



清华大学电机工程与应用电子技术系  
Department of Electrical Engineering, Tsinghua University

# 电力系统分析与控制 (30220562-2)

## 第九讲 频率稳定和动态潮流

2025-5-9



# 课程提纲

## Outlines



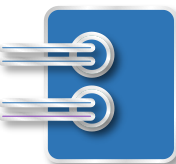
**频率稳定**

**频率控制**

**平衡节点与动态潮流**

**探索任务**

# 频率稳定



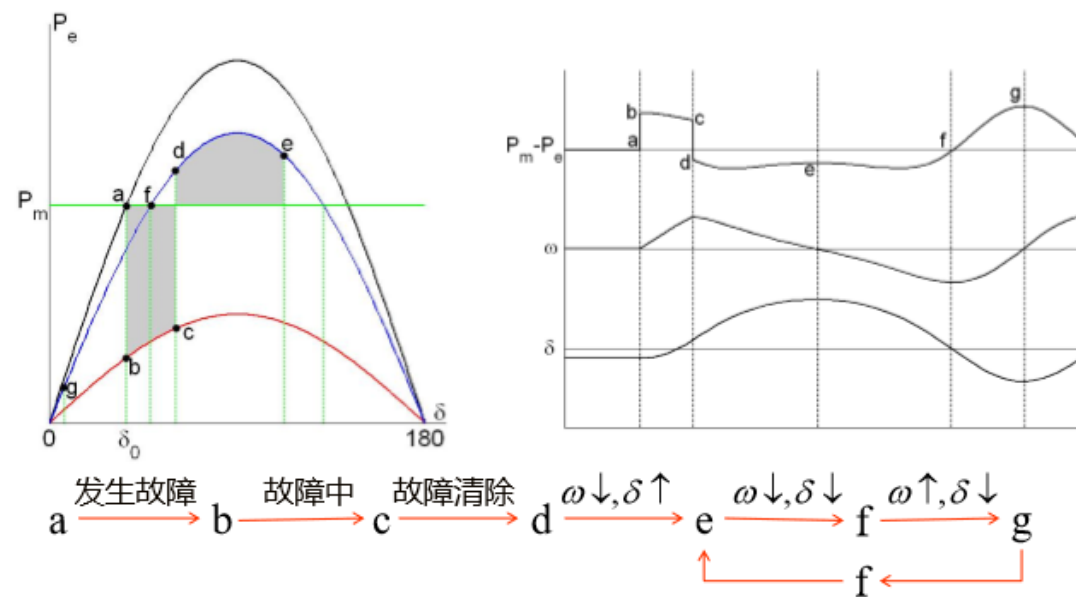
# 电力系统稳定性定义

**电力系统稳定性**指的是电力系统在**给定的初始条件下**，**受到扰动后能回到平衡状态**，同时大部分系统状态变量**保持有界**并使得全系统实际上**保持完整**的能力。

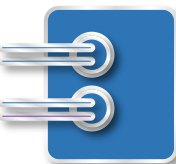
**功率平衡**是电力系统的最基本的要求和特征，各种稳定问题本质上可以理解为功率平衡问题的不同表现形式。

