# Lecture 7

主 讲：刘 俊

电 力 工 程 系

# 第四章 新能源电力系统稳态运行分析与计算

4.1 传统电力系统的潮流计算

**熟练掌握电力系统潮流计算模型。**

4.2 风力发电和光伏发电并网的潮流计算

熟练掌握风力发电接入系统的潮流计算模型。

熟练掌握光伏发电接入系统的潮流计算模型。

4.3 含新能源电力系统的随机潮流计算

了解风力发电接入系统的随机潮流模型。

了解光伏发电接入系统的随机潮流模型。

4.4 新能源并网后电力系统的频率控制

重点掌握新能源接入后系统一次、二次调频方法。

4.5 新能源并网后电力系统电压及无功补偿控制

掌握新能源对系统电压水平的影响及无功补偿控制。

# 4.1 传统电力系统的稳态潮流计算

- 元件模型
  - 线路（电阻、电抗、电导、电纳、Π型等值电路）
  - 变压器（漏阻抗、激磁阻抗、T型、 Γ型、Π型等值电路）
- 网络方程
  - 网络方程、节点导纳矩阵、节点类型
- 潮流方程
  - 功率平衡方程、修正方程式、约束条件
  - 雅克比矩阵、牛顿-拉夫逊法

- 思考题：

  - 什么是电力系统潮流计算？

    - 根据给定的**运行条件**和**网架结构**确定整个系统的运行状态，如**各母线上的电压（幅值及相角）、网络中的功率分布以及功率损耗等**。

- 电力系统潮流计算的意义是什么？

（1）三大计算中，电力系统潮流计算的结果是电力系统稳定计算和故障分析（短路计算）的**基础**。

（2）在系统**规划**阶段，通过潮流计算，合理规划电源容量及接入点，合理规划网架，选择无功补偿方案，满足规划水平的大、小方式下潮流交换控制、调峰、调相、调压的要求。

- 电力系统潮流计算的意义是什么？

（3）编制年运行方式时，在预计负荷增长及新设备投运基础上，选择典型方式进行潮流计算，发现电网中薄弱环节，供调度员日常调度控制参考，并对规划、基建部门提出改进网架结构，加快基建进度的建议。

（4）正常**检修**及特殊运行方式下的潮流计算，用于日运行方式的编制，指导发电厂开机方式，有功、无功调整方案及负荷调整方案，满足线路、变压器热稳定要求及电压质量要求。

（5）预想事故、设备退出运行对**静态安全**的影响分析及作出预想的运行方式调整方案。

# 一、网络方程及节点导纳矩阵

- 电力网络中有*n*个节点，基于KCL定律，则**I=YU**可以按向量和矩阵的形式列出*n*个节点方程式为：

$$I = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \cdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} \qquad Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \qquad U = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \cdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix}$$

# 节点导纳矩阵

- 特点：
  - （1）导纳矩阵的阶数等于电力网络的节点数。
  - （2）导纳矩阵各行非对角元素中非零元素的个数等于对应节点所连的不接地支路数。
  - （3）导纳矩阵的元素很容易根据网络接线图和支路参数直观地求得，形成节点导纳矩阵的程序比较简单。
    - 导纳矩阵各对角元素，即节点的自导纳等于相应节点之间的支路导纳之和。
    - 导纳矩阵非对角元素，即节点之间的互导纳等于相应节点之间的支路导纳的负值。
  - （4）导纳矩阵为对称矩阵，由网络的互易特性易知 。
  - （5）导纳矩阵是稀疏矩阵。

- 思考题：
  - 在电力系统潮流计算中有哪几种节点类型？

# 二、节点类型

- (1) PQ节点：给定节点的注入有功功率*P*和注入无功功率*Q*。
  - 属于这一类节点的有：
    - 纯负荷节点（如变电所母线）
    - 有功和无功功率都给定的发电机节点（包括节点上带有负荷）
    - 联络节点（注入有功功率和无功功率都等于零）
  - 它们的节点电压有效值*U*和相角*θ*未知。

# 二、节点类型

- (2) PV节点：给定节点的注入有功功率*P*和节点电压有效值*U*，待求量是节点的注入无功功率*Q*和电压的相角*θ*。
  - 这类节点通常是发电机节点，其有功功率给定而且通常具有比较大的无功容量，它们能通过自动电压调节器的作用使母线电压保持为给定值。
  - 有时将一些装有无功补偿设备的变电站母线也处理为PV节点。

