



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)

## 第十讲 电力系统中的惯量问题

2024-5-16



# 课程提纲

## Outlines



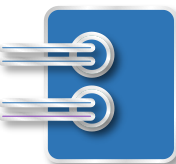
**惯量的意义、概念**

**电力系统频率响应**

**电力系统惯量支撑能力提升**

**作业——多机电力系统频率响应**

# 惯量的意义、概念



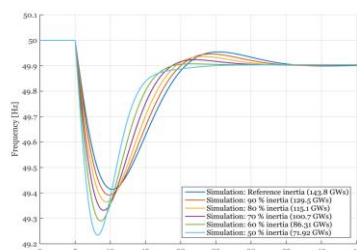
# 惯量问题的研究背景

## ●传统电力系统中的惯量

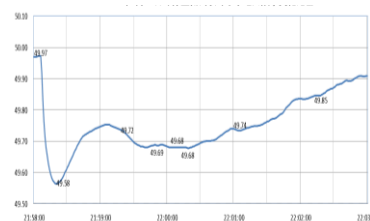
- 火电、核电通过汽轮发电机发电，电厂中的汽轮机及发电机转子存在巨大的转动惯量，一旦系统出现频率扰动，**可在瞬时遏制频率快速波动。**

## ●新能源高占比的新型电力系统的惯量

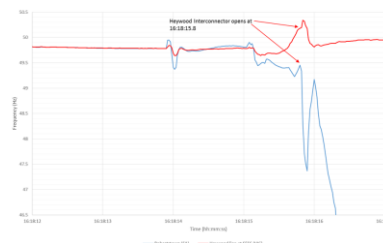
- 风电光伏装机占比不断提高、火电装机占比逐步下降，这也导致了**系统的转动惯量逐步减少。**
- 风光电源大量替代同步机组，同步惯量不断降低。低同步惯量系统在交直流故障期间易发生频率失稳等现象。



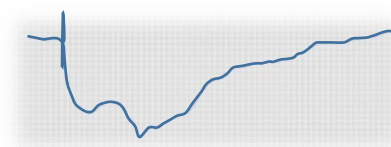
惯量降低引起频率稳定性恶化



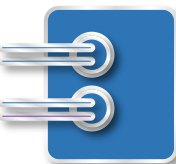
锦苏直流闭锁时  
华东电网实测频率曲线



2016年澳大利亚南部  
大停电实测频率曲线



2019年8.9英国大停电  
实测频率曲线



## 惯量问题的研究背景

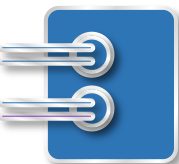
➤ 电力系统惯量支撑能力削弱已引发多起停电事故！



南澳 “9·28” 大停电事故

➤ 事故过程分析

- 2016年9月28日下午，一股强台风伴随暴风雨、闪电、冰雹袭击了新能源发电占比高达48.36%的澳大利亚南部地区电网，风电机组大规模脱网，最终导致全南澳大利亚州大停电，50h后才恢复供电
- 事故当日，输电线路故障引发电压跌落，风电机组因低电压穿越能力不足大规模脱网。风电机组脱网后，导致大规模潮流转移，联络线因严重过载而跳闸，南澳电网成为孤网。**因有功和无功功率的缺失，系统惯量不足导致系统频率自维持能力较低，最终引发系统频率和电压的崩溃，最终导致该地区大停电**



## 惯量问题的研究背景

- 电力系统惯量支撑能力削弱已引发多起停电事故!

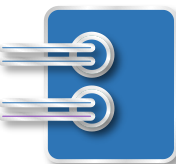
时间	切机容量 /MW	系统惯量 /(MW · s)	联络线断开前 频率振荡时间/s
1999-12-02	1130	10693	2.8
2004-03-08	650	7617	1.7
2005-03-14	580	11127	2.0
2016-09-28	1895	3000	0.6

历史上南澳电网由于发电机脱网造成与大电网联络线断开的事件

### ➤ 事故原因分析

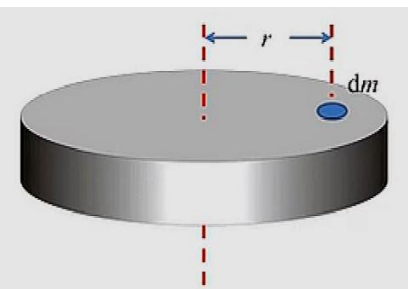
由表可见，大停电事故当日，南澳系统惯量呈现历史最低，频率振荡时间最短、切机容量最大。本次停电事故主要归因于高占比新能源机组导致的电力系统惯量支撑能力不足<sup>[1]</sup>。





# 同步发电机惯性及惯量定义

- 在物理学中，**惯性**是物体的一种固有属性，表现为物体对运动状态变化的抵抗程度
- 惯量**是描述物体惯性大小的量值，物体惯量即为质量
- 转动惯量
- （转子）动能

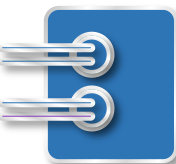


$$J = \int r^2 dm$$

式中： $r$  为转动半径； $m$  为刚体质量；转动惯量  $J$  单位为  $kg \cdot m^2$ ，对于某一台发电机，其转动惯量是恒定不变的

$$W_k = \frac{1}{2} J \Omega^2$$

式中： $J$  为转动惯量； $\Omega$  为机械角速度，发电机动能取决于转动惯量和转速，而对于额定运行的机组，动能仅取决于其转动惯量。通常用发电机额定运行时的动能衡量机组惯性大小，还可以用关于能量的惯性常数  $H$  和惯性时间常数  $T_j$  衡量机组惯性大小。



# 同步发电机惯性及惯量定义

## ● 惯性常数 $H$

- 额定转速时机组动能除以额定容量，单位为 s

$$H = \frac{W_k}{S_B} = \frac{J\Omega_0^2}{2S_B}$$

- 其物理含义为，发电机组仅利用存储的动能为大小等于发电机额定容量的负荷提供能量所持续的时间。对于运行的发电机组，其惯性常数仅与发电机额定转速时动能和额定容量有关，与实际有功出力无关

## ● 惯性时间常数 $T_j$

- 指施加额定转矩将发电机由静止拖动到额定转速所需要的时间，单位为 s，与惯性常数关系为

$$T_j = 2H = \frac{2W_k}{S_B} = \frac{J\Omega_0^2}{S_B}$$

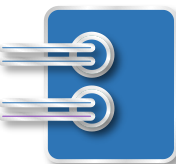


# 惯量的概念

## ➤ 线性运动与旋转运动的一个对比

	长度	质量	速度	加速度	力	动能	功率
线性运动	$s$	$M$	$v = ds/dt$	$a = dv/dt$	$F = Ma$	$W = \int Fds$	$p = \frac{dW}{dt}$ $= Fv$
	角度	惯量	角速度	角加速度	转矩	动能	功率
旋转运动	$\theta$	$J = \int r^2 dm$	$\omega = d\theta/dt$	$\alpha = d\omega/dt$	$T = J\alpha$	$W = \int Td\theta$	$p = \frac{dW}{dt}$ $= T\omega$