## 功角稳定性：

电力系统中受扰动后，同步发电机之间保持同步运行的能力；发电机维持或恢复电磁功率与机械功率的平衡关系的能力。



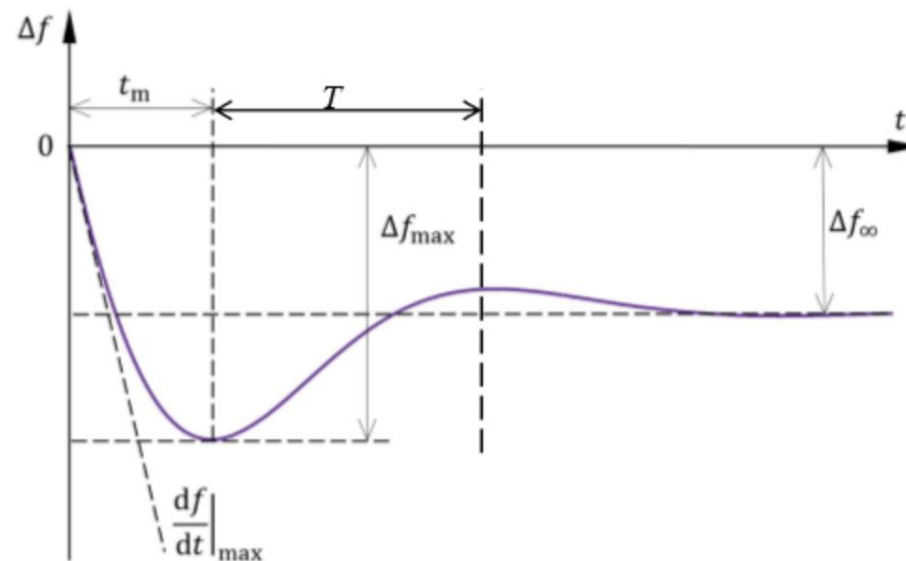
功角稳定性的物理过程分析



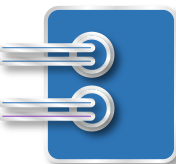
# 电力系统稳定性定义

**电压稳定性：**电力系统在正常条件下受扰动后维持系统中所有母线电压在可接受水平的能力；系统维持或恢复负荷需求和供给之间的平衡关系的能力

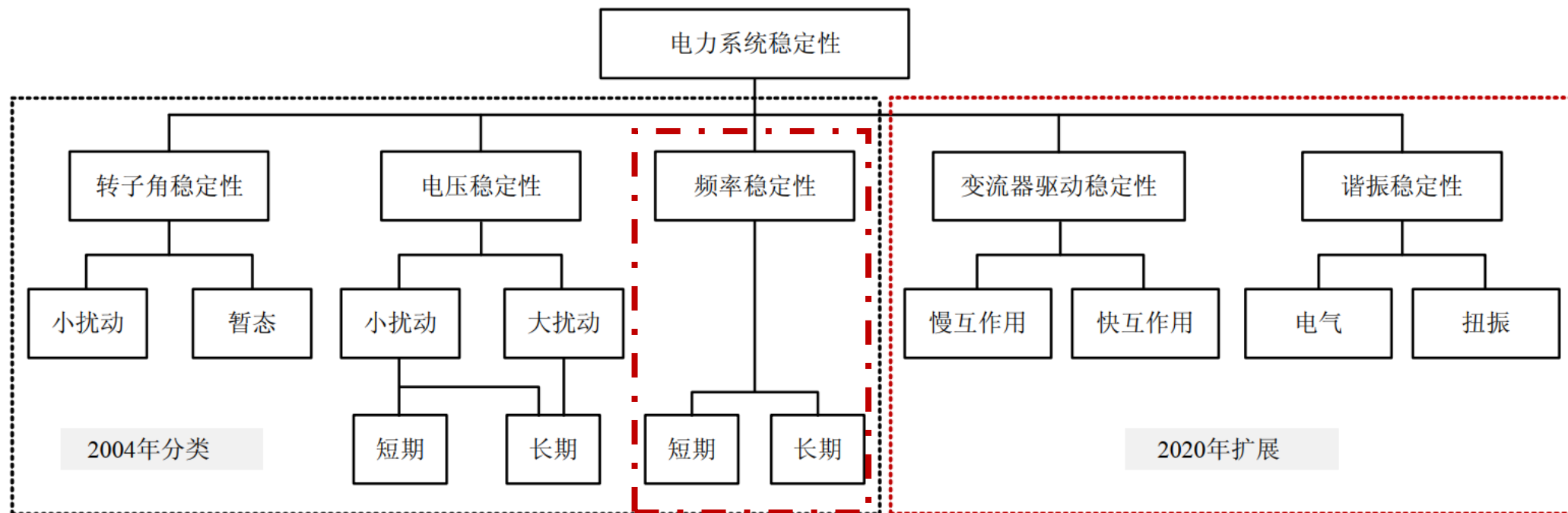
**频率稳定性：**电力系统中受扰动后，频率能够保持或恢复到合理范围内的能力；系统维持总发电量和总负荷量之间的平衡关系的能力



单机带负荷模型分析系统频降过程

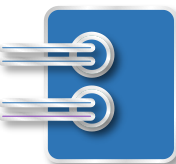


# 电力系统稳定性分类



## IEEE 电力系统稳定的分类(2004+2020 年)

[TECHNICAL REPORT PES-TR77: Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies](#), IEEE PES, April 2020

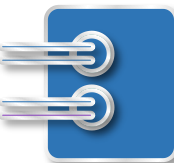


## 进一步理解稳定性

### 功率平衡与稳定性存在什么内在联系？

- ◆ 功率平衡是电力系统的最基本的特征，各种稳定问题本质上可以理解为功率平衡问题的不同表现形式
  - 功角稳定：发电机维持或恢复电磁功率与机械功率的平衡关系的能力
  - 电压稳定：系统维持或恢复负荷需求和供给之间的平衡关系的能力
  - 频率稳定：系统维持总发电量和总负荷量之间的平衡关系的能力
- ◆ 稳定性是系统能够持续保持功率平衡状态的能力，安全性则是在稳定的基础上保证设备运行参数不越限的能力





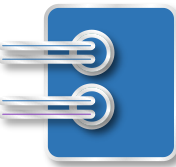
## 进一步理解稳定性

在同步机主导的传统电力系统中，有功功率与频率/功角强耦合，无功与电压强耦合，频率与功角稳定的区别是什么？

### ◆ 频率在功率平衡过程中具有十分关键的作用

- 由于机间同步功率项的存在，频率具有趋向于全网一致的特性，这是实现有效的功率调节的基础
  - 如果扰动后系统频率不能达到全网一致，意味着出现了功角稳定问题
  - 如果扰动后全网恢复同步，但频率超出了允许范围，这就是常说的频率稳定问题，但更准确的说是频率安全问题
- 本地瞬时频率指示了各机组功率调节的方向和强度
- 系统平均频率（的变化率）指示了系统整体功率平衡的状况
- 稳态频率的数值决定了各机组最终分担的功率差额，并指示了后续将系统拉回到额定工作点所需要的调整方向

