

## (上册)第一章 电力系统概述

- ◆ 电力系统（一次系统）分为三大部分：①发电机②电力网③负荷
- ◆ 单线图：用单线表示三相，反映电力系统各设备之间的联接关系
- ◆ 电力系统与发电厂的动力部分组成“动力系统”
- ◆ 电力系统运行特点与要求：(1)与国民经济、人民生活联系紧密(2)各种暂态过程时间非常短(3)电能的生产、输送、分配及消费同时进行，不能大量储存
- ◆ 电力系统运行的基本要求：(1)保证供电可靠性(2)保证良好的电能质量（电压+5%~-7%，频率±0.2~0.5Hz）(3)保证系统运行经济性
- ◆ 组成互联电力系统的优点：(1)减少系统总装机容量(2)减少备用容量(3)提高供电可靠性及电能质量(4)合理利用动力资源(5)便于安装大机组，提高劳动生产率；缺点：(1)由于互联设备都是超高压设备，投资大(2)系统构成复杂，运行难度大(3)并联回路数增加，故障电流相应增大。高压输电：压降小、损耗低、稳定性高
- ◆ 电力系统结线方式：①开式结线（无、有备用）②闭式结线
- ◆ 发电机端电压一般为 10~30kV，通过变压器升压到 110~750kV，高压线路远距离输电，通过变压器降压给负荷供电，大负荷直接从 6~110kV 上接收电能，民用负荷一般从 110/220V 单相电压上接收电能
- ◆ 35kV 县市内，110 跨县市，220 跨地区，500 跨省，750 跨大区
- ◆ 额定电压确定原则：
  - (1) 线路（电网）额定电压=用电设备额定电压
  - (2) 发电机额定电压=1.05 线路额定电压
  - (3) 升压变压器额定电压：一次侧=（与发电机相联：发电机额定电压 1.05）或（与线路相联：线路额定电压）；二次侧 = 1.10 线路额定电压；二次侧接 380V 时，额定电压为 400V
  - (4) 降压变压器额定电压：一次侧=线路额定电压；二次侧=(直接与用电设备相联、漏抗小，1.05)或(漏抗大 7.5%以上，1.10)
- ◆ 直流输电的优点：(1)适用于大系统互联(2)直流线路造价低(3)能量损耗小(4)控制快速简便
- ◆ 缺点：(1)换流站造价高，等价距离架空线 500km，电缆 50km(2)换流产生谐波，恶化电能质量，干扰通信系统(3)电流没有过零点，熄弧困难，HVDC 断路器研制困难
- ◆ 有功功率（消耗功率平均值），无功功率（交换功率峰值），反映网络内部与外部交换能量的能力的大小

- ◆ 视在功率  $S=UI$ ，复功率  $\dot{S}=\dot{U}\dot{I}$ ，对于三相 Y 接  $\dot{U}_L=\sqrt{3}\dot{U}_p e^{j30^\circ}$

$$\dot{S}=\sqrt{3}\dot{U}_L \dot{I}_L e^{-j30^\circ}$$

## 第二章 电力系统稳态模型

- ◆ 架空线路参数计算：

$$(1) r = \frac{\rho}{nS} \text{ 欧/公里 (n 每相分裂数, } \rho \text{ 欧} \cdot \text{毫米}^2/\text{公里, 铝 31.5)}$$

$$(2) x = 0.1445 \lg \frac{D_{eq}}{D_s'} \quad x = 0.1445 \lg \frac{D_{eq}}{r'} \quad \text{互几何均距}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}} \quad \text{自几何均距} \quad D_s' = \sqrt[n]{n R^{n-1} r'}$$

$$r' = e^{-\frac{1}{4}} r_0 = 0.779 r_0, \text{ 对于 LGJ, } r' \text{ 取 } 0.81 r_0$$

$$(3) b = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{eq}}{D_s}} \times 10^{-6} \quad b = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{eq}}{r_0}} \times 10^{-6} \quad \text{西门/公里,}$$

