



東南大學
SOUTHEAST UNIVERSITY



电力系统稳态分析

东南大学电气工程学院

2022/12/21





第1章小结

本章主要介绍电力系统的**基本概念**，是对电力概况的描述。重点要掌握电力系统的定义、参量、系统特征和对系统的要求、额定电压的概念。

• 电力系统定义

电力系统主体=发电设备+电力网络+用电设备

其中：电力网络=输电网+配电网

输电网=升压变压器+输电线路

配电网=降压变压器+配电线路

传统电力系统=电力系统主体+测量、保护、控制装置

现代电力系统=电力系统主体+信息通信系统+监测、控制系统

• 电力系统参量

装机容量（kW、MW、GW）、年发电量（kWh、MWh、GWh）、最大负荷（kW、MW、GW）、额定频率（Hz）、电压等级（kV）等。



第1章小结

额定频率是衡量电能质量的一个重要指标。它反映了全系统中发电与用电的有功功率平衡状态如何。发电原动机功率多于用电有功功率，频率将大于额定值；发电原动机功率小于用电有功功率，频率将小于额定值。

额定电压是衡量电能质量的另一个重要指标。因满足输电和用电的要求，系统通常由多个电压等级组成。最高电压等级是系统中最高等级的额定电压，它能反映系统的输送能力。

- **电力系统特征**

与国民经济及人民生活密切相关

电能不能大量储存---生产、输送、消费必连续

运行工况改变迅速 对电能质量要求高

- **对电力系统的要求**

可靠持续供电（充裕性、安全性）

保证电能质量（频率、电压、波形）

保证经济运行（煤耗率、网损率）

保证环保环境（限制排放、防止电、磁波、噪声、放射污染）



第1章小结

• 额定电压的概念

额定电压是一系列标准电压，它综合了各种技术、经济因素，给出在一定的输送功率和输送距离时最合理的电压。所以额定电压等级的选择取决于输送功率的大小和输送距离的长短。依据这个原则，一般可划分为：

输电电压 (kV) **220 330 500 1000** (大电力系统主干线)

变电电压 (kV) **35 (66) 110** (中小电力系统主干线及大系统二次网)

配电电压 (kV) **3 6 10**

以上划分不是绝对的，随着容量增大和最高电压等级的变化划分将改变。
110kV 以上级差为**2** 倍左右， **110kV** 以下级差应大于**3** 。

电力设备额定电压于相应电网额定电压相同。

发电机额定电压为线路额定电压的**105%**。

变压器一次侧额定电压等于用电设备的额定电压（直接连发电机的一次侧电压同发电机额定电压），二次侧额定电压为线路额定电压的**110%**（二次侧线路较短时为线路额定电压**105%**）。



第1章小结

• 电力系统中性点运行方式

中性点的运行方式与电力系统的电压等级相关。电压等级越高的系统其绝缘水平要求就越高。

采用中性点不接地或消弧线圈接地方式，当系统发生单相接地时，可靠性高，但对绝缘的要求水平也高。

采用中性点直接接地的方式可降低系统在发生单相接地时的系统电压绝缘水平。

单相接地故障时不同中性点接地方式比较

中性点接地类型	中性点不接地	中性点经消弧线圈接地	中性点直接接地
中性点电压幅值	升高为相电压	升高为相电压	保持为0
故障相电压幅值	0	0	0
非故障相电压幅值	升高为线电压 ($\sqrt{3}$ 倍)	升高为线电压 ($\sqrt{3}$ 倍)	不变
线电压	不变	不变	三相对称破坏
故障电流	小 (容性电流, 正常相电容电流3倍)	小 (电流性质与补偿程度有关)	大 (感性电流)
故障后运行	2h	2h	快速切除



第2章小结

本章内容是电力系统稳态分析的基础，主要介绍了发电机、变压器、电力线路、电力负荷在稳态分析中的模型。重点掌握各元件的模型建立和多级电压网络中参数的计算方法。

•各元件模型建立的物理概念

这章推导的公式最多， 如果把这些元件建立模型的物理概念搞清楚， 这些公式就不复杂。归纳各元件模型如下：

元件	特性	静态模型
发电机	旋转元件	同步电抗（隐极机： x_d 凸级机： x_d 、 x_q ） P 、 Q 或 P 、 V
负荷	综合负荷	计及静态特性： $P=f(u, f)$ $Q=f(u, f)$ 简单模型： 恒功率模型： P 、 Q 恒阻抗模型： Z_D



第2章小结

元件
特性
计算依据
静态模型

变压器
静止元件
试验数据
电阻--铜损耗，额定电流流过
所有绕组的损耗。
电抗--短路电压比。与高
中低绕组的排列方式有
关。位于中间的绕组有
可能电抗为负值。

