

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

### 6.1 概述

#### 同步电机的基本概念：

同步电机的两个基本组成部分：磁场和电枢；磁场在转子上，电枢在定子上；磁场由直流励磁，当转子由原动机拖动时，励磁绕组的旋转磁场在定子电枢绕组中感应交变电压，定子绕组接负荷后产生的电流频率取决于转子转速，因此，定子绕组电气量的频率与转子机械转速同步。**当有多台电机互联运行时，所有电机必须同步。**

定子绕组流过三相对称交流电流时：产生同步旋转磁场，与转子磁场相互作用产生电磁转矩。在发电情况下，电磁转矩与转子旋转方向相反，由原动机提供的转矩维持旋转，**稳态时，转子磁场和定子旋转磁场具有相同转速。**

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

### 一、电力系统稳定性

- ◆ **定义：** 研究电力系统受到干扰后，凭借系统本身固有能力和控制设备的作用回复到原始稳定运行，或达到新的稳态运行方式的问题。也称为**同步运行稳定性**，即：**所有并联运行的发电机都有相同的电角速度**。
- ◆ **解释：** 稳定性问题最早出现在20世纪20~30年代，第一批发电机并列运行。各发电机只有在同步运行状态下，其送出的电功率为定值，各支路电压及支路功率潮流也为定值，这就是电力系统的稳定运行状态。否则，全系统的频率和电压会大幅度波动，系统有可能失去稳定。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

### 二、影响稳定的因素

- ◆ 小的干扰有：负荷的小波动，这是常发生的。
- ◆ 大的干扰有：电网中突然发生短路，断路，跳闸，运行方式发生很大变化，这是不可避免的。
- ◆ 系统结构变化，参数变化，控制装置运行性能变化。

### 三、失去稳定的原因

如扰动发生后，各发电机机械输入转矩和电磁转矩之间失去平衡。出现各发电机转子不同程度的加速或减速（ $P_e = \frac{EU}{X_\Sigma} \sin \delta$   $U \downarrow \rightarrow P_e \downarrow \rightarrow P_m > P_e$  转子加速）结果功率角  $\delta$  随时间发生变化，若振荡衰减达到原始运行方式的正常值或达到新的稳态值，则可以稳定运行，否则就失去稳定。好比：多辆汽车在环形跑道行驶，汽车之间用橡皮带连接。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

稳定破坏是电网中最为严重的事故之一

例如：1965年11月美国东北部与加拿大电力系统大停电事故为例，该事故由于一条线路过负荷而引起相邻线路相继跳闸 / 以致发展成为全系统的稳定破坏事故，停电区域波及美国东北部6个州及加拿大的一部分，停电功率达2500万kW，停电时间达13小时32分，损失是巨大的。

2021年 2月18日，美国，受影响：德州

2019年 7月13日，美国，受影响：纽约部分城区

2019年 6月16日，阿根廷，受影响：南美五国

2019年 2月 7日，委内瑞拉，受影响：21个州（共23）

2017年 8月15日，中国台湾，受影响：全台

2016年 9月28日，澳大利亚，受影响：南澳全州

2015年12月23日，乌克兰，受影响：全国一半以上地区

2012年 7月30日，印度，受影响：东北部地区

2012年 4月10日，中国深圳，受影响：全深圳

2011年 9月15日，韩国，受影响：首尔、仁川、釜山、大田、庆尚南道等地

2008年 2月26日，中国南方冰灾，受影响：湖南、贵州、云南邵通、广西桂林、广东清远、韶关

# 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

## 四、功角稳定性问题分类

### 1. 静态稳定性

- ◆ 指电力系统在某运行状态下，突然遭受任意小干扰后，不发生非周期性失步，自动恢复到初始运行状态的能力。
- ◆ 小干扰如负荷变化，参数变化等，是指系统状态变量的变化很小，因此可以对系统的状态方程线性化。

