

上篇电力系统稳态分析:

【电力系统基本概念】：

电力系统：完成电能生产、输送、分配、消费统一整体。发电机、变压器、电力线路、负荷组成三相交流动力系统。电力系统，发电厂动力部分、热力网

一次系统：发电机、电力网络、负荷（高电压）

二次系统：保证一次系统安全可靠经济运行的信息

系统及其操作机构（低电压）

单线图：单线代表三相，反映电力设备间电联系

运行特性：密性、短促性、同时性

要求：供电可靠性高、电能质量高（电压+5~-7%、频率±0.2~0.5Hz、波形）经济性好、环境友好、智能化。

电力网：输电线路、变电站设备（变压器开关母线）

电气接线：电力设备间电气联系

地理接线：电力设备相对地理位置及联接路径

开式：配电网，无备用简单方便不可靠，有备用可靠

闭式：输电网，有备用可靠经济调度复杂

电能生产：火电70%、水电10%、核电大于10%、新能源：抽水蓄能电厂可以削峰填谷；新能源包括太阳能风能地热能潮汐能燃料电池核聚变等。

【远距离大容量输电与互联】：

高电压原因：容量S=UI，降压ΔU=IZ，损耗P₁=I²R，高电压输电容量大，降压小，损耗小，且稳定性高。

设计：考虑绝缘，发电机10~30kV，变压器升压110~750kV；大负荷6~110kV，民用电压110/220V单相

联络线：功率交换，提高可靠性，扩大规模

互联优点：减少总装机容量（错峰发电）；减少备用容量（同时故障检修概率小）；提高供电可靠性及电能质量（故障异常相互支援）；合理利用动力资源，可经济运行（水、小火、经济分配）

问题：超高压互联设备投资大；规模大运行难度大局部危及整体安全风险大；互联回路多故障电流大

我国：集中管理，分层控制（五级调度国电省市县）电压等级35kV县市，110跨县市，220跨地区，500跨省，750跨大区。

直流输电：适于大系统互联；线路造价低；能量损耗小；控制快速简便；**缺点**：换流站造价高；换流谐波电流不过零，熄弧困难，HVDC断路器研制困难

【额定电压确定】：原则-5%的波动范围

原因：标准化，最佳技术经济性能

线路（电网）额定电压 = 用电设备额定电压

发电机额定电压 = 1.05 线路额定电压

升压变压器：一次侧 = 发电机额定电压（与发电机相联1.05）= 线路额定电压（与线路相联）

二次侧 = 1.10 线路额定电压

降压变压器：一次侧 = 线路额定电压

二次侧 = 1.1 倍线路额定，30kV以内1.05

降压380V线路，额定取400V。

【复功率】：

功率：p(t)=Uicosp(1+cos2ωt)+Uisinp sin2ωt

p=等效电阻耗能速率，q=等效电抗能量交换速率

复功率S=U∠φ，视在功率S=UI

有功功率P：周期2ωt，均值Uicosp，消耗功率均值

无功功率Q：周期2ωt，均值0，峰值Uisinp，与外界交换能量能力大小，实际未消耗

三相复功率S₃=3U_pI_p=√3U_LI_Le^{j(φ-30°)}

网络吸收感性无功Q>0，无功负荷；Q<0，无功电源

【电力系统负荷】：

电力系统负荷：电功率总和、也称综合用电负荷。发电负荷+产用电=供电负荷=综合用电负荷+网损

网损=5%~10%的负荷，最大量-异步电动机

日负荷曲线：年最大负荷曲线/年持续负荷曲线

峰荷，谷荷，均荷，峰谷差：年最大负荷利用小时数

【架空线参数和等值电路】：

特殊问题：三相循环换位解决排列不对称，分裂导线减少电抗和电晕损耗

型号：标号-数字（截面积）

分布参数电路：单位长/km：

r = ρ/nS Ω/km（交流发热）

r₁ = r₂₀[1 + α(t - 20)] 温度修正

g = 0.1445lg(D_{eq}/D_S) Ω/km（电流效应）

x = ΔP_g/U² × 10⁻³ S/km，常忽略（绝缘漏电电晕）

b = 7.58/lg(D_{eq}/D_S) × 10⁻⁶ S/km（电压效应）

其中：ρ电阻率，单位Ω·mm²/km，铜18.8 铝31.5

n分裂数，r₀导线半径，R分裂圆周半径，D相距

几何均距D_{eq}=√[D₁₂D₂₃D₁₃]

几何平均等值半径D_s'=√[nRn^{1-r}]，D_s=√[nRn^{1-r}]

等值半径r'=0.779r₀，钢绞r'=0.81r₀

如三相电流之和不为0，则LC都要变化。

分裂导线电抗减小x=0.4，电纳增加b=2.6×10⁻⁶。

集总参数电路：I₁流入二端口，I₂流出二端口

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{ZY} & \sqrt{ZY} \sinh \sqrt{ZY} \\ \sqrt{Y/Z} \sinh \sqrt{ZY} & \cosh \sqrt{ZY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