(励磁支路) 电导--铁损耗，与空载损耗对应，
与负荷电流无关。
电纳--与空载电流对应，电纳属
感性，数值前应有一负号。

电力系统用 π 型等值电路

等值电路

变压器与架空线的电阻、电抗均与电流有关，称为串联参数或支路参数，在等值电路中串联。
变压器与架空线的电导、电纳称为并联参数或节点参数，在等值电路中并联。

架空线路
静止元件
物理原理
电阻--与线径、材料有关。

电抗--杆塔上导线的排列方式影响磁
场分布，导线有换位问题。

电导--有功电晕损耗，与电场强度有关。

电纳--与电场分布有关，属容性。

π 、 T 型等值电路



第2章小结

- 多级电压网络中元件参数的计算方法

- 标幺值的概念： 是**相对值**，**无量纲**。

必须选取基准值，有名值必须与基准值单位相同。

选**三相功率（全网唯一）**和**线电压（每个电压等级唯一）**为**基准值**，可求出**单相阻抗、导纳**和**线电流**的基准值。

- 多级电压网参数计算：

手算

有名值

选取电压基本级

将网络各元件参数的有名
值归算至基本级

标幺值

选取电压基本级

选取基准容量

方法一：将网络各元件参数的有名
归算至基本级，然后除以
基本级相应的各参数基准值。

方法二：将未归算的各元件参数的
有名值除以由基本级归算到
这些量所在的电压等级的各
参数的基准值。



第2章小结

- 多级电压网参数计算:

计算机计算

等值变压器模型（变压器 π 形等值电路）的概念

不同于变压器 Γ 形 Γ 形等值电路有明确的物理意义，即接地支路代表励磁导纳，串联阻抗支路代表绕组电阻和漏抗。该模型的三个支路虽没有物理意义，但该模型可体现变压器电压变换的功能。在多电压级网络计算采用此模型，不必进行参数的归算。

等值变压器模型中理想变压器变比的取值

有名制

1) 线路参数未经归算，变压器参数归算在低压侧，此时理想变压器的变比取变压器实际变比： $k=U_{\text{高}}/U_{\text{低}}$

2) 线路和变压器均按选定的变比 $k=U_{\text{高选}}/U_{\text{低选}}$ 归算到高压侧，此时理想变压器的变比要将原选定的变比按实际变比进行归算，理想变压器的变比应 $k=U_{\text{高}}U_{\text{低选}}/U_{\text{低}}U_{\text{高选}}$ 。

标么值

线路和变压器参数都已按选定的基准电压 $k=U_{\text{高B}}/U_{\text{低B}}$ 折算为标么值，此时理想变压器的变比要将按基准电压为变比进行按实际变比归算，理想变压器的变比应 $k=U_{\text{高}}U_{\text{低B}}/U_{\text{低}}U_{\text{高B}}$ 。

上述几种条件下理想变压器的变比统称“非标准变比”，“非标准变比”均在高压侧。

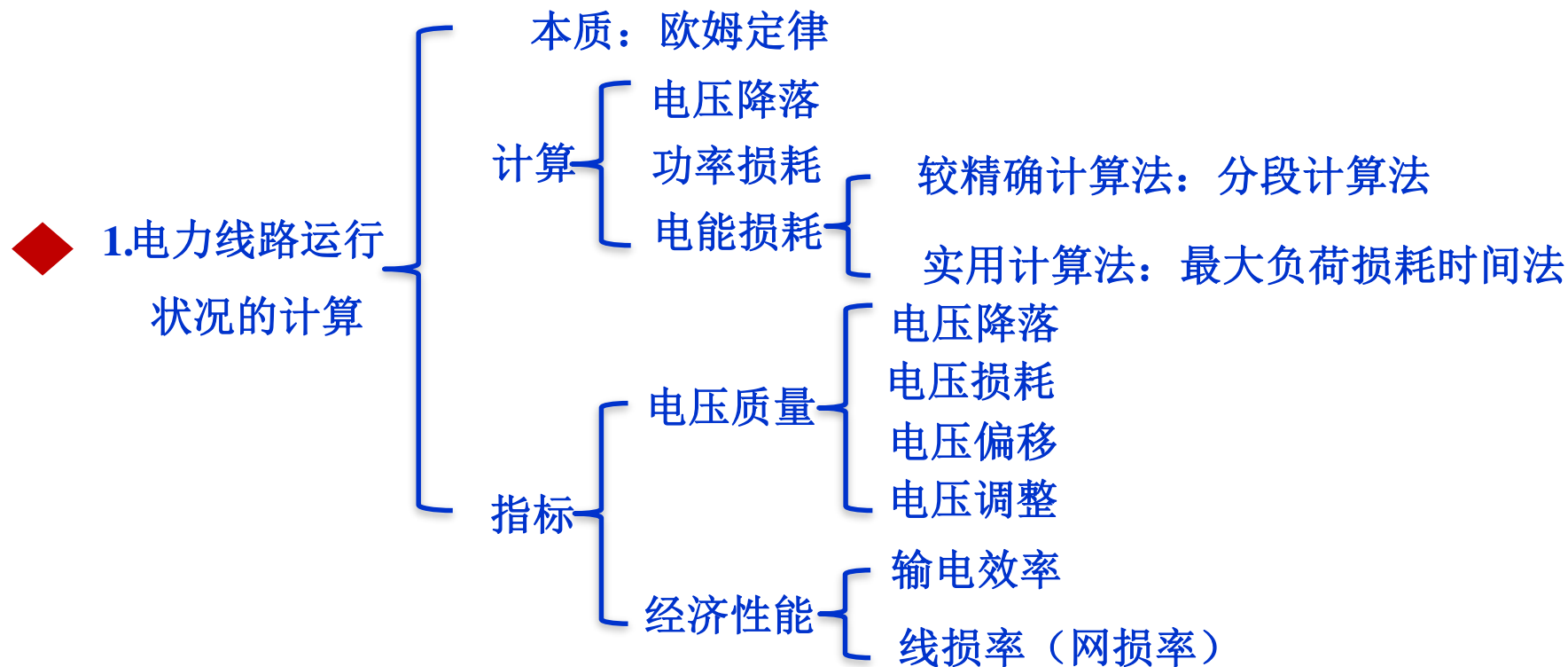
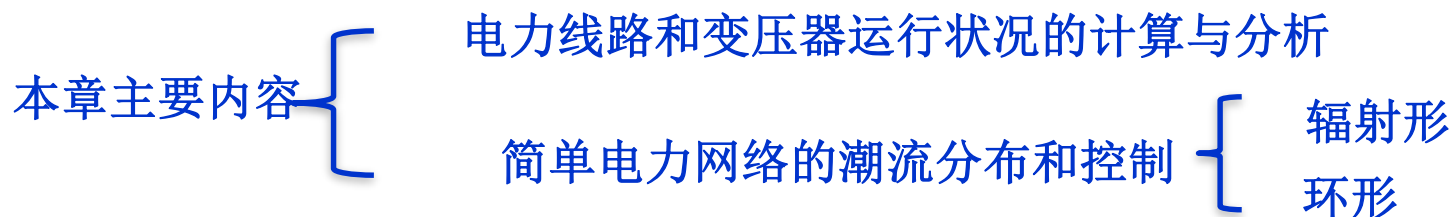


