上篇・电力系统稳态分析

【电力系统概念】

电力系统：完成电能生产,输送,分配,消费的整体
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)
运行特点：密切性、短促性、同时性
基本要求：(1)供电可靠性 (2)电能质量高(电压+5%~-7%,频率±0.2~0.5Hz) (3)经济性好 (4)环境友好
动力系统：电力系统,发电厂动力部分,热力网
联络线：交换功率,提高可靠性,扩大规模
电气接线：电气连接关系 **地理接线**：相对地理位置与联接路径
开式接线：配电网,可有备用 **闭式接线**：输电网
电能生产：火电70%,水电10%,核电大于10%,新能源包括太阳能风能地热潮汐能燃料电池核聚变等,抽水蓄能电厂可以削峰填谷

【远距离大容量输电与互联 直流输电】

容量 $S=UI$,压降 $\Delta U=IZ$,损耗 $P_L=I^2R$
高电压输电：容量大,压降小,损耗小,稳定性高考虑绝缘,发电机电压10-30kV,变压器升压到110-750kV,大负荷6-110kV,民用110/220V(单相)
互联优点：错峰减少总装机容量,减少备用,提高可靠性和电能质量,合理利用动力资源以实现经济运行(水,小火电)
互联问题：超高压互联设备投资大,系统规模大运行难度大、安全风险大,并联回路多故障电流大
大系统控制：集中管理,分层控制(国网省区县,35kV县市,110跨县市,220跨地区,500跨省,750跨大区)
直流输电优点：适于互联(同频同步问题);造价低(费用相同容量比DC:AC=3:2);损耗小;控制简便
直流输电缺点：换流站价格高(等价距离500km);谐波恶化电能质量干扰通信;电流不过零灭弧困难

【额定电压确定】

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(接发电机)或 线路额定电压(接线路)，二次侧 = 1.1×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×线路额定电压(30kV以内可取1.05)
二次侧接380V配电网时,额定电压取400V

【复功率】

复功率 $\dot S=\dot U\dot I^*$ **视在功率** S=UI
有功功率：周期为2ωt,均值为UIcosφ
无功功率：周期为2ωt,均值为0,峰值为UIsinφ
有功表征功率消耗均值,无功表征能量交换速率
三相复功率 $\dot S=3\dot U_p\dot I_p^*=\sqrt3 U_L I_L e^{j-30°}$
三相有功功率 $P=\sqrt3U_LI_L\cos\varphi=3U_PI_P\cos\varphi$
三相无功功率 $Q=\sqrt3U_LI_L\sin\varphi=3U_PI_P\sin\varphi$
网络吸收感性无功：Q>0无功负荷,Q<0无功电源
网络吸收感性无功等价于发出容性有功
发电负荷-厂用电=供电负荷=用电负荷+网损

【架空线等值电路】

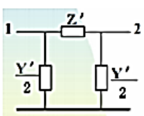
三相循环换位解决参数不平衡分裂导线减少电抗和电晕损耗,但会增大电纳
钢芯铝绞：型号+数字(载流面积,单位mm²)

分布参数计算公式
电阻 $r=\rho/nS\ \Omega/km$
电抗 $x=0.1445\lg(D_{eq}/D_s')\ \Omega/km$
电导 $g=\Delta P_g/U^2\times10^{-3}\ S/km$
电纳 $b=7.58/\lg(D_{eq}/D_s)\times10^{-6}\ S/km$
其中：ρ为计算电阻率(单位Ω·mm²/km,铜18.8 铝31.5) n导线分裂数,r_0为导线半径(单位mm),R为分裂圆周半径(单位mm),D为相距(单位mm)
$D_{eq}=\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}}$, $D_s'=\sqrt[n]{nR^{n-1}r'}$
$D_s=\sqrt[n]{nR^{n-1}r_0}$,(钢芯绞线) $r'=0.81r_0$
经验数据：x=0.4, b=2.6~2.85×10^{-6}
集总参数电路：I_1流入二端口,I_2流出二端口

$$\begin{bmatrix}\dot U_1\\ \dot I_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cosh\sqrt{ZY} & \sqrt{Z/Y}\sinh\sqrt{ZY}\\ \sqrt{Y/Z}\sinh\sqrt{ZY} & \cosh\sqrt{ZY}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot U_2\\ \dot I_2\end{bmatrix}$$

$Z=zL, Y=yL$, L为线路长度
L>750km长线，用下式精确计算

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



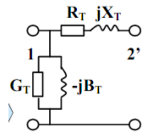
300km≤L≤750km，取级数前两项：

$$Z'=Z(1+ZY/6);\ \frac{Y'}{2}=\frac{Y}{2}(1-\frac{ZY}{12})$$

L≤300km,取级数前1项;
L≤100km,电压等级≤35kV：忽略并联导纳
双曲函数计算公式：
$\sinh(x)=(e^x-e^{-x})/2$, $\cosh(x)=(e^x+e^{-x})/2$
$\tanh(x/2)=(\cosh(x)-1)/\sinh(x)$

