

# 电力系统稳态分析

## 提纲

出品：仲英学辅

2020年9月1日

仲英书院学业辅导中心

ZHONG YING XUE FU

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

## 作品信息

- 标题：电力系统稳态分析 - 提纲
- 主编作者：电气 813 赖启平、电气 713 刘沁阳
- 校对排版：电气 86 刘菁锐、能动 B81 梁佳佳
- 出品时间：2020 年 9 月 1 日
- 总页数：28

## 许可证说明

 知识共享 (Creative Commons) BY-NC-ND 4.0 协议

本作品采用 **CC 协议** 进行许可。使用者可以在给出作者署名及资料来源的前提下对本作品进行转载，但不得对本作品进行修改，亦不得基于本作品进行二次创作，不得将本作品运用于商业用途。

# 前言



编写人员：电气 813 赖启平、电气 713 刘沁阳

排版人员：电气 86 刘菁锐、能动 B81 梁佳佳

感谢学业辅导中心各位工作人员与志愿者的努力工作，使本资料可以按时完工。由于编者们的能力与精力限制，难免有错误之处。如果同学们在本资料中发现错误，请联系仲英学业辅导中心：XJTUzyxuefu@163.com，我们将在修订时予以更正。

从第 3 周开始，每晚 19:30-21:30，学辅志愿者在东 21 舍 118 学辅办公室值班，当面为学弟学妹们答疑。

同时，我们也有线上答疑平台——学粉群。

19 级学粉群：902493560，756433480；

20 级学粉群：598243135，1137961185。

期中考试与期末考试前，我们还会举办考前讲座。学辅还有新生专业交流会，转专业交流会，英语考试讲座等活动，消息会在学粉群和公众号上公布，欢迎同学们参与。

仲英书院学业辅导中心

2020 年 9 月 1 日



学粉群 6.0  
QQ 群号：598243135



学粉群 6.1  
QQ 群号：1137961185



微信公众号  
仲英学业辅导中心及薪火工作室

仲英书院学业辅导中心



## 目录

第一章电力系统概述.....	1
第二章电力系统的数学模型.....	2
一、输电线路的参数（交流线路，ABC 三相正序情况） .....	2
二、变压器的参数.....	3
三、电网的电路结构.....	4
第三章手算潮流.....	5
一、潮流和潮流计算.....	5
二、电压降和功率损耗.....	6
三、输电线路的电压降落和功率损耗.....	9
四、开式网潮流计算（辐射网） .....	10
第四章机算潮流.....	12
一、电力网络方程（ $U \sim I$ ） .....	12
二、节点功率平衡方程（ $S \sim U$ ） .....	13
三、N-R 法.....	15
四、FDLF（快速解耦潮流）/ PQ 分解法.....	17
五、潮流计算的其他方法.....	18
第五章调频调压.....	19
一、有功功率和频率.....	19
二、无功功率和电压.....	21
三、有功功率最优分配.....	23
第六章 HVDC, FACTS.....	23
一、HVDC.....	23
二、FACTS（用电力电子技术提高电力系统的调节能力） .....	24

## 第一章电力系统概述

本章大多是一些零碎的概念，易考填空题

1. 描述电力系统的参数（可用来比较电力系统的大小）：

总装机容量：额定有功功率总和（能量）

最大负荷：某一时段的总有功负荷（功率）

年发电量：电能（能量）

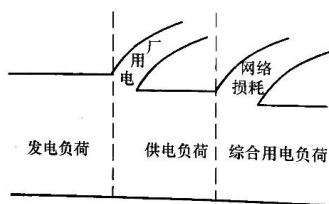
2. 电网接线方式

有备用：放射式、干线式、链式

无备用：无备用的双回、两端供电网络、环网

3. 区分动力系统、电力系统、输电系统、配电系统

4. 负荷的构成：



5. 负荷曲线：

注意以下概念：基荷、腰荷、峰谷差、削峰、填谷、日平均负荷、负荷率

日负荷曲线（功率：有功、无功）

年最大负荷曲线

年持续负荷曲线（年最大负荷利用小时数，区别不同类型发电厂、不同的负荷类型）

6. 电压等级

10, 35, 66, 110, 220, 330(西北), 500, 750(西北), 1000 AC

相应的绝缘子片数不同

7. 额定电压

(1) 发电机的额定电压：1.05

(2) 变压器的额定电压：

一次侧：

升压变：接发电机：1.05；接线路上当负载：1

降压变：一般接线路：1

二次侧：

升压变：接线路首段：1.05

降压变：一般接用户：1

注意：

变压器二次侧的额定电压是指空载时的额定电压。

变压器的分接头出现在铜线细（电流小）的一侧。

(3) 线路的额定电压：首端 1.05 ~ 0.95 末端

(4) 用电设备的额定电压：用户可能出现在线路的任何一处

## 第二章电力系统的数学模型

### 一、输电线路的参数（交流线路，ABC 三相正序情况）

功率：三相总功率，电压：线电压、电流：线电流

1.