### 2. 暂态稳定性

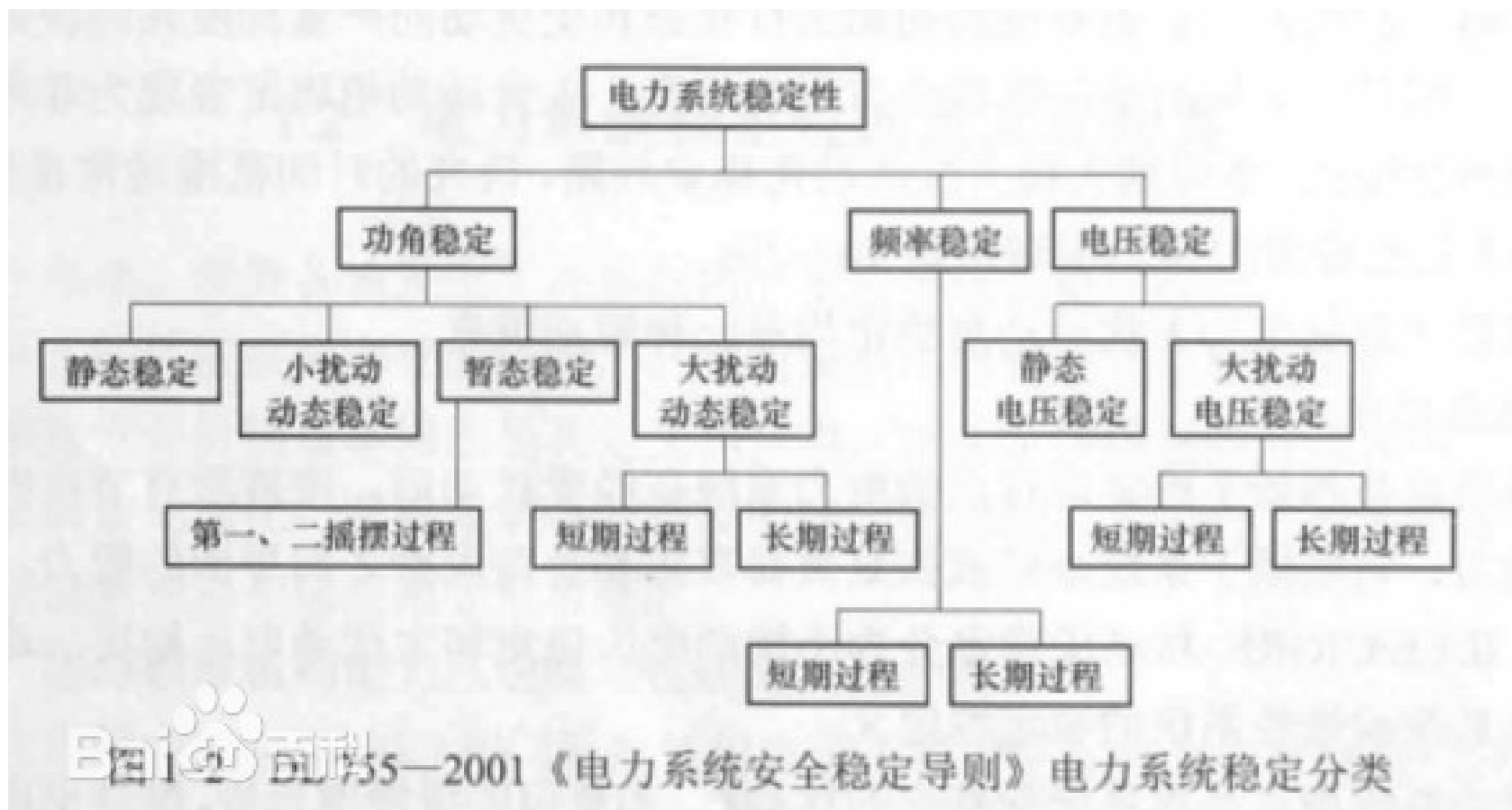
- ◆ 指电力系统在某个运行状态下突然遭受较大干扰后，各同步电机保持同步运行，并过渡到到一个新的稳定状态（或回到原来运行状态）的能力，通常指第一/二周期不失步。
- ◆ 大干扰是指投入或切除大容量用户、系统短路或断线等，这时系统的状态变量发生很大偏移，必须考虑元件的非线性特性。

### 3. 动态稳定

- ◆ 电力系统受到小的或者大的干扰后，在自动调节和控制装置的作用下，保持长过程的运行稳定性的能力

# 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

## 稳定性问题分类



## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

### 五、与第一篇的区别

◆ 在第一篇分析电磁暂态过程时，假设发电机的转速不变，重点研究暂态过程中的电压，电流变化。

在本篇分析机电暂态过程时，分析的重点是旋转电机的机械运动，因此不能再假设电机转速不变。

◆ 从时间上分：

电磁暂态过程：短路后先是电磁暂态过程，数量级属毫秒-秒级别，故障分析将这一过程作为研究对象。

机电暂态过程：在电磁暂态过程之后，其过程持续时间较长，数量级属秒~分钟级别，稳定分析将这一过程作为研究对象。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

### 一、同步发电机的转子运动方程

同步发电机转子的机械角速度与作用在转子轴上不平衡转矩之间有：

$$J\alpha = J \frac{d\Omega}{dt} = \Delta M = M_T - M_E \quad (1)$$

式中： $\Omega$ 为转子机械角速度， $rad/s$ ；

$J$ 为与转子同轴旋转的质量块的转动惯量， $kg \cdot m^2$ ；

$\Delta M$ 为机械转矩与磁转矩之差， $N \cdot m$ ；

当转子以额定转速旋转时，其动能： $W_K = \frac{1}{2} J \Omega_0^2$

则： $J = 2W_K / \Omega_0^2$

代入公式 (1)

$$\frac{2W_K}{\Omega_0^2} \frac{d\Omega}{dt} = \Delta M$$



## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

取基准值:  $M_B = S_B / \Omega_0$

$$\frac{2W_K}{\Omega_0^2} \frac{d\Omega}{dt} = \Delta M \quad (2)$$

$$\therefore \frac{2W_K}{S_B} \frac{d\Omega_*}{dt} = \Delta M_* \quad \text{或} \quad \frac{2W_K}{S_B \Omega_0} \frac{d\Omega}{dt} = \Delta M_*$$

$$\text{又} \because \Omega = \frac{\omega}{\rho} \quad \Omega_0 = \frac{\omega_0}{\rho}$$

$$\frac{T_J}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = \Delta M_* \quad \text{其中: } T_J = \frac{2W_K}{S_B} \quad (3)$$