【变压器等值电路】

短路试验：ΔP_S忽略铁耗 空载试验：ΔP_0忽略铜耗



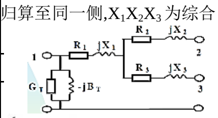
$$U_S\%=\frac{U_S}{U_N}\times100\qquad I_0\%=\frac{I_0}{I_N}\times100$$

$$\begin{cases}R_T=P_SU_N^2/S_N^2\times10^3\Omega\\ X_T=U_S\%U_N^2/S_N\times10\Omega\end{cases}\quad\begin{cases}G_T=P_0/U_N^2\times10^{-3}S\\ B_T=I_0\%S_N/U_N^2\times10^{-5}S\end{cases}$$

等值电路求的是YY接法归算到U_N侧的单相参数

【三绕组变压器等值电路】

归算至同一侧,$X_1X_2X_3$为综合自感,互感的等值电感

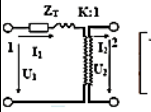


$$\begin{cases}\Delta P_{S1}=\frac12[\Delta P_{S(1-2)}+\Delta P_{S(3-1)}-\Delta P_{S(2-3)}]\\ \Delta P_{S2}=\frac12[\Delta P_{S(2-3)}+\Delta P_{S(1-2)}-\Delta P_{S(3-1)}]\\ \Delta P_{S3}=\frac12[\Delta P_{S(3-1)}+\Delta P_{S(2-3)}-\Delta P_{S(1-2)}]\end{cases}\quad\begin{cases}R_1=\frac{\Delta P_{S1}U_N^2}{S_N^2}\times10^3\\ R_2=\frac{\Delta P_{S2}U_N^2}{S_N^2}\times10^3\\ R_3=\frac{\Delta P_{S3}U_N^2}{S_N^2}\times10^3\end{cases}$$

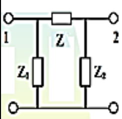
若绕组容量则需要功率归算(电压一般不归算)

$$\Delta P_{S(a-b)}=[\frac{S_N}{\min(S_{Na},S_{Nb})}]^2\Delta P'_{S(a-b)}$$

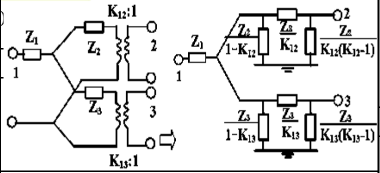
【变压器π型等值电路】



$$\begin{bmatrix}\dot U_1\\ \dot I_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}K & Z_T/K\\ 0 & 1/K\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot U_2\\ \dot I_2\end{bmatrix}$$



$$Z=\frac{Z_T}{K},Z_1=\frac{Z_T}{1-K},Z_2=\frac{Z_T}{K(K-1)}$$



【标幺值选取】

单相 $S_B=U_BI_B$, $U_B=Z_BI_B$
三相 $S_{3PB}=\sqrt3U_{LB}I_{LB}$, $U_{LB}=\sqrt3Z_BI_{LB}$
变压器: $R_{T*}=\Delta P_{S*}$, $X_{T*}=U_{S*}$; $G_{T*}=\Delta P_{0*}$, $B_{T*}=I_{0*}$
标幺值换算：(原则是有名值不变)

$$Z_{*B}=Z_{*N}\frac{U_N^2}{S_N}\frac{S_B}{U_B^2}=Z_{*N}\frac{U_N}{U_B}\frac{I_B}{I_N}$$

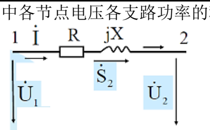
1.逐级归算：按变比折合阻抗至同一电压等级
2.各选电压法：统一选S_B,两侧分别选取电压基值计算标幺值,$K_*=K/K_B$, $K_*=1$可以去耦合
3.近似计算,所有元件$U_N=U_{av}$

【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 $K_{QV}=dQ/dU$
有功负荷频率调节效应系数 $K_{Pf}=dP/df$

【简单潮流计算】

潮流：系统中各节点电压各支路功率的稳态分布



$$d\dot U_1=\frac{P_1R+Q_1X}{U_1}+j\frac{P_1X-Q_1R}{U_1}\text{(知左侧参量)}$$
$$d\dot U_2=\frac{P_2R+Q_2X}{U_2}+j\frac{P_2X-Q_2R}{U_2}\text{(知右侧参量)}$$

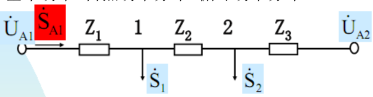
功率损耗：$\Delta\dot S_S=(P_S^2+Q_S^2)(R+jX)/U_S^2$
线路损耗：$\Delta\dot S_L=\Delta\dot S_S+\Delta\dot S_{P1}+\Delta\dot S_{P2}$
输电线的传输效率：线路末端有功/线路首端有功
QU强耦合 Q从高压侧流向低压侧
Vδ强耦合 P从超前点流向滞后点