# 电力系统频率响应



# 转子运动方程

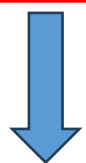
假定转子刚性，有

$J$ —转子的转动惯量

$\Omega$ —机械角速度

$M_m$ 、 $M_e$ 、 $M_D$  - 机械转矩、电磁转矩、阻尼转矩

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_m - M_e - M_D$$

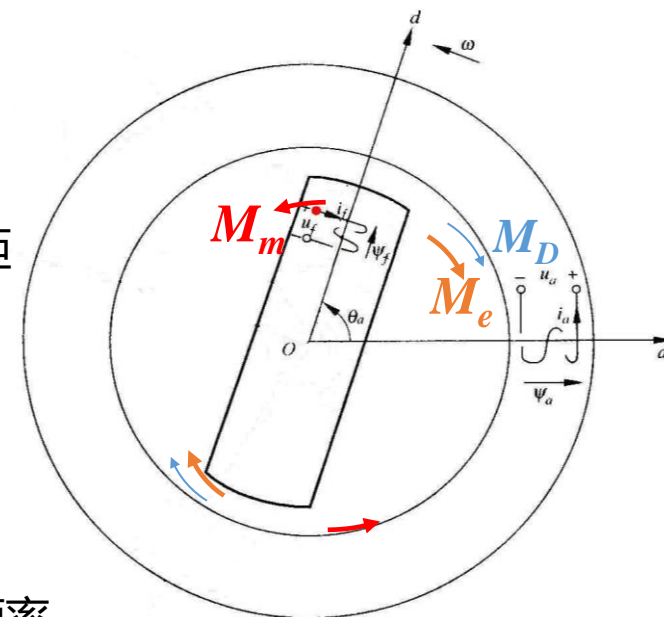


标么化

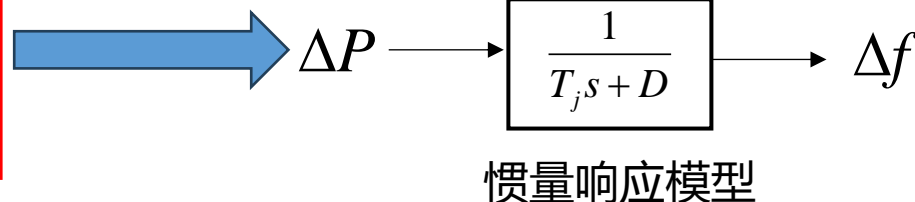
标么转子运动方程

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ T_j \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - 1) \end{cases}$$

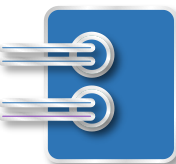
除 $\delta$ 、 $t$ 、 $T_j$ 、 $\omega_0$ 外，其余变量为标么值



功率扰动和频率变化的关系?



惯量响应模型



## 转子运动方程

补充：标么转子运动方程的推导

额定机械角速度为 $\Omega_0$ ，额定电角速度 $\omega_0 = p_p \Omega_0$ ，转子额定转速时的动能为：

$$W_k = \frac{1}{2} J \Omega_0^2 \Rightarrow J = \frac{2W_k}{\Omega_0^2}$$

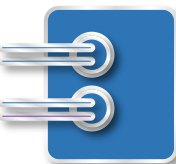
有

$$\frac{2W_k}{\Omega_0^2} \frac{d\Omega}{dt} = M_m - M_e - M_D$$

功率基值 $S_B$ ，转矩基值 $M_B = S_B / \Omega_0$

标么化：

$$T_j \frac{d\Omega^*}{dt} = M_{m^*} - M_{e^*} - M_{D^*} = \Delta M^*$$



## 转子运动方程

补充：标么转子运动方程的推导

$$T_j \frac{d\Omega^*}{dt} = M_{m^*} - M_{e^*} - M_{D^*}$$

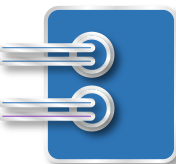
$$T_j = \frac{2W_k}{S_B} = \frac{J\Omega_0^2}{S_B} \quad \text{惯性时间常数, 单位为秒。}$$

因

$$\omega_* = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{p_p \Omega}{p_p \Omega_0} = \Omega_*$$

∴

$$\frac{T_j}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = T_j \frac{d\omega_*}{dt} = M_{m^*} - M_{e^*} - M_{D^*}$$



## 转子运动方程

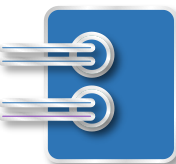
补充：标么转子运动方程的推导

**假定  $\omega \approx \omega_0 \leftrightarrow \Omega \approx \Omega_0$ , 什么意思?**

**功率与力矩:  $P = M\Omega$**

**力矩的标么值 = 功率的标么值?**

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{T_j}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = M_{m*} - M_{e*} - M_{D*} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = (\omega_* - 1)\omega_0 \\ T_j \frac{d\omega_*}{dt} = P_{m*} - P_{e*} - P_{D*} \end{array} \right.$$



## 转子运动方程

**$T_j$ 物理意义:**

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = \Delta M \Rightarrow T_j \int_0^1 d\omega = \int_0^{t_1} \Delta M dt$$