$T_J$  称为发电机组的惯性时间常数, s 秒, 需要进行标么值换算

注: 一般手册上,  $S_B$  为  $S_N$ , 即为发电机的额定容量

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

(1)  $T_J$  物理意义:

$$\because T_J \frac{d\Omega_*}{dt} = \Delta M_* \quad (\text{由式 (2) 得}) \quad \Omega_* = \Omega / \Omega_0 \quad \therefore dt = T_J \frac{d\Omega_*}{\Delta M_*}$$

令  $\Delta M_* = 1$  , 上式两边积分 
$$t = \int_0^1 \frac{T_J}{\Delta M_*} d\Omega_* = T_J \Omega_* \Big|_0^1 = T_J$$

在发电机组转子上加额定转矩后,  $T_J$  就是转子从停顿状态  $\Omega_* = 0$  匀加速到额定转速 (  $\Omega_* = 1$  ) 所经过的时间。

(2) 一般手册上只给出反映发电机转动部分质量和尺寸的值, 这时用下式计算:

$$T_J = \frac{2.74GD^2n^2}{S_n} \times 10^{-3}$$

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

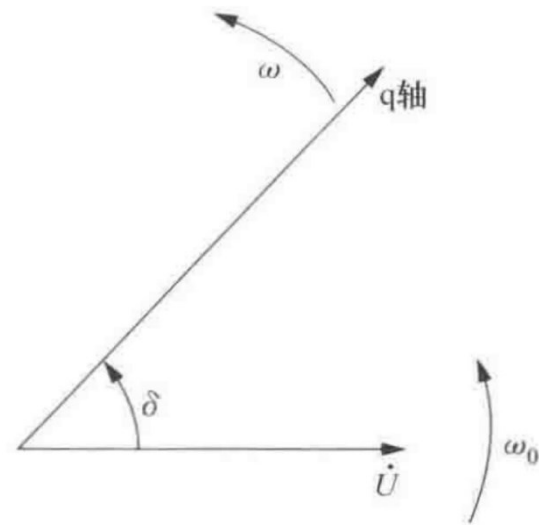
(3) 在电力系统稳定计算中，当已选好本系统统一的基准功率时，必须将各发电机的额定惯性时间常数**归算**为统一基准： $T_{Ti} = T_{JNi} \times \frac{S_{Ni}}{S}$

(4) 有时必须将**n台发电机合并**成一台发电机，则合并后

$$T_{J\Sigma} = \frac{T_{JN1}S_{N1} + T_{JN2}S_{N2} + \cdots + T_{JNn}S_{Nn}}{S_B} = \sum_{i=1}^n T_{Ji}$$

(5) 转子运动方程式  $T_J \frac{d\Omega_*}{dt} = \Delta M_*$  还可以用  $\delta$  表示，见图， $\dot{U}$  为无穷大系统的线电压，**q轴** 代表电机的转子交轴，则：

$$\text{当 } \omega \neq \omega_0 \text{ 时 } \begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad \begin{cases} T_J \frac{d\omega_*}{dt} = \Delta M_* \\ \therefore \frac{T_J}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta M_* \end{cases}$$



## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

又

$$\because \Delta M_* = \frac{\Delta M}{S_B / \Omega_0} = \frac{\Delta M \Omega_0}{S_B} = \frac{P_T - P_E}{S_B} = P_{T*} - P_{E*} \quad \frac{T_J}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \Delta M_*$$

$$\therefore \frac{T_J}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{T*} - P_{E*}$$

其他形式：

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{T_J} (P_T - P_E) \end{cases} \quad \text{或} \quad * \begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} (P_T - P_E) \end{cases}$$

\*注：其中  $\omega = \frac{\omega}{\omega_0} = \omega_*$  略去\*，除  $t, T_J$  和  $\omega_0$  外，其余均为标么值。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

(6)  $P_{T_i}$  ——主要取决于本台发电机原动机的调速系统特性

$P_{E_i}$  ——不仅与本台发电机的电磁特性，励磁调节系统特性有关，而且还与其它发电机的电磁特性，负荷特性，网络结构等有关。

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = P_T - P_E$$

所以，电力系统稳定计算的复杂性和工作量，取决于发电机电磁转矩（或功率）的描述和计算，是复杂的非线性函数。

(7) 稳定运行时，等式右侧为零；而在电磁暂态工程中可以采用调速不起作用的假设。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