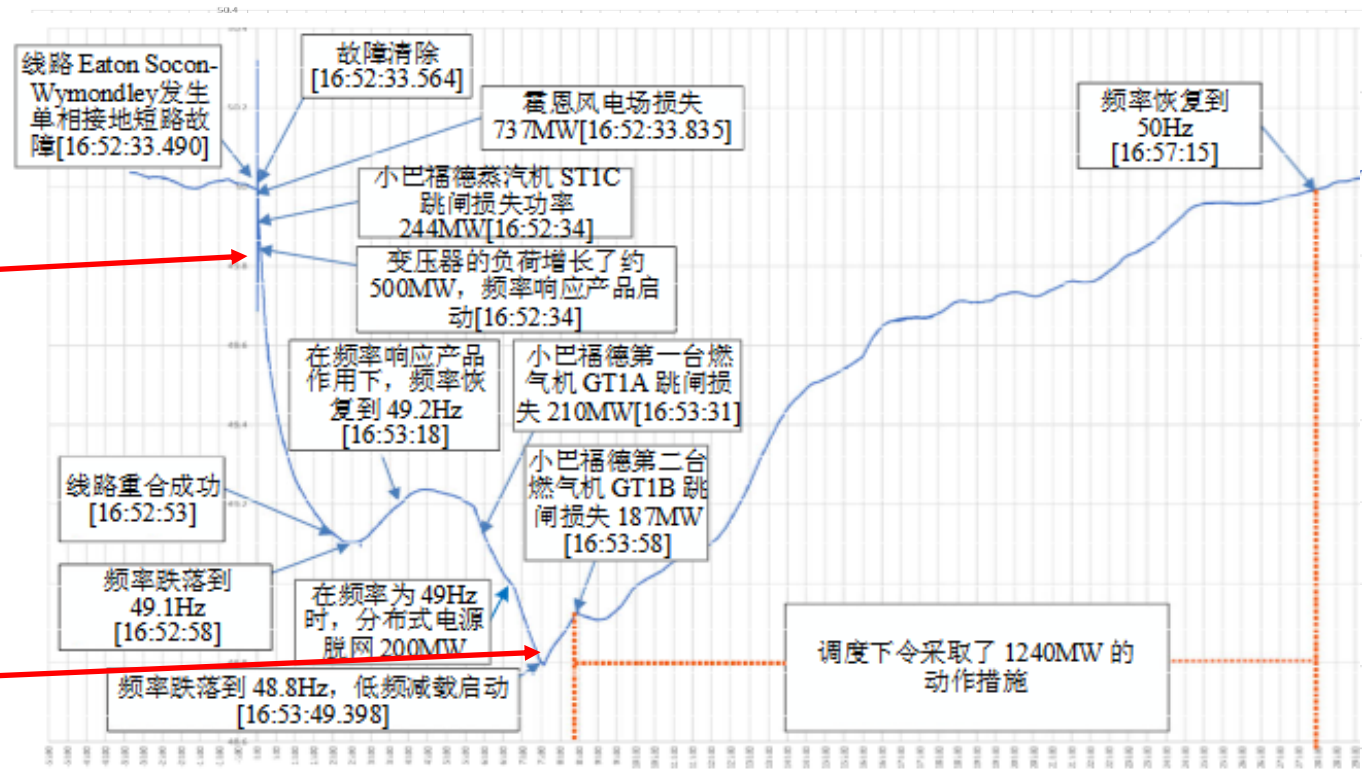




# 频率稳定案例：2019年英国大停电

当地时间2019年8月9日下午5点左右，英国发生大规模停电事故。本次事故发生前，英国电网风电、直流等电力电子并网电源出力占比超过40%，系统稳定性较弱

- 第一阶段，小巴德福燃气电站突然停机，系统频率开始下降。
- 第二阶段，在系统频率出现下降后，风机耐受低频能力不足，大量脱网，霍恩海上风电出力突降900MW左右。
- 第三阶段，系统频率大幅下降，最低达到48.8Hz，超过了系统允许的频率波动范围。低频减载启动，在全网范围内切除部分负荷，诸多地区出现停电。



# 频率控制

## 回顾：频率控制调节

### ● 频率特性

- 功率随频率变化的关系

### ● 一次调频

- 由调速器实现，根据频率变化改变原动出力，有差调节，有死区

### ● 二次调频

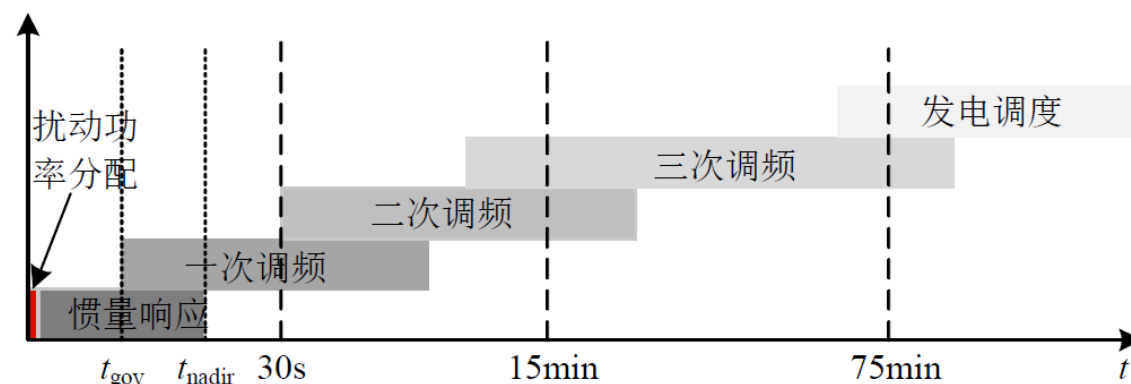
- 由调频器实现，可以按中调或操作员指令完成，也可以采用AGC方式自动实现，可以实现无差调节

### ● 三次调频

- 有功经济运行，目标可设为网损最小或煤耗最少等（前半学期稳态部分研究）

### ● 低频减载和紧急控制

- 按当前频率分级切除负荷，维持系统安全运行



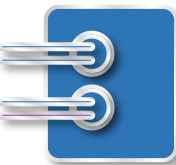
典型的电力系统有功频率动态过程示意图



## 频率调节效应

- 系统频率变化时，引起发电机输出功率变化，这是发电系统的频率特性或称之为**发电频率调节效应**；
- 系统频率变化时，引起负荷消耗的功率变化，这是负荷系统的频率特性或称之为**负荷频率调节效应**；
- 系统频率变化时，还会引起电网电压的变化，而电压变化又将引起发电功率和负荷功率的变化。