电阻  $r_1 = \rho / S \text{ } \Omega/\text{km}$

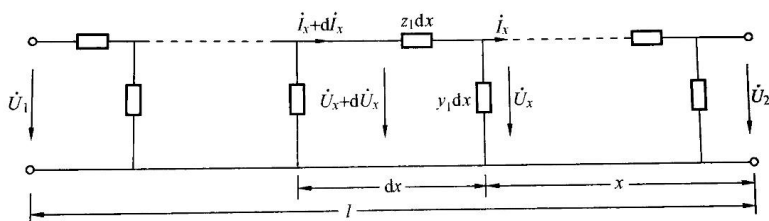
电抗  $x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} \text{ } \Omega/\text{km}$

电纳  $b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r}} \text{ S/km}$

电导  $g_1 \approx 0$

（具体推导过程需要了解）

2. 分布参数电路



其中:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z'Y'}{2} & Z' \\ Y'(1 + \frac{Z'Y'}{4}) & 1 + \frac{Z'Y'}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$Z' = Z_c \sin \gamma l = Z \frac{sh\gamma l}{\gamma l}$$

$$Y' = \frac{1}{Z_c} \frac{2(\cos \gamma l - 1)}{\sin \gamma l} = Y \frac{th(\gamma l / 2)}{(\gamma l / 2)}$$

$$Z = (r_1 + jx_1)l$$

$$Y = (g_1 + jb_1)l$$

300km 以下线路可以不用分布参数

## 二、变压器的参数

### 1. 双绕组变压器

$$Z_B = \frac{U_N^2}{S_N}, Y_B = \frac{S_N}{U_N^2}$$

$$R_{T*} = \frac{P_k}{1000 \times S_N} \leftrightarrow R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 \times S_N^2} \Omega$$

$$X_{T*} = \frac{U_k(\%) }{100} \leftrightarrow X_T = \frac{U_k(\%) \times U_N^2}{100 \times S_N} \Omega$$

$$G_M = \frac{P_0}{1000 \times S_N} \leftrightarrow G_M = \frac{P_0}{1000 \times U_N^2} S$$

$$B_{M*} = -\frac{I_0(\%) }{100} \leftrightarrow B_M = -\frac{I_0(\%) \times S_N}{100 \times U_N^2} S$$

### 2. 三绕组变压器

(1) 100/100/100:

$$P_{k1} = \frac{1}{2} (P_{k(1-2)} + P_{k(1-3)} - P_{k(2-3)})$$

类似, 得到  $P_{k1}$ ,  $P_{k2}$ ,  $P_{k3}$

从而得到  $R_{T1}$ ,  $R_{T2}$ ,  $R_{T3}$

(2) 100/50/100 或 100/100/50

需要将 50%一侧的参数折算到 100%后计算

### 三、电网的电路结构

#### 1. 多电压等级的有名值电路

需要确定一个电压等级，需要将参数折算过变压器，方法为远乘近除：

电压需除以近处的（当前位置）变压器额定电压，再乘以远处的（更靠近目标电压等级）变压器额定电压。

阻抗需除以近处的（当前位置）变压器额定电压的平方，再乘以远处的（更靠近目标电压等级）变压器额定电压的平方。

#### 2. 多电压等级的标幺值电路

##### (1) 标幺制：

由于电力系统是由变压器组成的，因而电力系统的标幺值概念和电机学是相通的。

标幺值本质上改变了量的单位，有助于有提高计算精度、速度。

##### ①基准值的取定原则：

- a. 基准值必须是和物理量同量纲的实数
- b. 各物理量的基准值之间必须满足物理定律方程：

由于  $S_B, U_B, I_B, Z_B, Y_B$  之前互相联系，因而人为规定：

$$S_B, U_B,$$

后  $I_B, Z_B, Y_B$  被约束

$$S_B = \sqrt{3}U_B I_B, \quad U_B = \sqrt{3}I_B Z_B, \quad I_B = \frac{1}{\sqrt{3}}Y_B U_B$$

变压器：

$$\frac{U_{1B}}{U_{2B}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$$

确定。

一般只人为规定一个  $S_B$ ，一般取大整数，例如 50MVA，100MVA。



$U_B$  一般取线路的额定电压，例如一条首端 121kV 的线路取  $U_B = 110kV$

$S_B$ ,  $U_B$  为取定基准值,  $I_B$ ,  $Z_B$ ,  $Y_B$ ,  $U_{2B}$  为导出基准值

②标幺制下的物理方程

$$\tilde{S} = \sqrt{3}\dot{U}\dot{I}^* \rightarrow S_B = \sqrt{3}U_B I_B \rightarrow \tilde{S}_* = \dot{U}_* \dot{I}_*^*$$

$$, \dot{U} = \sqrt{3}\dot{I}Z \rightarrow U_B = \sqrt{3}I_B Z_B \rightarrow U_* = I_* Z_*$$

(2) 多电压等级的标幺值电路的建立有两种方法:

一种是将有名值翻过不同的电压等级, 再除以统一的基准值。

另一种是将基准值翻过不同的电压等级, 用当前位置的有名值除以相应的基准值。

(3) 多电压等级的含变压器 $\pi$ 型等值电路的等值电路

考虑到实际电网中, 一台无载调压变压器的分接头至少有 5 种, 一台有载调压变压器的分接头数有很多, 若电网中有  $n$  台变压器, 则分接头参数组合有至少  $5^n$  种。不同的运行方式(分接头接法)下, 都要进行一次全网的参数折算, 最后存于电力系统计算软件数据库里的数据量太大。