## 二、发电机电磁转矩和功率（简单系统）

证明：（参见P177）

$$\begin{aligned} \text{机端功率: } P_0 &= u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c = u_d i_d + u_q i_q + 3u_0 i_0 \\ &= -(ri_d^2 + ri_q^2 + 3ri_0^2) + (i_d \dot{\psi}_d + i_q \dot{\psi}_q + 3i_0 \dot{\psi}_0) - i_d \omega \psi_q + i_q \omega \psi_d \end{aligned}$$

第一项：电阻消耗的功率

第二项：磁场能量变化释放的功率

第三项：经气隙传递的功率

$$\text{电磁功率: } P_E = i_q \omega \psi_d - i_d \omega \psi_q$$

$$\text{电磁转矩: } M_E = \frac{P_E}{\omega} = i_q \psi_d - i_d \psi_q$$

当系统运行在：三相平衡，稳态运行，不计定子电阻时

$$\begin{cases} u_d = -\Psi_q \\ u_q = \Psi_d \\ u_0 = 0 \end{cases} \quad \therefore M_E = u_q i_q + u_d i_d$$

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

分析稳定性问题时需对发电机的电磁暂态过程做某些简化:参见p56. 式 (2-85)

- (1) 忽略定子绕组随时间变化产生的电动势 ( $\dot{\psi}$  等于0) 微分 $\rightarrow$ 代数方程
- (2) 只计及发电机定子电流中的正序基频交流分量产生的电磁转矩, 忽略暂态过程中定子电流的其它分量, 稳态模型; 忽略定子暂态过程, 以一定的等值电动势和阻抗来表示等值发电机。(否则必须考虑网络的暂态过程)
- (3)  $r = 0$  (不计定子绕组的暂态过程, 更无必要计及其衰减)
- (4)  $\omega \approx 1$  (在定子电压方程中  $\omega$  的标幺值等于1)
- (5) 根据对精度的要求, 根据对励磁系统暂态过程的不同简化, 会影响等值电动势的取值。如: 考虑阻尼绕组的影响, 发电机以某电动势值来表示:  $E_q$ 、 $E'_q$ 、 $U_G$

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

## 1. 隐极机：功-角特性

接线图如右图，其相量图为

图中  $X_e = X_T + X_L$

$$X_{d\Sigma}' = X_d' + X_e$$

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_e$$

忽略转子回路电磁暂态

• 空载电动势为常数

• 同步电抗

(1) 以  $E_q$  和  $X_d$  表示发电机

$$\begin{cases} E_q = U_q + I_d X_{d\Sigma} \\ 0 = U_d - I_q X_{d\Sigma} \end{cases}$$

$$\therefore P_E = R_e (\dot{U} \dot{I})^* = R_e [(U_d + jU_q)(I_d - jI_q)]$$

$$= U_d I_d + U_q I_q = M_E$$

$$\therefore P_E = \frac{E_q - U_q}{X_{d\Sigma}} U_d + \frac{U_d}{X_{d\Sigma}} U_q = \frac{E_q U_d}{X_{d\Sigma}} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$$

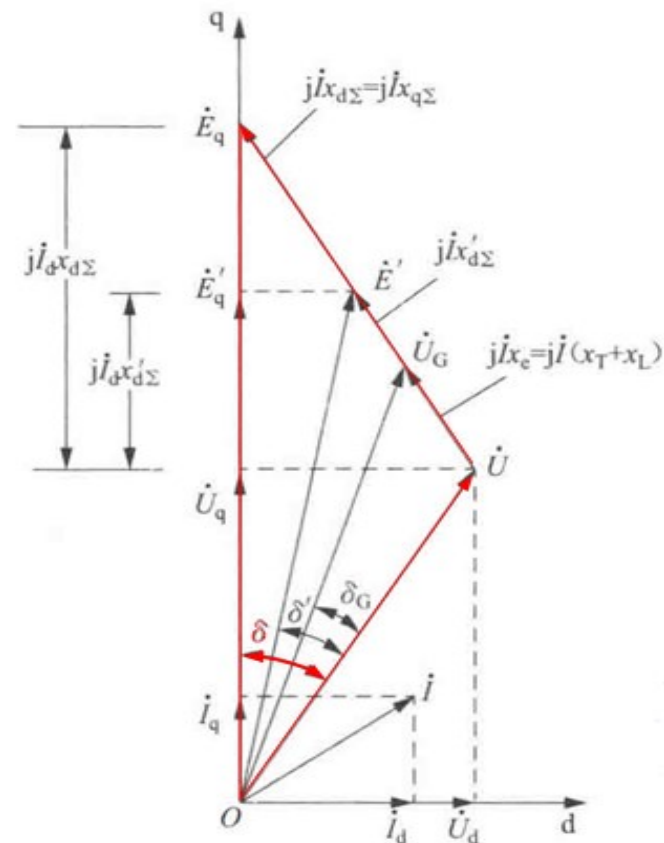
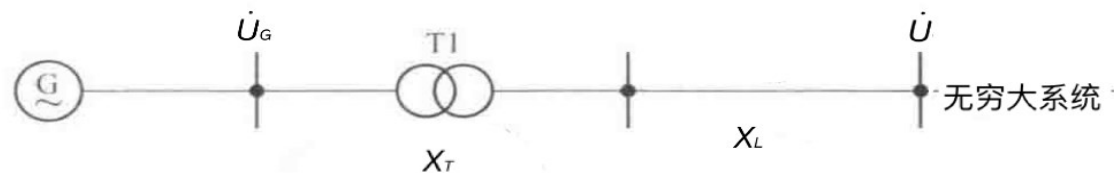