$$D_s = \sqrt[n]{n R^{n-1} r_0}$$

分布式到集中式：

$$\text{近似 } K_z = 1 + \frac{ZY}{6} \quad \text{精确 } K_z = \frac{\sinh \sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}} = \frac{e^{\sqrt{ZY}} - e^{-\sqrt{ZY}}}{2\sqrt{ZY}}$$

$$K_y = 1 - \frac{ZY}{12}$$

$$K_y = \frac{\tanh \frac{\sqrt{ZY}}{2}}{\frac{\sqrt{ZY}}{2}} = \frac{\cosh \sqrt{ZY} - 1}{\sqrt{ZY} \sinh \sqrt{ZY}} = \frac{\frac{e^{\sqrt{ZY}} + e^{-\sqrt{ZY}}}{2} - 1}{\frac{\sqrt{ZY}}{2} \frac{e^{\sqrt{ZY}} - e^{-\sqrt{ZY}}}{2}}$$

变压器双绕组：

$$(1) R_T = \frac{\Delta P_s U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \quad X_T = \frac{U_s \% U_N^2}{S_N} \times 10 \quad \text{欧(kW/kVA/kV)}$$

$$(2) G_T = \frac{\Delta P_0}{U_N^2} \times 10^{-3} \quad B_T = \frac{I_0 \% S_N}{U_N^2} \times 10^{-5} \quad \text{西门}$$

$$(3) \Delta P_0 = U_N^2 G_T \quad \Delta Q_0 = \frac{I_0 \% S_N}{100} \quad (\text{kW, kVar, kVA})$$

三绕组：

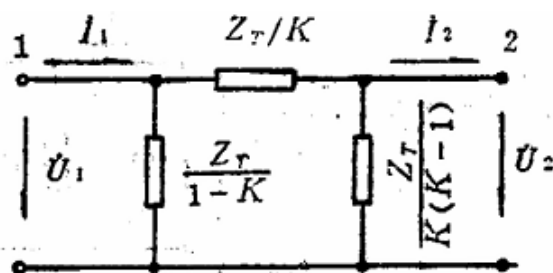
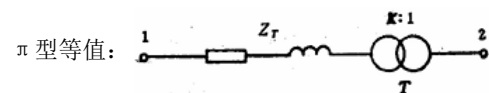
$$(1) \Delta P_{s1} = \frac{1}{2} [\Delta P_{s(1-2)} + \Delta P_{s(3-1)} - \Delta P_{s(2-3)}], \text{ 其余类推。}$$

绕组容量不等时，必须归算：绕组 2 为 50% 时，

$$\Delta P_{s(2-3)} = 4 \Delta P'_{s(2-3)}, \quad \Delta P_{s(1-2)} \text{ 同理为 4 倍}$$

$$(2) R_{T(100\%)} = \frac{\Delta P_{s \max}}{2 S_N^2} U_N^2 \times 10^3 \quad R_{T(50\%)} = 2 R_{T(100\%)}$$

(3) 短路电压与(1)同样变换，一般不用归算，但若所给值未经归算时则需按两倍归算。其余参数与双绕组相同



π 型等值电路不需要进行阻抗折合

多电压等级标幺制、平均标称电压：

额定	3	6	10	35	110	220	330	500
平均	3.15	6.3	10.5	37	115	230	345	525

## 第三章 电力系统潮流分析与计算

◆ 电压与功率损耗:

$$(1) \quad d\dot{U} = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2}, \quad 110\text{kV 及以下}$$

$$d\dot{U}_1 = \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} + j \frac{P_1 X - Q_1 R}{U_1} \quad \text{可忽略横分量}$$

$$(2) \text{ 串联 } \Delta \dot{S}_s = \Delta P_s + j \Delta Q_s = I^2 Z = \frac{S_s^2}{U_s^2} (R + jX)$$

(3) 并联功率损耗可直接以电压平方乘导纳计算 (注意不要忽略!)