而用变压器 $\pi$ 型等值电路以后, 不需要将电压或阻抗等翻过不同电压等级进行折算, 然而电流、电压关系保持正确。

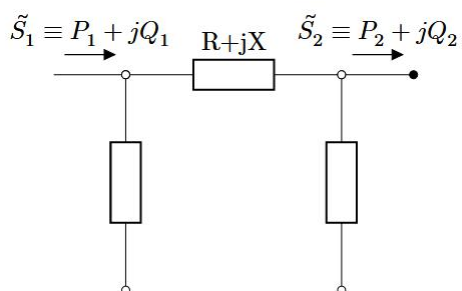
## 第三章手算潮流

### 一、潮流和潮流计算

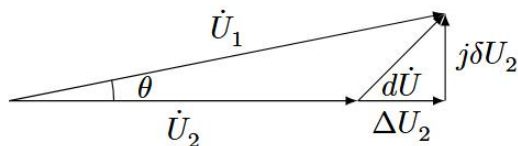
1. 潮流: 英文 load flow, 电网中从一个节点到另一个节点的功率流动。
2. 什么是电力系统的潮流计算:  
狭义: 计算系统中的节点电压;  
广义: 计算系统中的元件流过的功率, 电流, 节点电压
3. 电力系统的潮流计算的用途: 是电力系统其他计算的基础

## 二、电压降和功率损耗

### 1. 电压降落



(1) 情景 1: 已知末端量  $\tilde{S}_2$ ,  $\dot{U}_2$ , 求始端量  $\tilde{S}_1$ ,  $\dot{U}_1$ .



$$d\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$$

$$\text{令 } \dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ, \text{ 则 } \dot{U}_1 = \dot{U}_2 + d\dot{U} = \dot{U}_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2^*} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2^*}$$

$$\text{令 } \dot{U}_1 = U_1 \angle \theta, \text{ 则 } U_1 = U_2 + \Delta U_2 + j \delta U_2$$

$$\text{则 } \Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2^*}, \delta U_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2^*}$$

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_2)^2 + (\delta U_2)^2}$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{\delta U_2}{U_2 + \Delta U_2}\right)$$

称  $\Delta U_2$  为电压降的纵向分量,  $\delta U_2$  为电压降的横向分量。(以输电线为参考方向) 一般  $\theta < 30^\circ$ , 可忽略横向分量对电压降的影响, 认为  $U_1 \approx U_2 + \Delta U_2$ 。

讨论:

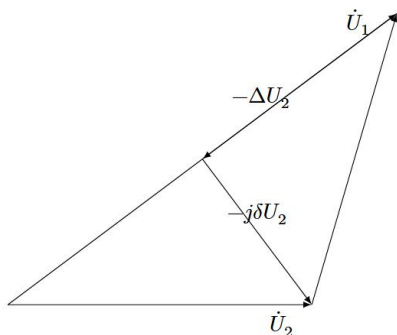
高压线路(输电网里)里:

$R \ll X$ , 因而

$$\Delta U_2 = \frac{Q_2 X}{U_2^*}, \delta U_2 = \frac{P_2 X}{U_2^*}$$

有重要结论: Q 总是从高压节点向低压节点流, P 总是从相位超前的节点向相位滞后的节点流。

(2) 情景 2: 已知始端量  $\tilde{S}_1$ ,  $\dot{U}_1$ , 求末端量  $\tilde{S}_2$ ,  $\dot{U}_2$ .



$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - d\dot{U} = \dot{U}_1 - \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2^*} - j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2^*}$$

$$\dot{U}_2 = U_1 - \Delta U_1 - j\delta U_1$$

## 2. 功率损耗

(1) 串联元件的功率损耗



$$\tilde{S}_1 = P_1 + jQ_1$$

$$\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}_1 - \tilde{S}_2 &= \Delta \tilde{S}_z = I (R + jX) I^* = \left| \frac{P + jQ}{U^2} \right|^2 (R + jX) \\ &= \frac{P^2 + Q^2}{U^2} (R + jX) = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R + j \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X \end{aligned}$$

其中  $\frac{P^2 + Q^2}{U^2} R$  是有功损耗,  $\frac{P^2 + Q^2}{U^2} X$  是无功损耗

## (2) 并联元件的功率损耗



$$\Delta \tilde{S}_y = \dot{U} \dot{I}^* = \dot{U} (\dot{U} Y)^* = U^2 Y^* = U^2 (G - jB)$$

由于  $G$  一般很小,

$$\text{接地支路消耗的功率: } \Delta \tilde{S}_y = -jBU^2$$

$$\text{等价于接地支路发出的功率: } \Delta \tilde{S}_y = jBU^2$$

### 三、输电线路的电压降落和功率损耗

#### 1. 定义

(输电线的) 电压损耗:

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

(节点的) 电压偏移:

$$\text{始端: } \frac{U_1 - U_N}{U_N} \times 100\%, \quad \text{末端: } \frac{U_2 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

#### 2. 输电线路的空载效应

空载时  $\dot{I}_2 = 0$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z'Y'}{2} & Z' \\ Y'(1 + \frac{Z'Y'}{4}) & 1 + \frac{Z'Y'}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

变成:  $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos(\beta l)$

$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 / \cos(\beta l) \geq \dot{U}_1$ , 末端电压会升高.