图 (b)



## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

$P_{Eq} = f(\delta)$  —— 功角特性如图 (c)

其中  $E_q$  为常数表示励磁不可调，励磁电流为常数

稳定性解释：

多台发电机互联运行，稳态运行时，所有发电

机同步运行，每台发电机输入输出转矩平衡；

若有一台发电机比其它转的快，则其转子角位置

较其它发电机超前，转子角加大，其输出电磁功率加大，

这样把较慢发电机的负荷转由较快发电机分担。

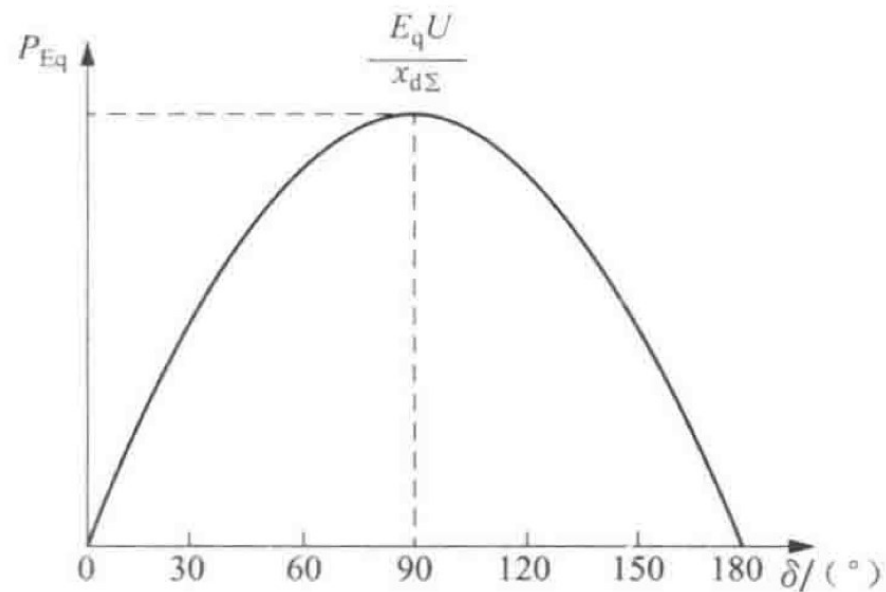


图 (c)

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

(2) 以  $E'_q$  和  $X'_{d\Sigma}$  表示发电机

$$\begin{cases} E'_q = U_q + I_d X'_{d\Sigma} \\ 0 = U_d - I_q X_{d\Sigma} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \therefore P_{Eq'} &= \frac{E'_q - U_q}{X'_{d\Sigma}} U_d + \frac{U_d}{X_{d\Sigma}} U_q \\ &= \frac{E'_q U_d}{X'_{d\Sigma}} - \frac{U_q U_d}{X'_{d\Sigma}} + \frac{U_d U_q}{X_{d\Sigma}} \\ &= \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - U^2 \left( \frac{\sin \delta \cos \delta}{X'_{d\Sigma}} - \frac{\sin \delta \cos \delta}{X_{d\Sigma}} \right) \\ &= \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \frac{X_{d\Sigma} - X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma} X'_{d\Sigma}} \sin 2\delta \end{aligned}$$

