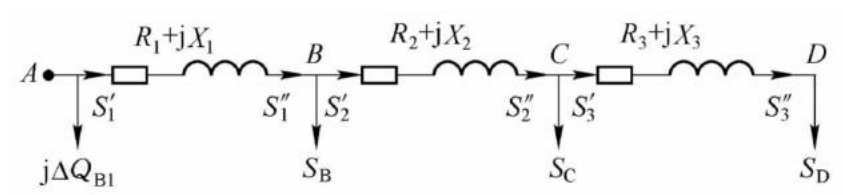
(2) 潮流计算的目的?

- ① 掌握系统运行状态, 为电力系统的运行和规划提供依据
- ② 评价电网的经济性和质量
- ③ 为短路计算和稳定性计算提供系统的初始稳态运行条件, 是电力系统中最基本的计算
- ④ 现代电力系统是一个极其复杂的大系统, 它的分析和计算离不开计算机, 但基本概念很重要。

(3) 潮流计算与电路计算的区别?

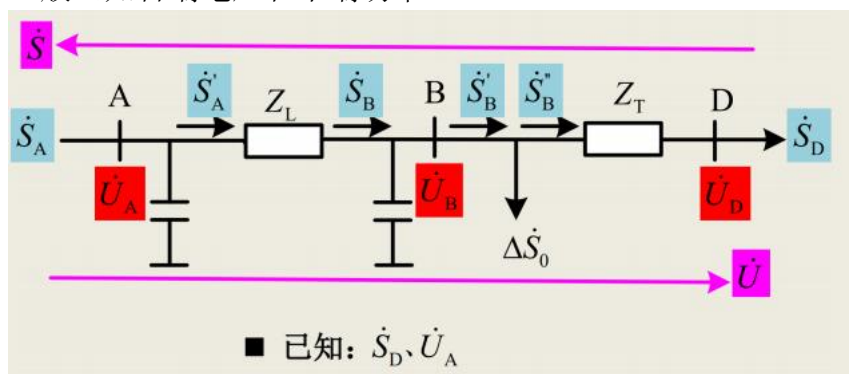
- ① 已知条件的变化: 由电流到复功率
- ② 模型物理基础的变化: 由欧姆定律到功率守恒定律
- ③ 计算模型的变化: 由线性方程组到非线性方程组

潮流计算的两个基础: 电压降落和功率损耗



2. 开式电力系统的潮流计算

一般已知首端电压和末端功率



(1) 为什么一般已知首端电压和末端功率？

- ① 首端发电机，发电机的电压是可以控制的，是靠励磁电流控制。
- ② 末端负荷，负荷电压一般不已知，但是负荷功率一般都知道。

(2) 潮流计算怎么进行？

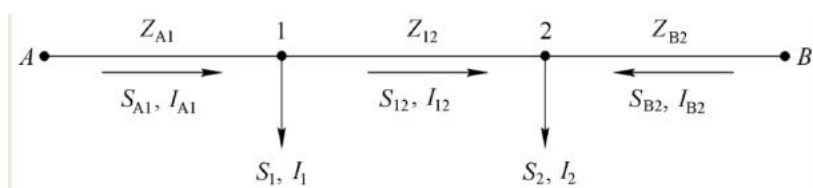
- ① 设全网为额定电压（依据是电压偏差 $\pm 5\%$ ，变化不大，用假设的电压来求功率损耗对功率的影响不大）
- ② 从距离电源（发电机）最远的节点起，逆着功率传输方向计算功率损耗并得到功率分布（不计电压降落），完成前代
- ③ 从电源点开始，顺功率传输方向，计算各段线路的电压降落和各节点电压（不算功率损耗），完成回代
- ④ 用新得到的电压反复迭代，直到满足精度要求，收敛

五、闭式电力系统的潮流计算

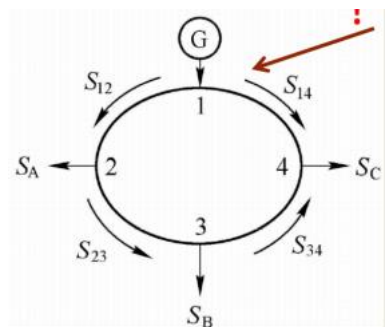
1. 闭式网络的基本概念

(1) 什么是闭式网络？

两端供电网络（一般的闭式网络）

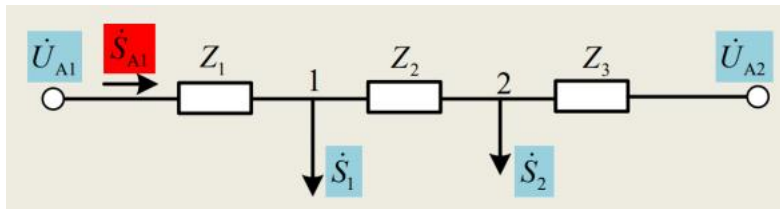


环形网络（两端供电网络的特殊情况）



2. 两端供电网的基本功率分布

基本思路：设置全网电压都是额定电压且相位一样，忽略电压损耗和功率损耗，然后计算基本功率分布（依据：功率的损耗和电压有关，因为系统电压偏差不大，所以对功率影响不大）



根据上述假设，可以得到以下公式（注意共轭）

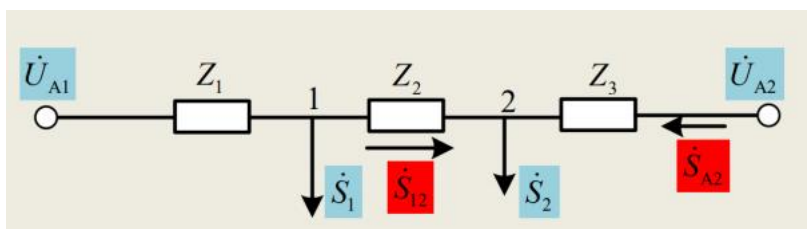
$$\dot{S}_{A1} = \frac{\dot{S}_1^* Z_{II}^* + \dot{S}_2^* Z_{\Sigma}^*}{Z_{\Sigma}^*} + \frac{U_N^* (U_{A1} - U_{A2})}{Z_{\Sigma}^*}$$

$$Z_{\Sigma}^* = Z_1^* + Z_2^* + Z_3^* \quad Z_{II}^* = Z_3^* \quad Z_I^* = Z_2^* + Z_3^*$$

第一部分称为基本功率分布（或称自然功率），该部分由负荷功率和网络参数决定（类似杠杆原理）

第二部分是循环功率，仅由电源点电压差和网络参数决定（若两端电压相同则为零）

同理：



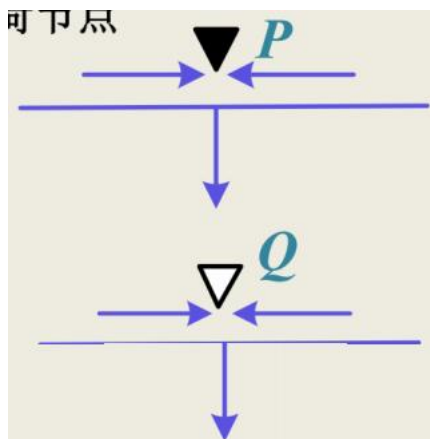
$$\dot{S}_{A2} = \frac{\dot{S}_1^* Z_I^* + \dot{S}_2^* Z_{II}^*}{Z_{\Sigma}^*} + \frac{U_N^* (U_{A2} - U_{A1})}{Z_{\Sigma}^*}$$

其中： $Z_I^* = Z_1^*$ $Z_{II}^* = Z_1^* + Z_2^*$ $\dot{S}_{12} = ?$

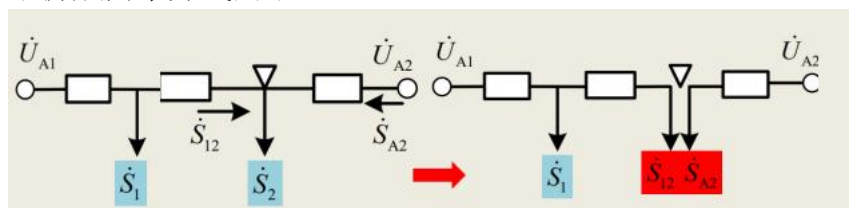
（1）什么是有功分点，什么是无功分点？

有功分点：有功功率从两侧供给的负荷节点

无功分点：无功功率从两侧供给的负荷节点



得到 S_{A1} 和 S_{A2} 后可以判断哪个节点无功分点，在无功分点的地方将两端供电网络拆成两个开式网络



$$S_{A2} = S_{A2}$$

$$S_{12} = S_2 - S_{A2}$$

拆开成两个开式网络后再进行两个开式网络的潮流计算

3. 环网的基本功率分布

从电源处切开分成特殊的两端供电的网络 ($U_{A1} = U_{A2}$)

然后再按上述两端供电网络计算即可

六、复杂电力系统潮流计算的数学模型

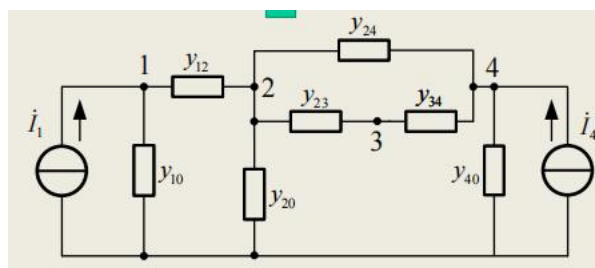
1. 电力网络的节点导纳矩阵

(1) 电力网络受什么条件约束？

元件特性约束：反映元件特性

联结关系约束：反映网络本身联结

(2) 节点导纳矩阵怎样列写？

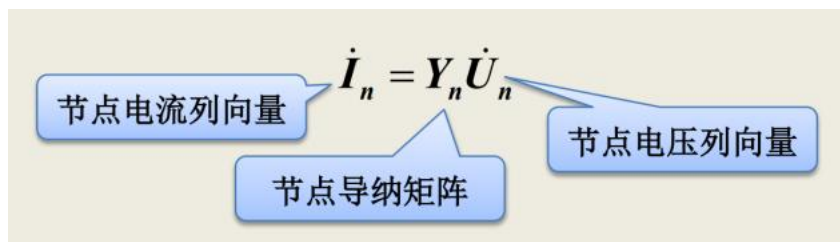


$$Y = \begin{bmatrix} y_{10} + y_{12} & -y_{12} & 0 & 0 \\ -y_{12} & y_{20} + y_{12} + y_{23} + y_{24} & -y_{23} & -y_{24} \\ 0 & -y_{23} & y_{23} + y_{34} & -y_{34} \\ 0 & -y_{24} & -y_{34} & y_{40} + y_{24} + y_{34} \end{bmatrix}$$

Y_{ii} : 与 i 节点直接相连的导纳之和

Y_{ij} : i 节点和 j 节点之间的导纳的相反数

(3) 节点导纳矩阵反映了电力网络的什么特性?



独立方程个数 n , 不包含参考节点 0

2. 电力系统潮流方程的建立

由 $I_n = Y_n U_n$ 可以推出功率方程:

$$P_i - jQ_i = U_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

进一步可以求出两坐标系下的节点功率平衡方程

直角坐标系下的功率方程:

$$\text{节点有功平衡: } \Delta P_i = P_i - (e_i a_i + f_i b_i) = 0$$

$$\text{节点无功平衡: } \Delta Q_i = Q_i - (f_i a_i - e_i b_i) = 0$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}, \quad \dot{U}_i = e_i + jf_i, \quad a_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j), \quad b_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)$$

极坐标系下的功率方程:

$$\text{节点有功平衡: } \Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0$$

$$\text{节点无功平衡: } \Delta Q_i = Q_i + U_i \sum_{j=1}^n U_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}, \quad \dot{U}_i = U_i \angle \delta_i = U_i e^{j\delta_i}, \quad \delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$$

3. 潮流方程的定解及约束条件

(1) 未知数和方程数分析?