用输电线路π型等值电路可以推得线路越长，1-BX 越小，U<sub>2</sub> 越大。

采取措施：线路末端接大电抗（并联补偿）

### 3. 功率输送极限

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta$$

$$Q = \frac{U_1 U_2}{X} \cos \delta - \frac{U_2^2}{X}$$

$$P_{\max} = \frac{U_1 U_2}{X} \approx \frac{U^2}{X}$$

### 4. 输电线的功率圆图

电压上下界约束（电压损耗）

热稳约束（线路发热）

进相运行约束（功角，暂态稳定，小干扰稳定）

类似下图：

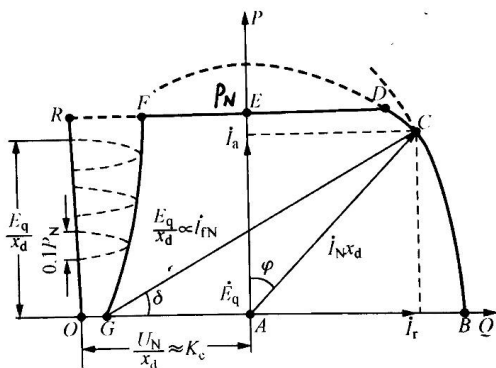


图 9-3 汽轮发电机的安全运行极限

## 四、开式网潮流计算（辐射网）

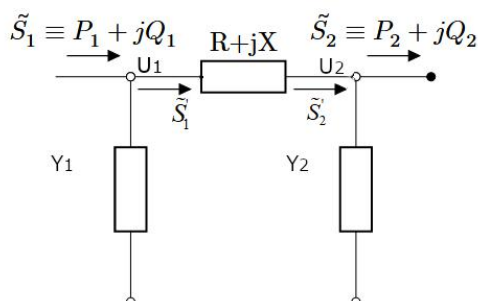
### 1. 辐射网

网络是树状图，没有环

若是双回线，需要先变成单回线：串联阻抗÷2，并联导纳×2

### 2. 已知同端量

逐步推进，一次完成



$$\Delta \tilde{S}_{y2} = \dot{U}_2^2 Y_2^*, \tilde{S}'_2 = \tilde{S}_2 + \Delta \tilde{S}_{y2}$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \left( \frac{\tilde{S}'_2}{\dot{U}_2} \right)^* Z, \tilde{S}'_1 = \tilde{S}_2 + \left| \frac{\tilde{S}'_2}{\dot{U}_2} \right|^2 Z$$

$$\Delta \tilde{S}_{y1} = \dot{U}_1^2 Y_1^*, \tilde{S}_1 = \tilde{S}'_1 + \Delta \tilde{S}_{y1}$$

### 3. 已知异端量

前推回代法

- (1) 前推：从最远的某个节点算初步功率分布，所有节点电压认为是  $1\angle 0^\circ$ （标么值），只算功率损耗
- (2) 回代：从根节点向末端依次算所有节点电压
- (3) 估算潮流只需以上两步，精确计算需要反复进行（1）和（2）。

### 4. 闭式网潮流计算（环网和双端供电电网）

(1) 环网：

- a. 令  $u_i^{(0)} = 1\angle 0^\circ, i = 2, 3, 4 \dots n$ , 先计算环上所有节点连接的辐射网的潮流，再计算环上所有节点对地支路的损耗，得到  $\tilde{S}_2, \tilde{S}_3, \tilde{S}_4, \dots$ 。

- b. 由于  $u_i^{(0)} = 1\angle 0^\circ, i = 2, 3, 4 \dots n$ ,  $\dot{I}_i = \left( \frac{\tilde{S}_i}{U_i} \right)^* \xrightarrow{U_i = 1\angle 0^\circ} \tilde{S}_i^*$ （此式表明解环时，

将复功率看作电流）

以四个节点为例，则

$$\tilde{S}_{12}^* Z_{12} + (\tilde{S}_{12} - S_2)^* Z_{23} + (\tilde{S}_{12} - S_2 - S_3)^* Z_{34} + (\tilde{S}_{12} - S_2 - S_3 - S_4)^* Z_{41} = 0$$

$$(Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} + Z_{41}) \tilde{S}_{12}^* = (Z_{23} + Z_{34} + Z_{41}) \tilde{S}_2^* + (Z_{34} + Z_{41}) \tilde{S}_3^* + Z_{41} \tilde{S}_4^*$$

再依次得到环网各支路的功率，得到“功率分点”（该点两侧潮流反向），一般取无功功率分点，该点电压最低，从该点打开环网，得到两个辐射网。

- (2) 双端供电网络
- a. 对于线性电路，使用叠加法，将双端供电网络看作无源环网和有电压源的回路。从而潮流有两部分：自然功率，强迫功率。

第四章机算潮流

一、电力网络方程 (U ~ I)

1. 比较手算和机算

区别	手算潮流	机算潮流
适用范围	简单网络（配电网）	复杂网络（输电网）
准确度	一般较低	高
计算次序	同时算节点电压和元件上的功率	先算电压，后计算潮流分布

2. 导纳矩阵 **Y**

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{1n} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{12} & Y_{22} & \cdots & Y_{11} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

(1) 由节点电压法：

**I = YU**

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \cdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{1n} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{12} & Y_{22} & \cdots & Y_{11} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \cdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix}$$

其中  $Y_{ii}$ ：自导纳，连在 i 节点上所有支路导纳之和  
 $Y_{ij}, (i \neq j)$ ：互导纳，连接 i, j 节点的所有支路导纳之和的负数