- 自动调剂励磁装置
- 暂态电动势不变,
- 暂态电抗

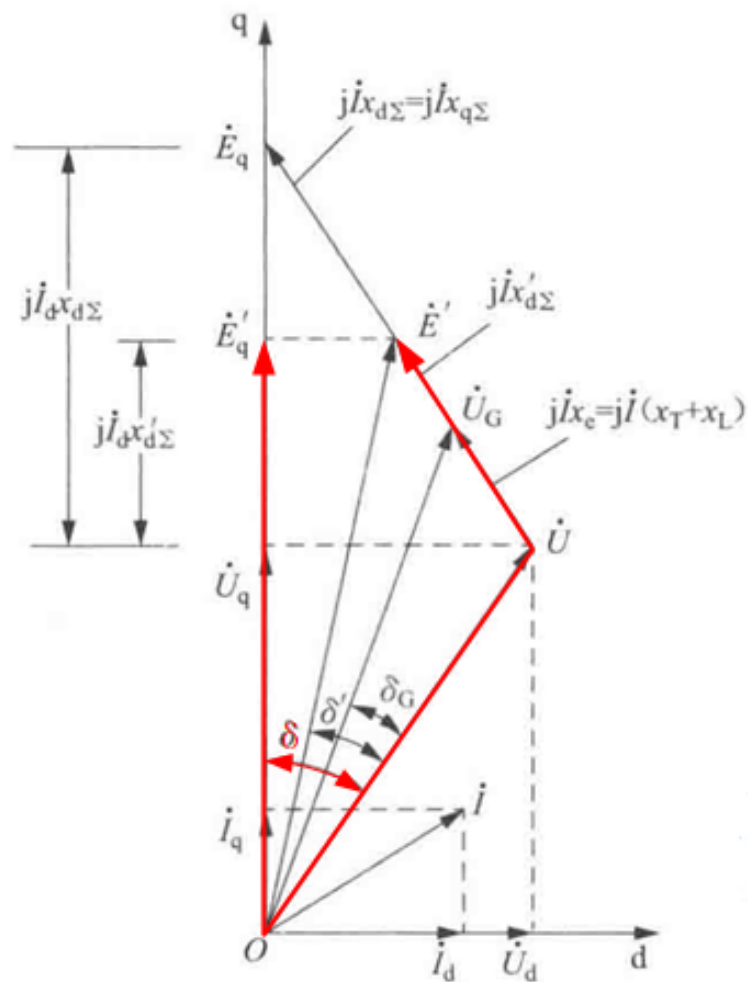


图 (b)

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

$P_{Eq}' = f(\delta)$  —— 功角特性如下图 (d)

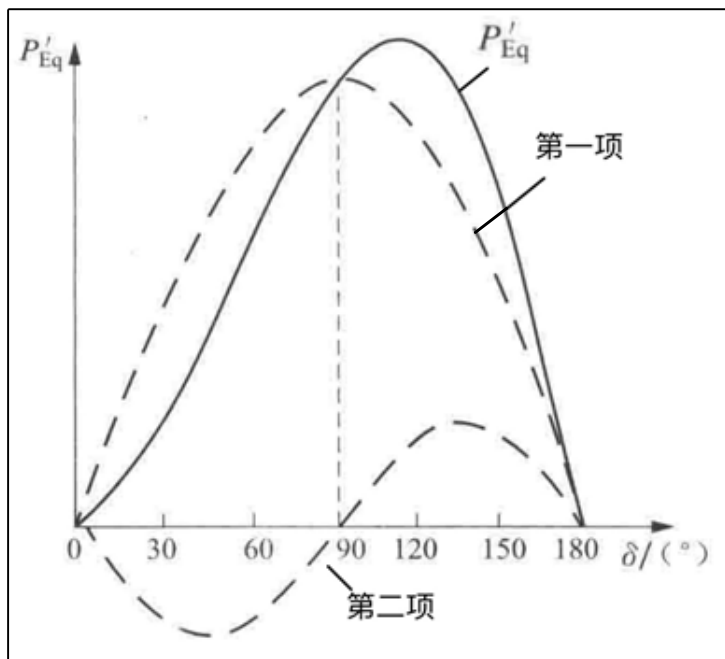


图 (d)

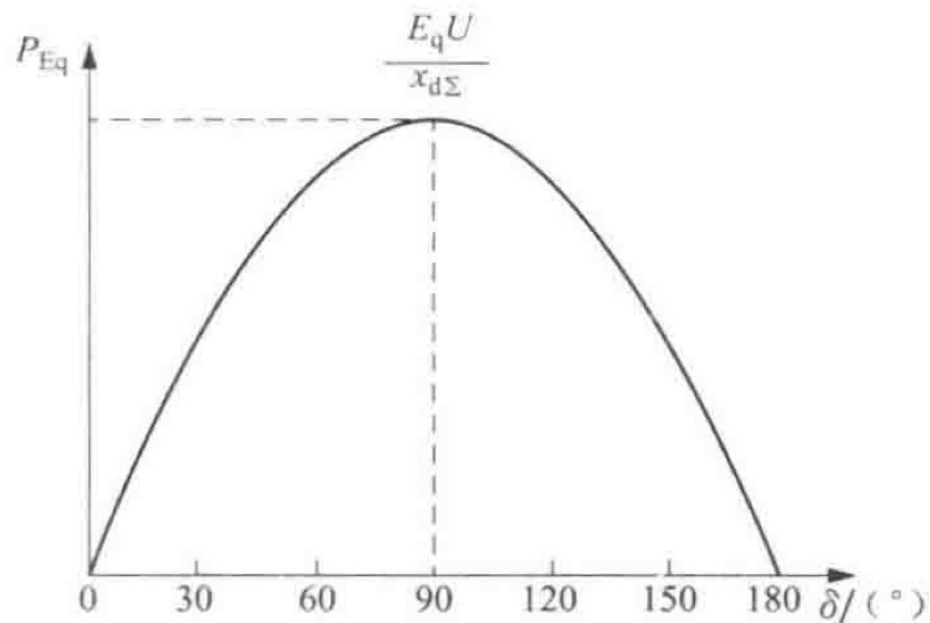


图 (c)