Z = zL, Y = yL, L为线路长度

π型等值电路：一横Z，两竖Y/2→修正系数

1. L>750km

$$\begin{cases} Z' = Z \cdot \sinh \sqrt{ZY} / \sqrt{ZY} \\ Y'/2 = Y/2 \cdot \tanh \sqrt{ZY}/2 / \sqrt{ZY}/2 \end{cases}$$

2. L≤300km（泰勒展开）

$$\begin{cases} Z' = Z \cdot (1 + ZY/6) \\ Y'/2 = Y/2 \cdot (1 - ZY/12) \end{cases}$$

3. L≤300km：取级数前1项，不考虑分布；

4. L≤100km，电压等级≤35kV：忽略并联导纳

$$\sinh/\cosh \theta = \frac{e^{\theta} + e^{-\theta}}{2}, \sqrt{a + jb}/\sqrt{c \angle \varphi} = \sqrt{c} \angle \frac{\varphi}{2}$$

【变压器等值电路】：

单位 kW, kV, kVA, 变比 K

短路试验：损耗ΔP_S，电压U_S%

空载试验：损耗ΔP₀，电流I₀%

U_S% = U_S/U_N × 100

I₀% = I₀/I_N × 100

R_T = ΔP_SU_N²/S_N² × 10³Ω, X_T = U_S%U_N²/S_N × 10Ω

G_T = ΔP₀/U_N² × 10⁻³S, B_T = I₀%S_N/U_N² × 10⁻⁵S

等值电路为YY接法，单相值。

励磁法：ΔS = ΔP₀ + jΔQ₀ = U_N²G_T + jI₀%S_N/100

【三绕组变压器】：

实验：1次开路，3次短路

折合：短路额定电流取较小值。

ΔP_S折合：U_S%标准已归算，（若归算系数为S_N之比）

ΔP_{S(a-b)} = [S_N / min(S_{Na}S_{Nb})]²ΔP_{S(a-b)}（假想实验）

计算：仅列出1绕组，23绕组同理。

ΔP_{S1} = 1/2 [ΔP_{S(1-2)} + ΔP_{S(3-1)} - ΔP_{S(2-3)}]

U_{S1}% = 1/2 [U_{S(1-2)}% + U_{S(3-1)}% - U_{S(2-3)}%]

【变压器π型等值电路】：

单相：
$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_T/K \\ 1/K & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

Z_T等值阻抗，K可为复数。

π形：高压侧Z₁为负，低压Z₂为正

$$\begin{cases} Z_1 = Z_T/K \\ Z_2 = Z_T/K(1-K) \end{cases}$$

三绕组变压器：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix}$$

【电力系统标么制】：

单相：S_B = U_BI_B, U_B = Z_BI_B, R_B = X_B = Z_B

三相：S_{3B}=√3U_{LB}I_{LB}=3U_{PB}I_{PB}, U_{LB}=√3Z_BI_{LB}

基值选取规律：满足约束条件，三相与单相一致，2

约束条件，4基值自由由度2。先选S_{3B}, U_{LB}。

变压器R_T = ΔP_S/X_T = U_S%, G_T = ΔP₀/B_T = I₀%。

标么值换算：X_B = X_r / X_r, X_r / X_B

逐级归算法：精确但麻烦；

各选电压法：统一选S_B，电压基值取平均标称电压

U_{av}，变压器变比基值K_B = U_{N1}/U_{N2}。

近似计算法：所有元件U_N = U_{av}。

【负荷静态特性】：

有功负荷电压调节效应系数，K_{PV} = dP/dU

无功负荷电压调节效应系数，K_{QV} = dQ/dU > K_{PV}

有功负荷频率调节效应系数，K_{PF} = dP/df

恒定功率，恒定阻抗表示，函数关系表示：

线性P_D = P_{D0} + (U - U_N)K_{PV}

二次P_D = P_{D0} + [a_P(U/U_N)² + b_P(U/U_N) + c_P]

平方恒定阻抗，一次恒定电流，常数恒定功率

【潮流计算】：画图求解

潮流：系统中各节点电压，各支路功率的稳态分布。

纵分量+横分量；S与U是同侧量。

dU₁ = (P₁R + Q₁X)/U₁ + (P₁X - Q₁R)/U₁ = ΔU₁ + jδU₁

dU₂ = (P₂R + Q₂X)/U₂ + (P₂X - Q₂R)/U₂ = ΔU₂ + jδU₂

→ X >> R, ΔU₂ ≈ Q₂X/U₂, δU₂ ≈ P₂X/U₂

PQ解耦特性：电压幅值差ΔU主要由Q产生，Q从U高

节点流向U低节点；相角差δ主要由P产生，P从δ超前

节点流向δ滞后节点。（条件X >> R, R ≈ 0，高压）

电压损耗：U₁ - U₂；电压偏移：(U₁ - U₂)/U_N

电压降落：dU₁ = U₁ - U₂

功率损耗：ΔS_S = P_S² + Q_S² / U_S² · (R + jX)