整个电力系统的频率特性是发电频率特性、负荷频率特性及电压影响的综合结果，它表示电力系统功率不平衡时**系统频率变化**的特性



## 频率调节效应系数

发电静态频率特性即发电机组的频率调节效应： $K_G = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f}$        $K_G^* = -\frac{\Delta P_G / P_{GN}}{\Delta f / f_0}$

负荷静态频率特性即负荷的频率调节效应： $K_L = \frac{\Delta P_L}{\Delta f}$        $K_L^* = \frac{\Delta P_L / P_{LN}}{\Delta f / f_0}$

系统的频率调节效应系数，即功频静特性系数： $K_S = K_G + K_D = -\frac{\Delta P_{L0}}{\Delta f}$

标么值： $K_S^* = -\frac{\Delta P_{L0}^*}{\Delta f^*} = -\frac{\Delta P_{L0} / P_{LN}}{\Delta f / f} = -\frac{\Delta P_G / P_{LN}}{\Delta f / f} + \frac{\Delta P_L / P_{LN}}{\Delta f / f} = K_G^* \frac{P_{GN}}{P_{LN}} + K_L^* = K_G^* \rho + K_L^*$

其中 $\rho$ 定义为备用系数

# 一次调频

由调速器实现，有差调节，近似直线（下垂控制）

初始负荷增加： $\Delta P_{L0}$

新平衡点频率变化： $\Delta f < 0$

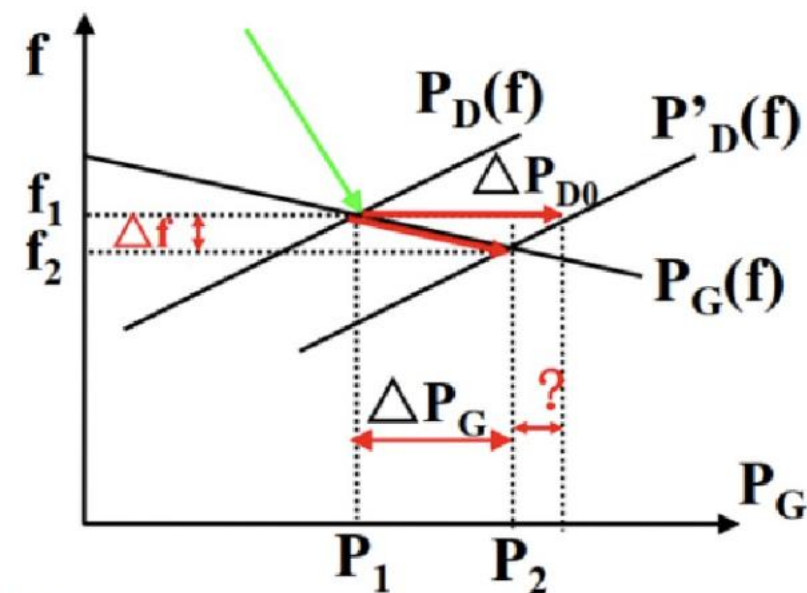
从负荷侧看，负荷增量相当于减小一部分

$$\Delta P_L = K_L \Delta f < 0$$

从发电侧看，一次调频作用，有功出力增加一部分

$$\Delta P_G = -K_G \Delta f > 0$$

实际上负荷增量是  $\Delta P_{Lf} = \Delta P_{L0} + K_L \Delta f = \Delta P_G$



注：图中D下标对应左侧公式L下标



# 二次调频

由**调频器**实现，近似直线簇

负荷初始增量 (**线段ad**) :  $\Delta P_{L0}$

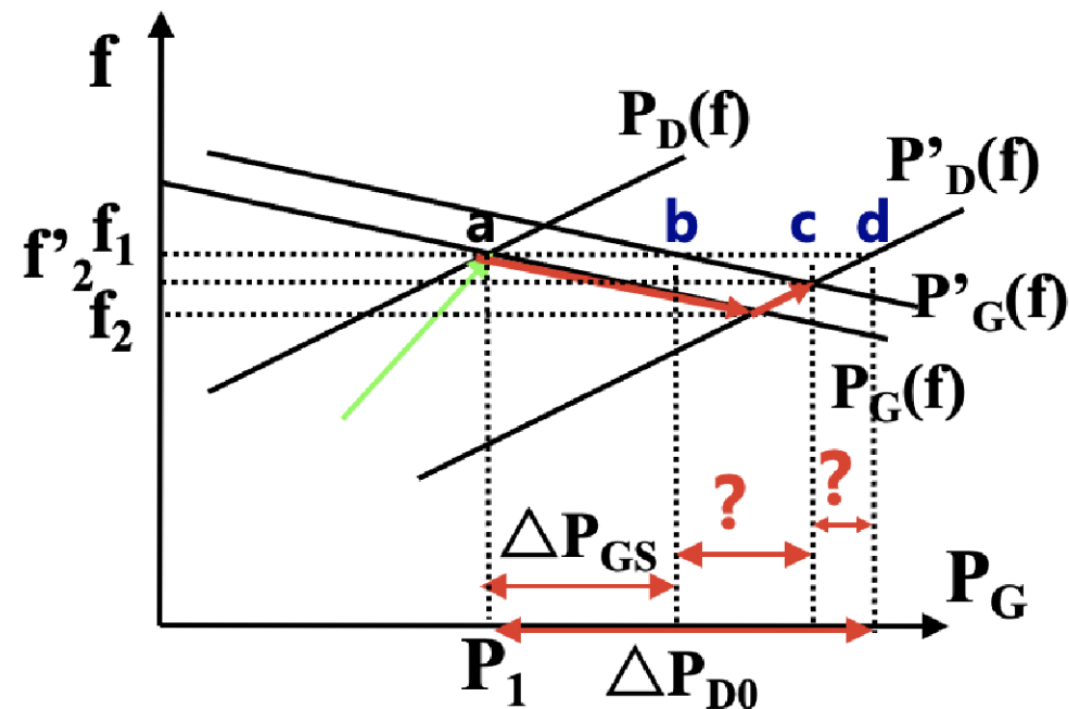
负荷调节效应 (**线段cd**) :  $\Delta P_L$

$$\Delta P_L = K_L \Delta f < 0$$

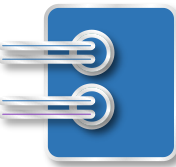