第三章 简单电力网络的计算和分析

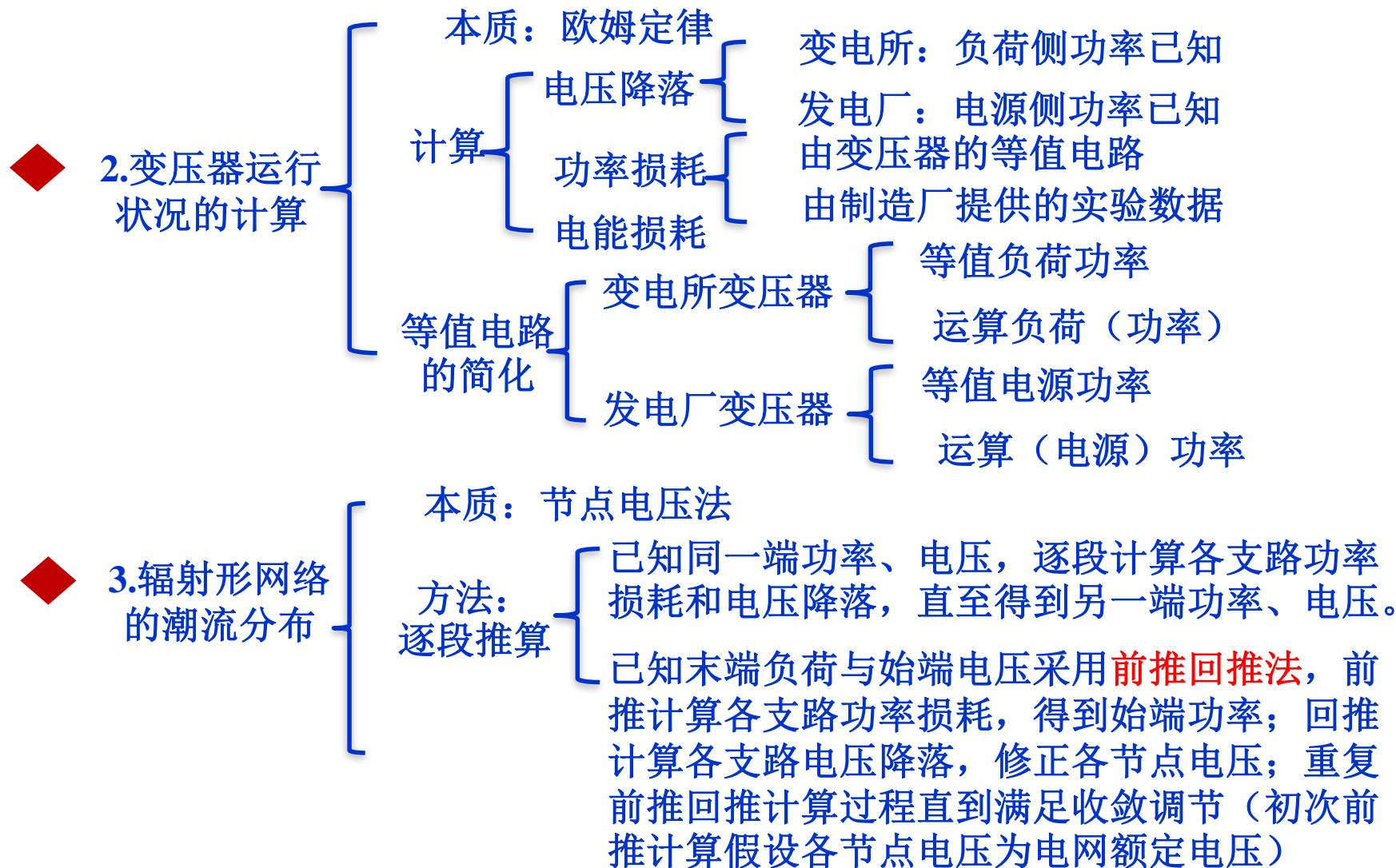
- **潮流计算**是电力系统正常运行时，根据给定的网络结构和运行条件，通过电压、功率平衡方程，求出整个网络的运行状态，包括各母线的电压、网络中的功率分布以及功率损耗等。