**若  $\Delta M = 1$ , 则**

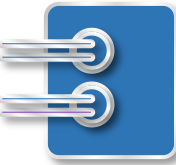
$$T_j = \int_0^{t_1} 1 \cdot dt = t_1$$

**思考: H的物理意义?**

$$H = \frac{W_k}{S_B} \quad T_j = 2H$$

**意义: 在发电机转子上施加额定转矩使转子加速, 转子由静止到额定转速所需的时间。**



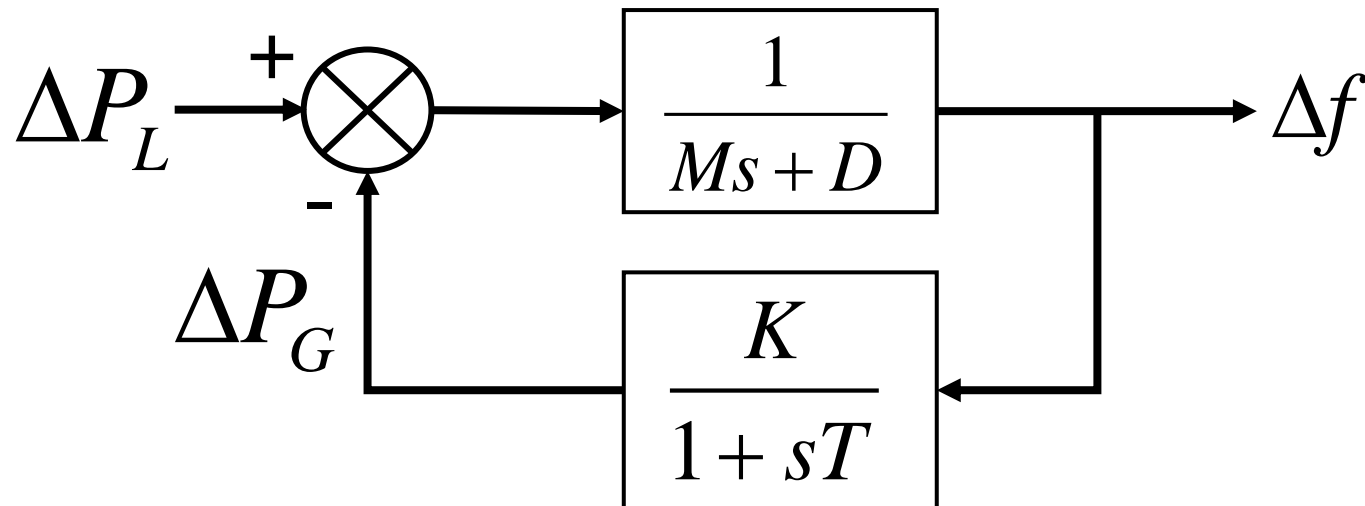


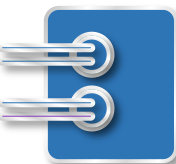
## 发电机一次调频环节与频率响应模型

简化考虑，假设机组采用一阶惯性环节进行一次调频控制

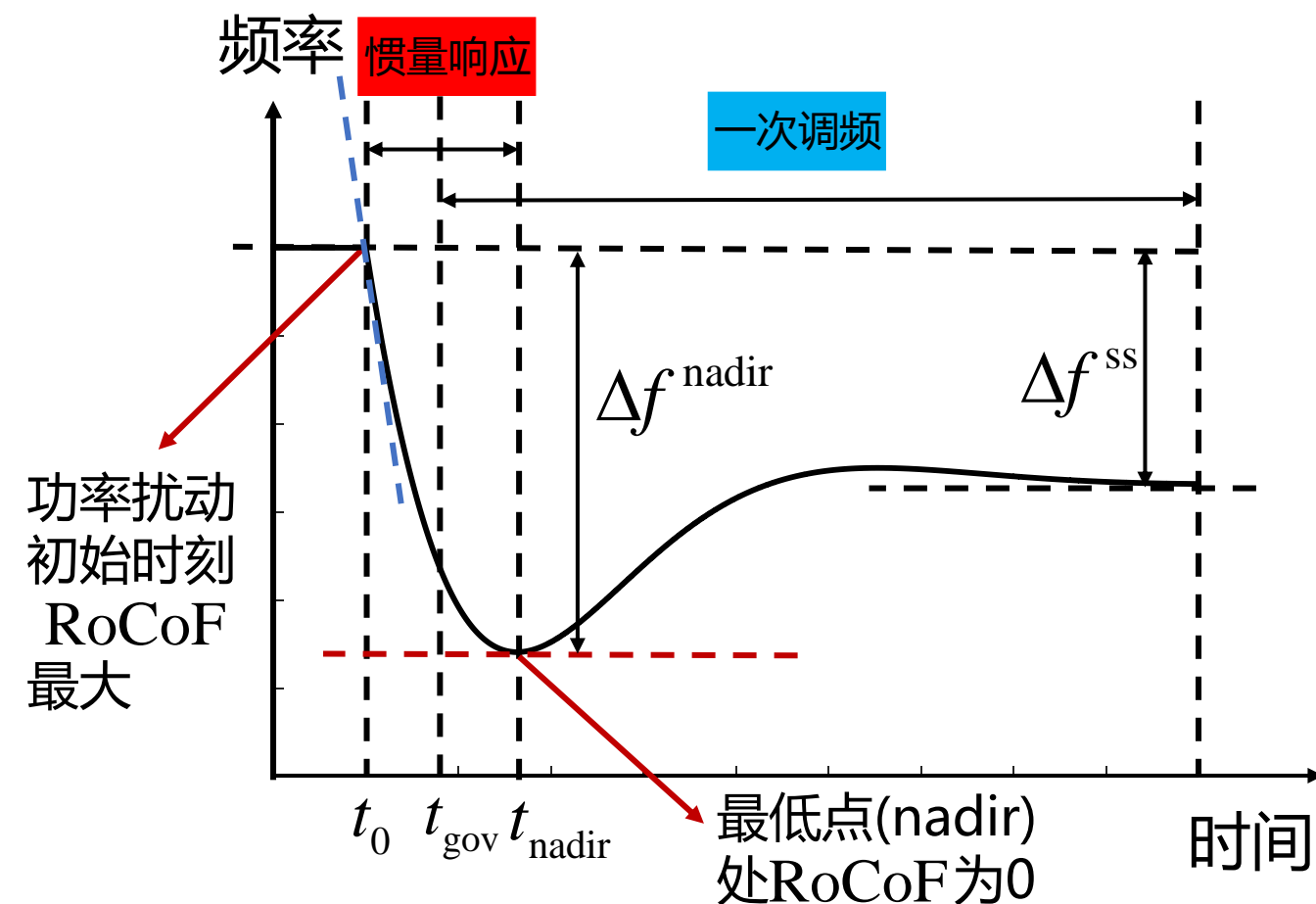
$$G(s) = \frac{K_G}{1 + sT_G}$$

那么惯量响应结合一次调频控制的控制模型为：





# 电力系统频率响应



## RoCoF: 频率变化率

$\Delta f^{\text{nadir}}$  : 暂态频率偏差极值

$\Delta f^{\text{ss}}$  : 准稳态频率偏差

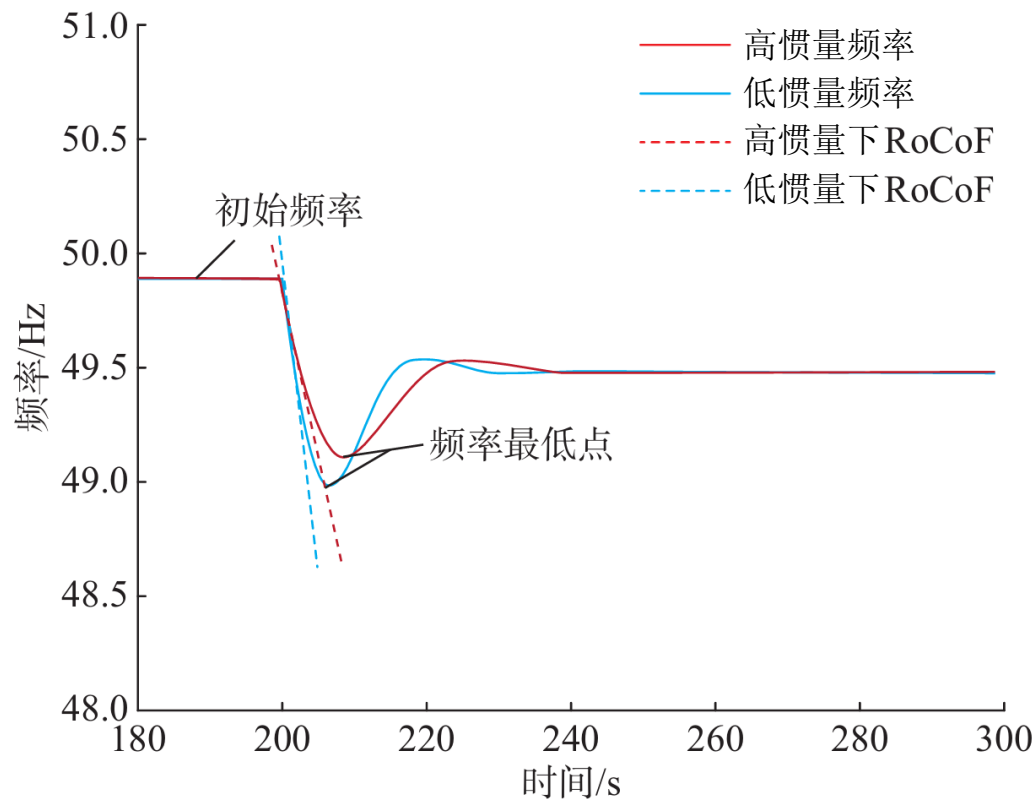
- 当系统受扰动后初始时刻对应的有功不平衡量最大, 可得系统初始时刻的频率变化率的最大值:

$$R_o C_o F_{\max} = \left. \frac{df(t)}{dt} \right|_{t=0^+} = -\frac{\Delta P_L f^0}{T_j}$$