(2) 导纳阵的特点：

- a. 复数阵：**Y = G + jB**
- b. 对称： $Y_{ij} = Y_{ji}$
- c. 是稀疏阵：稀疏度=0 元素个数/全部元素个数，一般>90%。



d. 输电系统（高压系统）的导纳阵：  $G_{ij} \ll |B_{ij}|$

e. 对角占优：  $Y_{ij} \ll |Y_{ii}|$

f. 导纳阵可逆的充要条件是网络至少有一条接地支路。

(3) 阻抗阵的特点：

a. 复数阵：  $\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j\mathbf{X}$

b. 对称：  $Z_{ij} = Z_{ji}$

c. 是稠密阵

d. 自阻抗  $Z_{ii}$  的物理意义：从  $i$  节点和地之间看进去的网络等值阻抗。

## 二、节点功率平衡方程 ( $\mathbf{s} \sim \mathbf{u}$ )

$$\mathbf{I} = \mathbf{YU}$$

$$I_i = \left( \frac{\tilde{S}_i}{\dot{U}_i} \right)^* = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j, i=1,2,\dots,n$$

$$P_i + jQ_i = \sum_{j=1}^n \dot{U}_i \dot{U}_j^* Y_{ij}^*, i=1,2,\dots,n$$

$\mathbf{Y}$  总是用直角坐标形式，  $Y = G + jB$ 。

由于电压有两种表示形式，因而有以下：

1. 极坐标形式的节点功率平衡方程

$$\dot{U}_i = U_i \angle \theta_i$$

$$\dot{U}_j = U_j \angle \theta_j$$

$$P_i + jQ_i = \sum_{j \in i} U_i U_j [(G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + j(G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})]$$

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j \in i} U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = \sum_{j \in i} U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases}$$

节点功率方程的特点：

高维，

非线性,

强耦合 (2n 个方程联立, 1 个量变化会影响其他所有量的计算)

## 2. 直角坐标形式的节点功率平衡方程

$$\dot{U}_i = e_i + jf_i$$

$$\dot{U}_j = e_j + jf_j$$

$$P_i + jQ_i = \sum_{j \in i} [((e_i e_j + f_i f_j)G_{ij} + (e_j f_i - e_i f_j)B_{ij}) + j(e_j f_i - e_i f_j)G_{ij} - (e_i e_j + f_i f_j)B_{ij}]$$

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j \in i} [(e_i e_j + f_i f_j)G_{ij} + (e_j f_i - e_i f_j)B_{ij}] \\ Q_i = \sum_{j \in i} [j(e_j f_i - e_i f_j)G_{ij} - (e_i e_j + f_i f_j)B_{ij}] \end{cases}$$

## 3. 比较两种形式的方程

极坐标形式的方程少, 但要算三角函数

直角坐标形式方程多, 但补充的方程简单

## 4. 节点分类和补充方程

对于所有节点, 有 6 个量:  $P_{Li}, Q_{Li}, P_{Gi}, Q_{Gi}, U_i, \theta_{ui}$

为了用 2n 个方程求解出所有未知量, 必须对一些量进行限定。

有三类限定 (三类节点):

a. PQ 节点: 使用负荷预测技术确定了每个节点的负荷曲线, 确定了  $P_{Li}, Q_{Li}$

电力网络运行控制系统按一定的分配原则, 确定了  $P_{Gi}, Q_{Gi}$

b. PV 节点

电力系统的无功功率分配比较宽松, 可以挑出一些发电机节点, 确定电压, 但无功功率是未知量。因而每多一个 PV 节点, 可去掉一个  $Q_{Gi}$  的方程, 因为用该方程带入  $\theta_{ui}$  可得到  $Q_{Gi}$ 。

PV 节点可以没有。

补充的方程有两种形式:

极坐标形式:

直角坐标形式:  $u_{n-m}^2 = e_{n-m}^2 + f_{n-m}^2$

c. Vθ节点 (平衡节点)

$$\Delta P_{\Sigma} = P_{G\Sigma} - P_{L\Sigma} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in i} U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$\Delta Q_{\Sigma} = Q_{G\Sigma} - Q_{L\Sigma} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in i} U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

再潮流得解之前，全网有功损耗  $\Delta P_{\Sigma}$  和无功损耗  $\Delta Q_{\Sigma}$  是未知的，因而需要假设一个节点（一般取最后一个发电机节点  $n$ ）， $P_{Gn}, Q_{Gn}$  作为未知量来平衡  $\Delta P_{\Sigma}$ ， $\Delta Q_{\Sigma}$ 。为了保持总未知量数目不增加，需给定  $u_n, \theta_n$ （一般取  $\theta_n = 0^\circ$ ）该节点被称为平衡节点（因为平衡网损），也称 **Vθ**节点、松弛节点。

若取两个平衡节点，则这两个节点间潮流被人为确定（强迫潮流），可能和分配原则相悖，不被接受。

### 三、N-R 法

Newton-Raphson 牛顿-拉夫逊法

收敛速度：2 次收敛，收敛速度!=计算速度，正常潮流只要 N-R 迭代四五次，病态潮流需要很多次甚至不收敛。

基本原理：

$$\mathbf{F}(\vec{x}^{(k)}) + \mathbf{J}(\vec{x}^{(k)})\Delta\vec{x}^{(k)} = \vec{0}$$