(4) 输电效率: 末端有功输出与始端有功输入之比

(5) 计算电压损耗时特别注意 减去线路充电功率 ( $Q = -U^2(B/2)$ )

◆ 潮流计算:

(1) 给定同一点功率和电压: 直接计算; 不同点: 两步法, 先设全网为额定电压, 求功率损耗和分布; 再求电压损耗和分布

(2) 闭式网: 基本功率分布=自然功率+循环功率。自然功率: 杠杆原理, 阻抗取共轭! 循环功率: 环路电势 (断口取在参数归算至的电压等级)、注意方向; 从无功分点分解为开式网, 给定分点功率, 重新计算其余节点的功率和所有电压

$$\dot{S}_e = \frac{\Delta E U_N}{Z_\Sigma}; \quad \text{结果: } \dot{S}_{A1} = \frac{\sum_{m=1}^n \dot{S}_m \dot{Z}_m}{\dot{Z}_\Sigma} + \frac{U_N (\dot{U}_{A1} - \dot{U}_{A2})}{\dot{Z}_\Sigma}$$

◆ 网络矩阵:

(1) 存在接地点  $\rightarrow Y_n$  的逆存在  $Y_{ij} = \left. \frac{\dot{I}_i}{\dot{U}_j} \right|_{\dot{U}_k=0, k \neq j}$ , 物理意义: 除

节点 j 外其余节点都接地, 在节点 j 上加一单位电压时, 从节点

i 流向网络的注入电流:  $Z_{ji} = \left. \frac{\dot{U}_j}{\dot{I}_i} \right|_{\dot{I}_k=0, k \neq i}$ , 除节点 i 外其

余节点均无注入电流, 在节点 i 注入一单位电流时, 节点 j 的电压。  $Y_{ij} = -y_{ij}$

(2)  $Y_n$ 、 $Z_n$  均具有对角线优势、对称方阵

◆ 功率方程:

$$(1) \quad P_i = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j),$$

$$Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)$$

$$(2) \quad P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]$$

$$Q_i = -U_i \sum_{j=1}^n U_j [B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]$$

◆ N-R 法, 直角坐标

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \dots \\ \Delta P_{m+1} \\ \Delta U^2 \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{12} & \dots & H_{1m+1} & N_{1m+1} & \dots \\ J_{11} & L_{11} & J_{12} & \dots & J_{1m+1} & L_{1m+1} & \dots \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & \dots & H_{2m+1} & N_{2m+1} & \dots \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & \dots & J_{2m+1} & L_{2m+1} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{m+11} & N_{m+11} & H_{m+12} & \dots & H_{m+1m+1} & N_{m+1m+1} & \dots \\ R_{m+11} & S_{m+11} & R_{m+12} & \dots & R_{m+1m+1} & S_{m+1m+1} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta f_1 \\ \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \\ \dots \\ \Delta e_{m+1} \\ \Delta f_{m+1} \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_j} = -(G_{ij} e_j + B_{ij} f_j) \quad H_{ii} = -\sum_j (G_{ij} e_j + B_{ij} f_j) - G_{ii} e_i - B_{ii} f_i$$

$$N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_j} = B_{ij} e_i - G_{ij} f_j \quad N_{ii} = -\sum_j (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) - G_{ii} f_i + B_{ii} e_i$$

$$J_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_j} = N_{ij} \quad J_{ii} = \sum_j (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) - G_{ii} f_i + B_{ii} e_i \quad R_{ij} = \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial e_j} = 0 \quad R_{ii} = -2e_i$$

$$L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_j} = -H_{ij} \quad L_{ii} = -\sum_j (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + G_{ii} e_i + B_{ii} f_i \quad S_{ij} = \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial f_j} = 0 \quad S_{ii} = -2f_i$$

当  $Y_n$  中  $Y_{ij}$  为零时, 相应的  $H_{ij}$ 、 $N_{ij}$ 、 $J_{ij}$ 、 $L_{ij}$  也都为零。