发电机一次调频贡献 (**线段bc**) 有功出力自动增加了一部分  $\Delta P_G$

$$\Delta P_G = -K_G \Delta f > 0$$

发电机二次调频贡献 (**线段ab**) :  $\Delta P_{GS}$

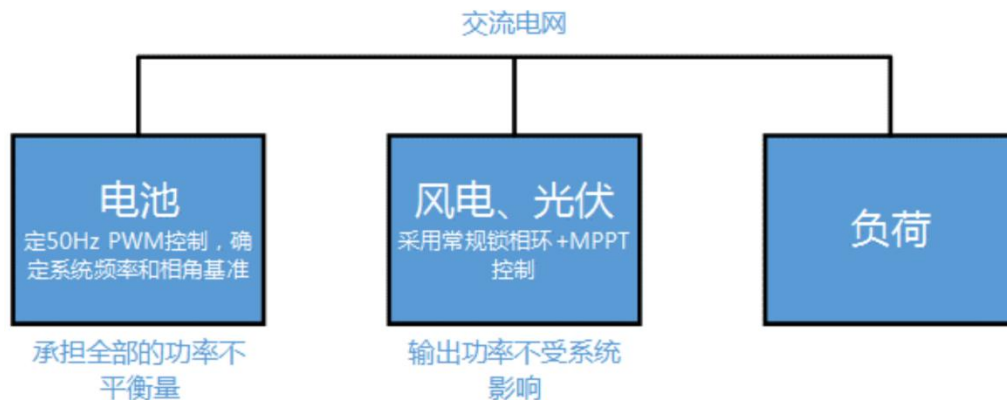


注：图中D下标对应左侧公式L下标



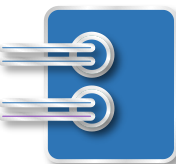
# 双高电力系统中的频率控制

- 传统电力系统里面为什么频率控制和有功控制是一体的？合称有功频率控制
  - 频率由同步发电机转速确定，而发电机转速和功率平衡相关，
$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \omega \\ T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \end{cases}$$
**物理规律**决定了频率和有功的相关性
- 变流器接口电源中，频率取决于PWM中给定的参考波，由控制确定，可以和有功无关，但系统功率平衡的要求仍然存在



构建左图所示的孤立交流电网

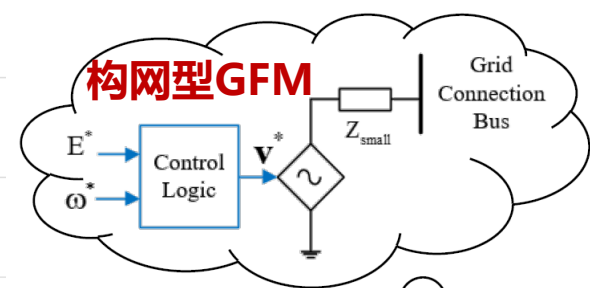
- 电池：定50Hz的PWM控制
- 风电、光伏：锁相，MPPT
- **有功、频率解耦**：频率维持50Hz恒定，不再反映有功平衡状态
- **功率平衡**：电池是系统中的平衡节点，功率扰动全部由电池承担，其他电源不参与功率平衡

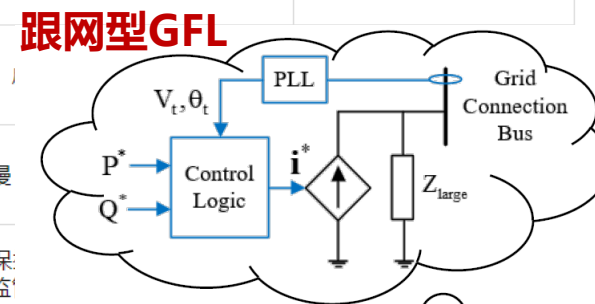


# 双高电力系统中的频率控制

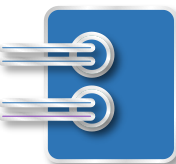
## □ 构网型电力电子设备 VS 跟网型电力电子设备

- **构网型**电力电子设备能够在没有外部电网的情况下独立运行，主动形成并维持电网的电压和频率，帮助其他电源在停电后与电网重新同步，从而实现电网恢复。类似于传统的同步发电机。
- **跟网型**电力电子设备是电流源，其通过跟踪电网的电压角度和幅值来注入或吸收有功和无功功率。它们依赖于电网提供稳定的电压和频率参考，无法在孤岛或离网模式下运行。

特性	构网型	跟网型
	 <p><b>构网型GFM</b></p>	<p>仅能跟随电网电压和频率同步输出</p> <p>依赖电网提供稳定的电压和频率参考</p> <p>无法为电网提供电压和频率支撑</p>
辅助服务	可以提供惯性、系统强度、电压调节和频率响应等多种辅助服务	无法提供辅助服务
实施难度和成本	技术更复杂、	
功率控制响应速度	响应速度较慢	
技术挑战和监管障碍	面临同步、保技术挑战和监	