【开式网潮流计算】

已知同点U,S：递推计算
已知不同点U,S：迭代计算
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代计算电压；4.反复迭代至收敛(计算2步)

【两端供电网】

基本功率=自然功率分布+循环功率分布



自然功率：杠杆原理

循环功率用Sc表示,方向从1到2(注意共轭量)

$$\dot S_{A1}=\frac{\dot S_1\overset{*}{Z}_I+\dot S_2\overset{*}{Z}_{II}}{\overset{*}{Z}_\Sigma}+\frac{U_N(\overset{*}{U}_{A1}-\overset{*}{U}_{A2})}{\overset{*}{Z}_\Sigma}$$

$Z_\Sigma=Z_1+Z_2+Z_3$ $Z_I=Z_2+Z_3$ $Z_{II}=Z_3$
Sc的弊：不送入负荷,产生功率损耗(经济性)
Sc的利：可调整潮流分布,强制调整(可控性)
注意事项：
在无功功率分点处将环网拆成开式网,并给出两个分点处功率(其他支路功率需要重新计算)
对于含有变压器的网络,从环路中断端口的电压即为循环功率中的dU(端口须在U_n侧)

【网络方程与矩阵】

$\dot I_N=Y_N\dot U_N$, $Z_N=Y_N^{-1}$, $\dot U_N=Z_N\dot I_N$
线性网络 $Y_{11}=y_{10}+y_{12}+y_{13}, Y_{12}=-y_{12}$
非线性网络 Y_{11}表示节点1加单位电压,其他节点加0电压时从1注入的电流值 Y_{12}表示节点1加单位电压,其他节点加0电压时从2注入的电流值
非线性网络 Z_{11}表示节点1加单位电流,其他节点加0电流时节点1的电压值 Z_{12}表示节点1加单位电流,其他节点加0电流时节点2的电压值

【潮流方程解法的特点】

基于Y的Gauss迭代法,存储量少,但收敛性差
基于Z的Gauss迭代法,存储量大,但收敛性好
N-R法,引入稀疏技术,收敛性好,但计算量与存储量很大
PQ分解法,PQ解耦简化,收敛性稍差,计算速度很快,适合在线分析

【功率方程推导】

节点类型：PQ(负荷节点 n-1-r个),PV(发电机节点r个),Vδ(平衡节点/参考节点 1个)
直角坐标：$Y_{ij}=G_{ij}+jB_{ij}$, $\dot U_i=e_i+jf_i$
计算电流：$P_i-jQ_i=\overset{*}{U}_i\sum_{j=1}^nY_{ij}\dot U_j$

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

潮流方程：
$\Delta P_i=P_i-(e_ia_i+f_ib_i)=0$ n-1个
$\Delta Q_i=Q_i-(f_ia_i-e_ib_i)=0$ n-r-1个
$\Delta U_i^2=U_i^2-(e_i^2+f_i^2)=0$ r个

【NR法—直角坐标】

修正方程：

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

导数矩阵称为雅可比矩阵

$$\begin{cases}H_{ii}=\frac{\partial\Delta P_i}{\partial e_i}=-a_i-(G_{ii}e_i+B_{ii}f_i)\\ H_{ij}=\frac{\partial\Delta P_i}{\partial e_j}=-(G_{ij}e_i+B_{ij}f_i)\end{cases}$$

$$\begin{cases}N_{ii}=\frac{\partial\Delta P_i}{\partial f_i}=-b_i+(B_{ii}e_i-G_{ii}f_i)\\ N_{ij}=\frac{\partial\Delta P_i}{\partial f_j}=B_{ij}e_i-G_{ij}f_i\end{cases}$$

$$\begin{cases}M_{ii}=\frac{\partial\Delta Q_i}{\partial e_i}=b_i+(B_{ii}e_i-G_{ii}f_i),M_{ij}=N_{ij}\\ L_{ii}=\frac{\partial\Delta Q_i}{\partial f_i}=-a_i+(G_{ii}e_i+B_{ii}f_i),L_{ij}=-H_{ij}\end{cases}$$

$$R_{ii}=\frac{\partial\Delta U_i^2}{\partial e_i}=-2e_i, R_{ij}=0$$
$$S_{ii}=\frac{\partial\Delta U_i^2}{\partial f_i}=-2f_i, S_{ij}=0$$