ΔS_P = -jU² · B/2

线路损耗：ΔS_L = S₁ - S₂ = ΔS_S + ΔS_{P1} + ΔS_{P2}，

输电效率：η_L% = P₂/P₁ × 100%（无功不满足）

【开式网潮流计算】：

给定同一点U/S：各个节点U/S递推计算。

U₁/S₁→dU₁/ΔS₁/ΔS₂→U₂/S₂

给定不同点U/S：1假设全网为额定电压；2不计压降

前代计算功率损耗；3由始端电压和功率损耗回

后代计算电压；4反复迭代至收敛（工程不迭代）

【闭式网】：

方法：1求全网等值电路；2全网额定电压不计损耗。

求基本功率分布；3依无功功率分点分解为两个

开式网，分别依不同点U/S模型计算。

基本功率=自然功率分布+循环功率分布

循环功率：环网两端电压不等产生，变压器不匹配。

$$S_c = \frac{U_N(\bar{U}_{A1} - \bar{U}_{A2})}{Z_{\Sigma}} = \frac{U_N \Delta E}{Z_{\Sigma}}$$

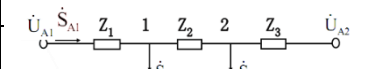
方向一般顺时针。注意**共轭量**。

取值ΔE可在任意位置开口，并归算阻抗至U_N

利：可调整潮流分布，强制调整（可控性）

弊：不送入负荷产生功率损耗（经济性）

两端供电网：



$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3, \bar{Z}_{11} = \bar{Z}_3, \bar{Z}_{\Sigma} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3$$

基本功率分布：（类似力矩平衡公式）

$$S_{A1} = \frac{S_1 \bar{Z}_1 + S_2 \bar{Z}_{11}}{\bar{Z}_{\Sigma}} + U_N(\bar{U}_{A1} - \bar{U}_{A2})/\bar{Z}_{\Sigma}$$

功率分点：功率由两侧向其供给的节点。

有功分点▼，无功分点▽

环形网：某一节点打开变为电压相等两端网

【网络方程，网络矩阵，功率方程】：

等值电路：全部变为π形。

网络方程：节点方程/回路方程。

节点方程：I_n = Y_nU_n, Z_n = Y_n⁻¹, U_n = Z_nI_n

Y_n：复数对称稀疏对角线优势；有接地非奇异

Y_{ij} = y_{ij0} + Σ y_{ijk}, Y_{ijj} = -y_{ijj}（节点导纳矩阵）

回路方程：Z_n = Y_n⁻¹, U_n = Z_nI_n

Z_n：复数对称满阵对角线优势；无接地不存在。

加流求压或加压求流，勿直接求逆。

功率方程：以节点注入功率代替节点注入电流。

直角坐标：Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}, U_i = e_i + jf_i

计算电流：P_i - Q_i = U_iΣ_{j=1}ⁿ Y_{ijj}U_j

P_i = e_iΣ_{j=1}ⁿ (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_iΣ_{j=1}ⁿ (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)

Q_i = f_iΣ_{j=1}ⁿ (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_iΣ_{j=1}ⁿ (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)

n母线2n个实数方程

P_i = U_iΣ_{j=1}ⁿ U_j[G_{ij}cos(δ_i - δ_j) + B_{ij}sin(δ_i - δ_j)]

Q_i = -U_iΣ_{j=1}ⁿ U_j[B_{ij}cos(δ_i - δ_j) - G_{ij}sin(δ_i - δ_j)]

节点类型：节点变量P_iQ_iU_iδ_i，知2求2（4n变量）

PQ节点（最多，n-r-1）/PV节点（电压控制，r）

Vδ节点（功率平衡，1）

迭代方程：直角坐标2n-2/极坐标2n-2-r

ΔP_i = P_{ic} - (e_ia_i + f_ib_i) = 0, PQ, PV(n-1)

ΔQ_i = Q_{ic} - (f_ia_i - e_ib_i) = 0, PQ(n-r-1)

ΔU_i² = U_{ic}² - (e_i² + f_i²) = 0, PV(r) X_{ic} = X_{GL} - X_{PL}

【潮流方程解法综述】：

雅可比(Gauss)法：计算简单收敛性差收敛速度慢。

高斯-赛德尔迭代法：最新迭代值直接代入求解。

Y法收敛性差，省内存，计算量少，PV处理难

Z法收敛性好，占内存，计算量大，PV处理难

牛顿-拉夫逊法：逐次线性化迭代。

初值要求严格，每次迭代重新计算J阵，稀疏性。

计算量大大降低，PV节点越界换为PQ。

f(x^(v)) = f^(v)Δx^(v), x^(v+1) = x^(v) - Δx^(v)

PQ分解法：3个简化基础，B是常数系数矩阵，迭代次

数多于NR，计算速度快，PQ解耦特性，收敛性较差

但收敛精度与NR相同（判别条件相同）。

【N-R法直角坐标】：泰勒展开取线性部分

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta U^2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial e} & \frac{\partial \Delta P}{\partial f} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial e} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial f} \\ \frac{\partial \Delta U^2}{\partial e} & \frac{\partial \Delta U^2}{\partial f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \\ R & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n-1 \\ n-1 \\ r \end{bmatrix}$$

$K_s = K_G \cdot \frac{P_{GN}}{P_{DN}} + K_{D_s} = K_{G_s} \rho + K_{D_s}$

现代电力大系统控制原则: 1.带调速器均参与一次调频; 2.二次调频部分电厂承担, 主调频机组 AGC.

