

稳态复习重点

(by Xu2087)

1、掌握潮流计算的定义、作用和基本潮流算法的特点；

定义：针对某个扰动变量 P，根据给定的控制变量 u，求出相应的状态变量 x。

作用：根据给定的网络结构及运行条件，求出整个网络的运行状态。运行状态包括：母线的电压、网络中的功率分布及功率损耗等。

基本潮流算法的特点：

(1) 高斯-塞德尔算法

优点：

- 原理简单, 程序设计十分容易。线性非线性方程组均适用。
- 导纳矩阵是一个对称且高度稀疏的矩阵。(占用内存小；迭代计算量小-各种潮流中算法最小)

缺点：

- 收敛速度很慢。(松散耦合)
- 迭代次数将随所计算网络节点数的增加而直线上升
- 病态条件的系统，计算往往会发生收敛困难。

(2) 牛顿潮流算法

优点：

- 收敛速度快，算法具有平方收敛特性。所有算法中收敛最快的。4—5 次。
- 具有良好的收敛可靠性。(取决于有一个良好的起动初值。)

缺点：

- 牛顿法所需的内存量及每次迭代的时间均较高斯-塞德尔多，与程序设计技巧有密切的关系。
- 如果电压质量差，或有重载线路而节点间角差很大时，有问题。

(3) 快速解耦法

- 用解两个阶数几乎减半的方程组，显著地减少了内存需求量及计算量；
- 系数矩阵 B' 及 B'' 是两个常数阵，在迭代循环前一次形成并进行三角分解组成因子表，在迭代过程中反复应用，大大缩短了每次迭代所需时间。
- B' 及 B'' 都是对称阵，为此只要形成并储存因子表的上三角或下三角部分。
- 线性收敛特性。快速解耦法达到收敛所需的迭代次数比牛顿法多。但总计算速度仍然有大幅提高。
- 具有较好的收敛可靠性。另外，快速解耦法的程序设计较牛顿法简单。

2、潮流计算基本方程和非线性的原因；

$$\dot{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

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

交流电力系统中的复数电压变量可以用两种坐标形式来表示：

$$\dot{U}_i = U_i e^{j\theta_i}$$

或 $\dot{U}_i = e_i + jf_i$

而复数导纳为: $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$

潮流方程的直角坐标形式:

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

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

潮流方程的极坐标形式:

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

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

采用节点功率作为节点注入量是造成方程组呈非线性的根本原因

3、病态条件系统的特点和求解方法;

特点:

- (1) 节点间相位角差很大的重负荷系统;
- (2) 包含有负阻抗支路的系统;
- (3) 具有较长的辐射型线路的系统;
- (4) 长线路与短线路接在同一节点上, 而且长短线路的长度比值又很大的系统。

此外, 平衡节点所在位置的不同选择也会影响收敛性能。

求解方法:

为克服这些缺点, 提出了基于节点阻抗矩阵的高斯-赛德尔迭代法。

$$\dot{I}_j^{(k)} = \frac{P_j^s - jQ_j^s}{U_j^{*(k)}}$$

$$U_j^{(k)} = \sum_{j=1}^{i-1} Z_{ij} \dot{I}_j^{(k)} + \sum_{j=i}^n Z_{ij} \dot{I}_j^{(k-1)}$$

4、牛顿法潮流雅可比矩阵的特点, 其稀疏结构和节点导纳矩阵的关系;

极坐标及直角类型的修正方程式, 有以下特点:

- a) 修正方程式的数目分别为 $2(n-1)-m$ 个及 $2(n-1)$ 个, 在 PV 节点所占的比例不大时, 两者的方程式数目基本接近 $2(n-1)$ 个。
- b) 雅可比矩阵的元素都是节点电压的函数; 每次迭代, 雅可比矩阵都需要重新形成。
- c) 雅可比矩阵的非对角元是否为零决定于相应的节点导纳阵元素 Y_{ij} 是否为零。
- d) 和节点导纳矩阵具有相同稀疏结构的分块雅可比矩阵在位置上对称, 但雅可比矩阵不对称。

