

## 1. 潮流计算的本质

在给定电力系统网络拓扑、元件参数和发电、负荷参量条件下，计算有功功率、无功功率及电压在电力网中的分布。已知电力网络的结构和参数，已知各负荷点、电源点吸取或发出的有功功率和无功功率（PQ 节点），给定电压控制点的电压幅值和有功功率（PV 节点），对指定的一个平衡节点给定其电压幅值和相位角（Vθ 点），求解全网各节点电压幅值和相位角，并进一步算出各支路的功率分布和网络损耗。求解潮流问题的基本方程式是节点功率平衡方程。

运行中的电力系统，通过潮流计算可以预知，随着各种电源和负荷的变化以及网络结构的改变，网络所有母线的电压是否能保持在允许范围内，各种元件是否会出现过负荷而危及系统的安全。

## 2. 为什么潮流计算时非线性代数方程组

其实潮流计算的电力系统也是线性的，只不过求解的潮流方程是非线性的。

根据节点电压法可以列出电力系统的方程：
$$\dot{I} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (i=1, 2, \dots, n)。$$

该方程为线性方程，右侧的互导纳均为常数。但实际电力系统中，电流并不能确定，因此需要用功率表示，转化为如下方程：
$$\frac{P_i - jQ_i}{\dot{V}_i^*} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (i=1, 2, \dots, n)。$$

这个方程即潮流计算中实际使用的方程，是非线性方程。由此可见，采用节点功率作为节点注入量式造成方程组成非线性的根本原因。由于方程组为非线性，因此必须采用数值计算方法、通过迭代来求解。需要用迭代来求解的必定是非线性方程。

强调代数方程，主要是为了和后面的短路计算和系统稳定计算计算的微分方程区别开来。

## 3. 为什么潮流计算时注入功率为正

$$I_{12} = y_{12} (V_1 - V_2)$$

$$I_{32} = y_{32} (V_3 - V_2)$$

$$I_{12} + I_{32} = I_2 = \left( \frac{S_2}{V_2} \right)^*$$

$$y_{12}(V_1 - V_2) + y_{32}(V_3 - V_2) = I_2$$

$$\Rightarrow y_{12}V_1 - (y_{12} + y_{32})V_2 + y_{32}V_3 = I_2$$

$V_2$  前面的是自导纳，为了保证自导纳为正（计算过程约定的，为了能统一起来），故公式变为： $-y_{12}V_1 + (y_{12} + y_{32})V_2 - y_{32}V_3 = -I_2$

由于电流  $I_2 \Rightarrow -I_2$ ，故  $-I_2 = \left( \frac{-S_2}{V_2} \right)^*$ ，即输出的电流或者输出的功率为负，也就是说注入的电流或功率为正。

#### 4. 为什么潮流计算要定义节点类型

为了求解潮流创造便利条件，所以定义节点类型；对于电力系统中的每个节点，要确定其运行状态，需要由四个变量：有功注入注入有功  $P$ 、无功注入  $Q$ 、电压幅值  $U$  及电压相角  $\theta$ 。对于有  $n$  个独立节点的网络，其潮流方程有  $2n$  个，变量数为  $4n$  个。根据电力系统的实际运行情况，一般每个节点 4 个变量中总有两个是已知的，两个是未知的。按各个节点所已经变量的不同，可把节点分成三种类型。

注：(1)  $PQ$  节点。这类节点已知节点注入有功功率  $P_i$ 、无功功率  $Q_i$ ，待求的未知量是节点电压值  $U_i$  及相位角  $\theta_i$ ，所以称这类节点为  $PQ$  节点。

一般电力系统中没有发电设备的变电所母线、发固定功率的发电厂母线可作为  $PQ$  节点，这类节点在电力系统中占大部分。

(2)  $PV$  节点。这类节点已知节点注入有功功率  $P_i$  和电压值  $U_i$ ，待求的未知量是节点注入无功功率  $Q_i$  及相位角  $\theta_i$ ，所以称这类节点为  $PV$  节点。

这类节点一般为有一定无功功率储备的发电厂母线和有一定无功功率电源的变电所母线，这类节点在电力系统中位数不多，甚至可有可无。

(3) 平衡节点。潮流计算时，一般只设一个平衡节点，全网的功率由平衡节点作为平衡机来平衡。平衡节点电压的幅值  $U_s$  及相位角  $\theta_s$  是已知的，如果给定  $U_s = 1.0$ 、 $\theta_s = 1.0$ ，



待求的则是注入功率  $P_s$ 、 $Q_s$ 。

## 5. 为什么潮流计算要有平衡节点

原因一：潮流方程的极坐标形式的节点功率方程为：

$$P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1-10)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1-11)$$

以上各式中， $j \in i$  表示  $\Sigma$  号后的标号  $j$  的节点必须直接和节点  $i$  相联，并包括  $j = i$  的情况。其中， $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$  表示的是  $i, j$  两个节点之间的相角差，如果两个节点的度数都变大  $10$  度，其实并不会影响节电功率方程的求解，结果保持不变。那么最终求出来的每个节点的电压值将会有无数个答案，因此我们需要定义一个基准（即参考量）；

原因二：一般只设一个平衡节点，全网的功率可以由平衡节点作为平衡机来平衡。即，平衡节点存在的物理意义是保持系统的功率平衡，尽量保证每个节点的功率都在正常值上，缺多少功率能够通过平衡节点得到补充。

## 6. 为什么平衡节点不参与潮流计算

因为潮流计算时，我们根据以下的节点功率方程来列方程求解的：

潮流方程的直角坐标形式为

$$P_i = e_i \sum_{j \in i} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j \in i} (G_{ij} f_i + B_{ij} e_j) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1-8)$$

$$Q_i = f_i \sum_{j \in i} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j \in i} (G_{ij} f_i + B_{ij} e_j) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1-9)$$

潮流方程的极坐标形式为

$$P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1-10)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1-11)$$

然而，由于平衡节点我们已知的是电压幅值 $U_s$ 及相位角 $\theta_s$ ，而注入功率 $P_s$ 、 $Q_s$ 是我们待求的量，因此我们列不出关于平衡节点的节点功率方程，则其无法参与潮流计算。

## 7.潮流计算为什么选择牛拉法来求解

1. 牛顿-拉夫逊法是目前求解非线性方程比较好的一种方法。这种方法的特点就是把对非线性方程的求解过程变成反复对相应的线性方程求解的过程，通常称为逐次线性化过程，收敛速度快，二阶收敛。

2. 但是牛拉法有一个致命的缺陷，就是它对初值的选择很敏感，只有选择得比较接近它们的精确解，才能保证准确快速求解。好在电力系统的电压和频率的初值都比较稳定，电压的变化范围不超过正负5%，频率基本稳定在50Hz左右，所以刚好能规避牛拉法的这一计算缺陷。