◆ 极坐标形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \dots \\ \Delta P_{m+1} \\ \dots \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \dots \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1m+1} & N_{11} & N_{12} & \dots & N_{1m} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2m+1} & N_{21} & N_{22} & \dots & N_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{m+11} & H_{m+12} & \dots & H_{m+1m+1} & N_{m+11} & N_{m+12} & \dots & N_{m+1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ J_{11} & J_{12} & \dots & J_{1m+1} & L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1m} \\ J_{21} & J_{22} & \dots & J_{2m+1} & L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ J_{m+11} & J_{m+12} & \dots & J_{m+1m+1} & L_{m+11} & L_{m+12} & \dots & L_{m+1m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \dots \\ \Delta \delta_{m+1} \\ \dots \\ \Delta U_1 / U_1 \\ \Delta U_2 / U_2 \\ \dots \\ \Delta U_m / U_m \end{bmatrix}$$

$$H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad H_{ii} = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = Q_i + U_i^2 B_{ii}$$

$$N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} = -U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad N_{ii} = -U_i \sum_j U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - 2U_i^2 G_{ii} = -P_i - U_i^2 G_{ii}$$

$$J_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j} = U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad J_{ii} = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = -P_i + U_i^2 G_{ii}$$

$$L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} = -U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad L_{ii} = -U_i \sum_j U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) + 2U_i^2 B_{ii} = -Q_i + U_i^2 B_{ii}$$

◆ PQ 分解法: 简化条件: 电抗远大于电阻, 电压相角差很小,  $Q_i \ll U_i^2 B_{ii}$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 / U_1 \\ \Delta P_2 / U_2 \\ \dots \\ \Delta P_{n-1} / U_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1n-1} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2n-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{n-11} & B_{n-12} & \dots & B_{n-1n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \Delta \delta_1 \\ U_2 \Delta \delta_2 \\ \dots \\ U_{n-1} \Delta \delta_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 / U_1 \\ \Delta Q_2 / U_2 \\ \dots \\ \Delta Q_m / U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1m} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{m1} & B_{m2} & \dots & B_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \dots \\ \Delta U_m \end{bmatrix}$$

特点: 以两个线性方程组代替一个线性方程组, 系数矩阵在迭代过程中保持不变, 系数矩阵对称, 收敛较慢, 但精度相同

## 第四章 电力系统稳态运行与控制

◆ 无功平衡: (1) 电源发无功与无功负荷、无功损耗平衡 (2) 无功电源容量与运行需要无功和备用无功平衡 (3) 局部地区无功平衡

◆ 无功电源 (1) 同步调相机、电动机 (2) 静电电容器 (3) 静止无功补偿器

◆ 中枢点选择: (1) 大型发电厂高压母线 (2) 大型变电所二次母线 (3) 有大量地方负荷的发电厂母线

◆ 电压控制方式: 逆调压、恒调压、顺调压

◆ 电压控制措施: (1) 调发电励磁 (2) 调变压器变比 (3) 并联无功补偿 (改变功率分布) (4) 串联无功补偿 (改变网络参数); 在等容量情况下, 并补减少线路上流通的无功, 降损效果较强, 串补直接减少线路的电压损耗, 调压效果较强。

◆ 有功平衡两层含义: (无功平衡前两层)

◆ 一次调频 (调速器)、二次调频 (调频器)

◆ 发电机和系统的功频静特性 (两者含义不同)

◆ 经济调度: 前提 (满足负荷需求、保证电力安全和质量)、目标 (使电力系统运行经济性达到最优)

◆ 传统 ED 等微增率 (IC) 准则: 最优解中各机组发电成本 IC 相等

◆ 考虑出力上下限: 先求 IC 相等时各机组出力, 将搭界机组固定在界上, 其余机组再求 IC 相等的出力, 依此进行下去得最终结果。

## (下册) 第二章 同步发电机的数学模型及机端三相短路分析

◆ 理想电机: (1) 定子 abc 三相绕组结构完全相同, 互相对称, 空间相隔 120 度电角度 (2) 转子结构相对于 d 轴及 q 轴完全对称 (3) 定子、转子铁心同轴且表面光滑 (忽略定、转子上的齿槽), 忽略齿谐波 (4) 定子、转子绕组电流产生的磁动势在气隙中是正弦分布的, 忽略高次谐波 (5) 磁路是线性的, 无饱和, 无磁滞和涡流损耗, 忽略集肤效应