5、快速解耦潮流和牛顿法潮流的关系, 基本快速解耦潮流与 XB 和 BX 型快速解耦潮流潮流在系数矩阵求取上有哪些异同, 对大 R/X 比值病态问题如何处理。

- (1) 快速解耦潮流和牛顿法潮流的关系:

- 来源于极坐标形式的牛顿法
- 快速解耦法在内存占用量以及计算速度方面，都比牛顿法有了较大的改进。
- 从牛顿法到快速解耦法的演化时在元件的 $R \ll X$ 以及线路两端相角差比较小等假设基础上进行的，当系统不符合这些假设时，迭代就会出现大 R/X 比值病态问题

(2) 基本快速解耦潮流与 XB 和 BX 型快速解耦潮流潮流在系数矩阵求取上的异同：

两者的差别主要在构成 B' 及 B'' 时元件电阻的取舍问题上。

XB 方案（标准型）：在构成快速解耦法 B' 的元素时，应不计串联元件的电阻 R ，仅用其电抗值 X ，而在形成 B'' 的元素时则仍用精确的电纳值 B 。

BX 方案（通用型）：在形成 B' 的元素时，不忽略电阻而采用精确的电纳值 B ；而在形成 B'' 时却略去电阻采用元件的电抗值 X 。

(3) 对大 R/X 比值病态问题的处理

1. 对大 R/X 比值支路的参数加以补偿，分为串联补偿法及并联补偿法两种。

A. 串联补偿法。原理见图 1-3，其中 X_c 数值的选择应满足 $i-m$ 支路 $(X+X_c) \gg R$ 的条件，这种方法的缺点是如果原来支路的 R/X 比值非常大，从而使 X_c 的值选的过大，新增节点 m 的电压值有可能偏离节点 i 及 j 的电压很多，从而导致潮流计算收敛缓慢，甚至不收敛。

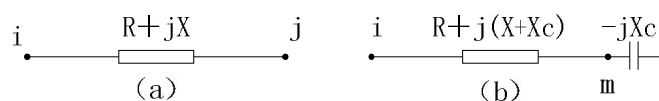


图1-3 对大 R/X 比值支路的串联补偿

B. 并联补偿法。如图 1-4 所示。经过补偿的支路 $i-j$ 的等值导纳为

$$Y_{ij} = G + j(B + B_f) + \frac{1}{\frac{1}{-2jB_f} + \frac{1}{-2jB_f}} = G + jB$$

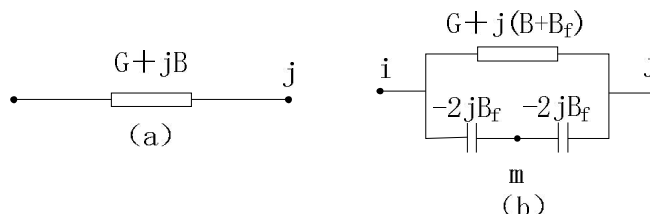


图1-4 对大 R/X 比值支路的并联补偿

(a) 原支路

(b) 补偿后的支路

6、因子表的作用，给出不同分解方式的因子矩阵元素能写出相应因子表；

三角分解法的 LR、LDU 以及 CROUT 分解，清楚前代、规格化、回代的意义。具体见 PPT

7、高斯消元与消去节点的关系；

- (1) 以高斯消元法逐列消元，对应于以消去节点法逐个消去节点
- (2) 消元过程中的注入元，在物理意义上对应于由于消去某节点而出现新的互联支路导纳。
- (3) 就形成因子表而言，三角分解法与高斯消元法完全等效，而以高斯消元法逐列消元又对应于以消去节点法逐个消去节点，因此可通过考察消去节点以考察因子表的形成
- (4) 基于如上关系，高斯消元后如出现注入元，该注入元也将出现在三角分解后所得的上、下三角矩阵中，并将出现在所形成的因子表中。
- (5) 因子表中是否会出现注入元等价于网络消去节点后是否会出现新的互联支路。