- 系统准稳态频率偏差可用机组一次调频备用容量完全释放状况  $\Delta P_G = R$  下的频率偏差表示

$$\Delta f^{\text{ss}} = \Delta f(t) \big|_{t=+\infty} = -\frac{R - \Delta P_L}{D}$$

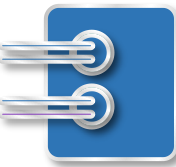
# 电力系统频率响应



惯性对电力系统频率特性的影响

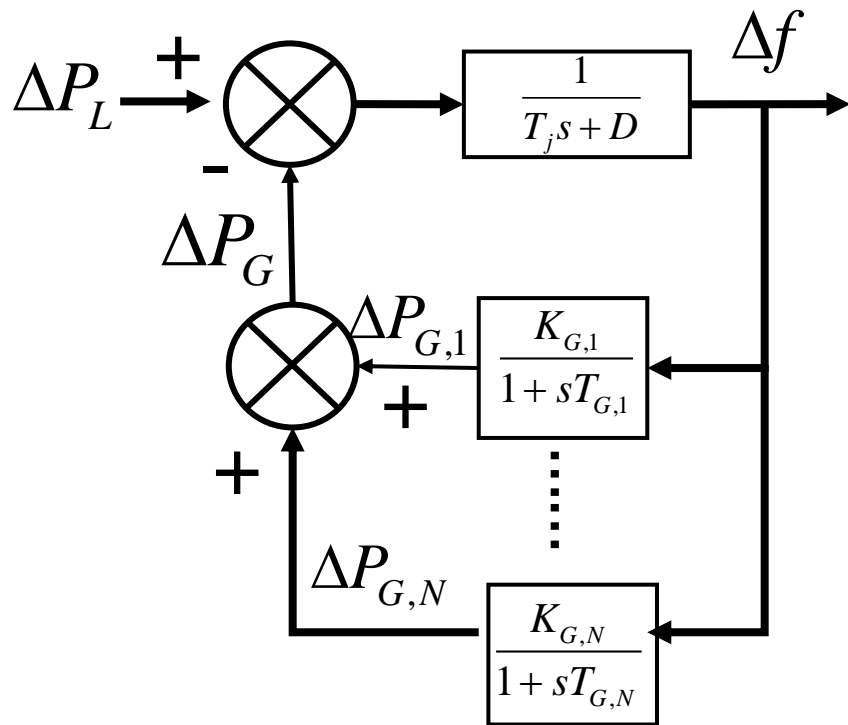
## ➤ 结论

- **初始时刻频率变化率**：系统受扰动后最大  $R_0 C_0 F$  与有功不平衡量成正比而与惯量水平成反比，事故容量越大、系统惯量越低， $R_0 C_0 F$  变化越快，频率变化幅值越大；
- **频率偏差极值**：系统受扰动后的频率偏差极值随系统惯量水平和一次调频能力的降低而增大，为维持频率偏差在允许范围，系统需具备足够的惯量水平，备用容量和调节速率以应对运行中可能出现的极限故障；
- **准稳态频率偏差**：系统准稳态频率偏差主要与有功扰动大小、机组一次调频备用容量、负荷阻尼特性有关，与系统惯量无关。



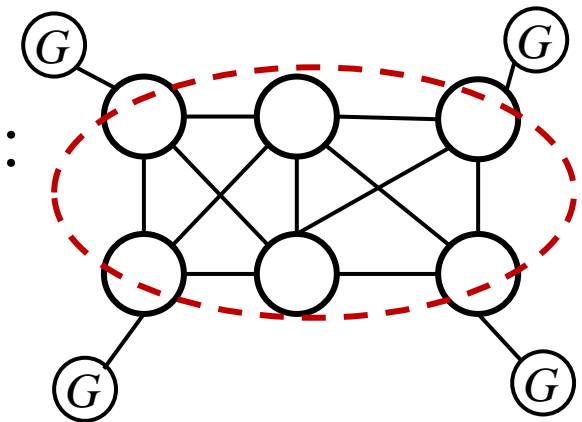
# 多机系统的频率响应

假设：全网频率相同，且暂态过程中也保持一致  
 则可采用平均系统频率响应模型<sup>[2]</sup>  
 (Average System Frequency, ASF):