AGC要求: 足够可调容量; 一定调整速度; 安全经济

【经济运行与控制】:

发电成本特性曲线 $C(P_G)$: 单位时间发电燃料成本 $C(\text{¥/h})$ 与发电出力 $P_G(\text{MW})$ 关系, 近似二次曲线, 系数均正. $C(P_G) = a + bP_G + cP_G^2$

成本微增率 λ : 增加单位出力, 单位时间增加成本.

目标函数: $\min C_T = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi})$

约束条件: 等式约束-有功潮流方程; 不等式约束-发电机出力 $P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}$, 线路输送功率 $|P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max}$

传统 ED 微增率准则: 如存在最优解, 所有机组IC相等. **考虑出力限制**, 机组出力堵界在界上运行, 剩余机组继续等IC.

证明: 拉格朗日乘子法, 加入 λ 构造L函数, 偏导=0.

负荷分配: 充分利用水资源降低火电成本.

下篇电力系统暂态分析:

【暂态过程基本概念】:

暂态过程: 从一个稳态向另一个稳态的过渡过程. 一波过程, 电磁暂态过程, 机电暂态过程.

电力系统事故: 03/08/14 美加大停电, 96/7/2 美国西部大停电, 96/11/19 北京电网停电.

短路原因: 电气设备载流部分的绝缘破坏.

短路后果: 产生大电流, 造成低电压, 干扰稳定运行. 架空线路概率最高; 单相接地最多, 三相短路最为严重威胁最大.

无穷大电源 t0 时刻短路电流:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}U}{|Z|} \sin(\omega t + \varphi - \theta)$$
$$- \frac{\sqrt{2}U}{|Z|} e^{-\frac{R}{L}(t-t_0)} \sin(\omega t_0 + \varphi - \theta)$$
$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$$

理想电机: abc绕组完全相同, 定子发电惯例, 正电流产生负磁链; 转子结构相对于 dq 完全对称. d 轴沿转子旋转方向领先 d 轴 90°; 忽略谐波, 磁路线性; d 轴励磁绕组f, 阻尼绕组D, q 轴阻尼绕组Q. 磁链正方向指向定子.

暂态 abc 数学模型: abcFD0 的顺序列写矩阵.

θ_a 是 d 轴领先 a 相的角度.

$\theta_a = \theta_0 + 120^\circ = \theta_c - 120^\circ$

绕组方程: 绕组电压方程/磁链方程. **6绕组18方程**

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_d \\ u_f \\ u_D \\ u_Q \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$
$$u_D = u_Q \equiv 0$$
$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

电感参数: $L_{aab/bcc} = L_s + L_l \cos 2\theta_{a/b/c}$; π

$L_{abb/bca} = -L_s - L_l \cos 2(\theta_{a/b/c} + 30^\circ)$; π

$L_{ff/DD/QQ} = L_{D/Q}/Q$ $L_{fD} = M_R$, $L_{fQ}/DQ = 0$

$L_{af/ab} = M_{fD} \cos \theta_a$, $L_{aQ} = -M_Q \sin \theta_a$; 2π

推导: $\Phi_a = F_a \lambda_{aa}$, $L_{aa} = \Psi_a / -i_a|_{t=0}$

【Park 变换】: abc 坐标变换到气隙同步旋转 dq0

目的: 将 abc 坐标时变模型转化为非时变.

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

正文化: 2/3 变 $\sqrt{2/3}$, 1/2 变 $1/\sqrt{2}$. 变换矩阵时变的. 线性变换. 经典等幅值, 正交等功率.

有名值电磁暂态方程: 电压/磁链(互感不可逆)

切割电势项. 2. dq 自磁链全链接, 互磁链为 0.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ u_f \\ u_D \\ u_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p\psi_d - \omega\psi_q \\ p\psi_q + \omega\psi_d \\ p\psi_0 \\ p\psi_f \\ p\psi_D \\ p\psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & M_f & M_D & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & M_Q \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ 3/2 M_f & 0 & 0 & L_f & M_R & 0 \\ 3/2 M_D & 0 & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 3/2 M_Q & 0 & 3/2 M_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

标么化:

原则-方程形式一致; 互感完全可逆; 保留传统参数

$u_{dQ0B} = \sqrt{2}U_R(I_R \text{ 定子绕组额定相电流有效值})$

$u_{dQ0B} = \sqrt{2}U_R(U_R \text{ 定子绕组额定相电压有效值})$

$S_{dQ0B} = 3U_R I_R = 3/2 u_{dQ0B} i_{dQ0B}$

$RXZ_{dQ0B} = \sim, L\omega\Psi \sim$

转子绕组 S_B 相等, i_B 需要 $X_{ad}/\omega_B M_{fD/Q}$ 修正.