第三章 简单电力网络的计算和分析

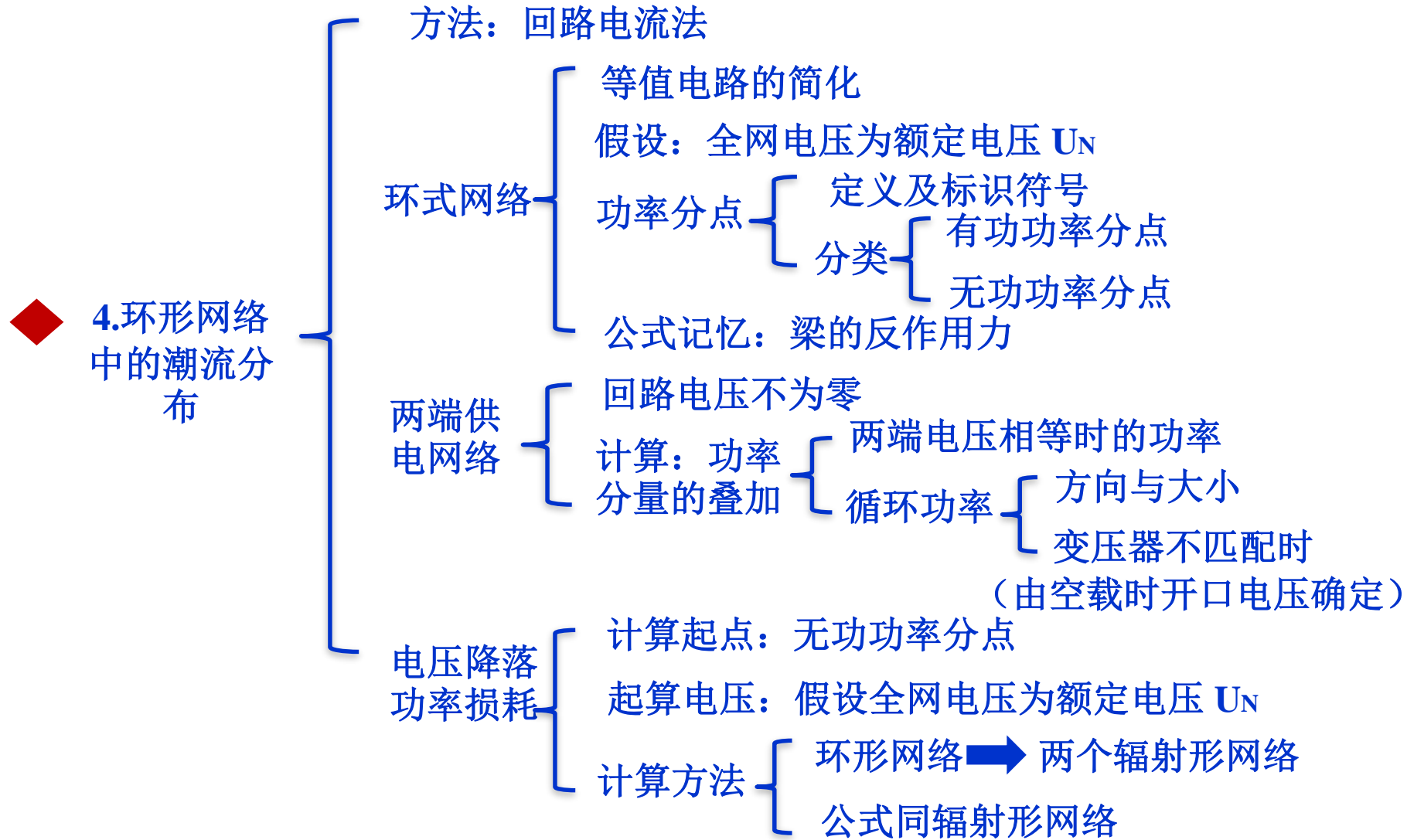


第三章 简单电力网络的计算和分析





第三章 简单电力网络的计算和分析



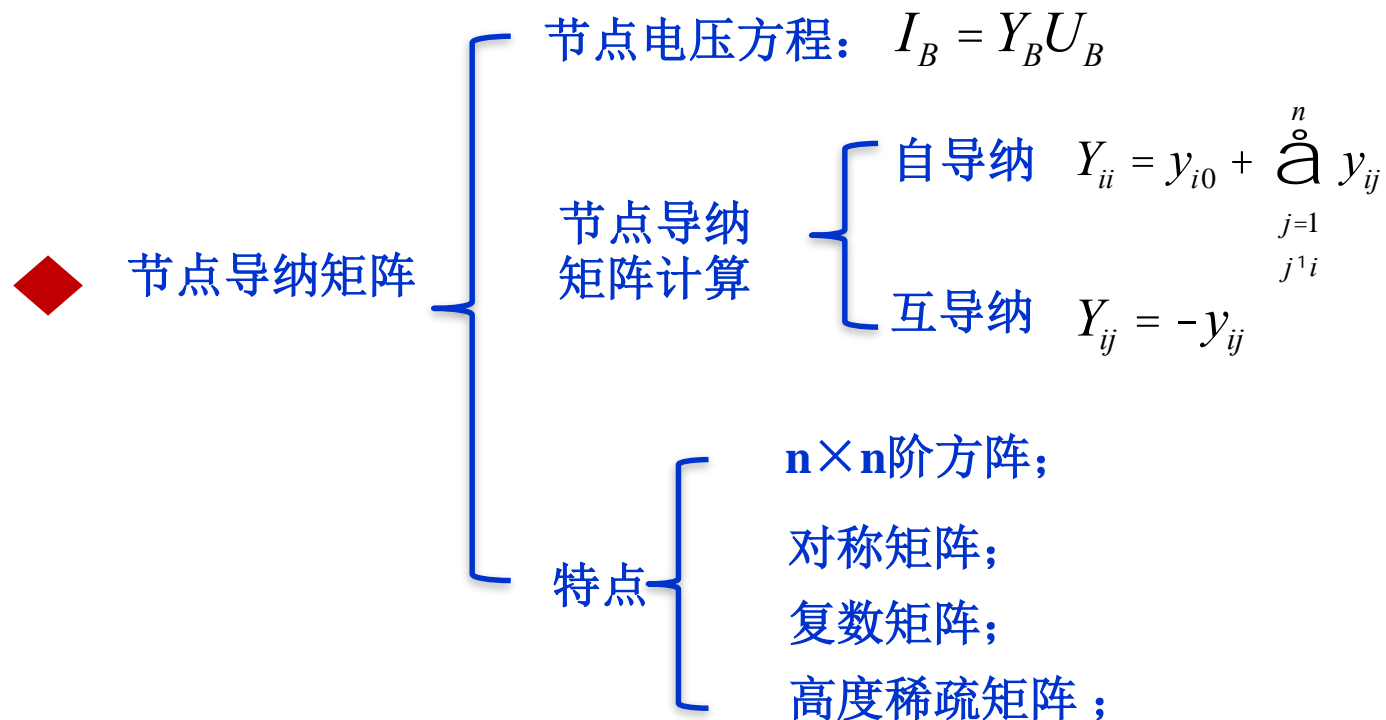
第三章 简单电力网络的计算和分析





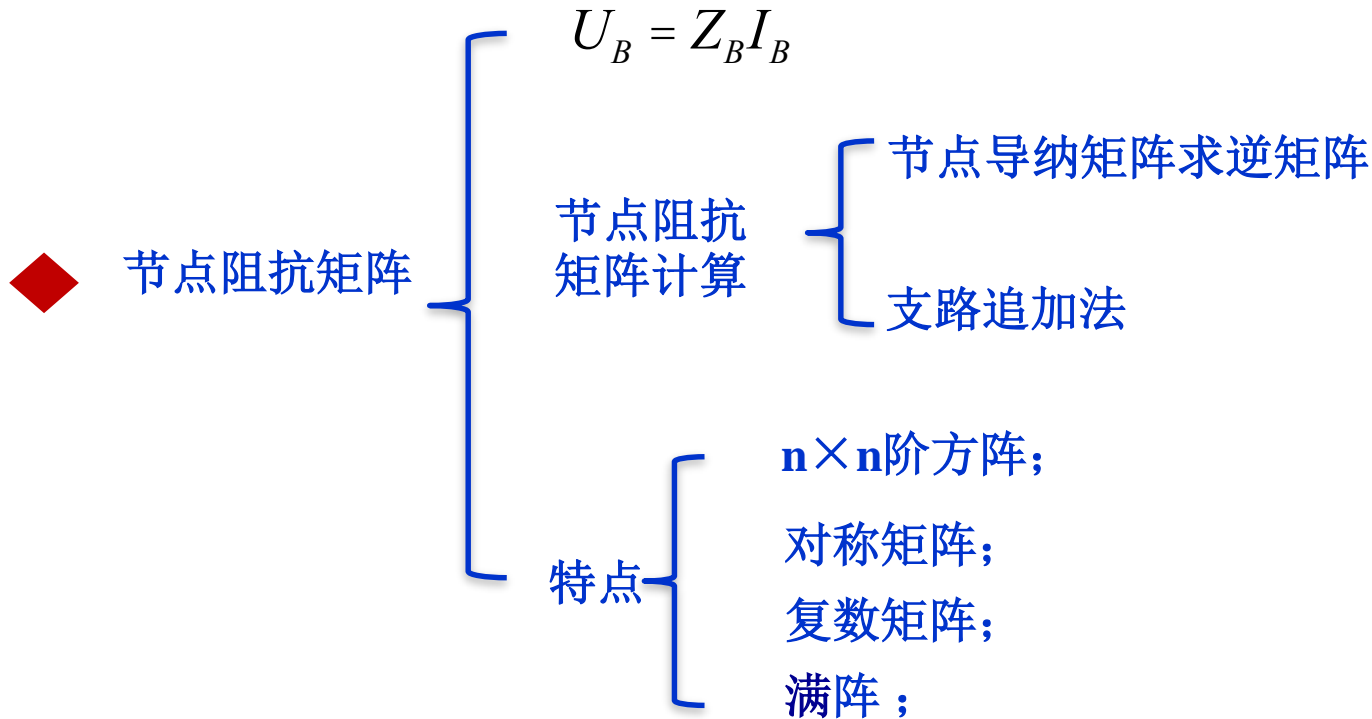
第四章 复杂电力系统潮流的计算机算法

本章主要内容 { 复杂网络数学模型的建立
节点电压方程的解算





第四章 复杂电力系统潮流的计算机算法



第四章 复杂电力系统潮流的计算机算法

功率方程

$$\dot{I}_i = \left(\frac{\dot{S}_i}{\dot{U}_i} \right)^* = \frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} \rightarrow \left(\frac{P_i + jQ_i}{\dot{U}_i} \right)^* = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j \rightarrow P_i - jQ_i = U_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j$$

$$\dot{U}_i = e_i + jf_i \quad Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$$

$$P_i = e_i \sum_{j=1}^n \dot{A} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n \dot{A} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)$$

$$Q_i = f_i \sum_{j=1}^n \dot{A} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n \dot{A} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)$$

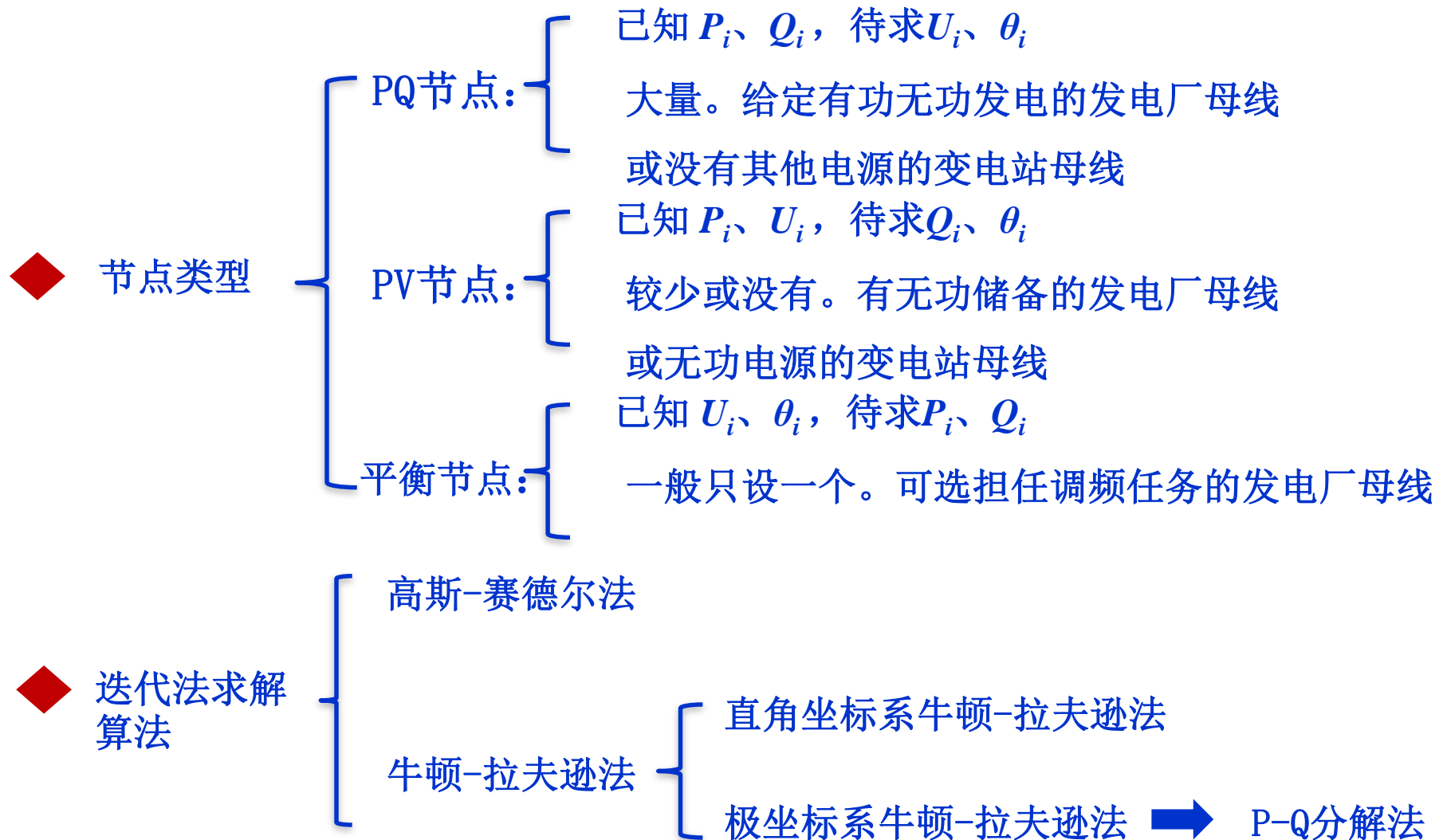
$$\dot{U}_i = U_i e^{j\theta_i} = U_i \cos \theta_i + jU_i \sin \theta_i \quad Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$$