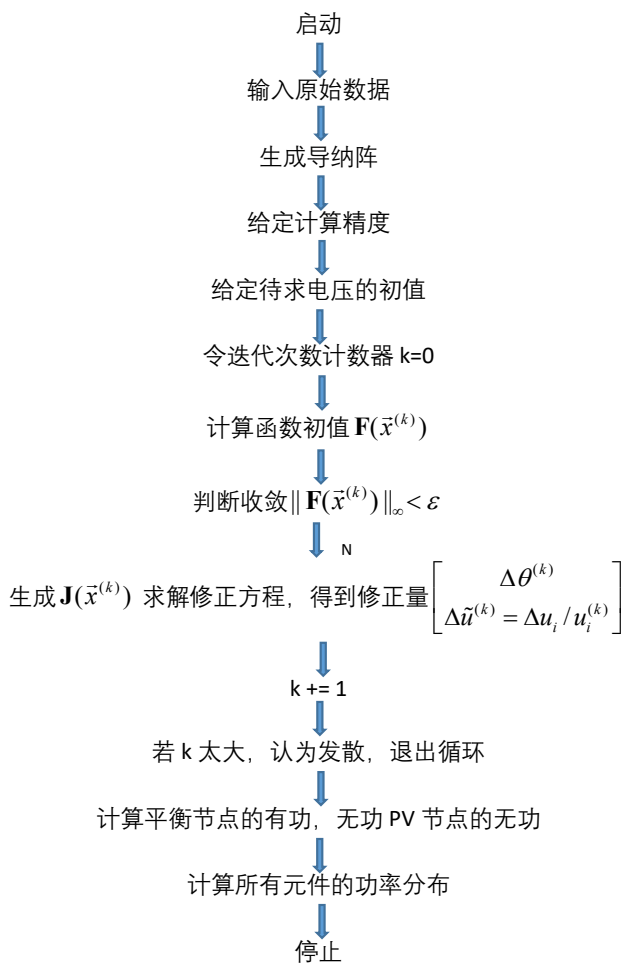
$$\mathbf{J}(\vec{x}^{(k)}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

$$\vec{x}^{(k+1)} = \vec{x}^{(k)} + \Delta\vec{x}^{(k)}, k = 0, 1, 2, \dots$$

$$\text{收敛条件: } \|\mathbf{F}(\vec{x}^{(k)})\|_{\infty} < \varepsilon$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_1 \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_1 \\ \dots \\ \Delta Q_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & & H_{1,n-1} & N_{11} & & N_{1m} \\ & \dots & & & \dots & \\ H_{n-1,1} & & H_{n-1,n-1} & N_{n-1,1} & & N_{n-1,m} \\ M_{11} & & M_{1,n-1} & L_{11} & & L_{1m} \\ & \dots & & & \dots & \\ M_{1m} & & M_{m,n-1} & L_{m1} & & L_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_{n-1} \\ \Delta u_1 / u_1^{(k)} \\ \Delta u_2 / u_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta u_m / u_m^{(k)} \end{Bmatrix}$$

流程:



## 四、FDLF（快速解耦潮流）/ PQ 分解法

配电网由于不满足  $R \ll X$ ，只能用 N-R 法，前推回代法，不能用 PQ 分解法

1. 由于  $R \ll X$ ，忽略所有元件的电阻，电导

非对角元：

$$H_{ij}, N_{ij}, M_{ij}, L_{ij}$$

对角元：

$$\begin{bmatrix} H_{ii} & N_{ii} \\ M_{ii} & L_{ii} \end{bmatrix} = U_i^2 \begin{bmatrix} B_{ii} & -G_{ii} \\ G_{ii} & B_{ii} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_i(x) & -P_i(x) \\ -P_i(x) & Q_i(x) \end{bmatrix}$$

P 和 U 关系小

$G_{ij}$  很小， $\theta_{ij}$  很小

Q 和  $\theta$  关系弱

从而解耦得：

$$\Delta \mathbf{P} = -\mathbf{H} \Delta \tilde{\theta}$$

$$\Delta \mathbf{Q} = -\mathbf{L} \Delta \tilde{U}$$

可证明  $Q_i \ll U_i^2 B_{ii}$

可忽略 N 阵

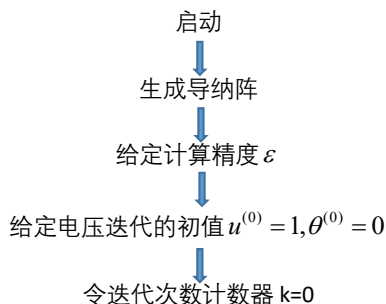
可忽略 M 阵

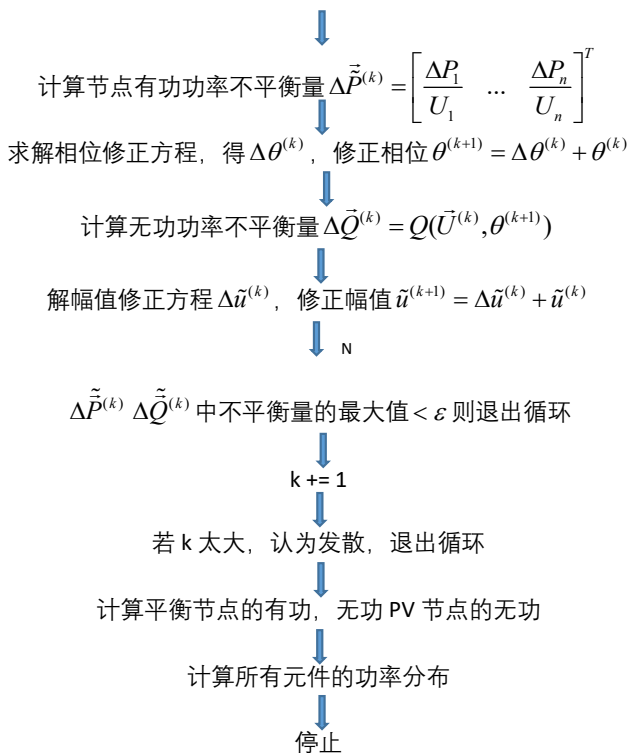
迭代时： $\Delta \tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{B}' \Delta \tilde{\theta}$ ， $\mathbf{B}' \in \mathbf{R}^{n-1, n-1}$  生成  $\mathbf{B}'$  阵时，忽略所有元件电阻，忽略线路对地