◆ 理想电机模型: 定子侧 abc 绕组; 转子侧 d 轴 (f、D 绕组), q 轴 (Q 绕组), q 轴沿转子旋转方向领先 d 轴 90 度电角度 (18 未知数)

◆ 定转子绕组自感、互感特点 (基于理想同步电机的假设):

(1) 定子绕组自感与互感均为  $2\theta_a$  的周期函数, 定子绕组自感为正而互感为负, 周期为  $\pi$  电角度

(2) 转子绕组的自感与互感均为常数

(3) 定子绕组与转子绕组之间的互感是  $\theta_a$  的周期函数, 周期  $2\pi$

◆ 派克变换 (将定子 abc 坐标变换到与转子同步旋转的 dq0 坐标)

(1) 经典:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_a & \cos\theta_b & \cos\theta_c \\ -\sin\theta_a & -\sin\theta_b & -\sin\theta_c \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_a & -\sin\theta_a & 1 \\ \cos\theta_b & -\sin\theta_b & 1 \\ \cos\theta_c & -\sin\theta_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix}$$

(2) 正交:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_a & \cos\theta_b & \cos\theta_c \\ -\sin\theta_a & -\sin\theta_b & -\sin\theta_c \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_a & -\sin\theta_a & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta_b & -\sin\theta_b & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta_c & -\sin\theta_c & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix}$$

◆ 有名值形式派克方程 (磁链方程):

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & M_f & M_D & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & M_Q \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}M_f & 0 & 0 & L_f & M_R & 0 \\ \frac{3}{2}M_D & 0 & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_Q & 0 & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

◆ 标么形式派克方程:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ u_f \\ u_D \\ u_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p\psi_d - \omega\psi_q \\ p\psi_q + \omega\psi_d \\ p\psi_0 \\ p\psi_f \\ p\psi_D \\ p\psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

(1)

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & 0 & 0 & X_{ad} & X_{ad} & 0 \\ 0 & X_q & 0 & 0 & 0 & X_{aq} \\ 0 & 0 & X_0 & 0 & 0 & 0 \\ X_{ad} & 0 & 0 & X_f & X_{ad} & 0 \\ X_{ad} & 0 & 0 & X_{ad} & X_D & 0 \\ 0 & X_{aq} & 0 & 0 & 0 & X_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

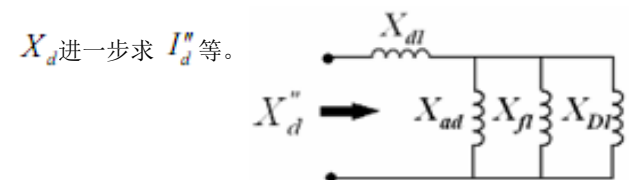
(2)

发电机机端短路后 q 轴绕组短路电流为零, 零轴绕组短路电流为零, 只有 d 轴绕组有短路电流, 故分析空载发电机机端三相短路只需要考虑 d 轴方向各绕组即 d、f、D 绕组的相互影响

由  $i_d(t) = (I_d'' - I_d')e^{-t/T_d''} + (I_d' - I_d)e^{-t/T_d'} + I_d$  得

$$I_d(t) = (I_d' - I_d')e^{-t/T_d''} + (I_d' - I_d)e^{-t/T_d'} + I_d$$

◆ 电流衰减顺序: D 绕组、f 绕组。根据电抗的串并联关系求得  $X_d''$ 、 $X_d'$ 、



◆ 两个时间常数分别求  $X_d''$  和  $X_d'$  得到, D 绕组:  $T_d'' = \frac{X_D''}{r_D}$

$$X_d'' = X_{Dl} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{dl}} + \frac{1}{X_{fl}}}, \quad X_d' = X_{fl} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{dl}}}$$