【NR法—极坐标法】

极坐标：$Y_{ij}=G_{ij}+jB_{ij}$, $\dot U_i=U_ie^{j\delta_i}$

$$\begin{cases}\Delta P_i=P_i-U_i\sum_{j=1}^nU_j(G_{ij}\cos\delta_{ij}+B_{ij}\sin\delta_{ij})\\ \Delta Q_i=Q_i+U_i\sum_{j=1}^nU_j(B_{ij}\cos\delta_{ij}-G_{ij}\sin\delta_{ij})\end{cases}$$

注：$\delta_{ij}=\delta_i-\delta_j$,n-1个P方程, n-r-1个Q方程
修正方程：

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}\frac{\partial\Delta P}{\partial\delta^T} & \frac{\partial\Delta P}{\partial U^T}U\\ \frac{\partial\Delta Q}{\partial\delta^T} & \frac{\partial\Delta Q}{\partial U^T}U\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\delta\\ \Delta U/U\end{bmatrix}\qquad\begin{array}{cc} n-1 \quad n-1-r & \\ \begin{bmatrix}H & N\\ M & L\end{bmatrix} & \begin{array}{c}n-1\\ n-1-r\end{array}\end{array}$$

$$\begin{cases}H_{ii}=Q_i+U_i^2B_{ii}\\ H_{ij}=-U_iU_j(G_{ij}\sin\delta_{ij}-B_{ij}\cos\delta_{ij})\end{cases}$$

$$\begin{cases}N_{ii}=-P_i-U_i^2G_{ii}\\ N_{ij}=-U_iU_j(G_{ij}\cos\delta_{ij}+B_{ij}\sin\delta_{ij})\end{cases}$$

$$\begin{cases}M_{ii}=-P_i+U_i^2G_{ii}\\ M_{ij}=-N_{ij}\end{cases}\quad\begin{cases}L_{ii}=-Q_i+U_i^2B_{ii}\\ L_{ij}=H_{ij}\end{cases}$$

【PQ分解法】

简化1. 由于R<<X,有N<H,M<L,忽略非对角块, N=0,M=0.
简化2. δ_{ij}较小,$\cos\delta_{ij}\approx1$, $G_{ij}\sin\delta_{ij}\ll B_{ij}\cos\delta_{ij}$, 于是$H_{ij}=U_iU_jB_{ij}=L_{ij}$
简化3. $Q_i\ll U_i^2B_{ii}$, $L_{ii}=U_i^2B_{ii}=H_{ii}$
修正方程：

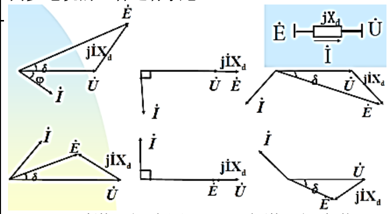
$$\begin{cases}\Delta P/U=-B'U\Delta\delta & n-1\text{维}\\ \Delta Q/U=-B''\Delta U & n-1-r\text{维}\end{cases}$$

$$H、L\approx UBU$$

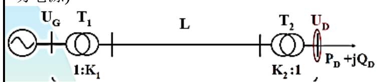
B是常系数矩阵,运算速度提高.
简化只影响迭代过程,不影响迭代结果.

【稳态运行与控制—无功与电压】

电压偏移：实际电压与额定电压之差,不可避免.
35kV以上±5%,10kV以下±7%,
低压照明+5%-10%,农村电网+7.5%-10%.
事故允许再增5%,但正偏不超过+10%.
电压低损耗大、危及系统稳定性
电压高破坏绝缘、超高压电晕损耗.
无功平衡：无功不能远距离输送。无功平衡要求全系统平衡和局部地区平衡，需要无功补偿。
同步电机的6种运行状态：



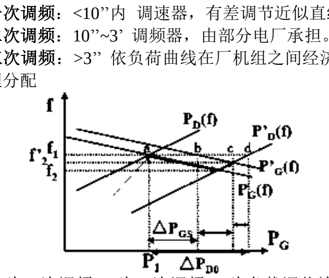
φ>0过激运行,电源 φ<0欠激运行,负载
δ>0发电机 δ=0调相机 δ<0电动机
无功电源：
1.发电机(唯一有功电源、基本无功电源),有功备用充足时,让负荷中心发电机少发有功、多发无功
2.同步调相机,优点是调节平滑,电源/负载(升压/降压)均可,可强励；缺点是投资、维护量、损耗大.
3.静电电容,优点是可分散/集中补偿,可分相补偿,投资少,有功损耗少；缺点是电压下降时输出急剧下降,不利于稳定电压.
4.SVC(静止无功补偿器,电感和电容并联并补),优点是调节能力强,特性平滑,反应速度快,可分相补偿,损耗小,维护简单；缺点是电压低时补偿量小,有谐波污染
5.高压线充电电容,高压线固有,无功过剩时电压偏高,需要并联电抗.
中枢点：电压有代表性的母线,要求其到不同负荷点的电压损耗不能太大,如大电厂高压母线、有大量地方负荷的机端母线、大型变电所二次母线.
电压控制：1.发电机励磁电压(难以兼顾机端负荷和远方负荷) 2.变压器分接头,改变变比(有载调压变压器) 3.利用无功补偿控制(并联电容器并补最小负荷时全部切除，同步调相机最大负荷时做无功电源)



$$U_D=(U_GK_1-\Delta U)\frac{1}{K_2}\approx(U_GK_1-\frac{Q_DX}{U_N})\frac{1}{K_2}$$