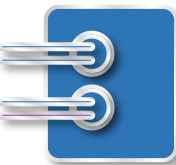


$$T_j = (\sum_{i=1}^N u_{i,t} S_i T_{j,i}) / S_{\text{sys}}$$

$$D = (\sum_{i=1}^N u_{i,t} S_i D_i) / S_{\text{sys}}$$



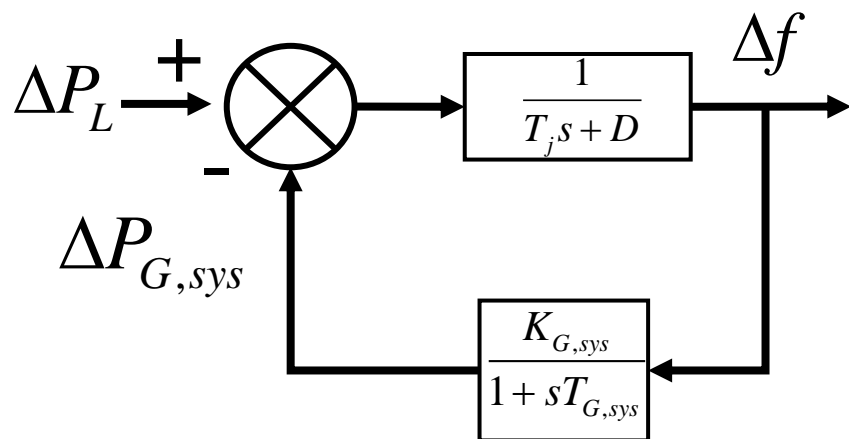
$u$  代表启停状态  
 $S_i$  代表机组容量  
 $S_{\text{sys}}$  代表系统容量基值



## 多机系统的频率响应

若进一步假设： $T_{G,1} = \cdots = T_{G,N}$

则多机系统的频率响应模型可经过聚合进一步简化为：



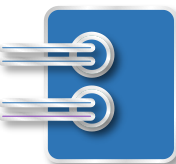
其中：

$$T_{G,sys} = T_{G,1} = \cdots = T_{G,N}$$

$$K_{G,sys} = (\sum_{i=1}^N u_{i,t} S_i K_{G,i}) / S_{sys}$$

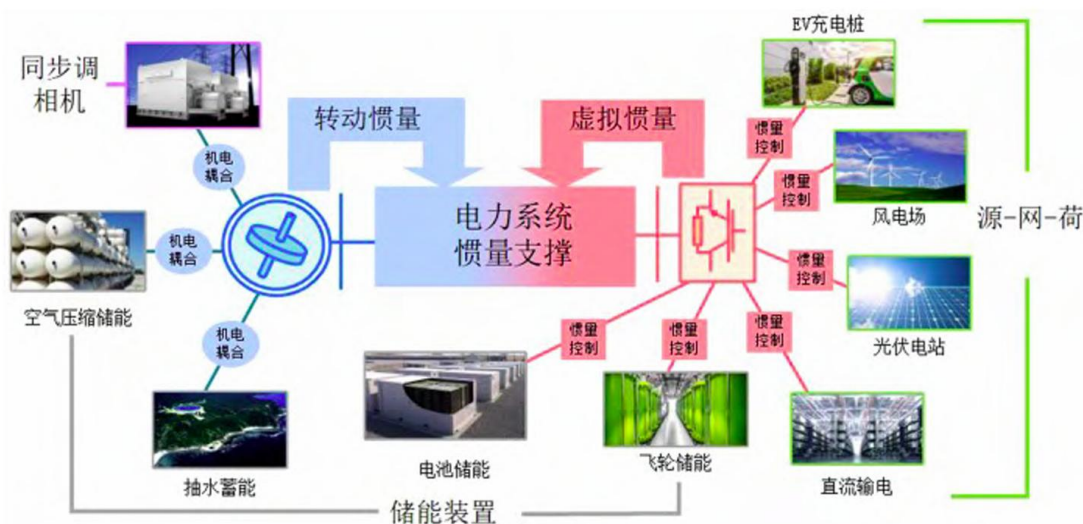
思考：如何推导系统的暂态频率偏差极值  $\Delta f^{\text{nadir}}$  ？

# 电力系统惯量支撑能力提升

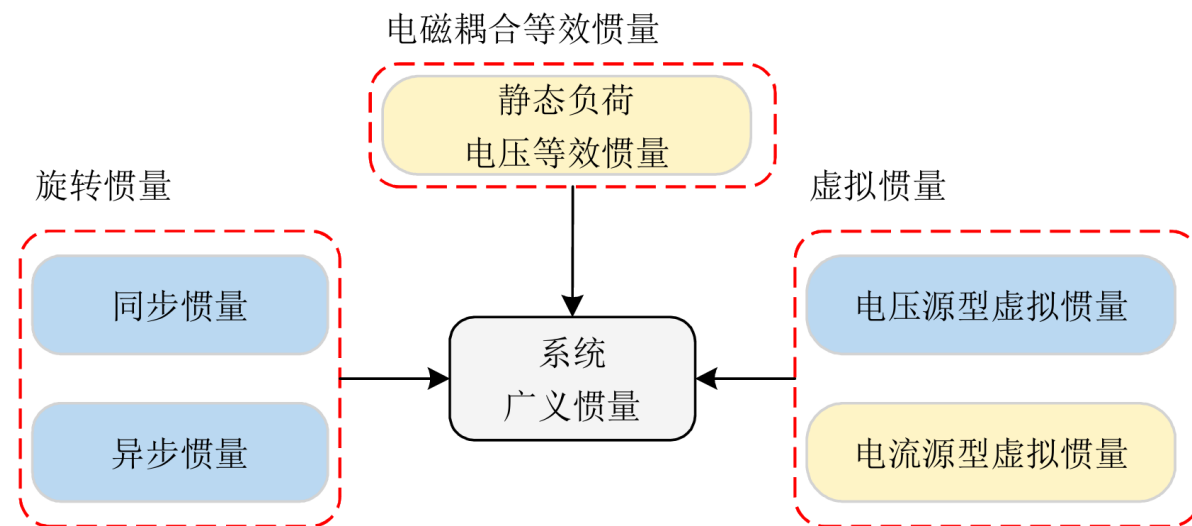


# 电力系统惯量支撑能力提升

- “9.28”事故后，南澳电网修改了技术规程，重新规定无论何时电源中必须有超过3台不小于100MW的燃气同步机组在线运行，以保证系统最低转动惯量。
- 依据惯量支撑机理，可将现有惯量支撑分为：（1）基于同步旋转装备的转动惯量支撑；（2）基于电力电子装备的虚拟惯量支撑；（3）基于电磁耦合的等效惯量支撑；