# 二、节点类型

- (3) 平衡节点：潮流计算中必须设置一个平衡节点，通常此类节点的电压有效值$U$为给定值，电压相角$\theta=0$，即系统中其他节点的电压相位以它为参考；待求的则是其注入有功功率和无功功率。
  - 由于所有的PQ节点和PV节点的注入有功功率都已给定，而网络中的总功率损耗是未知的，因此平衡节点必须平衡全系统的功率和损耗而不可以给定。
  - 潮流计算中原则上可以选择任一个发电机节点作为平衡节点，但通常取容量较大出线较多的发电机节点，以便当有功损耗估计出入较大时，对它的注入有功功率产生影响较小。

- 思考题：
  - 我们有PQ节点，有PV节点，那么平衡节点是否一定是Vθ节点？
  - 平衡机的作用是什么？
  - 可否有多台平衡机？

# 三、节点功率方程式

- 节点注入电流为线性方程组，其共轭和节点电压相乘，构成节点注入功率非线性方程组，实部虚部展开分别得到有功和无功功率注入方程组：

$$I_i = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} U_j (i = 1,2,\cdots,n)$$

$$S_i = P_i + \mathrm{j}Q_i = \sum \hat{I}_i \dot{U}_i (i = 1,2,\cdots,n), P_i = P_{Gi} - P_{Li}, Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$$

$$P_i - \mathrm{j}Q_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} U_j (i = 1,2,\cdots,n)$$

- 思考题：
  - 节点功率方程式能否消去电压用节点电流变量的幅值和相位作为求解变量？

$$I_i = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} U_j (i = 1,2,\cdots,n)$$

$$S_i = P_i + \mathrm{j}Q_i = \sum \hat{I}_i \dot{U}_i (i = 1,2,\cdots,n), P_i = P_{Gi} - P_{Li}, Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$$

$$P_i - \mathrm{j}Q_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} U_j (i = 1,2,\cdots,n)$$

- 思考题：
  - 为什么电力系统潮流方程是非线性的？什么导致了其非线性？

# 潮流方程

- 潮流方程的极坐标形式：

$$\begin{cases} P_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^{n} U_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \\ Q_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^{n} U_j (G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}) \end{cases}$$

- 潮流方程的直角坐标形式：

$$\begin{cases} P_i = e_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \\ Q_i = f_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i \sum_{j=1}^{n} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \end{cases}$$

# 潮流方程

- 特点：
  - 1.它是一组代数方程（不含微分方程），因而表征的是电力系统的稳态运行特性。
  - 2.它是一组非线性方程，因而只能用迭代方法求其数值解。
  - 3.由于方程中的电压和导纳既可以表为直角坐标，又可表为极坐标，因而潮流方程有多种表达形式。
  - **4.它是一组*n*个复数方程，因而实数方程数为2*n*个但方程中共含4*n*个变量：*P*，*Q*，*U*和$\theta$，*i*=1，2，……，*n*，故必须先指定2*n*个变量才能求解。**

# 三、潮流方程的节点约束条件

- 节点电压上下限，应满足小于节点最大额定电压并大于最小额定电压，即：

$$V_{i\min} \le V_i \le V_{i\max} \qquad (i = 1, 2, \cdots n)$$

- 发电机的有功功率和无功功率上下限，应小于节点最大额定功率并大于最小额定功率，即：

$$\begin{cases} P_{Gi\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi\max} \\ Q_{Gi\min} \le Q_{Gi} \le Q_{Gi\max} \end{cases} \qquad (i = 1, 2, \cdots G_n)$$

# 四、潮流方程的修正方程式

- 牛顿法潮流计算的核心问题是修正方程式的建立和求解。
- 先对网络中个节点的编号作如下约定：
  - (1)网络中共有$n$个节点，编号为1，2，3，…，$n$，其中包含一个平衡节点，编号为$n$；
  - (2)网络中有$m$个PQ节点，编号为1，2，3，…，$m$；
  - (3)网络中有$n$-$m$个PV节点，编号为$m$+1，$m$+2，…，$n$-1。