【稳态运行与控制—有功与频率】

频率偏移：负荷随机变化,不可避免,50±0.2Hz
一次调频：<10''内 调速器，有差调节近似直线
二次调频：10''~3' 调频器，由部分电厂承担。
三次调频：>3'' 依负荷曲线在厂机组之间经济合理分配



ab为二次调频,bc为一次调频,cd为负载调节效应
负荷功频静特性 $K_{D*}=(\Delta P_D/P_{DN})/(\Delta f/f_N)$
发电机功频静特性 $K_{G*}=-(\Delta P_G/P_{GN})/(\Delta f/f_N)$
N台发电机组工频静特性 $K_{G*}=(\sum K_{Gi*}P_{Gi})/\sum P_{Gi}$
发电机静态调差系数 $\delta=1/K_{G*}$
电力系统功频静特性 $K_*=K_{D*}+(P_{GN}/P_{DN})K_{G*}$
切记：选好参考点
按投入时间划分：热备用：旋转备用，运转中的发电设备可发最大功率与实际发电功率之差。
冷备用：未运转的，可随时启动最大发电功率
按用途划分：负荷备用,事故备用,检修备用,国民经济备用

【经济运行与控制】

发电成本特性: $C(P_G)=a+bP_G+cP_G^2$ ¥/h

传统 ED(经济调度):

目标函数: $\min C_T=\sum C_i(P_{Gi})$

约束条件: $\sum P_{Gi}=P_D$

等微增率准则: 最优解各机组成本微增率相等

考虑发电出力限制: 若某机组出力越界,则将其固定在界上,对剩余机组继续使用等微增率准则,直至满足负荷要求.

下篇·电力系统暂态分析

【暂态分析绪论】

暂态过程类型: 波过程(电流、电压波的传播,操作/雷击过电压),电磁暂态过程(电流、电压、磁链等电磁变量快速变化,短路/断线故障),机电暂态过程(机组功率角、转速、系统频率、电压的变化,系统振荡/稳定性破坏)

短路的后果: 产生大电流(发热,电磁力),造成低电压,干扰稳定运行

短路电流的组成: 无穷大电源 t_0 时刻短路电流

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

进入稳态所需时间: 4~5T

【同步电机建模】

绕组电压方程(6 个):

$$\begin{bmatrix}u_a\\u_b\\u_c\\u_f\\u_D\\u_Q\end{bmatrix}=p\begin{bmatrix}\psi_a\\\psi_b\\\psi_c\\\psi_f\\\psi_D\\\psi_Q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}r&0&0&0&0&0\\0&r&0&0&0&0\\0&0&r&0&0&0\\0&0&0&r_f&0&0\\0&0&0&0&r_D&0\\0&0&0&0&0&r_Q\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-i_a\\-i_b\\-i_c\\i_f\\i_D\\i_Q\end{bmatrix}$$

绕组磁链方程(6 个):

$$\begin{bmatrix}\psi_a\\\psi_b\\\psi_c\\\psi_f\\\psi_D\\\psi_Q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_{aa}&L_{ab}&L_{ac}&L_{af}&L_{aD}&L_{aQ}\\L_{ba}&L_{bb}&L_{bc}&L_{bf}&L_{bD}&L_{bQ}\\L_{ca}&L_{cb}&L_{cc}&L_{cf}&L_{cD}&L_{cQ}\\L_{fa}&L_{fb}&L_{fc}&L_{ff}&L_{fD}&L_{fQ}\\L_{Da}&L_{Db}&L_{Dc}&L_{Df}&L_{DD}&L_{DQ}\\L_{Qa}&L_{Qb}&L_{Qc}&L_{Qf}&L_{QD}&L_{QQ}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-i_a\\-i_b\\-i_c\\i_f\\i_D\\i_Q\end{bmatrix}$$

定子自感 $L_{aa}=L_s+L_t\cos2\theta_a$

定子互感 $L_{ab}=-M_s-L_t\cos2(\theta_a+30^\circ)$

转子自感 $L_{DD}=L_D=const$

转子互感 $L_{Df}=M_R=const$

转子互感 $L_{Qf}=const=0$

定转子互感 $L_{af}=M_f\cos\theta_a$

定转子互感 $L_{aQ}=-M_Q\sin\theta_a$

abcfDQ 绕组接口方程(6 个):