标么值方程:

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

$X_d = X_{ad} + X_{di}$, $X_q = X_{aq} + X_{qi}$, 以此类推.

【短路分析】: 超暂态与暂态过程

假设: 1 只考虑 d 轴电流, 即 dFd 绕组的影响. 2 励磁绕组时间常数远大于阻尼绕组 D. 3 $p\psi_d = 0$, $p\psi_q = 0$, $r_{id} = 0$.

超暂态过程: 阻尼绕组 D 电流衰减.

暂态过程: 忽略阻尼绕组 D, 励磁绕组 f 电流衰减.

稳态过程: 仅有 d 绕组.

X_d' : 短路瞬间, 定子侧看 d 轴方向三绕组电抗.

类似三绕组变压器.

$$X_d'' = X_{di} + \frac{1}{1/X_{ad} + 1/X_D + 1/X_f} \quad X_d'' < X_d' < X_d$$
$$X_d' : \text{D 绕组决定定子电流衰减 } T_d'' \quad T_d'' = X_D''/r_D$$
$$X_d' : \text{忽略阻尼绕组} \quad X_d' = X_{di} + \frac{1}{1/X_{ad} + 1/X_f}$$

X_f' : f 绕组, $T_d' = X_f'/r_f = X_d'/X_d \cdot T_{d0}$, $T_{d0} = X_f'/r_f$

物理意义: T_d' 定子励磁绕组均短路 D 绕组时间常数

短路电流表达式: 转子直流→交流, 不突变→直流

$$i_d(t) = \left(\frac{E_{q0}'}{X_d'} - \frac{E_{q0}}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{E_{q0}'}{X_d'} - \frac{E_{q0}}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{E_{q0}'}{X_d}$$
$$i_q(t) = i_0(t) = 0 \rightarrow i_{-a}(t) = I_d(t) \cos \theta_a$$

$i_{-a}(0^+)$: 短路瞬间 a 相电流不能突变, 因此感应出直流分量 $i_{-a}(0^+) = -I_d' \cos \theta_{a0}$, 衰减时间常数 T_{da}

总电流: $i_a(t) = -I_d' \cos \theta_{a0} e^{-t/T_{da}} + I_d(t) \cos \theta_a$

空载电势: $E_q = X_{ad} i_f$, 定子电势测转子电流.

暂态电势: $E_q' = X_{ad}/X_f \cdot \Psi_f$. 磁链不突变.

【三相短路计算】:

计算方法: 1 任选 S_B , 各选 U_{av} 平均标称电压. 2 计算标么值给出等值电路. 3 求电源到短路点总电抗 X_{Σ} . 一般用 X_d'' . 4 设电源 $U_{cs} = 1$, 无穷大电源. 5 短路点电流周期分量 $I_{F*} = 1/X_{\Sigma*}$, $I_F = -\sqrt{2}I_F \cos \theta$

$U_{av} = 1.05U_N$, 35-7, 110-5, 220-3, 330-45, 500-25

短路容量: $S_F = \sqrt{3}U_{av} I_{F*}$, $S_{F*} = I_{F*}^2 = 1/X_{\Sigma*}$

反映某一点电力系统强弱/与电源联系紧密程度, S_F 大电力系统强/联系紧密.

S_F 相同, 同条件下短路电流不一定相同.

非周期分量: $i_{-a}(0) = -i_f(0) = \sqrt{2}I_F$ (最大值)

$i_{-a}(t) = i_{-a}(0)e^{-t/T_{da}}$, $i(t) = I_d(t) + i_{-a}(t)$

冲击电流: $i = 1/2T = 0.01s$ 电流最大值

$i_{im} = \sqrt{2}I_F K_{im}$, $i_{im} = \sqrt{1 + 2(K_{im} - 1)^2}$

冲击系数 $K_{im} = 1 + e^{-0.01/T_{da}}$

【对称分量法】: $\alpha = e^{j120^\circ}$

原理: 任意三相电压, 均可分解为唯一正负零序电压分量之和. 且三个分量作用在三相循环对称系统时相互独立, 互相解耦. 可以用叠加原理计算.

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

序阻抗: 利用一相 U/I 定义. 对称系统 1/2 相等, 发电机非线性 1/2 不等.

	X1 正序	X2 负序	X0 零序
发电机	X_{d1} 三种取值 $(X_d'' + X_d'')/2$	$X_{d1} + 3X_n$	
阻抗	$X - X_m$	$X - X_m$	$X + 2X_m$
负荷	Z	Z	$Z + 3Z_N$
变压器	$X_p + X_s$	$X_p + X_s$	不同

变压器零序: 变压器如果是 Δ 接法, 串入 Z=每侧增加 1/3Z; Y0 接法, 每相串入 3Z.