支路，忽略变压器对地支路， $B_{ij} = -\left(\frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}\right) = \frac{1}{x_{ij}}$ ，

$\Delta \mathbf{Q} = -\mathbf{B}'' \Delta \tilde{U}$ ， $\mathbf{B}'' \in \mathbf{R}^{m, m}$ ， $\mathbf{B}''$  就是导纳矩阵的虚部 m 阶主子块。

2. 流程





讨论:

PQ 解耦法事实上没有解耦, 因为  $\Delta \tilde{Q}^{(k)} = Q(\vec{U}^{(k)}, \theta^{(k+1)})$  中得到  $\Delta \tilde{Q}^{(k)}$  用到了  $\theta^{(k)}$ 。

特点: 线性收敛, 但计算量相比于 N-R 法减少。(常数化, 生成一次);

精度和 N-R 法一样。(因为跳出迭代/判敛的条件一样)

## 五、潮流计算的其他方法

### 1. 直流潮流法:

对网络的基本假设: 忽略所有元件电阻, 忽略所有对地支路, 导纳阵不可逆。计算速度非常快, 结果不精确。

### 2. 极小化潮流算法: 最速下降

### 3. 三相潮流:

- a. 三相网络结构不对称（和/或）三相激励不对称：三相潮流算法
- b. 三相网络结构对称且三相激励不对称：对称分量法（正负零序）
- c. 三相网络结构对称且三相激励对称：单相潮流算法

## 第五章调频调压

### 一、有功功率和频率

- (1) 负荷的电压静态特性

$$P_L = P_{LN} \left[ a_P \left( \frac{U}{U_N} \right)^2 + a_P \left( \frac{U}{U_N} \right)^1 + c_P \left( \frac{U}{U_N} \right)^0 \right]$$

$$Q_L = Q_{LN} \left[ a_Q \left( \frac{U}{U_N} \right)^2 + a_Q \left( \frac{U}{U_N} \right)^1 + c_Q \left( \frac{U}{U_N} \right)^0 \right]$$

- (2) 系统的功频调节系数

$$K_S = K_L + K_{G\Sigma}$$

$$K_S = K_{L*} \frac{P_{LN}}{f_N} + K_{G\Sigma*} \frac{\sum_{i=1}^g P_{Gi}}{f_N}$$

$$\text{取 } K_{SB} = K_{LB} = \frac{P_{LN}}{f_N}$$

$$K_{S*} = K_{L*} + K_{G\Sigma*} \frac{\sum_{i=1}^g P_{Gi}}{P_{LN}} = K_{L*} + K_{\Sigma G*} k_r$$

$k_r$  被称为热备用系数，= 全部参加一次调频的机组的总容量/标称负荷。

调频时需注意有频差和无频差时的负荷概率增量。注意并列的两个系统的频率时相同的。

- (3) 发电机的功率圆图

有以下约束：

- a. 原动机出力 ( $P_{\min}, P_{\max}$ )
- b. 定子热容量（励磁电流  $I_f$ ）
- c. 转子热容量（电枢电流  $I_t$ ）
- d. 进相运行

## e. 功角约束

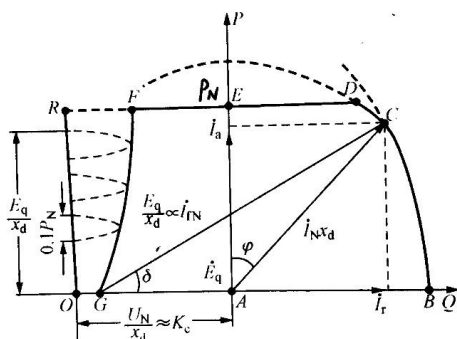


图 9-3 汽轮发电机的安全运行极限

## (4) 旋转备用（热备用）

- 负荷备用（因为负荷预测存在不准，符合存在波动）：2-5%
- 事故备用（发电机很昂贵，发生事故需要停机保护）：5-10%，且大于系统中最大的一台机组的容量
- 检修备用：4-5%
- 国民经济发展备用 3-5%

## (5) 厂用电

- 水电厂：0.1%~1% × 总有功负荷
- 核电厂：4%~5%
- 火电厂：5%~8%
- 网损（最大负荷期间）：6%~10%

## (6) 二次调频的分配原则

设共有  $1, 2, \dots, n_i$  台，减出力  $ACE_i = -\Delta P_{Li}$

①按爬坡速度分配：为了尽快消除频差

$$r_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sum_{j=1}^{n_i} S_{ij}}$$

$$P_{Sij} = P_{Gij} - r_{ij} ACE_i$$

②按备用容量分配

$$r_{ij} = \frac{|P_{Mij} - P_{Gij}|}{\sum_{j=1}^{n_i} |P_{Mij} - P_{Gij}|}$$

要减出力， $P_{Mij}$  为上界（最大允许输出功率）



要增出力,  $P_{Mij}$  为下界 (最小允许输出功率)