每个节点有四个运行变量 P_i , Q_i , U_i , δ_i 或者 e_i , f_i (U_i 的两轴分量)
 因此全系统有 $4n$ 个变量, 凭借功率方程可以得到 $2n$ 个方程
 需要给定 $2n$ 个变量值才能确定另外 $2n$ 个变量的解, 即每个节点给定两个运行变量

根据给定运行变量的不同将节点分为:

- ① 负荷节点: 即 PQ 节点, 已知量为 P 、 Q , 待求量为复电压
- ② 平衡节点: 即参考节点, 已知量为复电压, 待求量为 P 、 Q
- ③ 发电机节点: 即 PV 节点, 已知量 P 、 V , 待求量为 Q 、 δ
- ④ 联络节点: 特殊的 PQ 节点, $P=Q=0$

(更详细的未知数和方程数分析看看 PPT, 全是矩阵和公式不太好搬运)

4. 牛顿-拉夫逊法

一般迭代形式为:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} = x^{(k)} - \frac{f(x^{(k)})}{f'(x^{(k)})}$$

收敛判据为:

$$|x^{(k+1)} - x^{(k)}| < \varepsilon$$

$$g(x) = x - \frac{f(x)}{f'(x)}$$

实际意义: 在求该函数的不动点

多变量情况下的迭代形式:

$$\begin{cases} f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \bigg|_0 \Delta x_1^{(0)} + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \bigg|_0 \Delta x_2^{(0)} \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \bigg|_0 \Delta x_n^{(0)} = 0 \\ f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \bigg|_0 \Delta x_1^{(0)} + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \bigg|_0 \Delta x_2^{(0)} \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \bigg|_0 \Delta x_n^{(0)} = 0 \\ \dots \\ f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \bigg|_0 \Delta x_1^{(0)} + \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \bigg|_0 \Delta x_2^{(0)} \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \bigg|_0 \Delta x_n^{(0)} = 0 \end{cases}$$

矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \dots \\ f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \dots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

以此可以得到第一次的迭代结果：

$$\begin{bmatrix} x_1^{(1)} \\ x_2^{(1)} \\ \dots \\ x_n^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(0)} \\ x_2^{(0)} \\ \dots \\ x_n^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \dots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

反复循环可以求出方程解

5. 牛顿-拉夫逊法解潮流

(1) 直角坐标系下：（假设有 $n-r-1$ 个 PQ 节点， r 个 PV 节点，1 个平衡节点）

得到如下功率方程

$$\begin{aligned} \text{PQ节点: } & \begin{cases} \Delta P_i = P_i - (e_i a_i + f_i b_i) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_i - (f_i a_i - e_i b_i) = 0 \end{cases} & i=1, \dots, n-1-r \\ \text{PV节点: } & \begin{cases} \Delta P_i = P_i - (e_i a_i + f_i b_i) = 0 \\ \Delta U_i^2 = (U_i)^2 - (e_i^2 + f_i^2) = 0 \end{cases} & i=n-r, \dots, n-1 \end{aligned}$$

$$a_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) \quad b_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)$$

写成矩阵形式：

$$f(x) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta U^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P - P(e, f) \\ Q - Q(e, f) \\ U^2 - e^2 - f^2 \end{bmatrix} = 0$$

根据牛顿-拉夫逊法写出修正方程：

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta U^2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial e^T} & \frac{\partial \Delta P}{\partial f^T} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial e^T} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial f^T} \\ \frac{\partial \Delta U^2}{\partial e^T} & \frac{\partial \Delta U^2}{\partial f^T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix}$$

直角坐标系下 J 矩阵的特点：

- ① 2 (n-1) 阶方阵
- ② 不对称，各元素在迭代时变化，计算量大
- ③ 子块与节点导纳矩阵 Y 对应，也是稀疏矩阵

$$e_i^{(k+1)} = e_i^{(k)} + \Delta e_i^{(k)}, f_i^{(k+1)} = f_i^{(k)} + \Delta f_i^{(k)}$$

- ④ 修正过程为：

(2) 极坐标下：

功率方程为：

PQ节点：

$$\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0$$

$$\Delta Q_i = Q_i + U_i \sum_{j=1}^n U_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0$$

PV节点：

$$\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0$$

写成矩阵形式：

$$f(x) = \begin{bmatrix} \Delta P(U, \delta) \\ \Delta Q(U, \delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P - P(U, \delta) \\ Q - Q(U, \delta) \end{bmatrix} = 0$$

得到修正方程：（乘 U 除 U 是为了方便计算）

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta^T} & \frac{\partial \Delta P}{\partial U^T} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta^T} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial U^T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U/U \end{bmatrix}$$

极坐标下 J 矩阵特点:

- ① $2n-2-r$ 方阵 (比直角坐标系少了 r 阶)
- ② 不对称, 元素在迭代过程中变化, 计算量大
- ③ 子块与节点导纳矩阵 Y 对应, 也是稀疏的
- ④ 初值严格, 一般取 $U(0)=1, \delta(0)=0$

⑤ 修正过程:
$$\delta^{(k+1)} = \delta^{(k)} + \Delta \delta^{(k)} \quad U^{(k+1)} = U^{(k)} + \Delta U^{(k)}$$

6. PQ 分解法求解系统潮流

(1) 牛顿-拉夫逊法有什么优缺点?

优点: 收敛性好

缺点: 每次迭代要重新计算 J^{-1} , 计算量和储存量很大

修正方程:
$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U/U \end{bmatrix}$$

修正方程为:

化简的前提条件: 超高压和高压电网

第一步化简: (原因: $R \ll X, \delta$ 主要影响 P, U 主要影响 Q , 故 $N < H, M < L$)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U/U \end{bmatrix}$$

第二步化简: (原因: δ_{ij} 较小, 而且 $G_{ij} < B_{ij}$)

$$H_{ij} = L_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$

$$\longrightarrow \begin{cases} H_{ij} = U_i U_j B_{ij} & i, j=1, 2, \dots, n-1, i \neq j \\ L_{ij} = U_i U_j B_{ij} & i, j=1, 2, \dots, n-1-r, i \neq j \end{cases}$$

第三步化简: (原因: $Q_i \ll U_i^2 B_{ii}$)

$$\begin{aligned} H_{ii} &= Q_i + U_i^2 B_{ii} \\ L_{ii} &= -Q_i + U_i^2 B_{ii} \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} H_{ii} = U_i^2 B_{ii} & i, j=1,2,\dots, n-1 \\ L_{ii} = U_i^2 B_{ii} & i, j=1,2,\dots, n-1-r \end{array} \right.$$

经过三步化简后：

$$H, L \approx \begin{bmatrix} U_1^2 B_{11} & U_1 U_2 B_{12} & \cdots & U_1 U_k B_{1k} \\ U_2 U_1 B_{21} & U_2^2 B_{22} & \cdots & U_2 U_k B_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ U_k U_1 B_{k1} & U_k U_2 B_{k2} & \cdots & U_k^2 B_{kk} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} U_1 & & & 0 \\ & U_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & U_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1k} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ B_{k1} & B_{k2} & \cdots & B_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 & & & 0 \\ & U_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & U_k \end{bmatrix}$$

缩写： $H, L \approx UBU$

$$\text{P}\delta\text{修正: } \begin{bmatrix} \Delta P_1 / U_1 \\ \Delta P_2 / U_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} / U_{n-1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n-1} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n-2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ B_{n-11} & B_{n-12} & \cdots & B_{n-1n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \Delta \delta_1 \\ U_2 \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ U_{n-1} \Delta \delta_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$\text{QV修正: } \begin{bmatrix} \Delta Q_1 / U_1 \\ \Delta Q_2 / U_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-1-r} / U_{n-1-r} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1(n-1-r)} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2(n-1-r)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ B_{(n-1-r)1} & B_{(n-1-r)2} & \cdots & B_{(n-1-r)(n-1-r)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_{n-1-r} \end{bmatrix}$$

缩写： $\Delta P / U = -B' \cdot U \Delta \delta$
 $\Delta Q / U = -B'' \cdot \Delta U$

修正方程特点：

- ① 两套常系数线性方程组
- ② 常系数矩阵 B' 和 B'' 稀疏对称
- ③ B' 和 B'' 阶数分别为 $(n-1) \times (n-1)$ 、 $(n-r-1) \times (n-r-1)$

注：PQ 分解法和牛顿拉夫逊法的计算精度没有差别（原因：收敛判据没有变化）
 单步用时 PQ 分解法用时少，牛顿拉夫逊法长，牛顿拉夫逊法单步收敛快，但总时长仍然是 PQ 分解法少

七、电力系统的有功功率平衡和频率调整

1. 电力系统频率偏移的基本概念

(1) 频率偏移可以避免吗？

不可避免

(2) 频率偏移允许范围是多少？

我国国标规定： $50 \pm 0.2\text{Hz}$

发达国家： $50 \pm 0.1\text{Hz}$

2. 频率水平取决于什么？

(1) 频率偏移的决定性因素？

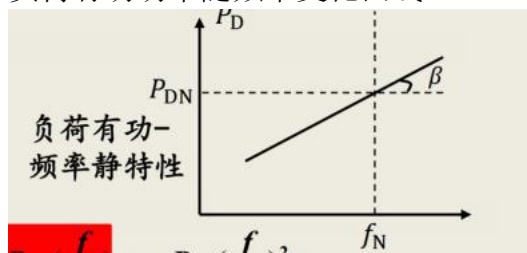
功率平衡： $P_G - P_D = P_G - (P_{LD} + P_S + P_L) = 0$

原动机输出机械功率大于发电机输出的电磁功率时，驱动转矩>制动转矩，发电机加速，频率上升。

原动机输出机械功率小于发电机输出的电磁功率时，驱动转矩<制动转矩，发电机减速，频率下降。

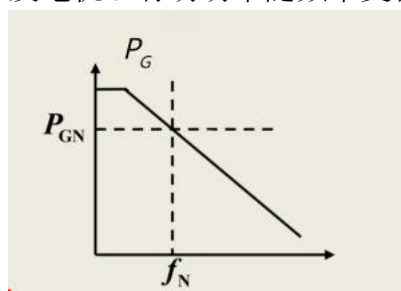
因此，**系统频率取决于有功功率的平衡**，而负荷不断变化，所以需要不断地跟随调整发电机组，这种平衡是动态的。

负荷有功功率随频率变化曲线：



频率调节效应系数： $K_D = \tan \beta = \frac{\Delta P_D}{\Delta f}$

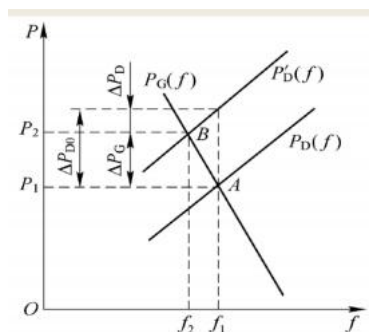
发电机组有功功率随频率变化曲线：



静态调差系数： $\delta = -\frac{\Delta f}{\Delta P_G}$

功频特性系数： $K_G = \frac{1}{\delta} = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f}$