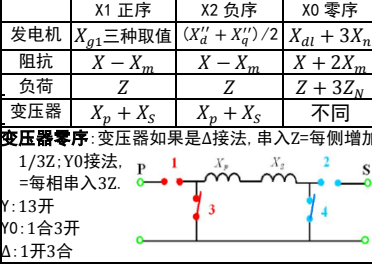
Y: 13开

Y0: 1合3开

Δ : 1开3合

【不对称故障复合序网】: 只有正序有电源

方程: 3 个序网 3 个网络方程. 发电机惯 s 例: 故障接口 3 个接口方程.



短路类型: 金属性短路-直接短路; 非金属性短路-经阻抗短路(常为电弧有阻抗).

正序等效原则: 故障点电流 $I_F = mI_{a1}$

$I_{a1} = E_{a1}/(X_1 + X_d)$

三相/两相/单相短路和两相短路接地.

	X_d	m
F ⁽³⁾	0	1 仅正序
F ⁽²⁾	X_2	$\sqrt{3}$
	$X_2 + Z_f$	正负并联 Z_f 串接, 零序断开
F ⁽¹⁾	$X_2 + X_0$	3
	X_0 换为 $X_0 + 3Z_f$	三序串联, $3Z_f$ 串接
	$X_2 X_0$	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_2 X_0}{(X_2 + X_0)^2}}$
F ^(1,1)	X_0 换为 $X_0 + 3Z_f$	三序并联, $3Z_f$ 串负零序间

【非全相运行】: 纵向故障(接入阻抗横向故障)

序网: 以故障接口处向序网两侧做戴维南等效.

单相断线=两相短路接地; 三序网并联;

两相断线=单相短路; 三序网串联;

【电力系统稳定性基本概念】:

研究:

两个要素: 平衡状态, 干扰.

平衡点类型: 稳定平衡点, 不稳定, 随动平衡.

稳定类型: 静态稳定, 暂态稳定, 动态稳定

数学描述: $\exists \delta > 0, \forall x_0$ 满足 $\|x_0 - x_e\| < \delta$, 微分方程的解满足 $t \rightarrow \infty, \bar{x}(t) \rightarrow \bar{x}_e$

$$\begin{cases} \bar{x}(t)/dt = \bar{f}(\bar{x}(t)) \\ \bar{x}(0^-) = \bar{x}_0 \end{cases}$$

电力系统: 同步发电机并联运行保持同步是正常运行基本条件.

平衡点: 电力系统处于正常运行状态即平衡.

干扰: 小干扰-静态; 大干扰-动态.

稳定性分类: 干扰大小-静态/动态稳定性; 时间长短-短期/中期/长期稳定性分析; 主要原因-功角频率, 电压, 负荷稳定性.

转子描述: $J = GD^2/4$, 动能 $W = J\Omega_0^2/2$, $Jd\Omega/dt = M$, $S_B = M_B\Omega_0$, $T_f = 2W/S_B = J\Omega_0^2/S_B$.

惯性时间常数 T_f 物理意义: 在单位转矩作用下, 转子从静止状态加速到额定状态所需要的时间.

发电机假设: 忽略定子电阻 $r=0$; 不计定子电磁暂态 $p\Psi_{ad}\Psi_{q0}=0$; 转差接近同步速 $\omega=1$; 转子电磁暂态近似处理取 E_q 或 E_q' 恒定.

发电机方程: 转子运动方程, 励磁绕组方程

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ T_f \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_E - P_D = \Delta P \end{cases} \begin{cases} u_d = X_q i_q \\ u_q = -X_d i_d + X_{ad} i_f \\ u_f = p\Psi_f + r_f i_f \\ \Psi_f = -X_{ad} i_d + X_f i_f \end{cases}$$

$E_q' = (X_d' - X_d) i_d + E_q$, 定子侧量表示.

简化模型: 定义式见左.

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ T_f \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \end{cases} \begin{cases} u_d = X_q i_q \\ u_q = -X_d i_d + E_q \\ \Psi_f = -X_d i_d + E_q \end{cases}$$

相量图: 寻找 dq 轴位置.

$E_q = \dot{U}_t + jX_q i$, $j(X_d - X_q)I_d$

$E_q \approx \dot{U}_t + jX_q i$, 计算电势

利用 X_d 求功角 δ .

凸极单机无穷大系统, $X_{ad} X_{q\Delta}$

$E' \triangleq \dot{U} + jX_{q\Delta} i$

功角方程:

$$P_{Eq} = \frac{E_q U}{X_{q\Delta}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_{q\Delta}} - \frac{1}{X_{d\Delta}} \right) \sin 2\delta$$
$$P_{Eq}' = \frac{E_q' U}{X_{q\Delta}'} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \frac{X_{q\Delta}' - X_{d\Delta}'}{X_{q\Delta}' X_{d\Delta}'} \sin 2\delta$$

【静态稳定】: i_f 不变 E_q 不变

静态稳定判据: E_q 恒定时同步功率系数

$$S_{Eq} = \frac{dE_q}{d\delta} = \frac{E_q U}{X_{q\Delta}} \cos \delta, S > 0 \text{ 静态稳定}$$

静态稳定储备系数: $K_P = (P_{max} - P_0)/P_0 \times 100\%$

K_P 越大, 静态稳定性越好. $P_{max} = E_q U/X_{d\Delta}$.