# 极坐标的功率不平衡方程式

- 平衡节点有功、无功功率平衡方程，和PV节点的无功平衡方程不用参加计算：
  - 平衡节点的注入功率不可能事先给定，从而不可能列出相应的表达式；
  - 同理，PV节点的无功功率也无法给定，而电压给定，不必求取。

$$
\begin{cases}
P_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^{n} U_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \\
Q_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^{n} U_j (G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij})
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j\in i} U_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) = 0; \quad i = 1,2,\cdots,n-1 \\
\Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j\in i} U_j (G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}) = 0; \quad i = 1,2,\cdots,m
\end{cases}
$$

# 极坐标的修正方程式

– 左边向量是节点注入功率的不平衡量（也称失配量）：

$$
\left[\begin{array}{c}
\Delta P_1(x)\\
\Delta P_2(x)\\
\vdots\\
\Delta P_{n-1}(x)\\ \hline
\Delta Q_1(x)\\
\Delta Q_2(x)\\
\vdots\\
\Delta Q_m(x)
\end{array}\right]
=
\left[\begin{array}{cccc|cccc}
H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1,n-1} & N_{11} & N_{12} & \cdots & N_{1,m}\\
H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2,n-1} & N_{21} & N_{22} & \cdots & N_{2,m}\\
\vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots\\
H_{n-1,1} & H_{n-1,2} & \cdots & H_{n-1,n-1} & N_{n-1,1} & N_{n-1,2} & \cdots & N_{n-1,m}\\ \hline
M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1,n-1} & L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1,m}\\
M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2,n-1} & L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2,m}\\
\vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots\\
M_{n-1,n-1} & M_{n-1,2} & \cdots & M_{n-1,n-1} & L_{n-1,1} & L_{n-1,2} & \cdots & L_{n-1,m}
\end{array}\right]
\left[\begin{array}{c}
\Delta\theta_1\\
\Delta\theta_2\\
\vdots\\
\Delta\theta_{n-1}\\ \hline
\Delta U_1/U_1\\
\Delta U_2/U_2\\
\vdots\\
\Delta U_m/U_m
\end{array}\right]
$$

# 雅克比矩阵（Jacobian Matrix）元素

- 其中，非对角线元素计算式为：

$$
\begin{cases}
H_{ij} = \dfrac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} = -U_i U_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) \\
N_{ij} = \dfrac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} U_j = -U_i U_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) \\
M_{ij} = \dfrac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} = U_i U_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) \\
L_{ij} = \dfrac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} U_j = -U_i U_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij})
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
H_{ij} = L_{ij} \\
N_{ij} = -M_{ij}
\end{cases}
$$

# 雅克比矩阵元素

- 对角线元素为:

$$
\begin{cases}
H_{ii} = \dfrac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} = U_i \sum\limits_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) = U_i^2 B_{ii} + (Q_{Gi} - Q_{Li}) \\
N_{ii} = \dfrac{\partial \Delta P_i}{\partial U_i} U_i = -U_i \sum\limits_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) - 2U_i^2 G_{ii} = -U_i^2 G_{ii} - (P_{Gi} - P_{Li}) \\
M_{ii} = \dfrac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} = U_i \sum\limits_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) = U_i^2 G_{ii} - (P_{Gi} - P_{Li}) \\
L_{ii} = \dfrac{\partial \Delta P_i}{\partial U_i} U_i = -U_i \sum\limits_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) + 2U_i^2 B_{ii} = U_i^2 B_{ii} - (Q_{Gi} - Q_{Li})
\end{cases}
$$

# 雅克比矩阵元素

- 极坐标Jacobian矩阵特点：
  - 雅克比矩阵的阶数是$n+m-1$。
  - 如果节点$i$和节点$j$之间的互导纳，则雅克比矩阵各子块**H**、**N**、**M**和**L**中的相应元素也为零，因此雅克比矩阵也是稀疏矩阵。
  - 雅克比矩阵中的两个对角子块是不对称的，但各元素之间存在关系。
  - 雅克比矩阵中各元素都是节点电压有效值和相位的函数，因此在整个迭代过程中所有元素都将随着节点电压相量的逐次修正而改变。