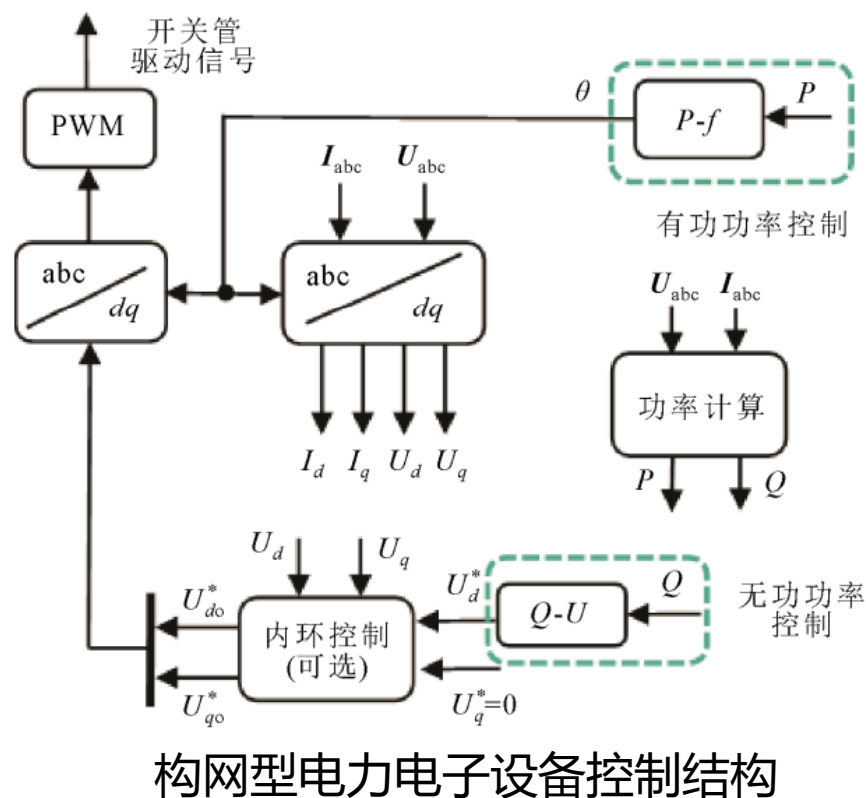
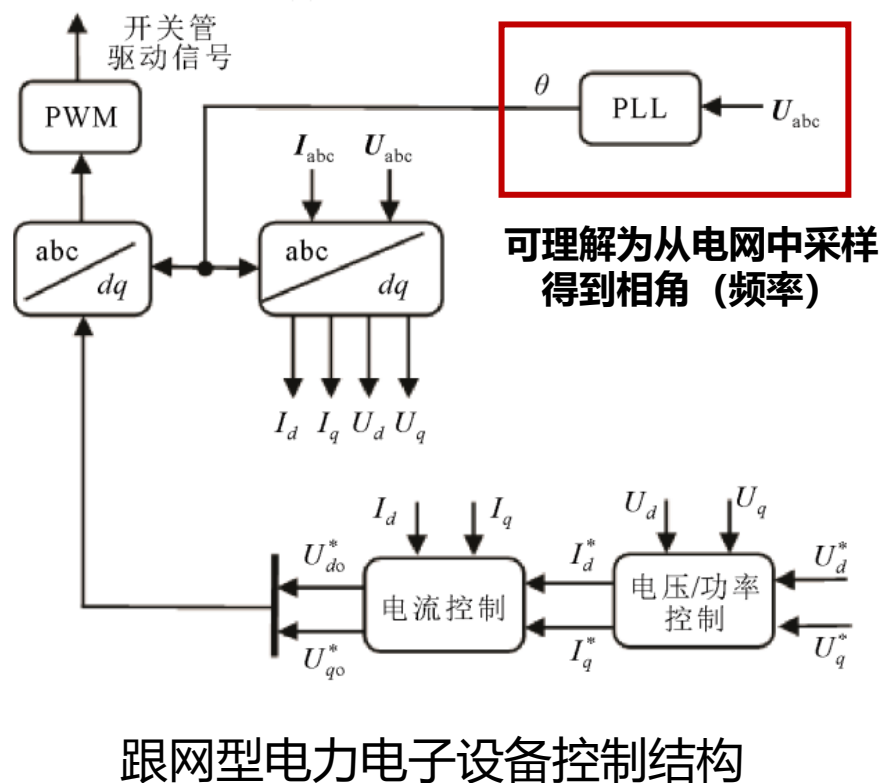


为了让设备能够参与系统功率平衡，需要让其感知到一个反映系统有功平衡状态的变量  
频率仍然是一个切合实际的选择（构网型和跟网型分别怎么做？）

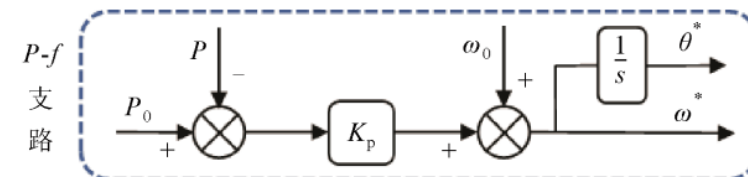


# 双高电力系统中的频率控制

## □ 构网型/跟网型电力电子设备控制结构



### 下垂控制

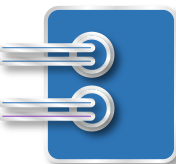


通过控制建立频率（输出）和有功（输入）之间的关系

频率获取来源不同！

- 跟网型的频率依赖电网
- 构网型的频率可以根据电网频率和功率自主调节

# 动态潮流



# 平衡节点

## 平衡节点由来:

潮流计算时全系统应该满足功率平衡条件,

而系统有功损耗和无功损耗都是节点电压

幅值和角度的函数, 只有V和 $\theta$ 都求出来才能确定, 因此N个节点至少有一个节点的P、Q不能事先给出, 需要等到潮流计算结束 $P_{loss}$ 、 $Q_{loss}$ 确定, 该节点设置为平衡节点 (松弛节点) 。