提高静态稳定性: 提高 P_{max} , 可提高系统电压, 增加内电势(励磁控制), 减小线路电抗(电容补偿).

特征根法: 单机无穷大系统线性化.

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\frac{S}{T_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix}, \lambda_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{\omega_0 S}{T_f}}$$

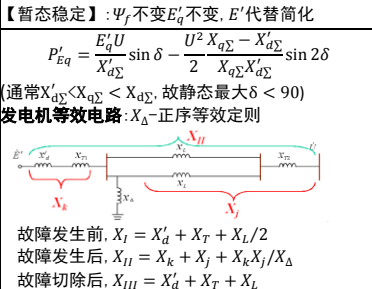
±实根不稳定, 共轭虚根稳定.

【暂态稳定】: Ψ_f 不变 E_q' 不变, E' 代替简化

$$P_{Eq}' = \frac{E_q' U}{X_{q\Delta}'} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \frac{X_{q\Delta}' - X_{d\Delta}'}{X_{q\Delta}' X_{d\Delta}'} \sin 2\delta$$

(通常 $X_{d\Delta}' < X_{q\Delta}' < X_{d\Delta}$, 故静态最大 $\delta < 90^\circ$)

发电机等效电路: $X_{d\Delta}$ -正序等效定理



故障发生前, $X_1 = X_d' + X_f + X_L/2$

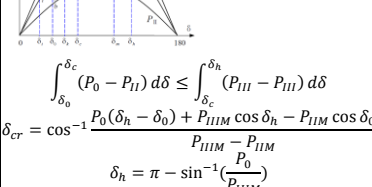
故障发生后, $X_{1f} = X_k + X_f + X_k X_f/X_d$

故障切除后, $X_{1ff} = X_d' + X_f + X_L$

$$P_k = \frac{E' U}{X_k} \sin \delta = P_{km} \sin \delta$$

等面积定则: 系统大扰动后, 发电机减速面积=加速面积, 可保持暂态稳定, 反之亦然. (充要条件)

其物理原理为面积等于动能, 需满足能量守恒.



根据转子运动方程求极限切除时间 t_{cr}

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{T_f} (P_0 - P_{11M} \sin \delta), t = 0, \delta = \delta_0, \frac{d\delta}{dt} = 0$$
$$t_{cr}^{(3)} < t_{cr}^{(1,1)} < t_{cr}^{(2)} < t_{cr}^{(1)}$$

提高暂态稳定性: 快速切除故障 δ_{cr} ; 提高输出功率 P_e ↑; 减少原动机输出机械功率 P_0 ↓.

根本 $S_{加速} \downarrow / S_{减速} \uparrow$

【继电保护】:

继电保护: 泛指继电保护技术或由各种继电保护装置组成的继电保护系统.

三大功能: 有选择性地将故障元件从系统中快速自动地切除, 使损坏最小; 反应电器元件运行工况, 报警减负荷延时跳闸; 尽快自动恢复停电部分供电.

基本原理: 识别故障或异常状况的特征, 采取适当的手段自动消除故障或异常.

类型: 熔断器/过电流保护/低电压; 阻抗(距离)保护 $Z=U/I$; 电流差动; 零序电流(故障后)很大

四大要求: 可靠性, 选择性, 快速性, 灵敏性.

互相矛盾, 适当取舍.

灵敏性: 保护装置反应故障的能力.

灵敏度系数 K_{lm} =故障参数/整定值.

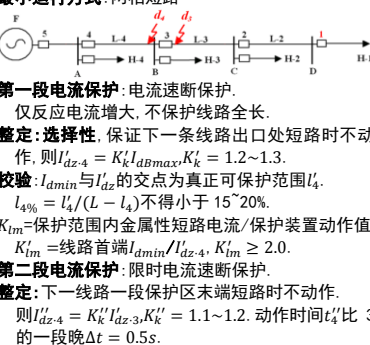
电流继电器 LJ: 动作电流 I_{dz-j} → 返回电流 I_{fh-j} .

动作特性返回特性: 不重合矩形, 滞环, 防抖动.

返回系数 $0.85 \leq K_{fh} = I_{dz-j}/I_{fh-j} < 1.0$.

最大运行方式: 三相短路, 机组多短路容量大;

最小运行方式: 两相短路



第一段电流保护: 电流速断保护.

仅反应电流增大, 不保护线路全长.

整定: 选择性: 保证下一条线路出口处短路时不动作. 则 $I'_{dz-4} = K'_l I_{d3max}$, $K'_l = 1.2 \sim 1.3$.