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n \dot{A} U_j (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij})$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^n \dot{A} U_j (G_{ij} \sin q_{ij} - B_{ij} \cos q_{ij})$$

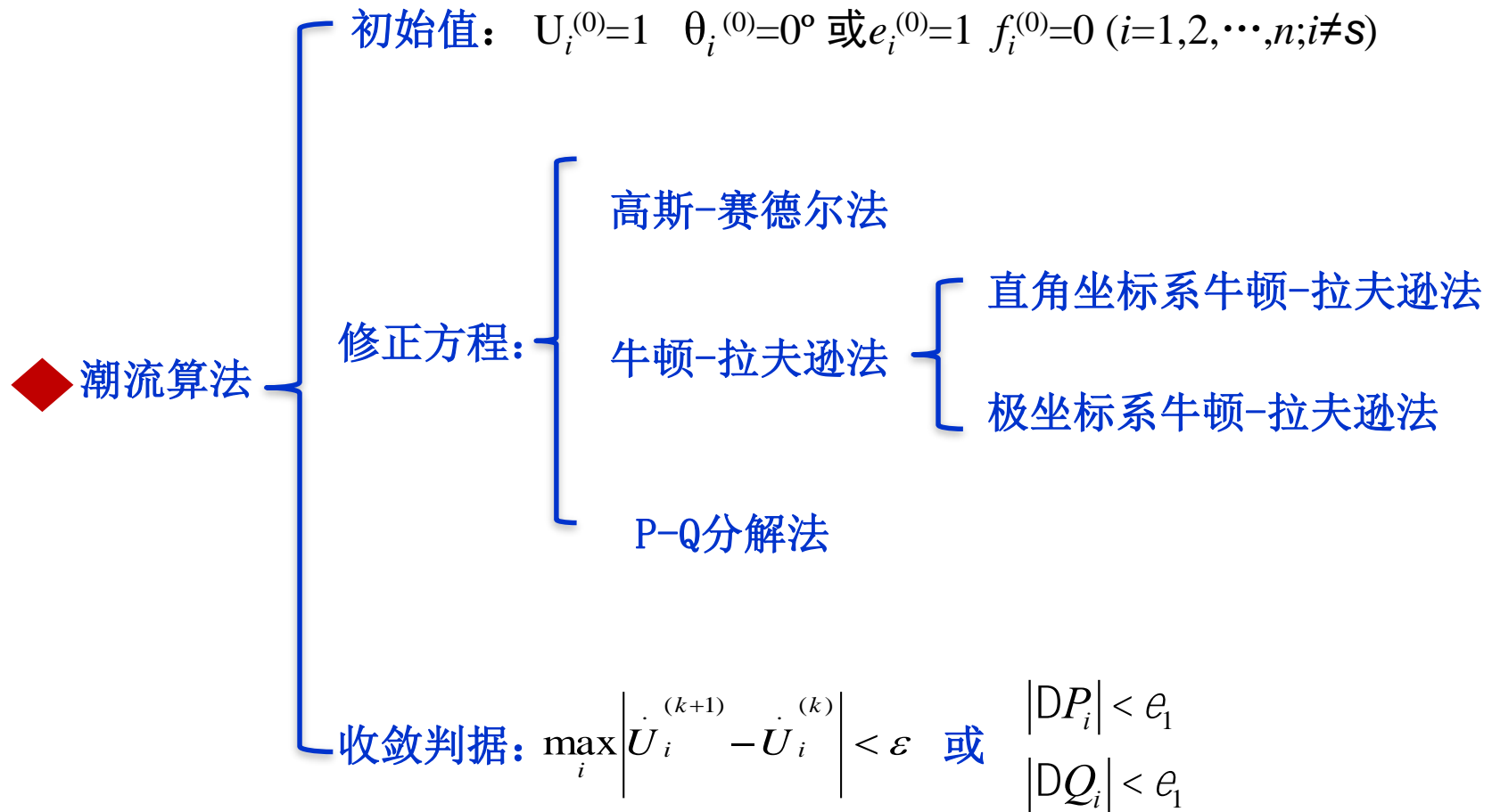


第四章 复杂电力系统潮流的计算机算法





第四章 复杂电力系统潮流的计算机算法



第四章 复杂电力系统潮流的计算机算法

◆ 修正方程:

高斯-赛德尔法

$$\dot{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{U_i^{(k)}} - \left(\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} \dot{U}_j^{(k+1)} + \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} \dot{U}_j^{(k)} \right) \right]$$

牛顿-拉夫逊法

直角坐标系牛顿-拉夫逊法

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta U^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \\ R & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix}$$

极坐标系牛顿-拉夫逊法

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U/U \end{bmatrix}$$

P-Q分解法

$$\begin{cases} \Delta P/U = -B'(U\Delta\theta) \\ \Delta Q/U = -B''\Delta U \end{cases}$$



第5章小结

本章主要阐述电力系统中有功功率的最优分布和电力系统的频率调整两个问题。有功功率的最优分布又进而分为有功功率负荷预计、有功功率电源的最优组合、有功功率负荷在已运行机组的最优分配等几方面。