此时平衡节点相当于承担**所有不平衡功率**, 常把平衡节点选在有较大余量的发电机节点。

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_{loss} = \sum_{i=1}^N V_i \sum_{j \in i} V_j G_{ij} \cos \theta_{ij}$$

$$\sum_{i=1}^N Q_i = Q_{loss} = \sum_{i=1}^N V_i \sum_{j \in i} V_j B_{ij} \cos \theta_{ij}$$



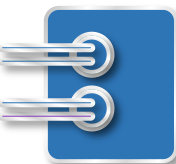
# 动态潮流

## 常规潮流 vs 动态潮流：

根据对不平衡功率的处理的不同可以分两种方法：平衡节点法和动态平衡法，即对应常规潮流与动态潮流。

**常规潮流**计算中，假定一个 **$V\theta$ 节点（平衡节点）**，实际隐含地认为系统中的不平衡功率是由该节点吸收的。在**线路开断、发电机退出运行或负荷发生较大变化**等情况，引起系统中较大的功率不平衡和频率的变化，此时还假设一个平衡节点吸收全部不平衡功率是不恰当的。

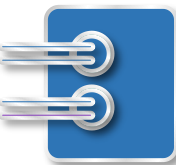
采用**动态潮流**算法，计算系统存在功率不平衡的稳态潮流。一部分差额功率由负荷按其频率特性来平衡，而大部分功率差额由多台发电机调速系统的动作来平衡。



# 动态潮流

## 常规潮流 vs 动态潮流:

因此在动态潮流中，V $\theta$ 节点与平衡节点是**两个不同的概念**。必须指定一个**V $\theta$ 节点**作为电压和相角参考节点，但可以指定**多个平衡节点**，即由多台发电机共同承担系统的不平衡功率。



# 动态潮流

## 模型原理：

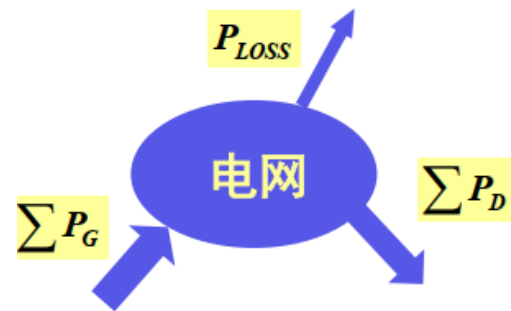
给定系统的有功潮流方程。

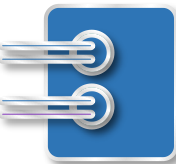
$$P_{G_i} - P_{D_i} - P_i(V, \theta) = 0, i = 1, 2, \dots, N$$

当系统发生功率不平衡时，例如失去一台机组或切除一批负荷。系统功率不平衡量是： $\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N P_{G_i} - \sum_{i=1}^N P_{D_i} - P_{loss}(V, \theta)$

动态潮流中，该差额由**所有发电机**共同分担，第*i*台发电机分担 $\alpha_i$ ， $\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$ 。 $\alpha_i$ 可以按照发电机的频率响应特性系数来选取，或者由AGC机组的控制特性决定，也可按满足某些经济准则来选取。

$$\underbrace{P_{G_i} - \alpha_i \Delta P_{\Sigma}}_{P_{G_i}'} - P_{D_i} - P_i(V, \theta) = 0, i = 1, 2, \dots, N$$





## 动态潮流

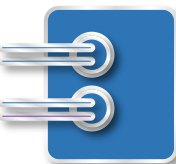
$$\underbrace{P_{G_i} - \alpha_i \Delta P_{\Sigma}}_{P_{G_i}'} - P_{D_i} - P_i(V, \theta) = 0, i = 1, 2, \dots, N$$

上式和无功潮流一起构成**动态潮流方程**。

当 $\alpha_N = 1, \alpha_i = 0, i = 1, 2, \dots, N - 1$ 时，上式为**常规潮流模型**。

实际计算中有功无功潮流方程均不包括V $\theta$ 节点方程，求解后的V带入V $\theta$ 节点方程会自动满足。

在动态潮流计算收敛以前，由于系统的准确网损 $P_{loss}$ 和功率不平衡量 $\Delta P_{\Sigma}$ 均是**未知**的，因此在进行潮流计算时通常是把**近似的 $\Delta P_{\Sigma}$ 值**带入，随着潮流迭代的进行， $\Delta P_{\Sigma}$ 会逐渐减少，在潮流收敛时其值为零。