◆ 通常认为故障前发电机定子开路, 则  $U_{A0} = E'_{q0} = E_{q0}$  ( $=1$ )

$$i_a(t) = i_{a+}(t) + i_{a-}(t) = -\frac{E'_{q0}}{X_d'} e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_d(t) \cos\theta_a$$

( $\theta_a(0) = 0$  时),  $i_d(t)$  如上

## 第三章 电力系统故障分析与计算

◆ 对称故障 (任选功率基值, 电压基值取平均标称电压), 短路电流

$$\text{周期分量/短路容量 } I_{F*} = \frac{U_{*}}{X_{\Sigma*}} = \frac{1}{X_{\Sigma*}} \quad (\text{电源至短路点总电抗})$$

◆ 非周期分量  $i_{\Delta}(t) = \sqrt{2}I_F e^{-\frac{t}{T_a}}$ , 半个周期 (0.01s) 后达到冲击电

$$\text{流 } \sqrt{2}I_F(1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}}), \text{ 有效值 } \sqrt{I_F^2 + (\sqrt{2}I_F e^{-\frac{0.01}{T_a}})^2}$$

◆ 近点短路: 考虑超暂态电抗 (加入总电抗) 和内电势, 其余相同

$$\text{电源变换 (戴维南)} \quad \dot{E}_{eq} = \left( \frac{\dot{E}_1}{X_1} + \frac{\dot{E}_2}{X_2} + \dots + \frac{\dot{E}_n}{X_n} \right) X_{eq}$$

◆ 转移阻抗 (星-三角变换公式)

◆ 对称分量法:  $\alpha = e^{j2\pi/3}$  — 任何一组三相电压、电流均可分解为正



负零序分量；三个分量互相独立解耦、可迭加；三相参数对称

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_a \\ \dot{f}_b \\ \dot{f}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{f}_{a0} \\ \dot{f}_{a1} \\ \dot{f}_{a2} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{f}_{a0} \\ \dot{f}_{a1} \\ \dot{f}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{f}_a \\ \dot{f}_b \\ \dot{f}_c \end{bmatrix}$$

- ◆ 发电机  $X_{g1}$  可取  $X_d, X'_d, X''_d$ ,  $X_{g2} = \frac{1}{2}(X''_d + X''_q)$ ,  $X_{g0} = X_d + 3X_n$ , Y0 侧加阻抗, 零序增加  $3Z_n$ ,  $\Delta$  侧增加  $1/3Z_n$
- ◆ 输电线路  $X_1=X_2=X-X_m$ ,  $X_0=X+2X_m$ , 负荷  $Z_1=Z_2=Z$ ,  $Z_0=Z+3Z_n$
- ◆ 变压器正负序均为  $X_p+X_s$ , 零序  $\Delta$  竖边地,  $Y_0$  横边通,  $Y$  两边不通
- ◆ 简单电力系统: 单相接地 (序网串联)、两相短路 (正负序并联, 零序独立)、两相短路接地 (序网并联), 附加阻抗、比例系数:

两相短路	(除 $X_1$ 外的附加阻抗) $X_2+(Z_f)$	$\sqrt{3}$
单相短路	$X_2+X_0+(3Z_f)$ (经阻抗短路)	3
两相短路接地	$\frac{X_2X_0}{X_2+X_0}$ ( $jX_0$ 换为 $jX_0+3Z_f$ )	$\sqrt{3}\sqrt{1-\frac{X_2X_0}{(X_2+X_0)^2}}$

- ◆ 单相短路有  $\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2}$ , 两相直接短路接地有

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{a1} \left( a^2 - \frac{X_2+aX_0}{X_2+X_0} \right), \quad \dot{I}_c = \dot{I}_{a1} \left( a - \frac{X_2+a^2X_0}{X_2+X_0} \right)$$