# 直角坐标功率、电压不平衡方程式

- 直角坐标下修正方程式的维数发生变化
  - 补充PV节点的电压方程：

$$
\begin{cases}
\Delta P_i = P_i - \sum\limits_{j \in i} [e_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)], i = 1, 2, \cdots, n-1 \\
\Delta Q_i = Q_i - \sum\limits_{j \in i} [f_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)], i = 1, 2, \cdots, m \\
\Delta U_i^2 = U_i^2 - (e_i^2 + f_i^2), \qquad i = m+1, m+2, \cdots, n-1
\end{cases}
$$

# 直角坐标的修正方程式

- 修正方程式：

$$
\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \hdashline \Delta P_p \\ \Delta U_p^2 \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta U_{n-1}^2 \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
H_{11} & N_{11} & H_{12} & N_{12} & H_{1p} & N_{1p} & H_{1,n-1} & N_{1,n-1} \\
J_{11} & L_{11} & J_{12} & L_{12} & J_{1p} & L_{1p} & J_{1,n-1} & L_{1,n-1} \\
H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & H_{2p} & N_{2p} & H_{2,n-1} & N_{2,n-1} \\
J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & J_{2p} & L_{2p} & J_{2,n-1} & L_{2,n-1} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\hdashline
H_{p1} & N_{p1} & H_{p2} & N_{p2} & H_{pp} & N_{pp} & H_{p,n-1} & N_{p,n-1} \\
R_{p1} & S_{p1} & R_{p2} & S_{p2} & R_{pp} & S_{pp} & R_{p,n-1} & S_{p,n-1} \\
H_{n-1,1} & N_{n-1,1} & H_{n-1,2} & N_{n-1,2} & H_{n-1,p} & N_{n-1,p} & H_{n-1,n-1} & N_{n-1,n-1} \\
R_{n-1,1} & S_{n-1,1} & R_{n-1,2} & S_{n-1,2} & R_{n-1,p} & S_{n-1,p} & R_{n-1,n-1} & S_{n-1,n-1}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta e_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_2 \\ \vdots \\ \Delta f_p \\ \Delta e_p \\ \Delta f_{n-1} \\ \Delta e_{n-1} \end{bmatrix}
$$

# 直角坐标的雅克比矩阵

- 直角坐标Jacobian矩阵特点：
  - 修正方程数目为2($n$-1) 个。
  - 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。
  - 按节点号顺序而构成的分块雅可比矩阵将和节点导纳矩阵具有相同的稀疏结构，是一个高度稀疏的矩阵。
  - 雅可比矩阵不是对称矩阵。

# 五、牛顿拉夫逊法

- 牛顿—拉夫逊法是常用的解非线性方程组的方法，也是当前广泛采用的计算潮流的方法，设有非线性方程组如下：

$$
\begin{cases}
f_1(x_1, x_2, \cdots, x_n) = y_1 \\
f_2(x_1, x_2, \cdots, x_n) = y_2 \\
\qquad \cdots\cdots \\
f_n(x_1, x_2, \cdots, x_n) = y_n
\end{cases}
$$

# 五、牛顿拉夫逊法

- 在近似解附近展开，取线性项：

$$\begin{cases} f_1\left(x_1^{(0)}+\Delta x_1, x_2^{(0)}+\Delta x_2, \cdots, x_n^{(0)}+\Delta x_n\right)=y_1 \\ f_2\left(x_1^{(0)}+\Delta x_1, x_2^{(0)}+\Delta x_2, \cdots, x_n^{(0)}+\Delta x_n\right)=y_2 \\ \qquad\cdots\cdots \\ f_n\left(x_1^{(0)}+\Delta x_1, x_2^{(0)}+\Delta x_2, \cdots, x_n^{(0)}+\Delta x_n\right)=y_n \end{cases}$$

$$\begin{cases} f_1\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \cdots, x_n^{(0)}\right)+\left.\dfrac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_0 \Delta x_1+\left.\dfrac{\partial f_1}{\partial x_2}\right|_0 \Delta x_2+\cdots+\left.\dfrac{\partial f_1}{\partial x_n}\right|_0 \Delta x_n=y_1 \\ f_2\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \cdots, x_n^{(0)}\right)+\left.\dfrac{\partial f_2}{\partial x_1}\right|_0 \Delta x_1+\left.\dfrac{\partial f_2}{\partial x_2}\right|_0 \Delta x_2+\cdots+\left.\dfrac{\partial f_2}{\partial x_n}\right|_0 \Delta x_n=y_2 \\ \qquad\cdots\cdots \\ f_n\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \cdots, x_n^{(0)}\right)+\left.\dfrac{\partial f_n}{\partial x_1}\right|_0 \Delta x_1+\left.\dfrac{\partial f_n}{\partial x_2}\right|_0 \Delta x_2+\cdots+\left.\dfrac{\partial f_n}{\partial x_n}\right|_0 \Delta x_n=y_n \end{cases}$$