(2) 频率的一次调整过程是怎样的？（调速器）



原发电机曲线为 $P_G(f)$ ，原负荷曲线为 $P_D(f)$

在某时刻负荷增加了 ΔP_{D0} ，则负荷曲线变为 $P_D'(f)$

与发电机曲线 $P_G(f)$ 的交点从 A 点变为 B 点，频率从 f_1 变为 f_2

频率变化： $\Delta f = f_2 - f_1 < 0$

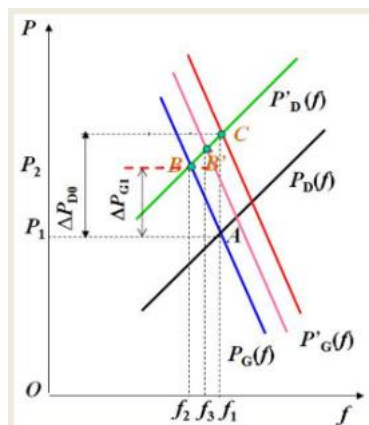
有功出力增量： $\Delta P_G = P_2 - P_1 = -K_G \Delta f > 0$

负荷调节效应： $\Delta P_D = K_D \Delta f < 0$

电力系统功频特性系数： $K = K_D + K_G = -\frac{\Delta P_{D0}}{\Delta f}$

一次调频属于有差调节。当 ΔP_{D0} 过大时，无法使频率在一定范围内。

(3) 频率的二次调整过程是怎样的？（调频器）



(图中 ΔP_{G1} 不正确)

接着一次调整，当前的功率平衡点为 B

发电机曲线从 $P_G(f)$ 变为 $P_G'(f)$ ，功率平衡点从 B 变为 B'，频率从 f_2 变为 f_3

(有差调整是 B' 点，无差调整是 C 点)

功率平衡方程如下：

$$\Delta P_{D0} = \Delta P_{G2} + \Delta P_{G1} - \Delta P_D = \Delta P_{G2} - K_G \Delta f - K_D \Delta f = \Delta P_{G2} - K \Delta f$$

(4) 发电机组的备用容量怎么分类？

按投入时间分类：

热备用：旋转备用，运转中的发电设备可能发的最大功率与实际发电功率之差

冷备用：未运转的、但能随时启动的发电设备可以发的最大功率

3. 现代大电力系统的频率如何控制？

(1) 对于 N 台发电机：

频率变化 Δf ，第 i 台发电机功率增量为： $\Delta P_{Gi} = -K_{Gi}\Delta f$

N 台机组总功率增量为： $\Delta P_G = \sum \Delta P_{Gi} = -\sum K_{Gi} \Delta f = -K_G \Delta f$

其中 $K_G = \sum K_{Gi}$ ，称为 N 台发电机等值功频静特性

其标么值为：

$$K_{G*} = -\frac{\Delta P_G / \sum P_{GiN}}{\Delta f / f_N} = -\frac{\sum \Delta P_{Gi*} P_{GiN}}{\Delta f_*} \frac{1}{\sum P_{GiN}} = \frac{\sum K_{Gi*} P_{GiN}}{\sum P_{GiN}}$$

(2) 电力系统的功频静特性系数：（公式打累了偷个懒）

有名值： $K = K_G + K_D = -\frac{\Delta P_{D0}}{\Delta f}$

标么值： $K_{G*} \frac{P_{GN}}{f_N} + K_{D*} \frac{P_{DN}}{f_N} = -\frac{\Delta P_{D0}}{\Delta f}$

$\Rightarrow K_{G*} \frac{P_{GN}}{P_{DN}} + K_{D*} = -\frac{\Delta P_{D0} / P_{DN}}{\Delta f / f_N} = -\frac{\Delta P_{D0*}}{\Delta f_*} = K_*$

$\Rightarrow K_* = K_{G*} \rho + K_{D*}$

备用系数： $\rho = \frac{P_{GN}}{P_{DN}}$

(3) 现代大电力系统的频率控制的原则？

- ① 带调速器的机组，只要有可调容量，都参加一次调频
- ② 二次调频由部分电厂承担——主调频机组（厂）

主调频机组要求：

- ① 有足够可调容量
- ② 有一定调整速度
- ③ 调整时能符合安全、经济的要求

(4) 各类电厂的基本特点？

- ① 火电厂：一般可调容量不大，出力变化不能太快
- ② 核电厂：一般宜带稳定负荷
- ③ 水电厂：可调容量在 50% 以上，调节速度快

水电厂适宜承担调频任务。枯水期时，水电主调频，效益低的火电辅助调频；丰水期时，为避免无谓弃水，水电满出力运行，效率不高的火电厂调频。

八、电力系统的无功功率平衡和电压调整

1. 电力系统电压偏移的基本概念

(1) 电压偏移对电力系统的影响？

V 低：电能损耗大，且危及系统稳定性

V 高：破坏绝缘，超高压线路电晕损耗

(2) 电压偏移可以避免吗？

原因：负荷随机变化，电网结构经常变化，大电网节点众多不可避免

(3) 电压偏移的允许范围？

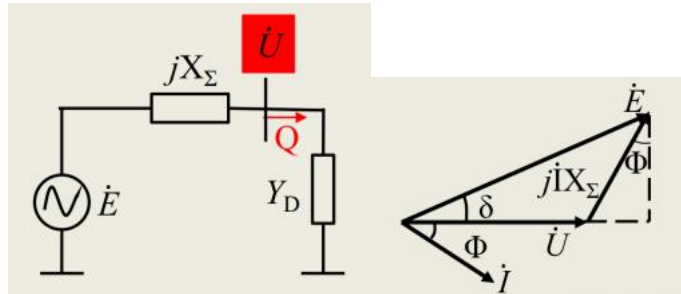
- ① 35kV 以上供电电压正负偏差绝对值之和不超过标称电压的 10%
- ② 10kV 及以下三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$
- ③ 220V 单相供电电压偏差为标称电压的 $+7\%$ ， -10%

(4) 电力系统的电压水平取决于什么？

取决于无功功率的平衡水平

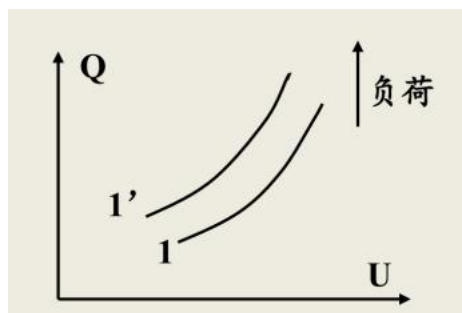
2. 电压水平取决于什么

(1) 负荷无功-电压静态特性和系统无功-电压静特性是什么样的？

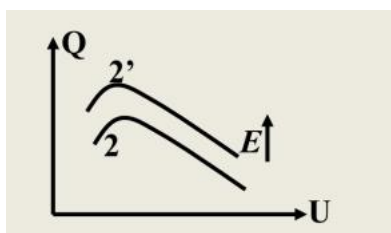


系统无功-电压关系： $Q = UI \sin \phi = U \frac{IX_{\Sigma} \sin \phi}{X_{\Sigma}} = U \frac{E \cos \delta - U}{X_{\Sigma}}$

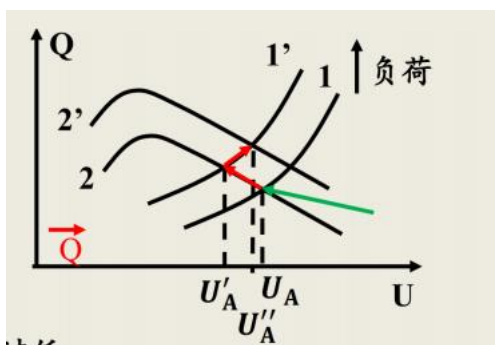
负荷无功-电压静特性：



系统无功-电压静特性：



(2) 无功功率平衡的过程是怎样的？



负荷增加，曲线从 1 变为 1'，电压下降

(3) 单凭发电机进行无功平衡行吗？

不行

实际负荷的功率因数为 0.7 左右，发电机为 0.8-0.9

无功损耗 > 有功损耗

线路无功损耗约为 Q_D 的 25%

多级变压器无功损耗约为 Q_D 的 50-75%

系统中总无功损耗约等于无功负荷 Q_D

导致需要的无功电源 = 2 无功负荷

又因为无功不能远距离输送（会导致有功损耗和电压损耗）

需要对无功功率进行就地补偿（设置其他无功电源），以满足全系统平衡和局部地区基本平衡

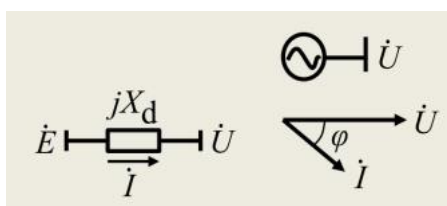
3. 电力系统中的无功电源

(1) 发电机：唯一的有功电源，基本的无功电源

发无功的能力：与同时发出的有功有关，由发电机的 PQ 极限曲线决定

当有功备用足够时，可让负荷中心的发电机少发有功，多发无功，有利于无功的局部平衡，提高电压水平

(2) 同步调相机：特殊同步电机，不发 P_G 的同步发电机，或者不带 P_D 的同步电动机



无功功率: $Q_G = UI \sin \varphi$

过激运行时发出 Q_G (无功电源) ($0^\circ < \varphi < 180^\circ$)

欠激运行时吸收 Q_G (无功负荷) ($-180^\circ < \varphi < 0^\circ$)

优点:

- ① 调节平滑
- ② 电源或负荷: 升压、降压均可
- ③ 强励: 故障时也能调, 有利于稳定性

缺点:

- ① 旋转机械设备: 投资大, 维护量大, 损耗大

一般安装在枢纽变, 平滑调压, 提高稳定性

(3) 静电电容器: 重要的无功补偿设备, 应用非常普遍

优点:

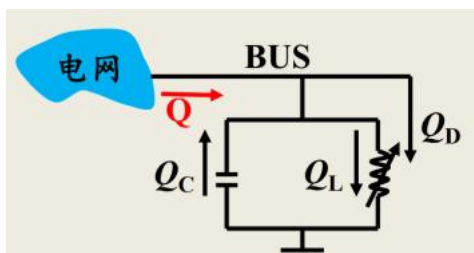
- ① 可分散、集中补偿, 可分组补偿, 可根据负荷情况分组投切
- ② 投资少、有功损耗少
- ③ 无旋转部件, 维护量小

缺点:

- ① $Q_C = U^2 / X_C = U^2 \omega C$, 电压下降时无功急剧下降, 不利于电压稳定

(4) 静止无功补偿器: 一类先进无功补偿装置, 负荷变化时, 快

速控制, 使母线电压维持不变



优点:

- ① 调节能力强、特性平滑
- ② 反应速度快
- ③ 可分相补偿
- ④ 损耗小, 维护简单

缺点:

- ① 最大补偿量正比于电压平方, 电压低时补偿量小
- ② 谐波污染

(5) 高压输电线路的充电电容：高压线固有，当无功过剩，电压偏高，要采取措施（比如并联电抗器）

4. 现代大电网的电压如何控制

(1) 负荷节点数量多又分散，不可能对所有节点的电压进行监控，应该怎么解决？

降维，对中枢点（电压水平具有代表性的关键母线）进行监测，只要控制好中枢点电压，其他母线的电压就能满足要求

(2) 中枢点电压的控制方式（原则）？

① 逆调压（难）：

最大负荷，升高中枢点电压（电网额定电压+5%）

最小负荷，降低中枢点电压（电网额定电压）

适用于中枢点到各负荷点远，负荷变化较大，电压损耗变化大，导致负荷点电压变化较大

② 顺调压（易）：

最大负荷时，允许中枢点电压低一点（不低于电网额定电压±2.5%）

最小负荷时，允许中枢点电压高一点（不高于电网额定电压±7.5%）

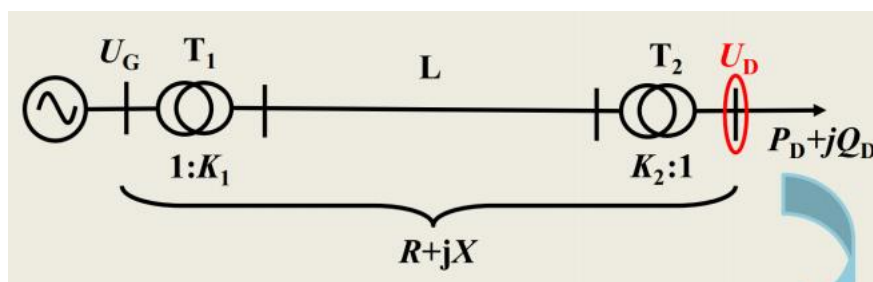
适用于中枢点到各负荷点近，负荷变动小

③ 恒调压（中）：

保持在电网额定电压±2-5%、

适用：介于上述两者之间

(3) 电压控制原理



$$U_D = (U_G K_1 - \Delta U) \frac{1}{K_2} = (U_G K_1 - \frac{Q_D X}{U_N}) \frac{1}{K_2}$$