$u_D=0$, $u_Q=0$, u_{abcf}约束

【派克变换】

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

$$C^{-1}=\begin{bmatrix}\cos\theta_a&-\sin\theta_a&1\\\cos\theta_b&-\sin\theta_b&1\\\cos\theta_c&-\sin\theta_c&1\end{bmatrix}$$

注意: θ_a是 d 轴领先 a 相的角度, $\theta_b=\theta_a-120^\circ$

正交化: 2/3 变为$\sqrt{2/3}$,1/2 变为$\sqrt{1/2}$

有名值的派克电压方程:

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

有名值的派克磁链方程:

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

标幺值的派克电压方程:

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

标幺值的派克磁链方程:

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

$X_d=X_{ad}+X_{dl}$, $X_f=X_{ad}+X_{fl}$, $X_D=X_{ad}+X_{Dl}$

$X_q=X_{aq}+X_{ql}$, $X_Q=X_{aq}+X_{Ql}$

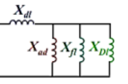
【短路分析】

abc 绕组电流的交流(直流)分量 对应 dq0 绕组电流的直流(交流)分量

【超暂态过程】

励磁绕组直流电流不衰减,而 D 绕组直流电流衰减,引起 d 绕组直流分量衰减.此时,q 轴与 0 轴的直流分量为 0.

d 轴超暂态电抗:



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

d 轴超暂态电流起始值:

$I_d''=E_{q0}'/X_d''$ $E_{q0}'=X_{ad}i_{f0}$

d 轴超暂态电流终止值:

$I_d'=E_{q0}'/X_d'$

d 轴超暂态电流时间常数:

$T_d''=X_D''/r_D$

【暂态过程】

D 绕组电流已衰减为 0,即忽略阻尼绕组,励磁绕组直流电流衰减,引起 d 绕组直流分量衰减到稳态.

d 轴暂态电抗:

$$X_d'=X_{dl}+\frac{1}{1/X_{ad}+1/X_{fl}}=X_d-\frac{X_{ad}}{X_f}$$

d 轴暂态电流起始值:

$I_d'=E_{q0}'/X_d'$, $E_{q0}'=X_{ad}i_{f0}$

d 轴暂态电流终止值:

$I_d=E_{q0}/(X_{dl}+X_{ad})$

(空载时, $E_{q0}'=E_{q0}$)

d 轴暂态电流时间常数:

$$T_d'=X_f'/r_f=(X_d-\frac{X_{ad}^2}{X_d})/r_f=(X_d'/X_d)T_{d0}$$

【综合过程】

d 轴直流电流:

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

q 轴、0 轴直流电流:

$I_q(t)=0$ $I_0(t)=0$

a 相短路电流的直流分量:

短路瞬间 a 相电流不能突变,因此将感应出直流分量$i_{a=}(t)=-I_d''\cos\theta_{a0}e^{-t/T_a}$

a 相总的短路电流:

$$i_a(t)=-I_d''\cos\theta_{a0}e^{-t/T_a}+I_d(t)\cos\theta_a$$

短路容量(标幺值):

$$S_{F*}=I_{F*}=1/(X_{\Sigma*})$$

冲击电流最大值:

$t=1/2T=0.01$ms时, $K_{im}=1+e^{-0.01/T_a}$

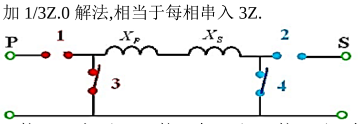
【对称分量法】: $a=e^{j120^\circ}$

任意一组三相的电压均可唯一分解为正负零序分量,且三个分量作用在对称系统时互相解耦,独立,可以进行叠加计算.

$$\begin{bmatrix}\dot U_a\\\dot U_b\\\dot U_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot U_{a0}\\\dot U_{a1}\\\dot U_{a2}\end{bmatrix}\quad\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a&a^2\\1&a^2&a\end{bmatrix}$$

	X1 正序	X2 负序	X0 零序
发电机	$X_d''/X_d'/X_d$	$(X_d''+X_q'')/2$	$X_{dl}+3X_n$
阻抗	$X-X_m$	$X-X_m$	$X+2X_m$
变压器	X_p+X_s	X_p+X_s	X_p+X_s

注意: 变压器如果是Δ接法,串入 Z 相当于每侧增加 1/3Z.0 解法,相当于每相串入 3Z.