由图 (d) 和图 (c) 比较得  $P'_{Eq}$  比  $P_{Eq}$  曲线高, 也就是可输出的电磁功率的最大值大, 即功率极限提高。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

参见图 (b) , 当  $E_q$  和  $U$  大小不变, 但是其间  $\delta$  功率角增大时, 则发电机输出电磁功率加大, 则  $E'$ 、 $E'_q$  和  $U_G$  均会减小;

当发电机装设自动励磁调节系统后 (图 (d)) , 调节特性增大励磁电流, 使发电机电势  $E_q$  增大, 直至  $E'_q$  为恒定值不变。

所以当发电机由某一给定运行初态开始增大输出电功率时, 若励磁系统能使  $E'_{q0}$  保持恒定常数, 则随着  $\delta$  增大  $\rightarrow E_q \uparrow \rightarrow$  发电机工作点将从  $E_q$  较小的正弦曲线过渡到  $E_q$  较大的正弦曲线上, 得到一条保持  $E'_{q0}$  为常数的功角曲线, 图 (e)

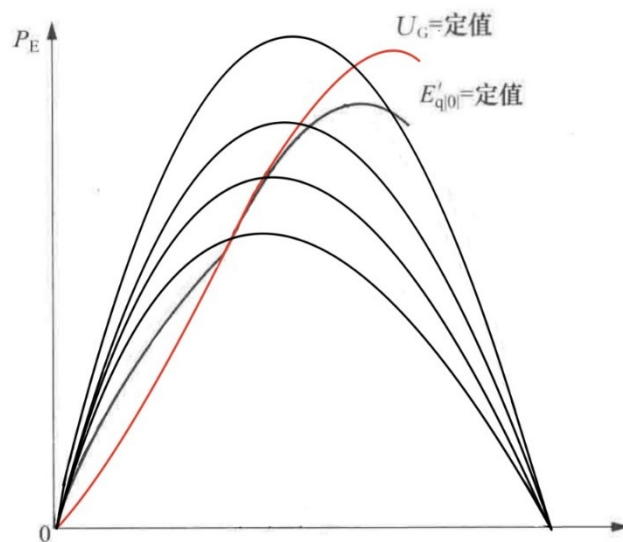


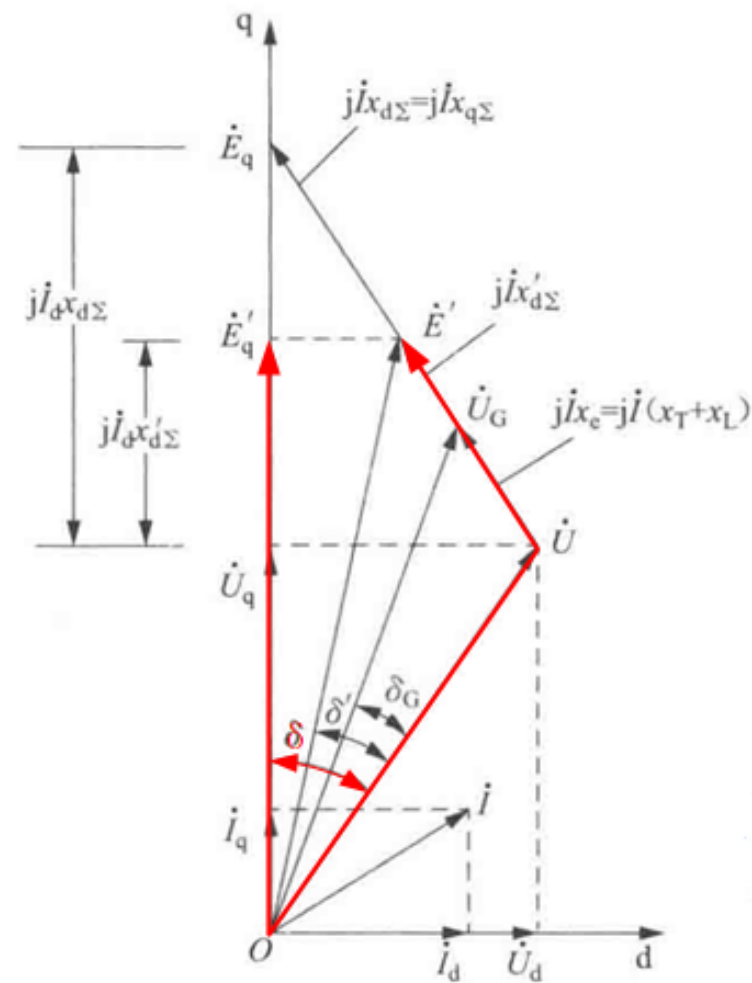
图 (e)