- ◆ 复杂电力系统: 戴维南 (开路电压、等效阻抗)、分解计算 (负序、零序用分流算, 正序分别以电压源和电流源计算后叠加)
- ◆ 非全相运行: 单相断线-两相短路接地 (从断口看入戴维南等效, 序网并联), 两相断线-单相短路 (序网串联)

第四章 电力系统稳定性分析与继电保护基础

- ◆ 按干扰大小分类: 静态稳定、暂态稳定; 按引起稳定问题的原因分类: 功角稳定性、电压稳定性、负荷稳定性
- ◆  $T_J$  的物理意义: 发电机在单位转矩的作用下, 转子从静止状态加速到额定状态所需要的时间
- ◆ 转子运动方程:

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0, \quad T_J \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_E - P_D = \Delta P$$

- ◆ 功角特性: (1)隐极机:  
$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta, \quad P_{E'_q} = \frac{E'_q U}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \frac{x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma} x'_{d\Sigma}} \sin 2\delta$$
- (2)凸极机:  $E'$  恒定时同隐极  
$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{x_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta \quad (\text{加'})$$
- ◆ 静态稳定判据:  $S = \frac{dP_E}{d\delta} > 0$  (同步功率系数)
- ◆ 提高静态稳定的措施: (1)采用先进的自动励磁调节系统(2)减少系统元件的电抗 (①提高电压等级②采用分裂导线③串联电容补偿) (3)改善系统网络结构

◆ 暂态稳定  $x_{II}$  接入附加阻抗,  $X_{II} = X_k + X_j + \frac{X_k X_j}{X_{\Delta}}$

◆ 等面积定则: abcd 的面积为发电机运行点从 a 点转移到 c 点的过程中转子相对运动的动能的增加, 为加速面积, defg 的面积为从 e 点到 f 点的过程中转子动能的减少量, 减速面积。加速面积等于减速面积。

◆ 由  $\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_0 - P_{II}) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_h} (P_{III} - P_0) d\delta$  求出  
$$\delta_{cr} = \cos^{-1} \left( \frac{P_0(\delta_h - \delta_0) + P_{III} \cos \delta_h - P_{II} \cos \delta_0}{P_{III} - P_{II}} \right)$$

- ◆ 提高暂态稳定性的措施: (1)故障的快速切除和自动重合闸装置的应用(2)提高发电机输出电磁功率(3)减少原动机输出机械功率
- ◆ 继电保护四大要求: 可靠性、选择性、快速性、灵敏性
- ◆ 最大运行方式: 最大容量、三相短路; 最小方式: 两相短路

◆ 一段保护 (电流速断保护):  $I'_{d\bullet 4} = K'_K I'_{dB \max}$  原则: 动作电流大于下一线路首端可能出现的最大短路电流; 校验: 以最小运行方式下两相短路电流  $K'_{lm3} = \frac{I'_{d3 \min}}{I'_{d\bullet 3}} \geq 2$ 。优: 简单可靠动作迅速,

缺: 受运行方式影响, 在某些运行方式下可能无保护范围

◆ 二段保护 (限时电流速断):  $I''_{d\bullet 4} = K''_K I'_{d\bullet 3}$ , 整定原则: 下一线路保护的第一段电流保护区末端短路时不动作; 功能: ①切除速断保护范围以外的故障②作为速断保护的后备保护; 要求: ①任何情况下保护线路全长②具有足够的灵敏度③具有最小的动作时限; 校验:  $K''_{lm} = \frac{I''_{d \min}}{I''_{d\bullet 4}} \geq 1.3 \sim 1.5$

◆ 三段保护 (定时限过电流保护):  $I'''_{d\bullet 4} = K'''_K I_{fz \max}$ , 原则: 躲开最大负荷电流; 功能: 本线路一二段的近后备和下一线路远后备; 要求: 最恶劣情况可靠切除故障; 电动机负荷:

$$I'''_{d\bullet 4} = \frac{K'''_K K_{zg}}{K_{fh}} I_{fz \max}; \quad \text{校验: } K'''_{lm} = \frac{I''_{d \min}}{I'''_{d\bullet 4}} \geq 1.2$$