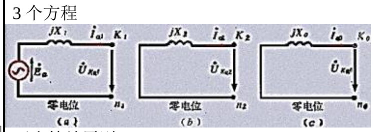
Y 接:1、3 打开 ;Y0 接:1 合 3 开 ;Δ接:1 开 3 合

【复合序网】

金属性短路: 直接短路接地

非金属性短路: 电弧短路等,经阻抗接地

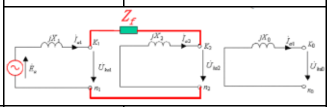
三个序网 3 个方程(发电机惯例),短路故障接口 3 个方程

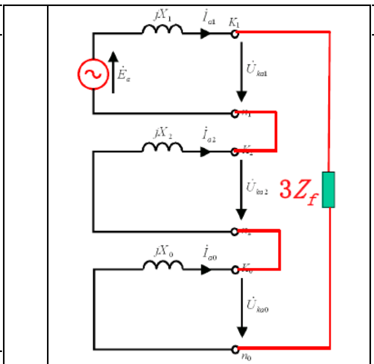


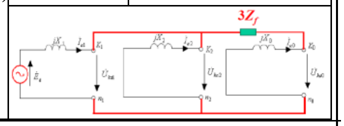
正序等效原则:

$\dot I_{a1}=\frac{\dot E_a}{j(X_1+X_\Delta)}$, $\dot I_{a2}$与$\dot I_{a3}$根据电路拓扑得到

故障电流点电流: $I_F=m*I_{a1}$

	X_Δ	m
F(3)	0	1 (负序、零序电流为 0)
F(2)	X_2	$\sqrt{3}$ 正负并联零序断开
	X_2+Z_f	Zf 串接
		
F(1)	X_2+X_0	3 三序串联
	X_0换为X_0+3Z_f	3Zf 串接



F(1,1)	$\frac{X_2X_0}{X_2+X_0}$	$\sqrt{3}\cdot\sqrt{1-\frac{X_2X_0}{(X_2+X_0)^2}}$ 三序并联
	X_0换为X_0+3Z_f	Zf 串在负零序间
		

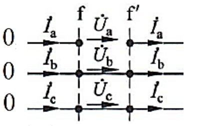
【非全相运行】

单相断线: 三序网并联

$\dot I_a=0$

$\dot U_b=0$

$\dot U_c=0$

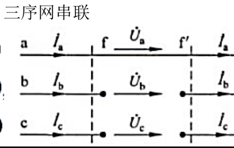


两相断线: 三序网串联

$\dot U_a=0$

$\dot I_b=0$

$\dot I_c=0$



下篇·电力系统稳定性分析

【电力系统稳定性】

两个要素: 平衡点,干扰大小

两种含义: 能否回到原平衡点,新平衡点能否接受

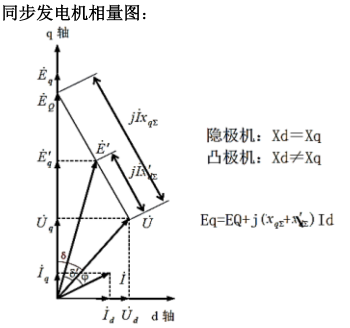
三种分类: 静态稳定、暂态稳定、动态稳定

简化后的同步发电机数学模型:

$$\begin{cases}U_{dt}=X_qI_q\\U_{qt}=-X_dI_d+E_q=-X_d'I_d+E_q'\end{cases}$$

$$\begin{cases}\frac{d\delta}{dt}=(\omega-1)\omega_0\\T_j\frac{d\omega}{dt}=P_m-P_e\end{cases}$$

同步发电机相量图:



隐极单机无穷大系统功角方程:

E_q表示的功角方程

$$P_{E_q}=\frac{E_qU}{X_{d\Sigma}}\sin\delta+\frac{U^2}{2}(\frac{1}{X_{q\Sigma}}-\frac{1}{X_{d\Sigma}})\sin2\delta=\frac{E_qU}{X_{d\Sigma}}\sin\delta$$

E_q'表示的功角方程

$$P_{E_q'}=\frac{E_q'U}{X_{d\Sigma}'}\sin\delta-\frac{U^2}{2}\frac{(X_{q\Sigma}-X_{d\Sigma}')}{X_{q\Sigma}X_{d\Sigma}'}\sin2\delta$$

凸极单机无穷大系统功角方程:

E_q恒定时凸极机的功角方程及曲线

$$P_{E_q}=\frac{E_qU}{X_{d\Sigma}}\sin\delta+\frac{U^2}{2}(\frac{1}{X_{q\Sigma}}-\frac{1}{X_{d\Sigma}})\sin2\delta$$

E_q'表示的功角方程及恒定时功角曲线

$$P_{E_q'}=\frac{E_q'U}{X_{d\Sigma}'}\sin\delta-\frac{U^2}{2}\frac{(X_{q\Sigma}-X_{d\Sigma}')}{X_{q\Sigma}X_{d\Sigma}'}\sin2\delta$$

【静态稳定】

Eq 恒定时同步功率系数: $S_{Eq}=dEq/d\delta>0$稳定

静态稳定储备系数: $K_P=(P_{max}-P_0)/P_0$

提高静态稳定性: 提高Pmax可以提高稳定性,因此可提高电压,增加励磁,减小电抗(分裂,电容补偿)