8、掌握三种节点优化编号方法。

- (1) 静态优化法—按静态联结支路数的多少编号
- (2) 半动态优化法—按动态联结支路数的多少编号—最常用
- (3) 动态优化法—按动态增加支路数的多少编号

9、稀疏存储的几种主要格式；【具体见第二章 PPT 例题】

- (1) 散居格式
- (2) 按行（列）存储格式
- (3) 三角检索存储格式
- (4) 链表存储格式

10、图上因子分解和前代回代计算；

【具体见第二章 PPT 例题 3-4、3-5、3-6】

11、稀疏向量法的因子化路径、前代运算路径、回代运算路径；

【具体见第二章 PPT 例题 3-7、3-8】

12、理解齐次二次代数方程泰勒级数展开公式 $y^s = y(x(0)) + J\Delta x + y(\Delta x)$ ；

见书 P22-23

13、掌握保留非线性潮流和牛顿法潮流算法迭代公式的差别；

牛顿法迭代公式

$$\Delta x^{(k)} = -(J(x^{(k)}))^{-1} [y(x^{(k)}) - y^s]$$
$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)}$$

保留非线性算法

$$\left. \begin{aligned} \Delta x^{(k+1)} &= -(J(x^{(0)}))^{-1} [y(x^{(0)}) - y^s + y(\Delta x^{(k)})] \\ x^{(k+1)} &= x^{(0)} + \Delta x^{(k+1)} \end{aligned} \right\}$$

保留非线性：

- 1) 恒定雅可比矩阵，只需一次形成，并由三角分解构成因子表
- 2) $\Delta x^{(k)}$ 是相对于始终不变的初始估计值 $x^{(0)}$ 的修正量
- 3) 达到收敛所需迭代次数多，收敛特性为直线但总计算速度较快

牛顿法：

- 1) 每次重新形成因子表
- 2) $\Delta x^{(k)}$ 是相对于上一次迭代所得到的迭代点 $x^{(k)}$ 的修正量

14、定雅可比牛顿法与保留非线性潮流的联系；

定雅可比牛顿法是经典的牛顿法的一种简化形式，即用恒定不变的由变量初始值计算得到的雅可比矩阵进行整个迭代过程的计算。

只要初始值相同，并且第一次迭代时不计非线性项，则在两种方法随后的每一步迭代中，将得到完全重合的中间迭代点，从而最后结果也是相同的。

15、掌握保留非线性潮流算法的特点；

- 1) 在收敛性方面,属于“等斜率法”的范畴,和牛顿法的平方收敛特性相比,达到收敛的迭代次数较牛顿法多。
- 2) 计算速度可以接近快速解耦法。
- 3) 矩阵的存储量也比较少。
- 4) 较快速解耦法,收敛的可靠性更好。

16、 最小化潮流算法与常规潮流的区别,常用的目标函数形式,搜索方向和最优步长因子确定方法;

(1) 区别:潮流计算问题归结为求解一个非线性代数方程组;非线性规划潮流计算法是把潮流计算问题表示为求某一个由潮流方程构成的函数(称为目标函数)的最小值问题,并以此来代替代数方程组的直接求解。

(2) 常用的目标函数形式:

潮流计算问题概括为求解如下的非线性代数方程组

$$f_i(x) = g_i(x) - b_i = 0 \quad \text{或} \quad f(x) = 0$$

构造标量函数

$$F(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x)^2 = \sum_{i=1}^n (g_i(x) - b_i)^2$$

或

$$F(x) = [f(x)]^T f(x)$$

若非线性代数方程组的解存在,则标量函数 $F(x)$ 的最小值应该成为零。

解代数方程组的问题转化为求非线性多元函数的最小值问题。于是潮流计算问题归为无约束非线性规划问题。

(3) 搜索方向和最优步长因子确定方法

搜索方向 $\Delta x^{(k)}$ 的确定:

利用常规牛顿算法每次迭代所求出的修正量向量 $\Delta x^{(k)} = -J(x^{(k)})^{-1} f(x^{(k)})$ 作为搜索方向,并称之为目标函数在 $x^{(k)}$ 处的牛顿方向。

最优步长因子 $\mu^{*(k)}$ 的确定:

目标函数看作步长因子的一元函数

$$F^{(k+1)} = F(x^{(k)} + \mu^{(k)} \Delta x^{(k)}) = \Phi(\mu^{(k)})$$

关键是写出 $\Phi(\mu^{(k)})$ 的解析表达式,然后 $\mu^{*(k)}$ 由下式得

$$\frac{dF^{(k+1)}}{d\mu^{(k)}} = \frac{d\Phi(\mu^{(k)})}{d\mu^{(k)}} = 0$$

17、 PV 节点的无功功率越界和 PQ 节点的电压越界的处理方法;

PV 节点的无功功率越界的处理方法:

发电机节点及具有可调无功电源的节点,常被指定为 PV 节点。

对于用牛顿算法的程序,当在迭代过程中发现无功功率越界时,即将这一节点转化为其给定无功功率 Q_i^s 等于 Q_i^l (上下限)的 PQ 节点。

这时可将节点 i 由 PV 节点转变为 PQ 节点,令该点的无功给定值是 Q_i^{limit} ,然后重新进行潮流迭代计算

由于节点类型发生了变化,雅可比矩阵及其因子表也将变化。

对牛-拉法:

当使用极坐标时,多了一个 PQ 节点,应增加一个无功功率平衡方程,增加一个电压幅值变量,所以雅可比矩阵的阶次将增加一阶。

对于直角坐标, 原 PV 节点对应的 $(U_i^{sp})^2 - e_i^2 - f_i^2 = 0$ 方程将转变为无功平衡方程。

对快速分解法:

$P-\theta$ 迭代修正方程不变, Q-V 修正方程将增加一阶。如果 B'' 是原来的 Q-V 修正方程的系数矩阵, 则节点 i 的 PV 节点转换成 PQ 节点时, B'' 增加 1 阶。

两种简单方法:

第一种方法在快速分解法形成 B'' 时, 使 B'' 的阶次为 $n \times n$ 。即把 PV 节点所对应的部分也包括在内, 然后在 PV 节点所对应的 B'' 的对角元素上增加一个很大的数

第二种方法仍把该节点作为 PV 节点, 但需要将发生无功越界的 PV 节点的电压改变以使该节点的无功功率回到界内。

PQ 节点的电压越界的处理方法:

PQ 节点的电压越界可以通过将该节点转化成 PV 节点的办法来处理, 也即将该节点的电压固定在电压的上界或下界上。

在潮流计算中, 将该节点的电压幅值固定在需要控制的限制值上, 然后把该节点作为 PV 节点进行潮流迭代计算。这时 Q-V 潮流方程减少一个(对极坐标)。

对牛顿-拉夫逊法: 每次迭代要重新形成雅克比矩阵, 这种节点类型的改变不会遇到困难。

对于快速分解法可以有两种处理方法:

第一种作法在 Q-V 迭代方程的 B'' 中划去将要转变成的 PV 节点 i 所在的行和列, 这相当于在节点 i 的对角元上加接一个有很大数值的导纳, 利用秩 1 因子更新算法对 B'' 进行修正即可, 这种作法灵活方便。

第二种作法不改变节点类型, 电压越界的节点仍保持为 PQ 节点, 但改变该节点的无功给定量, 这需要计算节点 i 的无功功率改变多少时才能使节点 i 的电压拉回到界内。

18、带负荷调压变压器抽头的调整方法;

第一种方法:

在计算开始前对这类变压器先选择一个适当的变比值 K , 用通常的牛顿法先迭代 2~3 次。然后在后继的每两次迭代中间, 插入下述的变压器变比调整选择计算:

U_i^s 是所要保持的节点 i 的电压, $U_i^{(k)}$ 是该次迭代已求的电压。计算变压器变比在 $(k+1)$ 次迭代时所取的新值:

$$K^{(k+1)} = K^{(k)} + c(U_i^s - U_i^{(k)})$$

重复计算。直到前后两次迭代所求得的 K 值变化小于一个预定的很小的数并且潮流收敛为止。

第二种方法: 自动调整法(见 PPT)

19、互联系统区域间交换功率的控制方法;

互联系统区域间交换功率控制, 也称为联络线控制。

第一种方法: 在互联系统的每一个区域内, 都指定一台发电机作为调节发电机, 通过这些发电机有功出力的调整以保证本区域的净交换有功功率为规定值。

这些发电机在潮流计算中作 PV 节点处理, 并分别指定一个有功出力作为其计算初值。

第二种方法: 在计算过程中自动控制区域内有功交换。[见 PPT]

20、最优潮流定义, 最优潮流与基本潮流的区别;

(1) 定义: 最优潮流就是当系统的结构参数及负荷情况给定时, 通过控制变量的优选, 所

找到的能满足所有指定的约束条件，并使系统的某一个性能指标或目标函数达到最优时的潮流分布。

(2) 最优潮流和基本潮流比较：

基本潮流计算时控制变量 u 是事先给定的；而最优潮流中的 u 则是可变而待优选的变量，为此必然有一个作为 u 优选准则的函数。

最优潮流计算除了满足潮流方程这一等式条件之外，还必须满足与运行限制有关的大量不等式的约束条件。

21、 最优潮流常用的目标函数、控制变量、状态变量、约束条件；

最优潮流的目标函数：

(1) 全系统发电燃料总耗量（或总费用）

$$f = \sum_{i \in NG} K_i(P_{Gi})$$

(2) 有功网损

$$f = \sum_{i,j \in NL} (P_{ij} + P_{ji})$$

常用的控制变量有：

- (1) 除平衡节点外，其它发电机的有功出力；
- (2) 所有发电机节点及具有可调无功补偿设备节点的电压模值；
- (3) 移相器抽头位置
- (4) 带负荷调压变压器的变比。
- (5) 并联电抗器/电容器容量

常见的状态变量有：

- (1) 除平衡节点外，其它所有节点的电压相角；
- (2) 除发电机节点以及具有可调无功补偿设备节点之外，其它所有节点的电压模值。

约束条件：

最优潮流分布必须满足基本潮流方程，这就是最优潮流问题的**等式约束条件**。即 $f(x, u, p) = 0$ 。

由于扰动变量 p 是给定的，该式可简化为 $g(x, u) = 0$

不等式约束条件：

- (1) 有功电源出力上下限约束；
- (2) 可调无功电源出力上下限约束；
- (3) 带负荷调压变压器变比 K 调整范围约束；
- (4) 节点电压模值上下限约束；
- (5) 输电线路或变压器元件中通过的最大电流或视在功率约束；
- (6) 线路通过的最大有功潮流或无功潮流约束
- (7) 线路两端节点电压相角差约束，等等。

统一表示为 $h(u, x) \leq 0$

22、 简化梯度算法的表征形式和基本求解过程；

$$\nabla f = \frac{\partial L}{\partial u} = \frac{\partial f}{\partial u} + \left(\frac{\partial g}{\partial u}\right)^T \lambda + \frac{\partial \omega}{\partial u}$$

具体求解过程见书本 P53

23、 直流潮流计算方法；

PPT 例题

24、 状态估计定义、作用，状态估计与潮流计算的区别；

电力系统状态估计：对给定的系统结构及量测配置，在量测量有误差的情况下，估计出系统的真实状态——各母线上的电压相角与模值及各元件上的潮流。

作用：

- 1) 去除不良数据，提高数据精度
- 2) 计算出难以测量的电气量，相当于补充了量测量。

状态估计与潮流计算的区别：

常规潮流计算程序的输入通常是负荷母线的注入功率 P 、 Q ，以及电压可控母线的 P 、 $|V|$ 值，一般是根据给定的 n 个输入量测量 z 求解 n 个状态量 x ，而且满足以下条件：