新能源电力系统惯性水平提高措施<sup>[3]</sup>

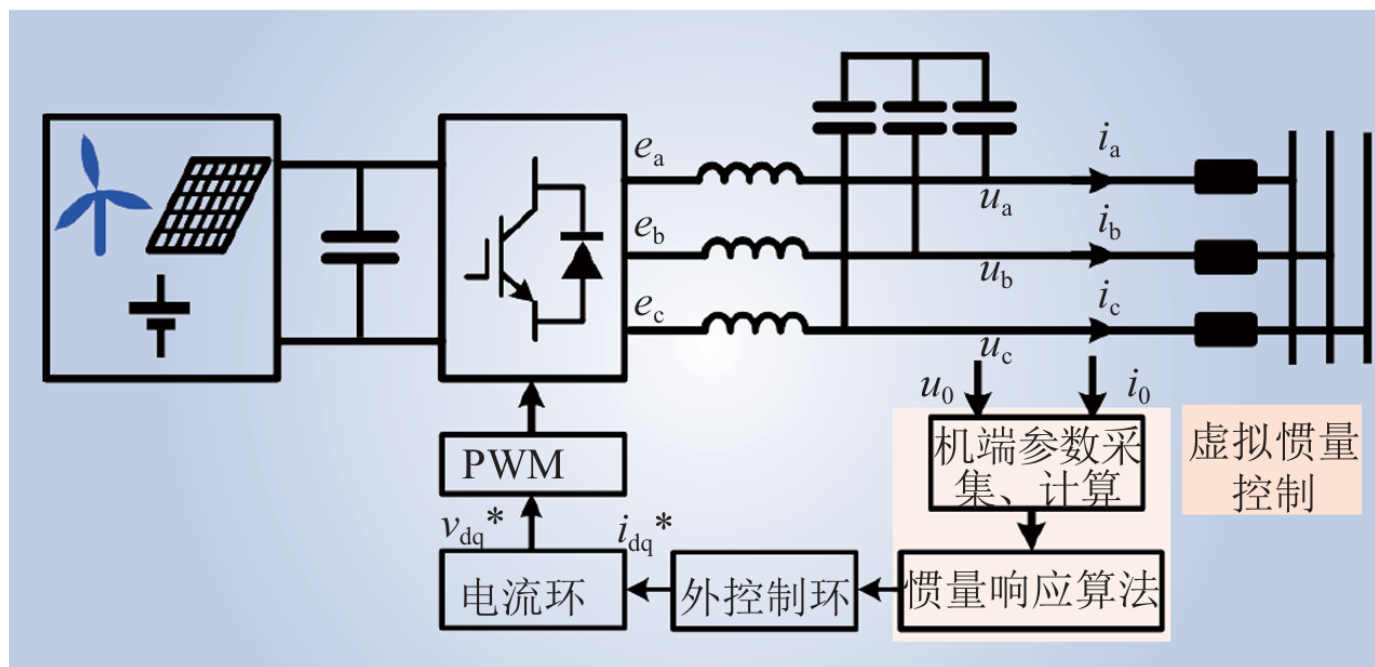


新型电力系统的广义惯量体系<sup>[5]</sup>

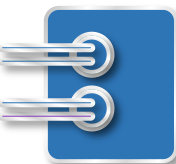


## 基于电力电子装备的虚拟惯量支撑

- 借助于电力电子装备的柔性调控技术，源、网、荷、储对电网的惯量支撑可通过附加虚拟惯性控制得以实现



具有提供频率支撑能力的电力电子接口设备<sup>[4]</sup>



# 基于电力电子装备的虚拟惯量支撑

## □ 通过对变流器控制策略改进，使其提供惯量响应<sup>[8]</sup>

- 电流源型虚拟惯量
- 电压源型虚拟惯量

## □ 电流源型虚拟惯量

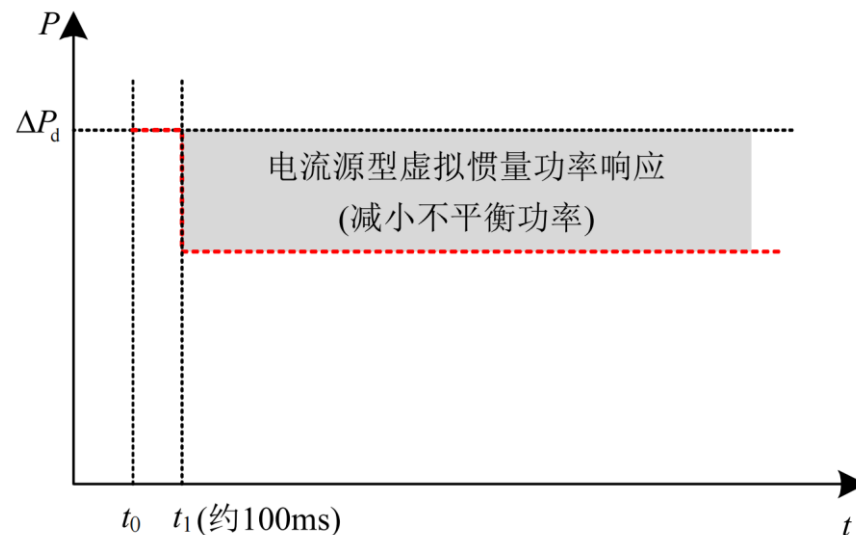
- 控制机理：将系统频率变化率引入到变流器有功控制环节，改变有功参考值，向电网提供与频率变化率成正比的有功功率

$$\Delta P = K \frac{df}{dt}$$

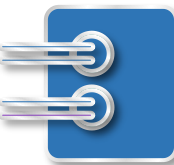
- 与同步机固定的转动惯量相比，K不受物理约束，可灵活设定
- **能量来源**：风机可利用风轮动能，光伏利用配套储能

## □ 与同步机惯量的区别

- **本质上仍是功率源**，不具备分担扰动功率使输出功率突变的特性
- 通过测量频率、反馈至变流器、改变有功参考值改变，该过程**存在约100ms的延时**，比同步机瞬时自然响应慢
- 并没有增加系统惯量，改善了系统不平衡功率，是功率响应