二次调频的驱动信号:

$$\Delta P_{Gij} = P_{Sij} - P_{Gij} = -r_{ij} ACE_i$$

#### (7) 三次调频

仅二次调频不一定最经济

三次调频由于计算量大, 每隔 5~15min 进行一次。

$$P_{eij} = e_{ij} \sum_{j=1}^{n_i} P_{Gij}$$

一般  $P_{eij} \neq P_{Gij}$

假如三次调频的驱动信号为:

$$\Delta P_{Gij} = P_{eij} - P_{Gij}$$

$$\sum_{i=1}^{n_i} \Delta P_{Gij} = \sum_{j=1}^{n_i} P_{eij} - \sum_{j=1}^{n_i} P_{Gij} \begin{cases} = 0 & (t = 0) \\ \neq 0 & (t > 0) \end{cases}$$

因而频率会波动,

选取三次调频的驱动信号:

$$\Delta P_{Gij} = P_{eij} - e_{ij} \left( \sum_{j=1}^{n_i} P_{eij} - \sum_{j=1}^{n_i} P_{Gij} \right) - P_{Gij}$$

$$\sum_{i=1}^{n_i} \Delta P_{Gij} = \sum_{j=1}^{n_i} P_{eij} - \left( \sum_{j=1}^{n_i} P_{eij} - \sum_{j=1}^{n_i} P_{Gij} \right) - \sum_{j=1}^{n_i} P_{Gij} = 0$$

二三次调频综合后:

$$P_{Sij} = P_{eij} - e_{ij} \left( \sum_{j=1}^{n_i} P_{eij} - \sum_{j=1}^{n_i} P_{Gij} \right) - r_{ij} ACE_i$$

## 二、无功功率和电压

#### (1) 无功功率源:

- 发电机: 调节励磁
- 并联补偿: 电容发出无功, 分组投切
- 串联补偿: 直接减小线路的电容
- SVC, StatCom

## (2) 调压的必要性和容许电压偏差

电压偏差的危害：

- a. 高电压：降低寿命，威胁绝缘
- b. 低电压：电动机转差增大，电流变大，升温，损坏绝缘；影响厂用电

供电电压偏差的限值：

35kV 及以上：上下界宽度之和：10%

20kV 及以下~380V：± 7%

220V：0.90 ~ 1.07

配电线路最大电压损耗：

110~10kV：5%

380V：5%

220V：7%

## (3) 无功功率平衡

$$\sum_i P_{GiN} \geq P_{L\max} + \Delta P_{\max} + P_R$$

发电机， $Q_L$  变化，要使电压  $U_L$  不变，只能  $E_q$  变化

## (4) 中枢点电压管理

- a. 逆调压：大负荷时电压低，需要节点电压高，来给电网电压留裕度；小负荷是需要电压低。（1, 1.05）
- b. 顺调压：重载时电压偏低，低不允许低过下界。1.025 ~ 1.075（该数值在中国可见于 1978 年后东南大学编写的电力系统稳态分析教材，后被其他教材沿用）
- c. 恒调压：原理同顺调压，只不过电压允许范围更窄：1.02 ~ 1.05（该数值的取值来历同上）

## (5) 三绕组变压器分接头选择

由低压侧负载定高压侧  $U_{1t}$ ，再由中压侧负载定  $U_{2t}$ 。

## (6) 变压器改变分接头调压与并联补偿配合调压

先在小负荷下无补偿的情况下选择分接头（就近靠档），再在大负荷方式下选补偿容量  $Q_C$ 。

### 三、有功功率最优分配

数学规划问题：

目的：运行在最经济方式下

决策变量  $P_G$ ,  $Q_G$ , 分接头,  $Q_C$

约束条件：电能质量，安全运行，功率平衡

发电机组的燃料消耗特性（耗量特性）：单位时间（h）消耗燃料（kg 标准煤）与  $P_G$  的关系。用三次/二次多项式拟合实验测量结果。

## 第六章 HVDC, FACTS

### 一、HVDC

#### 1. 特点

- a. 造价：成本主要是换流站（整流站，逆变站）  
线路相对交流而言便宜。
- b. 无静态稳定性问题，仅有线路发热极限，而交流有  $P_{\max} = \frac{U_1 U_2}{X} \approx \frac{U^2}{X}$  限制。
- c. 调整迅速：交流下要控制线路输送功率非常困难
- d. 可抑制短路电流：现代电网网架越来越密，短路电流越来越大。

#### 2. 缺点：

- a. 逆变侧在负载重时可能会逆变失败
- b. 谐波
- c. 需要无功补偿

#### 3. 电路中平波电抗器的作用：

- (2) 抑制谐波
- (3) 抑制直流线路上的短路电流
- (4) 抑制小电流不连续

(4) 防止逆变器换相失败

## 二、FACTS（用电力电子技术提高电力系统的调节能力）

电力市场化后电网潮流多变。

FACTS 可以对建设规划不足（有的线路满载，同时有的线路利用率很低），调节能力有限进行弥补，对已有线路进行技术改造。电力电子技术，计算技术，通信技术

例子：并联两线路阻抗不同，两者不同时满载，需要加串补。

变压器变比不同，环流浪费功率，需要加电力电子移相器（串联电压）。

串联型：TCSC

并联型（比串联型更常用）：SVC，SVG

混合型：UPFC（unified power flow controller 美国首创，昂贵，找不到应用场景），

TCSP（thyristor controlled shift phasor）