$$z = h(x) \quad (1)$$

其中， $h(x)$ 是以状态量 x 及导纳矩阵建立的量测函数向量。

量测个数与状态量个数一致，因此，哪怕这些输入量 z 中有一个数据无法获得，常规的潮流计算也无法进行。

当一个或多个输入量 z 中存在粗差（gross error，又称不良数据）时，也会导致潮流计算结果状态量 x 出现偏差而无用。

在实际应用中，可以获取其它一些量测量，譬如线路上的功率潮流值 P 、 Q 等，这样，量测量 z 的维数 m 总大于未知状态量 x 的维数 n 。

而且，由于量测量存在误差，(1) 式将变成

$$z = h(x) + v \quad (2)$$

z 是观测到的量测值， v 是量测误差。

上式可以理解成：如果以真实的状态向量 x 构成测量函数 $h(x)$ ，则量测真值还要考虑加上量测噪音 v 的影响后，才是观测到的量测值 z 。

从计算方法上，对状态估计模型 (2) 式，采用了与常规潮流完全不同的方法，一般根据一定的估计准则，按估计理论的处理方法进行计算。

25、 网络可观测性、关键量测，关键量测或关键量测组的存在对数据的可检测与可辨识性的影响；

网络可观测性：

当收集到的量测量通过量测方程能够覆盖所有母线的电压幅值和相角时，则通过状态估计可以得到这些值，称该网络是可观测的。

关键量测：

定义为，若失去该量测，系统不可观测。

关键量测或关键量测组的存在对数据的可检测与可辨识性的影响：

- 1) 由于关键量测总是精确拟合，关键量测处的状态估计解无任何滤波效果。
在极端情况下，对一个无任何冗余的可观察系统尽管可以进行状态估计，但是所有残差都为零，无法辨识任何不良数据。
- 2) 量测组可以是系统中的两个或若干个量测。关键量测组中，如果仅仅出现一个不良数据，可以用启发式方法逐一验证后排除，但是如果出现多于一个不良数据将不可辨识。

26、 不良数据的检测和不良数据辨识定义；

- (1) 对 SCADA 原始量测数据的状态估计结果进行检查，判断是否存在不良数据并指出具体可疑量测数据的过程称之为**不良数据检测**。
- (2) 对检测出的可疑数据验证真正不良数据的过程称之为**不良数据的辨识**。

27、 状态量和量测量的估计误差、残差、误差的定义；

| | 观测值 | 真实值 | 估计值 | 估计误差 | 残差 | 误差 |
|----|-------|--------|-----------|------------------------------|------------------------|----------------|
| 状态 | ----- | x | \hat{x} | $\tilde{x} = x - \hat{x}$ | ----- | ----- |
| 量测 | z | $h(x)$ | \hat{z} | $\tilde{z} = h(x) - \hat{z}$ | $r \equiv z - \hat{z}$ | $v = z - h(x)$ |

(具体见 PPT)

28、 电力系统安全的含义，电力系统运行条件四种状态、特点和转化过程；

电力系统安全的含义：

对安全的广义解释是保持不间断供电，亦即不失去负荷。在实用中更确切地用正常供电情况下，是否能保持潮流及电压模值等在允许的范围以内表示。

等式的约束形式： $g(x)=0$.

式中： x 为系统运行的状态量。可以认为是功率平衡。

电力系统运行条件用四种状态来描述：

- 1) **安全正常状态**：已处于正常状态的电力系统，在承受一个合理的预想事故集（contingency set）的扰动之后，如果仍不违反等约束及不等约束，则该系统处于安全正常状态。
- 2) **不安全正常状态**：如果运行在正常状态下的电力系统，在承受规定预想事故集的扰动过程中，只要有一个预想事故使得系统不满足运行不等式约束条件，就称该系统处于不安全正常状态。
- 3) **紧急状态**：运行在只满足等式约束条件但不满足不等式的状态。
 - a) 持久性的紧急状态：没有失去稳定性质，可通过校正控制使之回到安全状态。
 - b) 稳定性的紧急状态：可能失去稳定的紧急状态。通过紧急控制到恢复状态。
- 4) **恢复状态**：系统可能不满足等式约束，而满足不等式约束，或一部分满足约束，另一部分不满足。对处于恢复状态的系统，一般通过恢复控制使之进入正常状态。