- ① 调整 U_G
- ② 调整变比 $K_1 K_2$
- ③ 改变无功功率分布 Q_D
- ④ 改变网络串联电抗 X

5. 调压方式概述

(1) 改变发电机端电压调压

调节励磁电压：

- ① 易于逆调压，实质上是调节发电机无功出力
- ② 难以兼顾机端负荷和远方负荷的要求，不能完全依靠发电机进行调压
- ③ 适合于靠近负荷中心，且有足够备用容量的发电机

(2) 改变变压器分接头调压

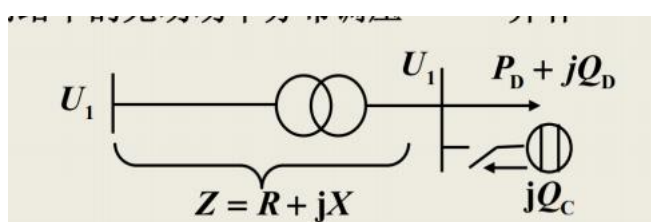
普通变压器：停电改变分头，选定分头要兼顾各种负载水平

有载调压变压器：在不同负荷下，可不停电切换分头

(3) 改变网络中的无功功率分布调压——“并补”

并联电容器：最小负荷时，一般全部切除；负荷增加时，投入全部或部分

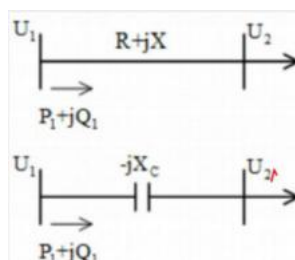
同步调相机：最大负荷时，作无功电源；最小负荷时，做无功负荷



补偿前的电压损耗： $\Delta U = \frac{PR+QX}{U_2'}$

补偿后的电压损耗： $\Delta U_C = \frac{PR+(Q-Q_C)X}{U_{2C}'}$

(4) 改变输电线路进行调压——“串补”



补偿前的电压损耗： $\Delta U = \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1}$

补偿后的电压损耗： $\Delta U_C = \frac{P_1 R + Q(X - X_C)}{U_1}$

注：

- ① 利用发电机调压不需要增加费用，是发电机直接供电的小系统的主要调压手段
- ② 当系统无功功率供应充足时，各变电站可通过选择变压器分接头来调压；而在无功不足时，不宜采用该方法，因为当某地区的电压由于变压器分接头的改变而升高后，该地区所需的无功功率也增大，从而导致整个系统的额定电压水平更加下降

③ 从调压的角度看，并联电容补偿和串联电容补偿的作用都是减小电压损耗 QX/V 分量，串联电容补偿减少 X ，并联电容补偿减少 Q ，只有 QX/V 分量较 PR/V 分量更大时，调压效果才明显，这两种方法都需要增加投资

九、电力系统短路分析绪论

1. 电力系统稳态和暂态的区别

(1) 什么是电力系统的稳态和暂态？

电力系统的稳态：正常的、相对静止的运行状态；稳态分析——电力系统正常的、三相对称运行状态的分析和计算（如潮流计算）

电力系统的暂态：从一种稳定运行状态向另一种稳定运行状态的过渡过程；暂态分析——分析过渡过程中电压、电流、功率等随时间的变化（如故障分析）

(2) 电力系统处于稳态需要满足什么条件？

节点电压幅值、频率、相位不随时间变化

线路电流幅值、频率、相位不随时间变化

(3) 电力系统暂态过程产生的原因？

电力系统正常运行时处于稳定状态。各种扰动造成了电力系统进入暂态，如果扰动后电力系统出现了异常，如停电等就是电力系统事故。

扰动种类：短路故障（系统内的元件（发电机、变压器、线路、电动机）上发声的不同相之间的或相与地之间的短路故障。

），负荷投切。

2. 电力系统短路的后果及类型

(1) 电力系统短路会产生什么后果？



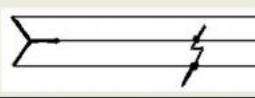

① 产生大电流：发热，高温破坏设备，电弧将许多东西短时融化（电焊）；电磁力破坏设备

② 造成低电压：电器设备无法正常工作，医院、矿山引起危险

③ 干扰以至于破坏系统的稳定运行，如大电厂母线故障导致发电机退出运行，负荷中心故障导致严重失去负荷

④ 总出力与总负荷不平衡导致发电机加速或减速，造成系统振荡、频率变化、发电机失步、电压崩溃而造成大面积停电

(2) 电力系统短路的类型？

| 短路类型 | 示意图 | 符号 |
|--------|---|-------------|
| 三相短路 |  | $f^{(3)}$ |
| 两相接地短路 |  | $f^{(1,1)}$ |
| 两相短路 |  | $f^{(2)}$ |
| 单相接地短路 |  | $f^{(1)}$ |

(3) 各种元件发生短路的概率、各种短路故障发生的概率？

110kV 架空线路 78.0%

600kW 以上发电机 7.5%

110kV 变压器 6.5%

110kV 母线 8.0%

架空输电线时电力系统中比较薄弱环节，发生短路的几率最高

三相短路 5%

两相短路 4%

两相短路接地 8%

单相接地 83%

三相故障发生概率小，但是最为严重，对系统的安全稳定运行影响最大

(4) 电力系统短路计算的意义？

- ① 电气设备选择的依据
- ② 电气系统保护配置的依据
- ③ 网络结构规划、设计的依据
- ④ 电力系统稳定控制措施制定的依据
- ⑤ 电力系统短路试验是测量分析电力系统特性的重要手段

3. 无穷大容量电源经阻抗短路的分析

(1) 无穷大电源的概念？

能提供恒定电势，不论所接负荷如何变化，其电势频率不变

电源的内阻抗为零，即短路时电源内无电压损耗，其端电压不变

$$e(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \phi)$$

E 、 ω 、 ϕ 均为常数

(2) 短路故障的基本分析方法？

短路后的瞬间：各电气量剧烈变化，采用微分方程分析，即：建立系统的微分方程模型（暂态模型），根据短路条件求解微分方程组

短路后进入稳态：各电气量幅值、相位、频率均不再变化，采用相量分析（类似于稳态计算），求解代数方程组

(3) 短路分析的假设条件？

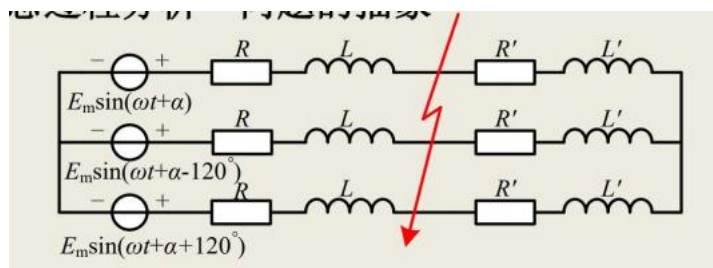
① 假定同步发电机和异步电动机的转速维持不变；由于电磁暂态过程的时间很短，系统中旋转电机的机械运动变化非常微小（有惯性）

② 用次暂态电抗和次暂态电势描述发电机（次暂态电抗<暂态电抗）

③ 认为负荷电流比短路电流小很多，可忽略不计，认为发电机短路前空载。因此，次暂态电势的标么值等于 1

④ 忽略线路对地电容，忽略变压器的励磁支路，高压电网可忽略电阻

(4) 暂态过程分析



电压源（无穷大电源），在时刻 t_0 经电阻 R 及电感 L 突然短路，求短路后电流随时间的变化

已知： $e_a = E_m \sin(\omega t + \alpha)$ ， $i_a = I_m \sin(\omega t + \alpha - \phi')$

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{(R + R')^2 + \omega^2(L + L')^2}} \quad \phi' = \tan^{-1} \frac{\omega(L + L')}{R + R'}$$

假定短路再 $t=0$ 时刻发生，电路方程为：

$$Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = E_m \sin(\omega t + \alpha)$$

初始条件为：

$$i_{a\{0-\}} = I_m \sin(\omega t + \alpha - \phi') = I_m \sin(\alpha - \phi')$$

得到方程的解为：

$$i_a = i_p + i_{ap}$$

$$= I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \phi) + [I_m \sin(\alpha - \phi') - I_{pm} \sin(\alpha - \phi)] e^{-\frac{t}{T_a}}$$

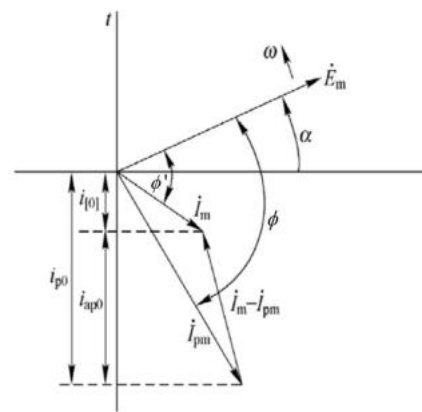
$$\text{其中 } I_{pm} = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad \phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad T_a = \frac{L}{R}$$

短路电流中包含两个分量——周期分量和非周期分量

周期分量的幅值取决于电源电压和短路回路的阻抗，且在暂态过程中保持不变，它也是回路的稳态短路电流

非周期分量是为了使电感中电流不突变而产生，其值在短路瞬间最大，而在暂态过程中以时间常数 T_a 按指数规律衰减最终为零

(5) 向量图分析



当 I_m 和 I_{pm} 相量差平行时和垂直时，非周期分量分别最大和最小

短路冲击电流 i_{im} （短路电流最大可能的瞬时值）

恒定电势外电路空载情况下发生三相短路，短路回路为纯感性，短路时刻（ $t=0$ ）初相角为零情况下，非周期分量起始值最大

在短路后约半个周期出现最大值，即短路发生后 0.01 秒

4. 常用的短路电流计算指标

(1) 短路冲击电流

$$i_{im} = \sqrt{2}k_{im}I_p$$

k_{im} 为冲击系数， $1 \leq k_{im} \leq 2$

在实际计算中：

- ① 当短路发生在发电机电压母线时，取 $k_{im} \leq 1.9$
- ② 当短路发生在发电厂高压电压母线时，取 $k_{im} \leq 1.85$
- ③ 当短路发生在其他时，取 $k_{im} \leq 1.8$