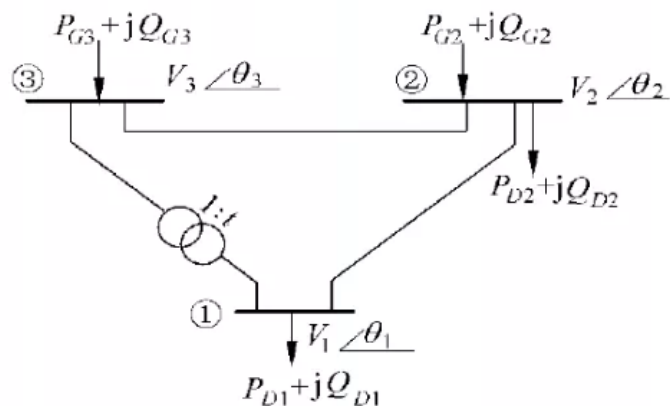
# 动态潮流

## 工程上动态潮流计算过程：

1. 动态潮流模拟功率扰动引起频率变化  $\Delta f$ ， $\Delta f$ 引起发电机和负荷功率修正，经过时间 $t$ 后，频率由 $f_0$ 变为 $f_1$ 。 $t$ 、 $f_1$ 的值由计算频率的微分方程决定。
2. 频率稳定在 $f_1$ 后，系统的不平衡功率 $\Delta P_\Sigma$ 仍然不为0，但己是很小的数。
3. 然后根据机组的惯性时间常数 $T_j$ 分配 $\Delta P_\Sigma$ ，其中达到额定容量的机组不参加分配。

工程上常采用**交替解法**。即每次计算潮流得到系统的功率分布及网损后，进行频率计算，同时计算出由频率效应影响后新的网络注入，带入下次潮流计算。

# 动态潮流



未知量:  $\theta_1, \theta_2, V_1$

常规潮流可写为

$$\begin{cases} f_1 = 0 - P_{D1} - P_1(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3, t) = 0 \\ f_2 = P_{G2} - P_{D2} - P_2(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3) = 0 \\ f_4 = 0 - Q_{D1} - Q_1(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3, t) = 0 \end{cases}$$

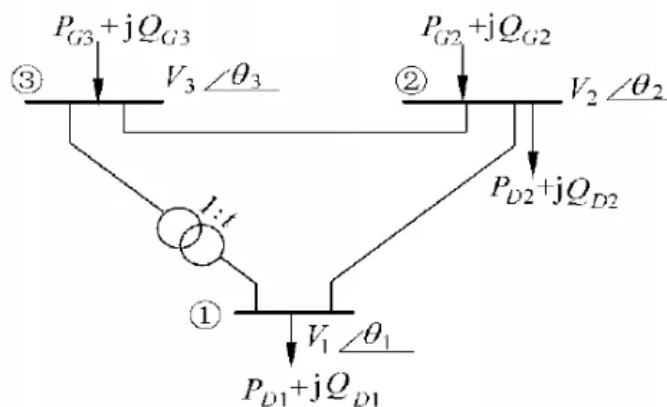
$$\begin{cases} f_1 = -P_{D1} - P_1(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3, t) = 0 \\ f_2 = P_{G2} - P_{D2} - P_2(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3) = 0 \\ f_3 = P_{G3} - P_3(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3, t) = 0 \\ f_4 = -Q_{D1} - Q_1(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3, t) = 0 \\ f_5 = Q_{G2} - Q_{D2} - Q_2(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3) = 0 \\ f_6 = Q_{G3} - Q_3(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3, t) = 0 \end{cases}$$

动态潮流可写为

$$\begin{cases} f_1 = 0 - P_{D1} - P_1(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3, t) = 0 \\ f_2 = P_{G2} - \alpha_2 \Delta P_{\Sigma} - P_{D2} - P_2(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3) = 0 \\ f_4 = 0 - Q_{D1} - Q_1(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3, t) = 0 \end{cases}$$



# 动态潮流



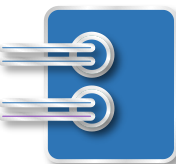
对Vθ节点3的有功潮流方程（不出现在动态潮流计算）

$$f_3 = P_{G3} - \alpha_3 \Delta P_{\Sigma} - P_3(\theta_1, \theta_2, V_1, V_2, V_3, t) = 0$$

上面的动态潮流模型  $\alpha_2 + \alpha_3 = 1$ ，表明发电机  $P_{G_2}$  分担了部分不平衡功率。

# 作业

## 任务：动态潮流计算

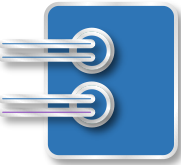


# 作业

- 1. 回顾P-Q分解法，分析matpower中与P-Q分解法对应的函数fdpf各步骤的作用。

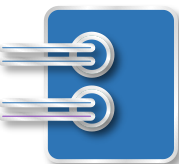
注：fdpf函数准确来说实现的是快速分解法。快速分解法与P-Q分解法思想一致，区别在于迭代公式有所不同，具体可以参考《高等电力网络分析》第八章第二节。（图书馆水木搜索可以直接搜到）

参考书：张伯明、陈寿孙、严正. 高等电力网络分析(第二版): 现代电力系统丛书[M]. 北京: 清华大学出版社,2007.



# 作业

- 2. 对fdpf函数进行改写，实现基于P-Q分解法（快速分解法）的动态潮流方法，分析动态潮流的计算结果，并对比其与常规潮流计算结果的不同。
  - 本次作业所用系统参数在“case39\_d.m”给出，“case39\_d.m”给出的是发生功率缺额前的系统。令节点16负荷有功增加200MW，节点39发电机有功减小200MW，分别利用常规潮流和动态潮流方法求解潮流。
  - 系统功率差额由系统所有发电机共同承担（包括平衡节点的发电机），分担系数按照发电机的静态频率响应特性系数来选取，并假定所有发电机的静态频率响应特性系数相等。忽略负荷的频率特性。



## 作业

- 3. 思考：通过动态潮流能体现频率变化么？（不需要编程实现，自主思考即可），可选择在报告中展示。