- 有功功率负荷的变动（依据变动幅度及周期分解为三种）

- 系统备用容量

热备用、冷备用

- 各类发电厂的特点及合理组合

火电厂（高温高压、中温中压、低温低压）、原子能、水力发电、风光发电

高温高压电厂

可调范围较窄

在负荷曲线更基底部分运行

原子能电厂

一次投资大

尽可能利用，承担额定负荷

水电厂

启动快、增减负荷快

分有无调节水库讨论



第5章小结

- 有功功率负荷的合理分配

目标：在满足一定约束条件的前提下，尽可能节约消耗的一次能源
耗量特性曲线

比耗量： 单位时间内输入能量与输出功率之比
原点和耗量特性曲线上某一点连线的斜率

耗量微增率： 单位时间内输入能量微增量与输出功率微增量的比值
耗量特性曲线上某一点切线的斜率

有功功率负荷的最优分配问题

等式约束条件 $f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{d})=0$

不等约束条件 $g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{d})=0$

目标函数 $C=C(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{d})$

负荷最优分配的基本准则是等耗量微增率准则

$$\frac{dF_1(P_{G1})}{dP_{G1}} = \frac{dF_2(P_{G2})}{dP_{G2}} = \frac{dF_3(P_{G3})}{dP_{G3}} = \dots = \frac{dF_n(P_{Gn})}{dP_{Gn}} = \lambda$$



第5章小结

当系统中既有火力又有水力发电设备时，应先根据给定的水耗量确定换算系数 $\gamma = dF(P_T) / dW(P_H)$ ，然后再运用等耗量微增率准则

$$\frac{dF_1(P_{T1})}{dP_{T1}} = \dots = \frac{dF_m(P_{Tm})}{dP_{Tm}} = \gamma_{(m+1)} \frac{dW_{(m+1)}(P_{H(m+1)})}{dP_{H(m+1)}} = \dots = \gamma_n \frac{dW_n(P_{Hn})}{dP_{Hn}} = \lambda$$

当必须计及网络损耗时，还应对等耗量微增率准则作网损修正

$$\frac{dF_i(P_{Ti})}{dP_{Ti}} \frac{1}{(1 - \partial \Delta P_{\Sigma} / \partial P_{Ti})} = \gamma_j \frac{dW_j(P_{Hj})}{dP_{Hj}} \frac{1}{(1 - \partial \Delta P_{\Sigma} / \partial P_{Hj})}$$

- 电力市场

基本模式

电力市场种类

- 电力系统的频率调整

一次调整

系统中所有未满载的发电机组都要分担的调整任务，依靠调速器自动完成，为有差调节。一次调整的频率偏移是 $\Delta f = -\Delta P_{LO} / K_S$



第5章小结

二次调整

由系统中被选出的调频发电机组承担，依靠调频器完成，可以做到无差。二次调整的频率偏移为 $\Delta f = -(\Delta P_{LO} - \Delta P_{GNO}) / K_S$

三次调整

系统中所有按给定负荷曲线发电的发电机组分担的调整任务。以系统总耗量最小为目标，受约束与于系统中有功、无功功率都必须保持平衡以及各类变量都不得逾越一定限额。



第6章小结

本章内容是电力系统中无功功率的最优分布和电力系统的电压调整。其中，无功功率的最优分布包括无功功率电源的最优分布和无功功率负荷的最优补偿。电压调整的措施有借发电机、变压器和补偿设备调压以及组合调压。

•调频与调压的不同

- ✓频率问题是全局的，调节措施主要集中在发电厂。
- ✓电压问题是局部的，调节措施可以是分布的。



第6章小结

- 电力系统中无功功率的平衡

- ✓ 电力系统无功和电压的关系（无功过剩，电压升高；无功不足，电压降低）

- 各种无功电源及其特点

- ✓ 发电机（发电机以滞后功率因数运行时所发出的无功功率为正，以超前功率因数运行时所发出的无功功率为负。）
 - ✓ 电容器和调相机（并联电容器只能向系统供应感性无功功率。调相机实质上是只能发无功功率的发电机，过励运行时向系统供应感性无功，欠励时吸取感性无功。）
 - ✓ 静止补偿器和静止调相机（分别对应于电容器和调相机。）
 - ✓ 并联电抗器（并联电抗器就感性无功而言，不是电源，而是负荷。）



第6章小结

- 电力系统中无功功率的最优分布
 - ✓ 前提：负荷自然功率因数的提高（提高负荷自然功率因数的原因及其措施）
- 无功功率电源的最优分布（等网损微增率准则）
 - ✓ 目标函数：网络损耗最小
 - ✓ 分配原则：等网损微增率准则

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{Gi}} \frac{1}{(1 - \partial \Delta Q_{\Sigma} / \partial Q_{Gi})} = \lambda$$



第6章小结

- 电力系统的电压调整

- 1. 电压波动及其产生原因

- 2. 电压调整

- ① 电压中枢点的概念

- ② 中枢点电压的调整方式：

- 逆、顺、常调压的含义及适用条件

- ③ 电压调整的措施、适用范围和优缺点

- 改变发电机端电压调压

- 改变变压器变比调压

- 改变无功功率分布调压

- 改变线路参数调压

- 组合调压

- ④ 电压调整的基本计算：

- 选择变压器的变比

- 确定无功补偿容量



谢 谢!