主要用来对电气设备和载流导体进行动稳定校验

(2) 短路电流的最大有效值：在短路过程中，任一时刻 t 的短路电流有效值，是指以时刻 t 为中心的一个周期内瞬间电流的均方根值

$$I_{im} = I_p \sqrt{1 + 2 (k_{im} - 1)^2}$$

(3) 短路功率：短路容量，是短路电流有效值同短路处的正常工作电压（一般用平均额定电压）的乘积

$$S_t = \sqrt{3} V_{av} I_p$$

$$S_{t*} = I_{p*}$$

短路容量主要用来校验开关的切断能力

十、电力系统三相短路的计算方法

1. 无限大容量电源三相短路的计算

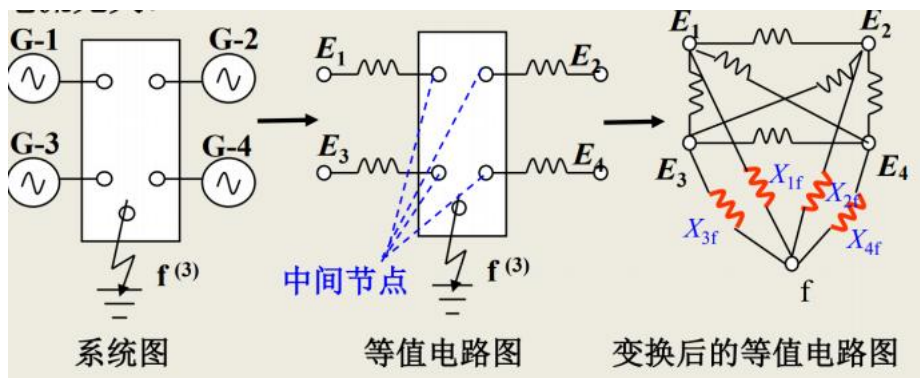
周期分量不衰减，只需计算短路电流的周期分量 I_p ，即可求出短路点的冲击电流、短路电流最大有效值和短路功率

计算短路电流的周期分量 I_p 需要知道供电点电压和供电点电压与短路点之间的转移阻抗，两者之比即为短路电流的周期分量 I_p

2. 转移阻抗的概念及计算

(1) 什么是转移阻抗？

对任一复杂网络进行变换，消除除了短路点和电源电势节点以外的所有中间节点，最后得到的各电源电势节点到短路点间的直接联系电抗（这时可以略去各电源间的连线，因为连线中的电流是电源间的交换电流，与短路电流无关）



得到最终的等值电路图后就可以用叠加定理计算得到短路电流周期分量：

$$I_f = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \frac{E_1}{Z_{1f}} + \frac{E_2}{Z_{2f}} + \dots + \frac{E_n}{Z_{nf}}$$

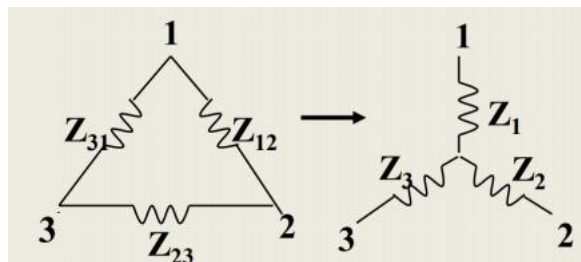
(2) 求取转移电抗的方法是什么？

① 星网变换（星角变换是星网变换的特例）：
 n 条阻抗支路 $Z_1 Z_2 \dots Z_n$ 以 k 点为公共端点的星形网络，去掉 k 点形成网形网络

$$Z_{ij} = Z_i Z_j Y_\Sigma$$

其中 $Y_\Sigma = \frac{1}{Z_1} + \dots + \frac{1}{Z_n}$

② 角星变换（一般不用）：



$$Z_1 = \frac{Z_{12} Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$$

$$Z_2 = \frac{Z_{12} Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$$

$$Z_3 = \frac{Z_{23} Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$$

3. 有限大容量电源三相短路的计算

（1）什么是有限大容量电源？

（同步发电机）三相短路时，周期分量会衰减

无限大容量电源：周期分量（不衰减）+非周期分量（衰减）

有限大容量电源：周期分量（衰减）+非周期分量（衰减）

有限大容量电源的计算分两部分：

① 计算短路瞬间短路电流周期分量的有效值，即起始次暂态电流，进而可计算出冲击电流、短路电流的最大有效值和短路功率（最有用）

② 考虑周期分量衰减时，三相短路暂态过程中不同时刻短路电流周期分量有效值的计算，该计算主要用于电气设备的热稳定校验（不做要求）

（2）计算起始次暂态电流

① 发电机均用次暂态电抗 x_d'' 作为其等值电抗，均用次暂态电势 E_0'' 作为其等值电势（在不确定发电机短路前运行参数时，可近似 $E_0'' = 1.05 - 1.1$ ，有时也近似认为等于 1）

② 异步电动机用次暂态电势 E_0'' 和次暂态电抗 x'' 来表示，在实用计算中，

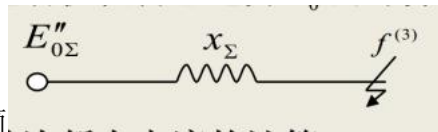
只对短路点附近，并能显著供给短路电流的大型电动机才去计算 E_0'' 和 x'' ，其他电动机可看作系统中负荷节点的综合负荷的一部分，取 $E_0'' = 0.8$ ， $x'' = 0.35$ （距离短路点远的负荷可以忽略不计）

③ 网络方面，忽略线路以及变压器的对地支路

计算步骤：

① 给定系统中各元件参数的标么值计算并形成等值电路

② 发电机及电动机次暂态电势 E_0'' 的计算（参考上述）



③ 网络化简

④ 短路点起始次暂态电流的计算： $I'' = \frac{E_{0\Sigma}''}{x_\Sigma}$

（3）短路冲击电流的计算

$$i_{im} = k_{im}\sqrt{2}I'' + k_{imLD}\sqrt{2}I_{LD}''$$

式中第一项为发电机提供的冲击电流，第二项为负荷提供的冲击电流。 I_{LD}'' 为负荷提供的起始次暂态电流， k_{imLD} 根据容量不同取不同的系数

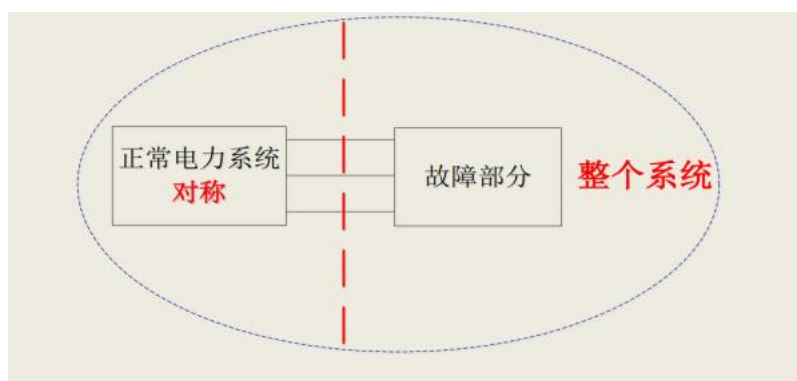
十一、电力系统的对称分量法

1. 不对称故障后电力系统的特点

故障后电力系统分成了两个部分：

正常部分：电压和电流不再对称，但三相参数相等

故障部分：是电力系统正常部分电压和电流不再对称的根源。故障部分是整个系统很小的局部

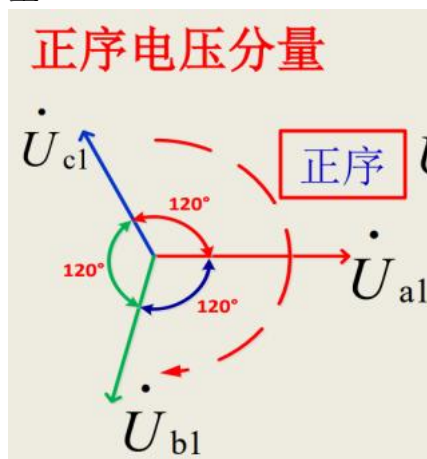


故障后的电力系统的本质是在对称的系统中接入一个不对称的电压源（带内阻）（戴维南等效）

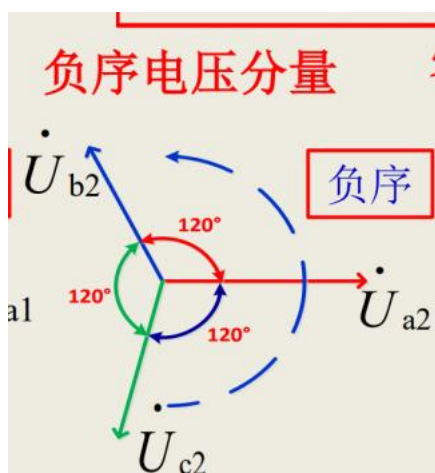
2. 对称分量的定义与性质

（1）什么是对称分量法？

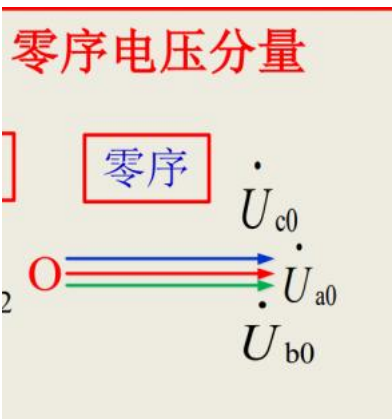
将一组不对称的三相相量分解为正序、负序、零序三组对称分量之和（原因：任何一组三相电压，均可分解为唯一的正序电压分量、负序电压分量、零序电压分量）