# 五、牛顿拉夫逊法

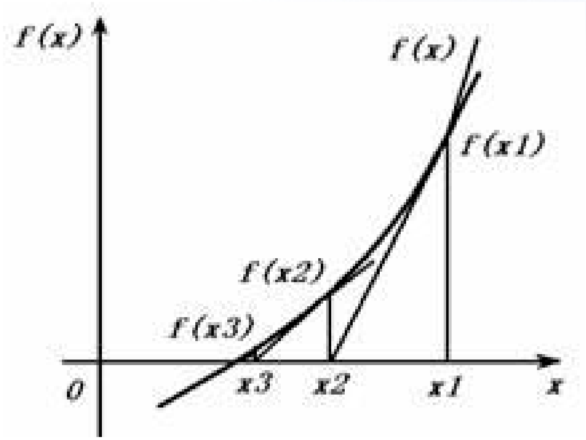
- 如果近似解与精确解相差不大，则$\Delta x_i$的高次方可以略去，写成矩阵形式：

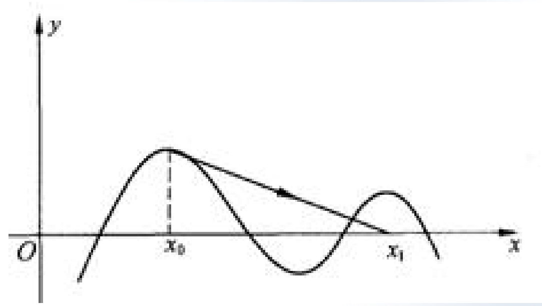
$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \cdots, x_n^{(0)}\right) \\ y_1 - f_1\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \cdots, x_n^{(0)}\right) \\ \cdots \\ y_1 - f_1\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \cdots, x_n^{(0)}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_0 + \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right|_0 + \cdots + \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right|_0 \\ \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_0 + \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right|_0 + \cdots + \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right|_0 \\ \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_0 + \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right|_0 + \cdots + \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix}$$

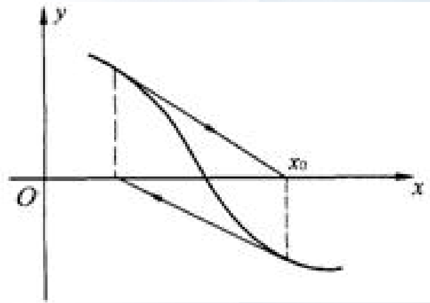
$$\boldsymbol{\Delta f} = \boldsymbol{J\,\Delta x} \Longleftarrow y - f\left(x^{(k)}\right) = \left.\frac{df}{dx}\right|_k \Delta x^{(k)}$$

# 五、牛顿拉夫逊法

- 牛顿—拉夫逊法的几何解释：




迭代收敛

不收敛情况

**因此，牛顿拉夫逊法对初值的选择比较严格！**

- 思考题:
  - 潮流计算迭代的收敛判据是什么?
  - 在电力系统潮流计算中迭代收敛完成之后还需要做什么?

# 六、稳态潮流计算的流程

| |
|---|
| **1、读入系统原始数据；** |
| 2、形成网络节点导纳矩阵； |
| 3、置各节点电压初值，至迭代次数*k*=1； |
| 4、计算各节点功率最大失配量，如不满足收敛精度，继续Step5；如满足，跳往Step8； |
| 5、形成潮流方程的雅克比矩阵； |
| 6、求解修正方程式； |
| 7、修正节点电压向量，*k*=*k*+1，返回Step4； |
| 8、计算平衡节点有功无功功率、PV节点无功功率、各线路和变压器传输的功率、网络损耗，输出收敛后结果。 |

# 七、其他潮流计算方法

- 快速解耦潮流（亦称PQ分解法）
- 直流潮流
- 随机潮流
- 最优潮流
- 约束潮流
- 三相潮流
- 动态潮流
- 开断潮流
- 谐波潮流