转化过程：

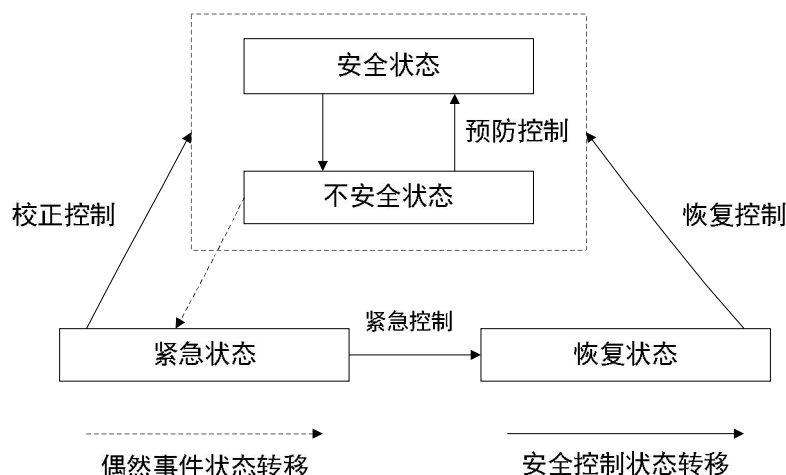


图3-1 电力系统运行状态分类及其转化过程

29、 电力系统等值的作用；

当电力系统进行在线计算时，往往难以在调度中心获得整个系统的全部实时信息，而系统数学模型的规模又必须与所得到的实时信息相一致。因此，不得不把系统中的某

些不可观察部分通过等值方法来处理。应用等值方法可以大大的缩小问题的计算规模。

30、 Ward 等值的误差的主要原因；

由于求取等值是在基本运行方式下进行的，而在系统实时情况下，由于运行方式变化会导致外部系统实际注入变化和参数发生变化，因此造成潮流计算的误差。这种现象在无功率方面表现得更为突出。

31、 非基本运行方式下 WARD 等值校正方法；

- 1) 先以内部系统实时数据作状态估计，求出边界节点的电压模值与电压相角；
- 2) 然后以所有边界节点作为平衡节点，对基本运行方式下的外部等值系统（由边界节点及保留的外部系统节点组成）作潮流计算。
 - ◇ 对保留的 PV 节点：有功注入为 0，电压模值为给定值，相角取边界节点相角平均值。
- 3) 潮流计算求得的边界注入用于校正基本运行方式下的注入。
- 4) 如果校正后注入进行状态估计时，与内部信息有较大残差，可修改边界节点电压模值与相角，重复计算 2—3 次。

32、 缓冲母线的作用；

对于静态安全分析，引起最大影响的开断事故是发生在与边界母线相连的联络线上，以边界母线为中心，可向外部系统确定若干节点层。若保留第一层各节点，略去该层各节点之间的联络线，加上用 Ward 等值法得到的边界等值支路与等值注入，就可形成缓冲等值网。

第一层上的节点，称为缓冲母线，缓冲母线与边界母线间的支路，称为缓冲支路。

在缓冲等值中，边界节点之间的互连等值支路参数及边界节点的等值注入，可由常规的 Ward 等值法求出。

为了在内部系统出现线路开断情况下，外部系统能向内部系统提供一定的无功功率支援，可把所有缓冲母线 m 定为 PV 节点，并规定其有功注入 $P_m=0$ ，母线电压等于相连的边界母线电压 $U_m=U_{i0}$ ，这样缓冲母线在任何情况下都不会提供有功功率。