$$\text{正序电压: } U_{c1} = U_{b1}e^{-j120^\circ} = U_{a1}e^{j120^\circ}$$



$$\text{负序电压: } U_{c2} = U_{b2}e^{j120^\circ} = U_{a2}e^{-j120^\circ}$$



零序电压: $U_{c0} = U_{b0} = U_{a0}$

$$a = e^{j120^\circ}, \quad a^2 = e^{-j120^\circ}$$

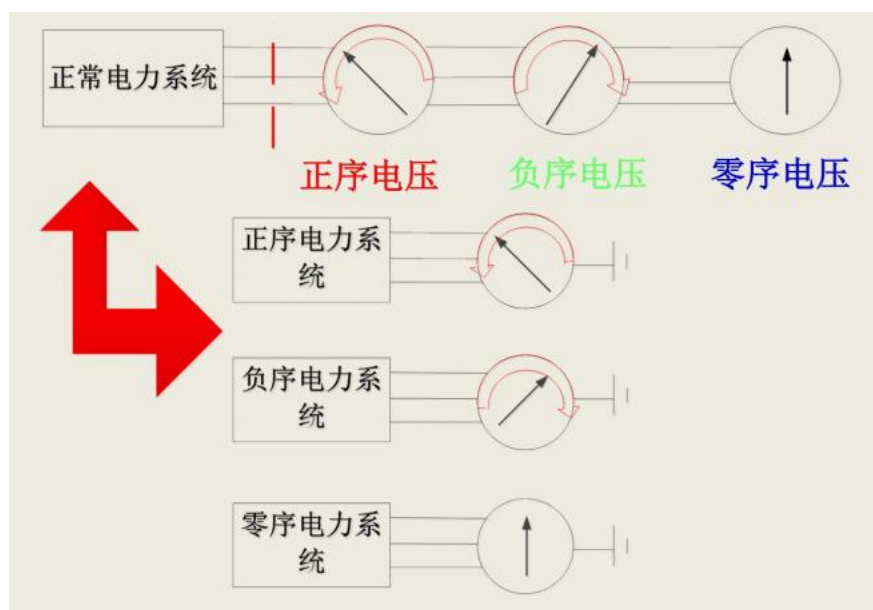
3. 序分量对对称三相电力系统的性质

正序量作用于对称系统只产生正序量

负序量作用于对称系统只产生负序量

零序量作用于对称系统只产生零序量

三种分量对对称系统相互对立，互相解耦

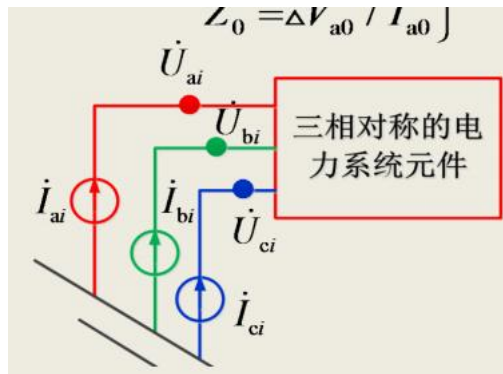


根据三序电路列写出三条方程，再加上故障点的条件（边界条件）（3个方程），这样六个未知数+六个方程就可以解方程求解

4. 电力系统各元件的序阻抗和序等值

（1）如何定义序阻抗？

序阻抗是指元件三相参数对称时，元件两端某一序的电压降与通过该元件同一序电流的比值



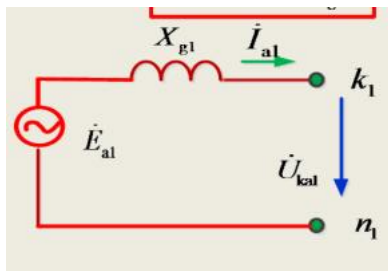
$$Z_1 = \Delta V_{a1} / I_{a1}$$

$$Z_2 = \Delta V_{a2} / I_{a2}$$

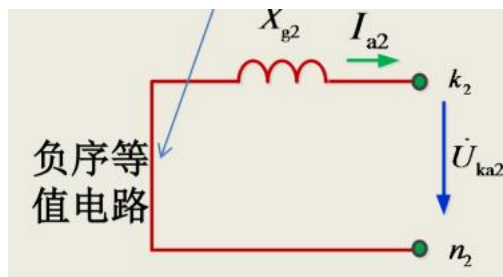
$$Z_0 = \Delta V_{a0} / I_{a0}$$

(2) 发电机的序阻抗和等值电路？

正序阻抗可以根据不同的运行状况选 X_d 、 X_d' 、 X_d'' ，存在正序电压 E_{a1}



负序阻抗隐极机 $X_{g2} = X_d''$ ，凸极机 $X_{g2} = \frac{1}{2} (X_d'' + X_q'')$ ，取发电机不产生负序电压



不产生零序电压，因为电力系统中发电机通常与三角形接法的变压器相连，使发电机无法流过零序电流（防止发热对发电机的损害），所以**电力系统中发电机通常不考虑零序阻抗**

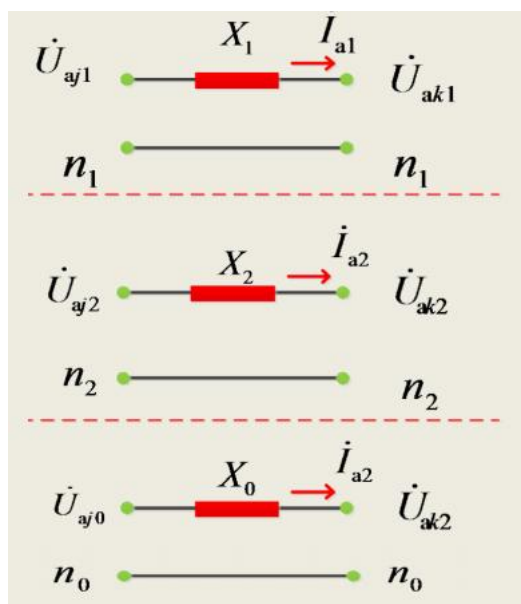
总结：

- ① 发电机正序等值为电压源串阻抗
- ② 发电机负序等值为阻抗（与正序阻抗值不相同）
- ③ 无零序等值（对于电力系统而言）

(3) 变压器的序阻抗和等值电路？

变压器的三序等值电路相同（只计电抗，忽略电阻、电导和电纳）

(4) 线路的序阻抗和等值电路？



$$X_1 = X - X_m$$

$$X_2 = X - X_m$$

$$X_0 = X + 2X_m$$

线路的正负序阻抗相同，零序阻抗不同，大于正负序阻抗

(5) 负荷的序阻抗和等值电路？（类似发电机）

负荷主要是工业负荷，大多数工业负荷是异步电动机，所以综合负荷的特性和异步电动机的特性类似。

① 正序等值用恒定阻抗表示： $Z_{LD} = 0.8 + j0.6$ ；也可用纯电抗近似表示： $Z_{LD} = j1.2$ 且功率因数为 0.8

② 负序等值一般取 $jX_2 = j0.35$

③ 没有零序等值电路

小结：

- ① 发电机要区分正序、负序参数，没有零序参数
- ② 变压器不区分正序、负序、零序，三序相等
- ③ 线路的正序、负序参数相等，零序参数和正负序不同
- ④ 负荷的正序、负序参数不相等，没有零序参数

十二、电力系统各序网络的制定

1. 正序网络的制定

(1) 制定要点：

① 故障点引入正序电势（从故障点开始，分别往左右画，仅当某序电流能流通某一元件时，该序网络才包括该元件）

- ② 除了空载线路、空载变压器、接地阻抗外，其余所有元件均包括其中
- ③ 各元件是正序参数，需特别区分的有发电机和负荷

2. 负序网络的制定

(1) 制定要点：

- ① 删掉正序网络中发电机电势
- ② 故障点引入负序电势，发电机和负荷是负序电抗，其余不变

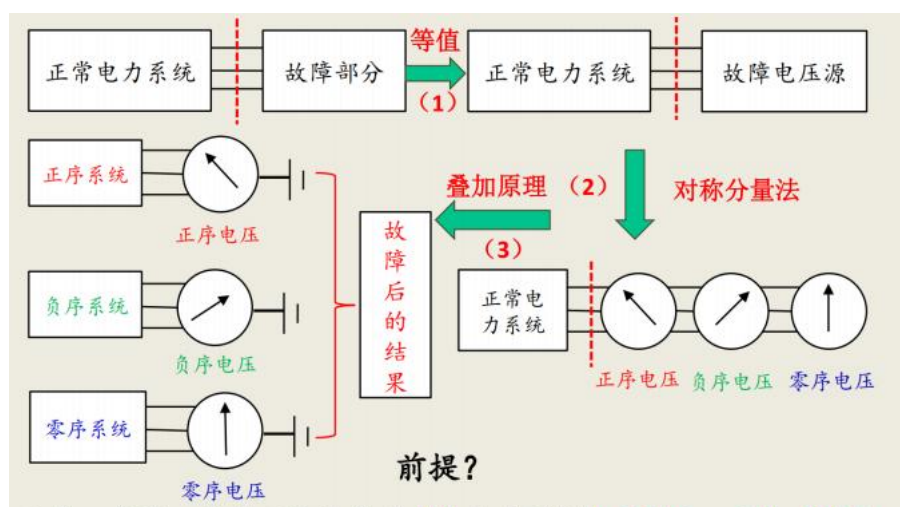
3. 零序网络的制定（重点）

(1) 制定要点：

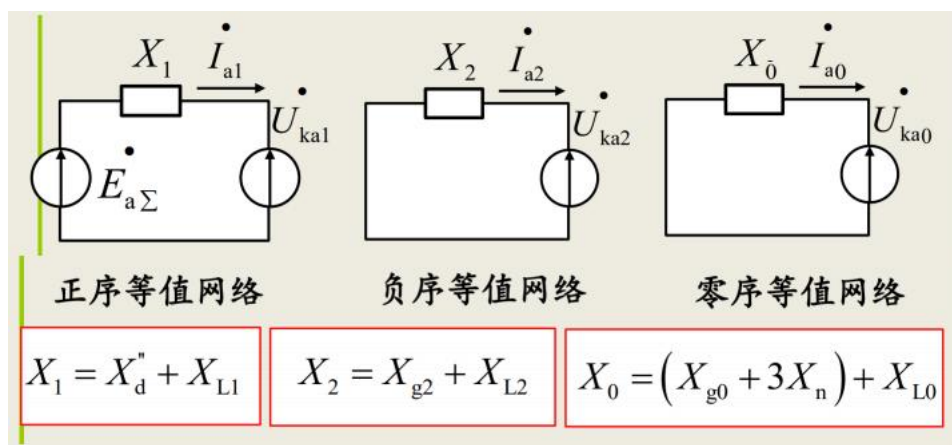
- ① 故障点引入零序电势
- ② 发电机电源零序电势为零，不包括在零序网络
- ③ 零序电流只有经大地或者架空地线才能形成通路（当遇到变压器时，只有中性点接地时才能流通）
- ④ 当中性点经阻抗接地时，在零序网络中，该阻抗应乘以 3

十三、电力系统不对称故障的计算

1. 不对称故障计算的基本思路



故障部分戴维南等效为故障电压源
 将故障电压源分为三序电压
 将三序电压分为三序系统计算



根据上面的等效电路模型列写下列的 KVL 方程

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka1} = \dot{E}_a - j\dot{I}_{a1} X_1 \\ X_1 = X_d'' + X_{L1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka2} = -j\dot{I}_{a2} X_2 \\ X_2 = X_{g2} + X_{L2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka0} = -j\dot{I}_{a0} X_0 \\ X_0 = (X_{g0} + 3X_n) + X_{L0} \end{cases} \quad (3)$$

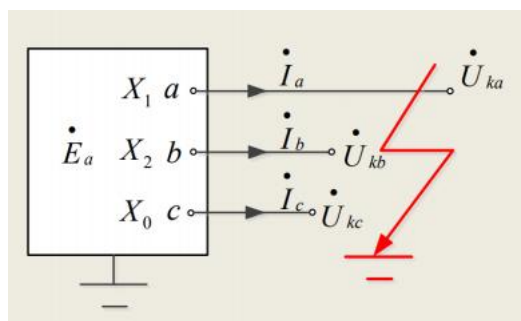
上述 3 条方程共有 6 个未知数

不同类型的故障，故障端口的三相电压、电流满足一定关系，得到 3 个接口方程
(将其拆解为三序分量求解)

解出未知数

2. 不对称故障的边界条件

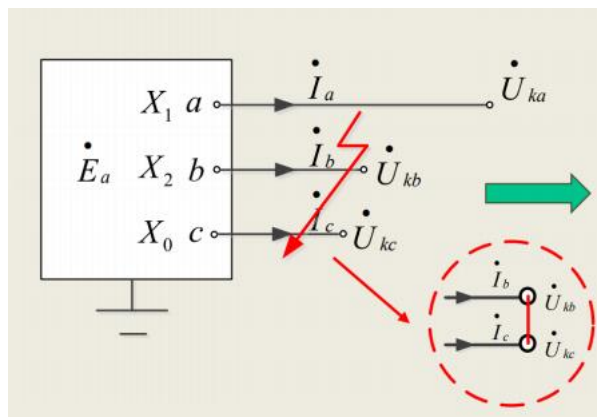
(1) 单相接地故障 (一般假定 a 相接地，称 a 相为特殊相)



故障端口有以下 3 个方程

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka} = 0 \\ \dot{I}_b = 0 \\ \dot{I}_c = 0 \end{cases}$$