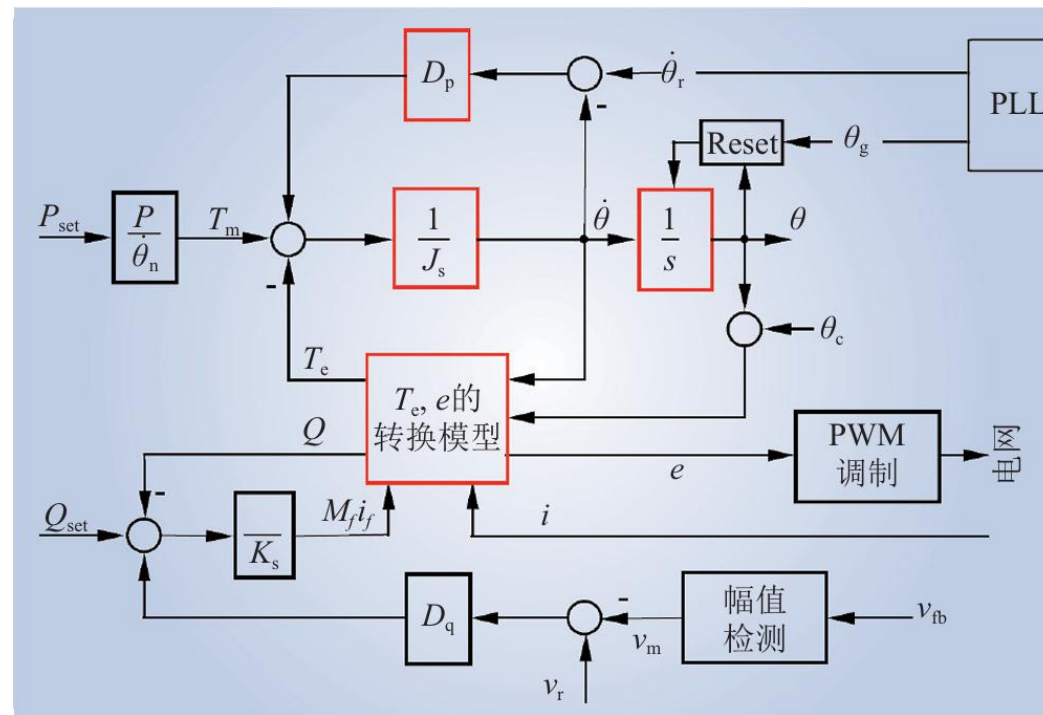
电流型虚拟惯量功率响应示意图<sup>[5]</sup>



# 基于电力电子装备的虚拟惯量支撑

## □ 电压源型虚拟惯量

- 主要指虚拟同步机(VSG)技术
- 在变流器控制环节引入**同步机转子运动、无功下垂控制及电磁暂态方程**，使其具有同步机并网的外特性
- **能量来源**：光伏依靠储能，风机依靠风轮转动动能
- 其变流器输出电压是目标控制量，输出功率是自由量，发生功率扰动时惯量储能单元即时应激的吸收或释放能量响应，使系统功率平衡，**可在出现不平衡功率瞬间无延时的提供惯量支撑功率，等效增大了惯量。**
- 缺陷：新能源受自然因素影响，**故障前所具有的能量不同，虚拟惯量差异较大且难以估计**



虚拟同步机控制框图<sup>[4]</sup>

- 如果源侧能够持续提供能量，虚拟同步机在惯性响应与频率响应的各个环节都与同步发电机非常相似

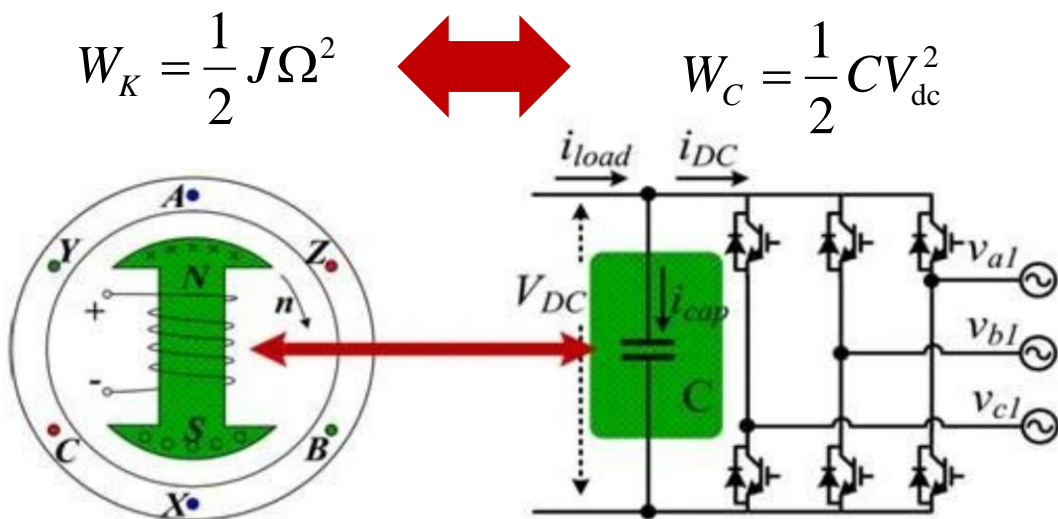
# 其他惯量响应

## 直流电能储能<sup>[6]</sup>

- 采用直流储能的惯量模拟，侧重于满足模拟惯量需要的电容储能，扩大电容以提供“实质性”惯量

旋转机械能(同步电机)

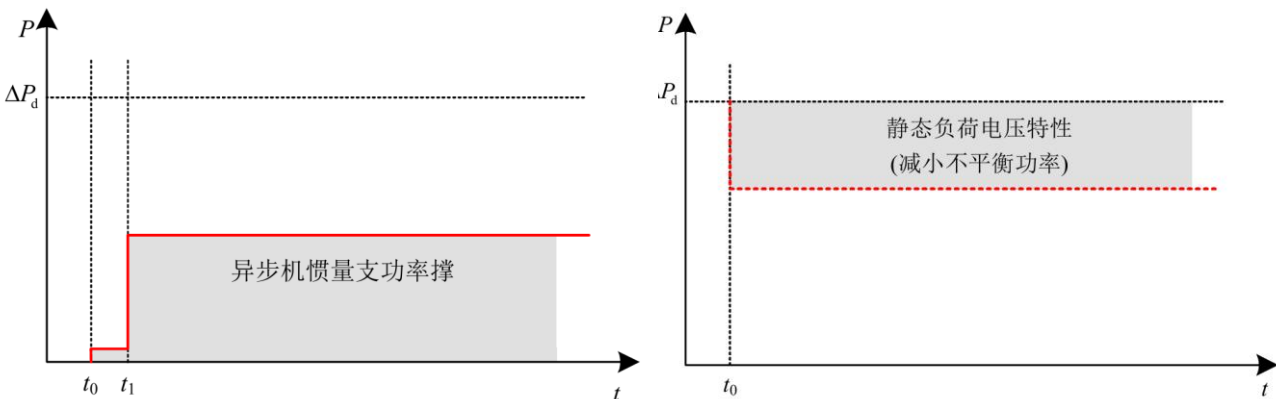
电容电磁势能(电力电子)