校验: I_{dmin} 与 I'_{dz} 的交点为真正可保护范围 l'_d .

$l_{4\%} = (l'_d / (L - l'_d))$ 不得小于 15% 20%.

K_{lm} =保护范围内金属性短路电压/保护装置动作值 K'_{lm} =线路首端 I_{dmin}'/I_{dz-4} , $K_{lm} \geq 2.0$.

第二段电流保护: 限时电流速断保护.

整定: 下一线路一段保护区末端短路时不动作.

则 $I'_{dz-4} = K'_l I'_{d3} K'_l = 1.1 \sim 1.2$. 动作时间 t'_d 比 3 的一段晚 $\Delta t = 0.5s$.

校验: I_{dmin} 与 I'_{dz} 的交点为真正可保护范围 l'_d .

K'_{lm} = 本线路末端 $I_{dmin}'/I'_{dz-4} \geq 1.3 \sim 1.5$. 若不合格可减小动作电压 I_{dz-4} 增加延时 Δt .

第三段电流保护: 定时限过电流保护.

可靠性: 保护范围从 4 首到 3 末端.

整定: 躲开最大负荷电流; 返回电流 \rightarrow 自启动电流.

$$I'_{dz} = K'' I'_{f2-max}, \Delta t = 1.0s, K''_{lm} = 1.15 \sim 1.25$$

$I_{fh-4} > I_{zq4-max} = K_{zq4} I_{fz4-max}$, $K_{fh} = I_{fh}/I_{dz} = .85$

$I_{zq4} > 1$, $I'_{dz-4} = K'' I'_{d3max}/I_{fz4-max}/K_{fh}$

校验: #4 的近后备 $K'_{lm} = I_{d3min}'/I'_{dz-4} \geq 1.3 \sim 1.5$;

#3 的近后备, $K'_{lm} = I_{d3min}'/I'_{dz-4} \geq 1.2$.

$$I'_{dz} < I'_{d3} < I'_{dz}$$

试题:

1. **等 IC 证明**: 拉格朗日乘子法, 构造 L 函数 $\min L = C_T - \lambda(\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_D)$ λ -边际成本

取极值必要条件 $dL/dP_{Gi} = dC_T/dP_{Gi} - \lambda = 0$

$dL/d\lambda = \sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_D = 0$ (等式约束)

2. **YΔ接法分析**

Y/Δ-N 联, 则 $\dot{U}_{Y1} = \dot{U}_{\Delta 1} K_e^{jN \times 30^\circ}$ (正序)

$\dot{U}_{Y2} = \dot{U}_{\Delta 1} K_e^{-jN \times 30^\circ}$ (负序)

3. **SVC 原理**: LC 并联, K 可调

无功补偿度 $Q = Q_D + Q_L - Q_C$

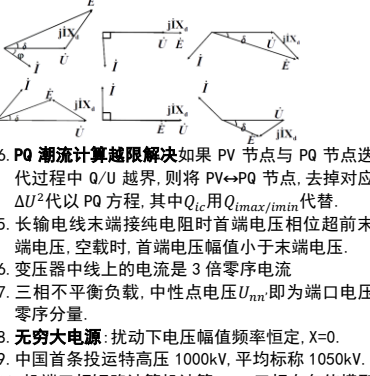
负荷变化 $\Delta Q = \Delta Q_D + \Delta Q_L - \Delta Q_C$

电压维持不变则 $\Delta Q_C = 0$, 令 $\Delta Q_C = -\Delta Q_D$

4. **加压调压变压器**: 纵向, 横向, 混合型调压

纵向调幅值, 横向调相位.

5. **同步调相机 6 状态**: 发电/调相/电动, 电源/负荷



6. **PQ 潮流计算极限解决**如果 PV 节点与 PQ 节点迭代过程中 Q/U 越界, 则将 PV→PQ 节点, 去掉对应 ΔU^2 代以 PQ 方程, 其中 Q_{ic} 用 $Q_{imax}/imin$ 代替.

7. 长输电线路末端接纯电电阻时首端电压相位超前末端电压, 空载时, 首端电压幅值小于末端电压.

6. 变压器中线上电流是 3 倍零序电流

7. 三相不平衡负荷, 中性点电压 U_{n0} 即为端口电压零序分量

8. **无穷大电源**: 扰动下电压幅值频率恒定, $X=0$.

9. 中国首条投运特高压 1000kV, 平均标称 1050kV.

10. 机端三相短路计算机计算: abc 三相有名值模型一解微分方程数值解法, 直接+系数收敛慢/参数不易获得; dq0 有名值-常数计算快/参数不易获得/结果需要转化; dq0 标么值-参数准备小/不够直接转化 为有名值再转化为 abc 值.

11. 同步发电机三相短路时, 定子电流周波分量的起始值与转子在短路发生瞬间的位置 θ_0 有关, 而与它对应的转子绕组中电流直流分量的起始值与 θ_0 无关.