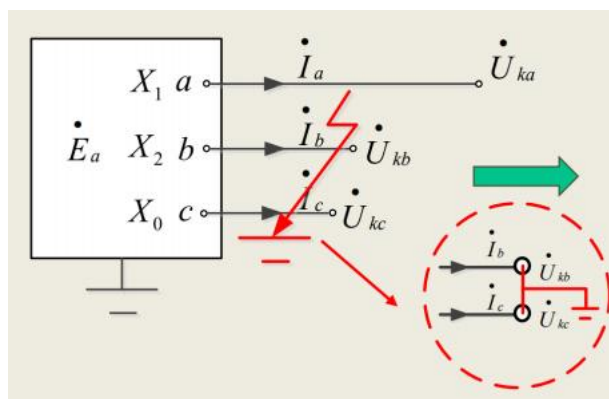
(2) 两相短路故障（一般假定 bc 相短路，a 相仍然为特殊相）



故障端口有以下 3 个方程

$$\begin{cases} \dot{I}_a = 0 \\ \dot{I}_b = -\dot{I}_c \\ \dot{U}_{kb} = \dot{U}_{kc} \end{cases}$$

(3) 两相短路接地故障（一般假定 bc 相短路接地，a 相仍然为特殊相）



故障端口有以下 3 个方程

$$\begin{cases} \dot{I}_a = 0 \\ \dot{U}_{kb} = 0 \\ \dot{U}_{kc} = 0 \end{cases}$$

3. 单相接地故障的计算

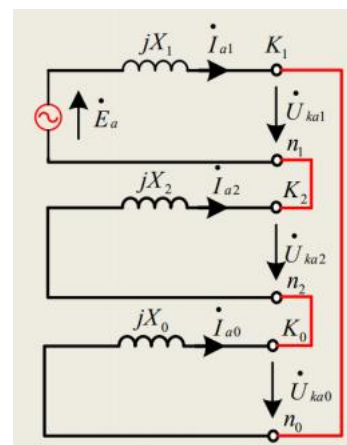
故障端口的方程拆解为三序变量为：

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka0} + \dot{U}_{ka1} + \dot{U}_{ka2} = 0 \\ \dot{I}_{a0} + a^2 \dot{I}_{a1} + a \dot{I}_{a2} = 0 \quad (a=e^{j2\pi/3}) \\ \dot{I}_{a0} + a \dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} = 0 \end{cases}$$

上述方程可得

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka0} + \dot{U}_{ka1} + \dot{U}_{ka2} = 0 \\ \dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} \end{cases}$$

单相故障的复合序网（故障处的连接关系）正、负、零三序网在故障端口处串联



利用复合序网可以得到结果

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \frac{\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2 + X_0)}$$

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

$$\dot{I}_a = \frac{3\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2 + X_0)}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka1} = \dot{E}_a - j\dot{I}_{a1}X_1 = \frac{(X_2 + X_0)\dot{E}_a}{X_1 + X_2 + X_0} \\ \dot{U}_{ka2} = -j\dot{I}_{a2}X_2 = \frac{-X_2\dot{E}_a}{X_1 + X_2 + X_0} \\ \dot{U}_{ka0} = -j\dot{I}_{a0}X_0 = \frac{-X_0\dot{E}_a}{X_1 + X_2 + X_0} \end{cases}$$

4. 两相短路故障的计算

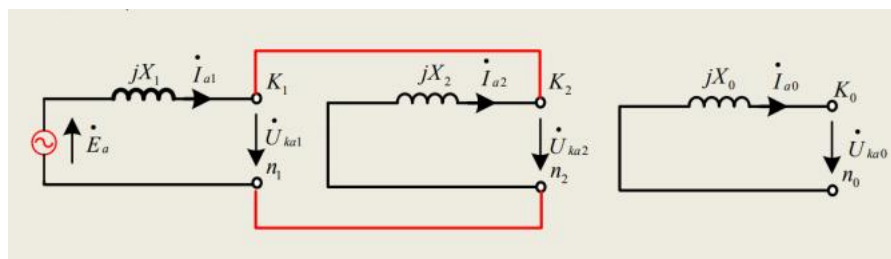
故障端口的方程拆解为三序变量为：

$$\begin{cases} \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0 \\ \dot{I}_{a0} + a^2\dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2} = -(\dot{I}_{a0} + a\dot{I}_{a1} + a^2\dot{I}_{a2}) \\ \dot{U}_{ka0} + a^2\dot{U}_{ka1} + a\dot{U}_{ka2} = \dot{U}_{ka0} + a\dot{U}_{ka1} + a^2\dot{U}_{ka2} \end{cases}$$

上述方程可得：

$$\begin{cases} \dot{I}_{a0} = 0 \\ \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0 \\ \dot{U}_{ka1} = \dot{U}_{ka2} \end{cases}$$

两相短路故障的复合序网正、负序网络在故障端口处并联，零序网络开路



由复合序网可得

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{a0} = 0 \\ \dot{I}_{a1} = -\dot{I}_{a2} = \frac{\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2)} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_{ka0} = 0 \\ \dot{U}_{ka1} = \dot{U}_{ka2} = -j\dot{I}_{a2}X_2 = \frac{X_2\dot{E}_a}{X_1 + X_2} \\ \dot{U}_{ka} = \dot{U}_{ka0} + \dot{U}_{ka1} + \dot{U}_{ka2} = \frac{2X_2\dot{E}_a}{X_1 + X_2} \\ \dot{U}_{kb} = \dot{U}_{kc} = \dot{U}_{ka0} + a^2\dot{U}_{ka1} + a\dot{U}_{ka2} \\ = \frac{(a^2 + a)\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2)} = \frac{-X_2\dot{E}_a}{X_1 + X_2} \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_b &= -\dot{I}_c = \dot{I}_{a0} + a^2\dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2} \\ &= \frac{(a^2 - a)\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2)} = \frac{-\sqrt{3}\dot{E}_a}{X_1 + X_2} \end{aligned}$$

5. 两相短路接地故障的计算

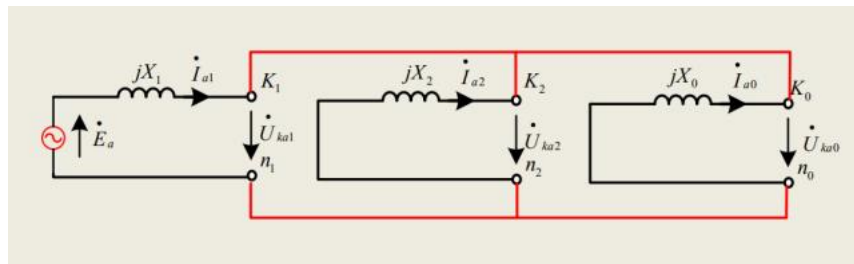
故障端口的方程拆解为三序变量为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0 \\ \dot{U}_{ka0} + a^2\dot{U}_{ka1} + a\dot{U}_{ka2} = 0 \\ \dot{U}_{ka0} + a\dot{U}_{ka1} + a^2\dot{U}_{ka2} = 0 \end{array} \right.$$

上述方程可得：

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0 \\ \dot{U}_{ka0} = \dot{U}_{ka1} = \dot{U}_{ka2} \end{array} \right.$$

两相短路接地故障的复合序网正、负、零序网络在故障端口处并联



由复合序网可得：

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2 // X_0)} \\ \dot{I}_{a2} = -\frac{X_0}{X_2 + X_0}\dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a0} = -\frac{X_2}{X_2 + X_0}\dot{I}_{a1} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_b = \dot{I}_{a0} + a^2\dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2} \\ = \left(a^2 - \frac{X_2 + aX_0}{X_2 + X_0} \right) \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{a0} + a\dot{I}_{a1} + a^2\dot{I}_{a2} \\ = \left(a - \frac{X_2 + a^2X_0}{X_2 + X_0} \right) \dot{I}_{a1} \end{array} \right.$$

$$\dot{U}_{ka0} = \dot{U}_{ka1} = \dot{U}_{ka2} = \frac{X_2 X_0}{X_2 + X_0} \dot{I}_{a1} \quad \dot{U}_{ka} = 3\dot{U}_{ka0} = \frac{3X_2 X_0}{X_2 + X_0} \dot{I}_{a1}$$

6. 正序等效定则（对上述公式的总结）

$$I_{a1}^{(n)} = \frac{E_a}{j(X_1 + X_{\Delta}^{(n)})}$$

或

$$I_{a1}^{(n)} = \frac{E_a}{X_1 + X_{\Delta}^{(n)}}$$

n ——短路故障的类型 X_{Δ} ——不同类型短路时的附加电抗

不对称短路时，短路点正序电流的大小与在短路点串联一附加电抗 X_{Δ} 并在其后发生三相短路时的电流大小相等

对各种不对称短路，短路点故障相电流的大小与正序电流大小成正比

$$I_F^{(n)} = m^{(n)} I_{a1}^{(n)}$$

| 短路类型 | 代表符号 n | $X_{\Delta}^{(n)}$ | m^n |
|--------|-------------|-----------------------------|---|
| 三相短路 | $F^{(3)}$ | 0 | 1 |
| 两相短路 | $F^{(2)}$ | X_2 | $\sqrt{3}$ |
| 单相短路 | $F^{(1)}$ | $X_2 + X_0$ | 3 |
| 两相短路接地 | $F^{(1,1)}$ | $\frac{X_2 X_0}{X_2 + X_0}$ | $\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_2 X_0}{(X_2 + X_0)^2}}$ |

（背一下）

利用正序等效定则计算不对称短路电流的步骤：

画出系统的正序、负序和零序等值电路，求出系统对短路点的正序、负序和零序输入电抗

根据短路的不同类型，组成附加电抗，将它接入短路点，然后像计算三相短路那样，算出短路点的正序电流

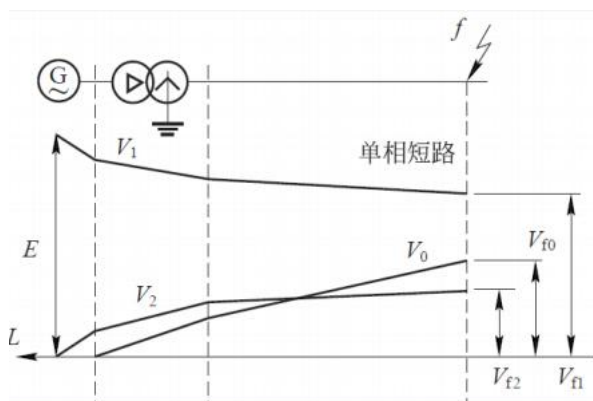
7. 不同类型短路时的电压分布

（1）单相短路

正序电压电源点最高

负序和零序电压故障点最高，负序电压到发电机内为零，零序电压到主变低压侧端口为零

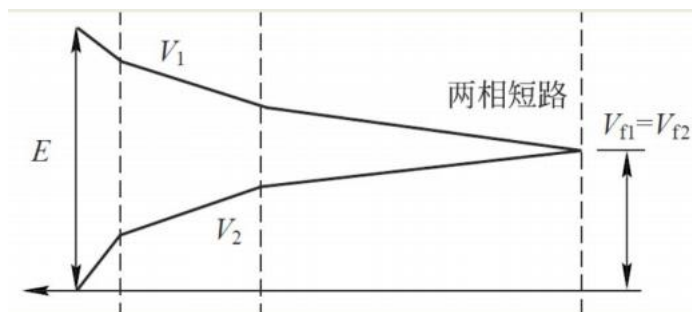
V1 在发电机和变压器侧斜度不一样（发电机电抗一般 0.2，变压器电抗一般 0.1）