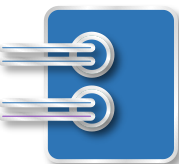


直流电容储能等效为同步机惯量机械能

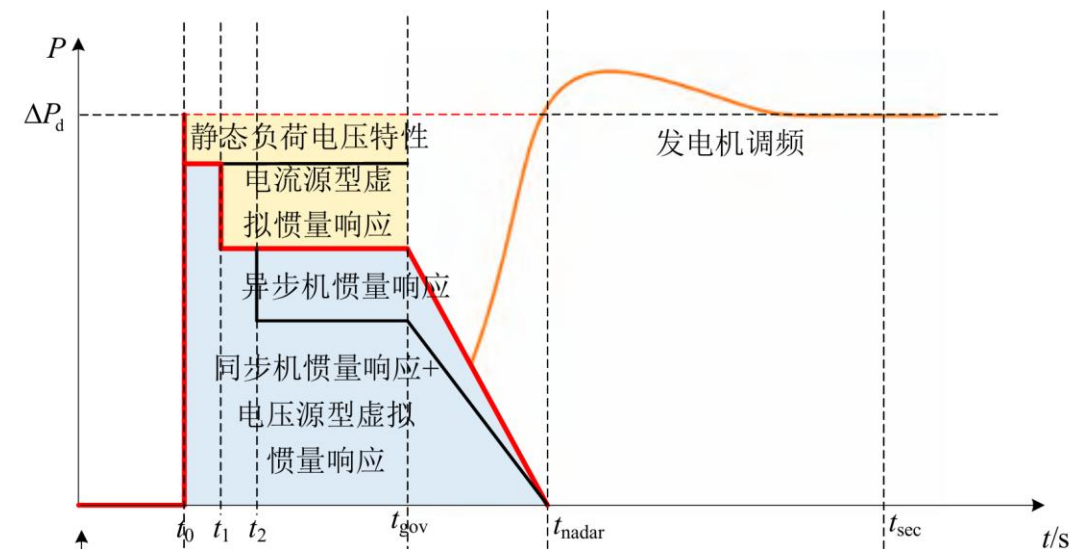
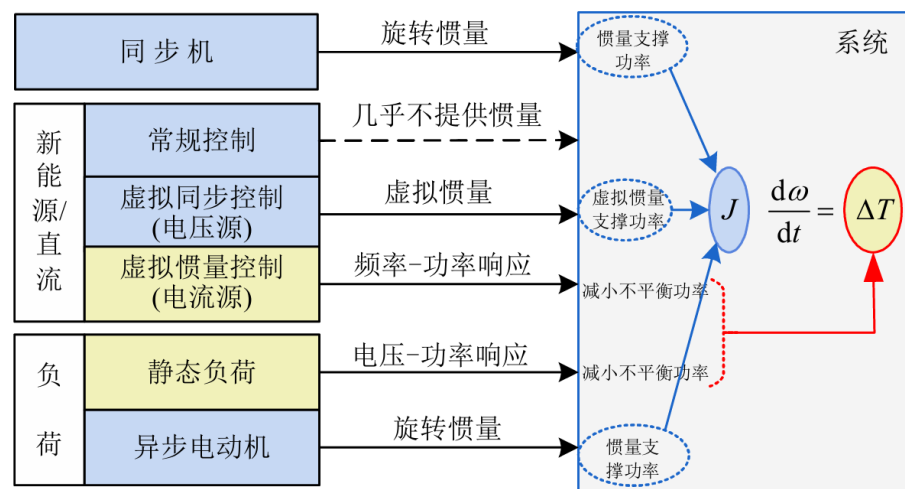
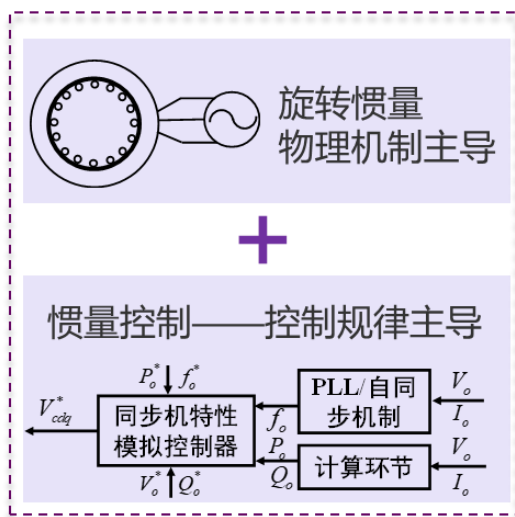
## 负荷侧惯量响应

- 异步电动机惯量响应：异步电动机对电网表现出的等效惯量呈时变特征有功扰动下，转差率先响应，而后转子转动惯量响应，此时响应特性与同步机相同
- 静态负荷电压特性：电压变化将导致恒阻抗、恒电流负荷功率相应变化，减小功率不平衡量





# 各惯量响应综合分析<sup>[5]</sup>

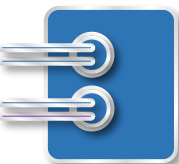


惯量响应阶段影响因素及其响应原理

系统惯量响应时序图

# 作业

## 多机电力系统频率响应



# 作业

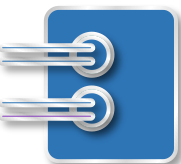
算例采用稳态大作业二中的case39\_UC.m系统。不考虑负荷的惯量响应，各发电机组的阻尼常数和一次调频参数  $K_G$  如附表所示，各机组一次调频参数  $T_G$  统一设置为12。

(1) 系统正常运行时频率为50Hz。设 $t=5s$ 时系统中产生了 $\Delta P_L$ 的负荷突增。请自行设置不同的 $\Delta P_L$ 和各机组的惯性时间常数  $T_j$  (通常在3~15秒之间)，观察系统频率曲线变化

(2) 根据课件中聚合后的多机系统频率响应模型推导  $\Delta f^{\text{nadir}}$  的表达式（下节课用到，提示：理论推导可以参考文献[7]）

	G30	G31	G32	G33	G34	G35	G36	G37	G38	G39
$D$	2.7	2.9	2.1	2.5	2.7	2.6	2.4	2.8	2.2	2.6
$K_G$	15	16	22	21	20	28	23	17	18	21





## 参考文献

- [1] 曾辉,孙峰,李铁等.澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J].电力系统自动化,2017,41(13):1-6.
- [2] 宋晓芳,周海强,薛峰,等.计及源荷不确定性及频率安全的电力系统区间优化调度方法[J].电力自动化设备,2022,42(07):212-220.
- [3] 王博,杨德友,蔡国伟.高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J].电网技术,2020,44(08):2998-3007.
- [4] 鲁宗相,汤海雁,乔颖,等.电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J].中国电力,2018,51(01):51-58.
- [5] 孙华东,王宝财,李文锋,等.高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5179-5192.
- [6] J. Zhu, C. D. Booth, G. P. Adam, A. J. Roscoe and C. G. Bright, "Inertia Emulation Control Strategy for VSC-HVDC Transmission Systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1277-1287, May 2013.
- [7] U. Markovic, Z. Chu, P. Aristidou and G. Hug, "LQR-Based Adaptive Virtual Synchronous Machine for Power Systems With High Inverter Penetration," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 10, no. 3, pp. 1501-1512, July 2019.