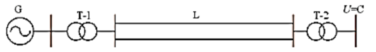
特征方程:

$$\lambda^2+\frac{S_{E_q}(\delta_0)\omega_0}{T_j}=0$$

【暂态稳定】

功角特性: 假定E'不变

$$P_\Sigma=\frac{E'U}{X_\Sigma}\sin\delta$$

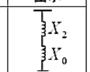
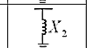
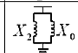
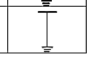


故障前: $X_I=X_d'+X_{T1}+X_L/2+X_{T2}$

$$P_I=\frac{E'U}{X_I}\sin\delta=P_{IM}\sin\delta$$

故障中: $X_{II}=X_k+X_j+X_kX_j/X_\Delta$

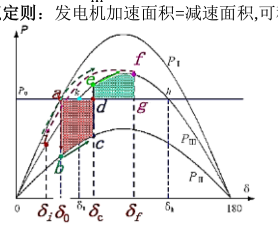
$$P_{II}=\frac{E'U}{X_{II}}\sin\delta=P_{IIM}\sin\delta$$

故障类型	附加电抗 X_Δ	图示
单相接地故障 $K^{(1)}$	X_2+X_0	
两相相间故障 $K^{(2)}$	X_2	
两相接地故障 $K^{(1,1)}$	$\frac{X_2X_0}{X_2+X_0}$	
三相故障 $K^{(3)}$	0	

故障后: $X_{III}=X_d'+X_{T1}+X_L+X_{T2}$

$$P_{III}=\frac{E'U}{X_{III}}\sin\delta=P_{IIIM}\sin\delta$$

等面积定则: 发电机加速面积=减速面积,可稳定



δ_0初始功角, δ_c故障切除角, δ_{cr}极限切除角

δ_h,P_0与曲线□交点, $\delta_h=\pi-\sin^{-1}(P_0/P_{IIIM})$

$$\delta_{cr}=\cos^{-1}\frac{P_0(\delta_h-\delta_0)+P_{IIIM}\cos\delta_h-P_{IIM}\cos\delta_0}{P_{IIIM}-P_{IIM}}$$

根据转子运动方程求极限切除时间t_{cr}

$$\begin{cases}\frac{d^2\delta}{dt^2}=\frac{\omega_0}{T_j}(P_m-P_{IIM}\sin\delta),t=0,\delta=\delta_0,\frac{d\delta}{dt}=0\end{cases}$$

提高暂态稳定性: 快速切除故障δ_C,提高输出功率P_e,减少原动机输出P_0

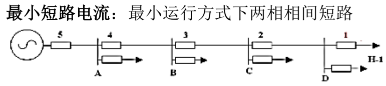
【继电保护】

四大要求: 可靠性(既不拒动,也不误动),选择性(最小范围切除故障,保证非故障部分供电),快速性(最短的时间切除故障),灵敏性(反应故障的能力)

电流继电器(LJ) 动作电流$I_{dz\cdot J}$>返回电流$I_{fh\cdot J}$,返回系数$K_{fh}=I_{dz\cdot J}/I_{fh\cdot J}$应$>0.85$

最大短路电流: 最大运行方式下三相短路

最小短路电流: 最小运行方式下两相相间短路



[第一段电流保护]: 电流速断保护

整定: $I_{dz\cdot4}'=K_k'I_{Bmax}$(下一段出口的最大短路电流)

(应有$K_k'=1.2\sim1.3$)

动作延时: $\Delta t=0$

校验: ①I_{dmin}是 4 段最小短路电流,与$I_{dz\cdot4}'$的交点为可靠保护范围l_4',$l_{4\%}=l_4'/L_4$,不得小于 15%~20%

②速断保护灵敏度系数$K_{lm4}'=I_{Amin}/I_{dz}$必须>2.0

[二段保护]: 限时电流速断保护

保护线路全长并延伸到下一线路,具有动作时限

整定: 线路 3 的一段保护区末端短路时不动作即

$I_{dz\cdot4}''=K_k''I_{dz\cdot3}'$ 应有$K_k''=1.1\sim1.2$

动作延时: $\Delta t=0.5s$

校验: $K_{lm4}''=I_{Bmin}/I_{dz\cdot4}''$ 必须 1.3~1.5

(若不合格,可以减小动作电流并增加延时)

[三段保护]: 定时限过电流保护

保护范围从 4 首到 3 末端

整定: 1.躲开最大负载电流 2.返回电流大于自启动电流

$I_{dz}'''=K_k'''I_{fz\cdot max}$ 应有$K_k'''=1.15\sim1.25$

动作延时: $\Delta t=1.0s$

校验: #4 的近后备$K_{lm4}'''=I_{dBmin}/I_{dz\cdot4}'''$ 应 1.3~1.5

#3 的远后备$K_{lm4}'''=I_{dCmin}/I_{dz\cdot4}'''$ 应 > 1.2