此外，由于高压电网的 $|g_{ij}| \ll |b_{ij}|$ ，在 $P_m=0$ 时， $\theta_m = \theta_{i0}$ ，所以在基本运行方式下，缓冲母线也不向内部系统提供无功功率。只有内部系统出现事故开断后，缓冲母线才会作出提供无功功率的响应。

构成等值时，边界母线的类型将按其实际情况定为 PV 母线或母线 PQ 母线。如果边界母线原来就是 PV，由于其本身即具有无功增量响应，就不需在这些边界处添相应的缓冲节点。当边界母线有相邻接的 PV 节点时，也可考虑不增添相应的缓冲节点。

33、 REI 等值的基本思想，REI 网络的求取；

REI (Radial Equivalent Independent)等值法的基本思想：

- (1) 把电网的节点分为两组，即要保留的节点与要消去的节点。
- (2) 首先将要消去节点中有源节点按其性质的相关归并为若干组，每组有源节点用一个虚拟的等价有源节点来代替，它通过一个无损耗的虚拟网络（REI 网络）与这些有源节点相联。
- (3) 在此虚拟有源节点上的有功、无功注入功率是该组有源节点有功与无功功率的代数和。
- (4) 在接入 REI 网络与虚拟等价节点后，原来的有源节点就变成了无源节点。
- (5) 然后将所有要消去的无源节点用常规的方法消去。

REI 网络求取见 PPT 算例。

34、 为保证 REI 网络是准确，PQ 节点、PV 节点应满足的条件；

PQ 节点：当一组外部 PQ 母线用 REI 网络进行等值时，为了保证等值网络在非基本运行方式下的准确度，在基本运行方式下这些母线的电压角应该是同相位的。

PV 节点：为了要使等值网络与原始网络的响应一致，在基本运行方式下，这些 PV 母线（节点）的电压角 θ_k 和功率因素角 ϕ_k 之和应是相等的。

35、 基本节点与基本支路；

基本节点：在外部系统中，对一定的运行状态，某些节点或支路对内部系统有较强的关联，这些节点或支路的状态发生改变时，可对内部系统的潮流分配有着明显的影响。

基本支路：由基本节点连接起来的支路称为基本支路。

36、 直流潮流法支路开断计算；

见 PPT 算例

37、 发电机开断变化过程的划分，与静态安全分析相关的时段；

发电机开断模拟的数学模型，通常整个变化过程分为四个时段。

时段 1：电磁暂态过程。系统的暂态潮流是按网络阻抗与机组暂态电抗来分布，由于系统电磁储能容量很小，暂态过程在数毫秒内即被阻尼。

时段 2：机械暂态过程。发电机的反应过程决定于机组的惯性，有功出力的变化是由发电机旋转部分的转动惯量来决定。

时段 3：调速器动作过程。发电机间功率分配的变化是由 FRC 特性来决定的。

时段 4：自动发电控制。在一个控制区域内的发电机按自动发电控制装置（AGC）的整定值进行调节。

- ◇ 对于在线发电机开断模拟，快速反应的时段 1、2 不予考虑。
- ◇ 时段 3 的行为是静态安全分析所需研究的部分，此时各台发电机的功率变化可以用它的 FRC 与系统的 FRC 之间的比例关系来确定。时间：几秒—几十秒。
- ◇ 时段 4 中 AGC 的作用：是通过二次频率调整来消除静态频率偏差，此外还可控制联络线的功率来调整互联系统间的静态频率偏差。

38、 预想事故的自动选择的目的；

预想事故的自动选择 ACS (Automatic Contingency Selection)：就是在实时条件下利用电力系统实时信息，自动选出那些会引起支路潮流过载、电压违限等危及系统安全运行的预想事故，并用行为指标来表示它对系统造成的危害严重程度，按其顺序排队给出一览表。这样就可以不必对整个预想事故集进行逐个详细分析计算。因为有意义的预想事故，只占整个预想事故集的一小部分。因此，可以大大节省机时，加快安全分析速度。