(2) 两相短路

正序电压在发电机端最高

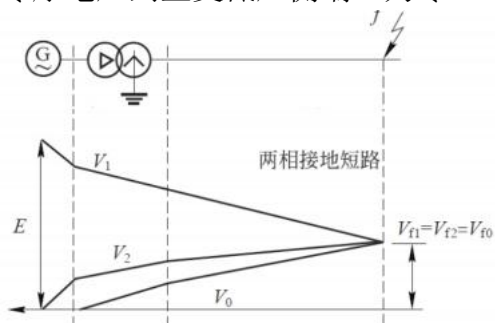
系统中没有零序电压，负序电压在故障点处最高



(3) 两相接地短路

正序电压在发电机端最高

负序和零序电压故障点最高，故障点处三序电压相等；负序电压到发电机内为零，零序电压到主变低压侧端口为零



(4) 正序电压横向对比

三相短路时，短路点电压为零，系统其他各点电压降落最严重；两相短路接地时，正序电压降低的数值仅次于三相短路；单相接地时，正序电压降低最小

8. 非故障处的电压和电流的计算

(1) 如何计算非故障处的电压和电流？

用复合序网求出故障点的各序电流和电压，然后用合成的方法求出故障点的短路

电压和短路电流

分别在各序网中求出要求的非故障点的各序电压和电流，然后合成即可

(2) 如何考虑变压器两侧电压和电流的相位偏移？

最常用的变压器绕法 YNd11

三角形侧绕组的正序线电压或线电流超前星形侧绕组的正序线电压或线电流 30°

三角形侧绕组的负序线电压或线电流落后星形侧绕组的正序线电压或线电流 30°

绕组三角形接，没有零序通路

$$U_{a(1)} = U_{A(1)} e^{j30^\circ}$$

$$U_{a(2)} = U_{A(2)} e^{-j30^\circ}$$

$$I_{a(1)} = I_{A(1)} e^{j30^\circ}$$

$$I_{a(2)} = I_{A(2)} e^{-j30^\circ}$$

十四、电力系统稳定的基本概念

1. 稳定性的基本涵义

(1) 什么是稳定性？

物体（系统）维持某一平衡状态的一种能力和性质

稳定性必然与平衡点（平衡状态或稳定状态）相联系——平衡点稳定性

稳定与否与干扰的大小有关



(2) 系统稳定性的数学描述是怎么样子的？

标准状态方程为： $\frac{dx(t)}{dt} = f[x(t)]$

其中的 $x(t)$ 是状态量

如果系统状态随时间的变化率为零，则称该点 x_e 是系统的平衡点

如果没有任何扰动，系统状态不会随时间变化，即处于静止的状态

(3) 扰动的数学描述是什么？

对某一 $\delta > 0$ ，如果对任意的与平衡点 x_e 距离小于 δ 的初始运行点 x_0 ，即满足

$|x_0 - x_e| < \delta$ ，状态方程的解满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_e$ ，则称在平衡点 x_e 稳定。

$|x_0 - x_e|$ 反映了干扰的大小

2. 电力系统稳定性的概念

(1) 电力系统的平衡点

交流系统中大量同步发电机并联运行，使其均**保持同步**是系统正常运行的基本条件。电力系统处于正常运行状态下，该状态即电力系统的一个平衡点（状态）。

电力系统稳态运行状态下的各个状态变量的值即对应平衡状态的数值。如果没有任何扰动，不会发生任何变化，系统处于相对静止的状态。

(2) 电力系统的数学模型及平衡状态？

电力系统的数学模型

$$\begin{cases} \frac{d\bar{x}(t)}{dt} = \bar{f}(\bar{x}(t), \bar{y}(t)) \\ g(\bar{x}(t), \bar{y}(t)) = 0 \end{cases}$$

发电机等 网络—代数方程

电力系统的平衡状态： (\bar{x}_e, \bar{y}_e)

满足 $\begin{cases} \bar{f}(\bar{x}_e, \bar{y}_e) = 0 \\ g(\bar{x}_e, \bar{y}_e) = 0 \end{cases}$ 电力系统的平衡状态即一种
可行的稳态潮流状态

(3) 电力系统的干扰？

小干扰：小负荷投入、发电机出力小幅度增加

大干扰：各种故障、切除线路等等

(4) 电力系统稳定性的涵义？

电力系统受干扰偏离平衡状态 x_e 到达 x_0 ，干扰消除后，系统如果能回到原来的平衡状态 x_e 或者进入新的可接受的平衡状态 x_{e1} ，则系统在 x_e 对该扰动是稳定的平衡点，否则为不稳定平衡点。

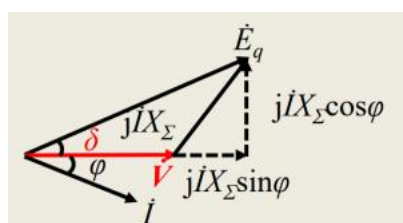
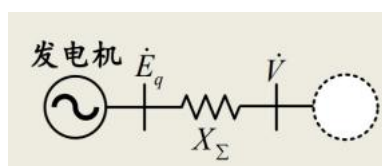
(5) 电力系统稳定性怎么分类？

① 按干扰大小分：

- a. 静态稳定（需要回到原平衡点）：小干扰（理论上为无穷小干扰）后能否回到平衡点
- b. 暂态稳定（回到原平衡点或进入新的平衡点）：大干扰后能否回到平衡点或新的可接受的平衡点，如果可以称为暂态稳定，否则称为暂态不稳定
- c. 动态稳定：电力系统受到干扰后，不发生振幅不断增长的振荡而失步——主要指低频振荡

- ② 按时间长短分：
- 短期稳定分析
 - 中期稳定分析
 - 长期稳定分析
- ③ 按引起稳定问题的主要原因分：
- 功角稳定性
 - 频率稳定性
 - 电压稳定性
 - 负荷稳定性

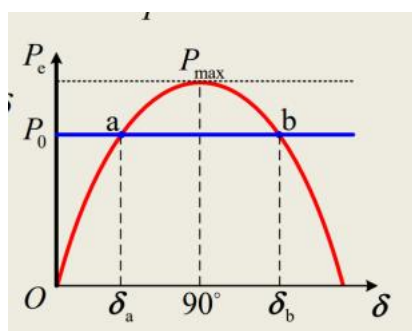
3. 简单电力系统稳定性的详解



根据相量图： $IX_{\Sigma} \cos \phi = E_q \sin \delta$

发电机的输出有功功率为： $P = P_e = VI \cos \phi = \frac{E_q V}{X_{\Sigma}} \sin \delta$

得到 P - δ 曲线图

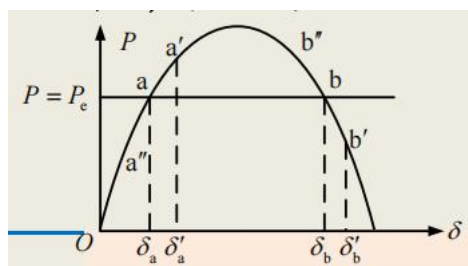


(1) 什么是功角？

电势 E_q 和电压 V 的相位差，除了表征系统的电磁关系之外，还表示各发电机转子之间的相对空间位置。而各发电机转子之间相对运动的性质，恰好是判断各发电机之间是否同步运行的依据

(2) 静态稳定的基本概念

正常运行时，发电机的输入机械功率和输出电磁功率达到平衡功角

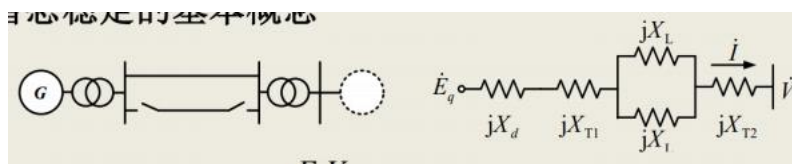


a 点：电磁功率增大（扰动）——> δ_a' ——>机组减速——>a——> δ_a'' ——>机组加速——>a——>以 a 为中心,来回振荡——>稳定在 a 点
结论：a 为稳定运行点

b 点：电磁功率减小（扰动）——> b' ——>机组加速——>直至失去同步
或 电磁功率增大（扰动）——> b'' ——>机组减速——>a
结论：b 为非稳定运行点

由上述推理可知简单电力系统静态稳定的判据为： $\frac{dP_e}{d\delta} > 0$

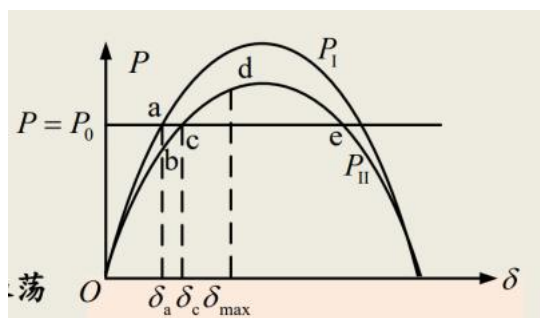
（3）暂态稳定的基本概念



正常运行时： $P_I = \frac{E_q V}{X_{d\Sigma I}} \sin \delta$ ， $X_{d\Sigma I} = X_d + X_{T1} + \frac{1}{2}X_L + X_{T2}$

切除一回线时： $P_{II} = \frac{E_q V}{X_{d\Sigma II}} \sin \delta$ ， $X_{d\Sigma II} = X_d + X_{T1} + X_L + X_{T2}$

由于 $X_{d\Sigma I} < X_{d\Sigma II}$ ，所以 $P_I > P_{II}$



第一种可能：a——>b——>c——>在 d 点， $\Delta\omega = 0$ ——>c——>以 c 点为中心振荡

第二种可能：a——>b——>c——>d——>超越 e 点——>继续加速，直至失去同步

由上述推理可知暂态稳定的判定为：根据电力系统受到扰动后发电机转子的相对

运动情况，即功角的变化情况来判断

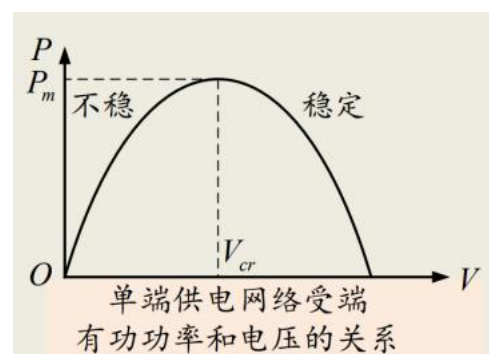
如果功角经过振荡后能稳定在某一个数值，表明发电机组之间恢复同步运行，系统具有暂态稳定性

如果电力系统在大扰动后，功角不断增大，表明发电机组之间已失去同步，系统失去了暂态稳定性

（4）电压稳定的基本概念

“电压崩溃”现象：长输电线的末端电压会随着负荷功率的增大而缓慢下降，当负荷功率达到一定的极限时，节点电压将发生不可控制的急剧下降（与负荷的动态特性密切相关，电压失稳时负荷失稳的一种外在表现）

在实际的电力系统中，电压失稳通常发生在系统遭受大扰动、发电机保持了暂态稳定性的故障后的运行状态



电压稳定的判据： $\frac{dP}{dV} < 0$

（5）频率稳定的基本概念（全是 PPT 原话）

电力系统的频率是由系统的有功平衡决定的

如果系统发生故障，或解列后的局部系统有功功率发生较大的缺额，频率就会大幅度的下降。如果不采取措施，会发生频率崩溃。

当系统频率发生变化时，发电机的出力和负荷都会发生变化（频率调节效应），用电力系统的频率调节效应系数来表示。

频率崩溃：电力系统或被解列后的局部系统出现较大有功功率缺额时频率大幅度下降，影响汽轮发电机组出力下降或跳闸，造成频率进一步下降，系统有功功率进一步减少的恶性循环，使电力系统或局部系统大停电

4. 电力系统稳定性的分析方法

① 按求解方法分：

- a. 直接法：直接分析或根据能量函数估计
- b. 时域仿真法：计算机时域仿真

② 根据干扰的大小采用不同的方法：

- a. 静态稳定：将非线性方程在平衡点线性化，利用分析线性系统的方法如特征根分析稳定性——小干扰

- b. 暂态稳定：非线性方程，没有通用的方法，一般通过时域仿真分析或能量法分析——大干扰