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

由于  $E'_q$  计算复杂，用  $E'$  代替  $E'_q$ （工程近似计算中）

$$\therefore P_{E'} = \frac{E'U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta'$$

$$\begin{aligned} \text{而 } \delta' &= \delta - \arcsin \frac{I_q(X_{d\Sigma} - X'_{d\Sigma})}{E'} = \delta - \arcsin \left[ \frac{U_d}{E'X_{d\Sigma}} (X_{d\Sigma} - X'_{d\Sigma}) \right] \\ &= \delta - \arcsin \left[ \frac{U}{E'} \left( 1 - \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}} \right) \sin \delta \right] \end{aligned}$$



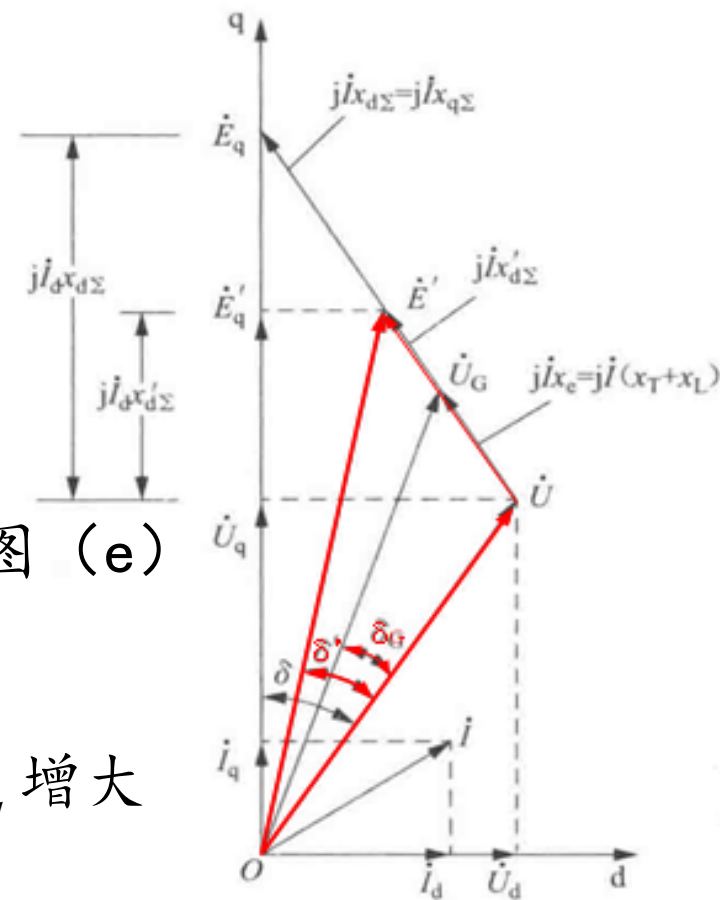
## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

(3) 发电机端电压  $U_G$  为常数 自动调剂励磁装置保持端电压不变

$$\therefore P_{U_G} = \frac{U_G U}{X_e} \sin \delta_G$$

$$\delta_G = \delta - \arcsin \frac{I_q X_{d\Sigma} - I_q X_e}{U_G} = \delta - \arcsin \left[ \frac{U}{U_G} \left( 1 - \frac{X_e}{X_{d\Sigma}} \right) \sin \delta \right]$$

其中： $U_G$  为常数，表示发电机励磁采用强励式，如图 (e) 与  $E'_q$  恒定同样方式的  $U_G = \text{常数}$  的特性曲线。  
如图 (e) 可见，为使  $U_G$  为恒定不变，应调节  $I_f$  使  $E_q$  增大更多时，才能使  $U_G$  不变。



## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

## 2. 凸极式发电机的功角特性

图 (f) 为凸极机相量图

图中:

$$\begin{cases} X_e = X_T + X_L \\ X_{q\Sigma} = X_q + X_e \end{cases}$$

忽略转子回路电磁暂态

• 空载电动势为常数

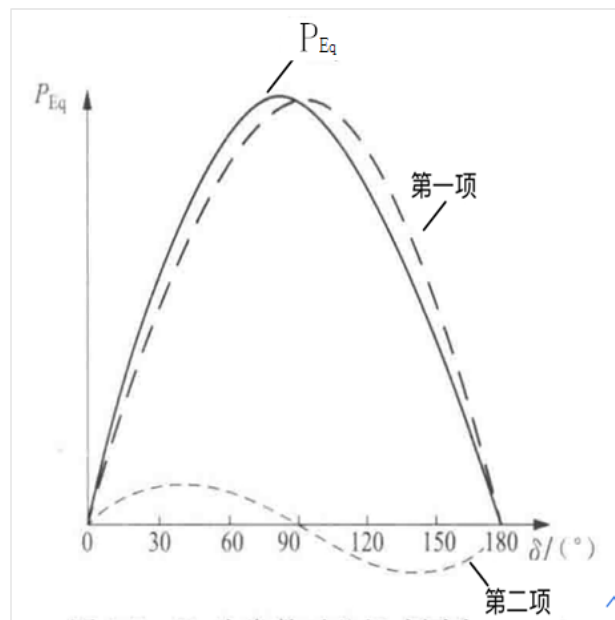
• 同步电抗

$$P_{E_q} = U_q I_q + U_d I_d$$

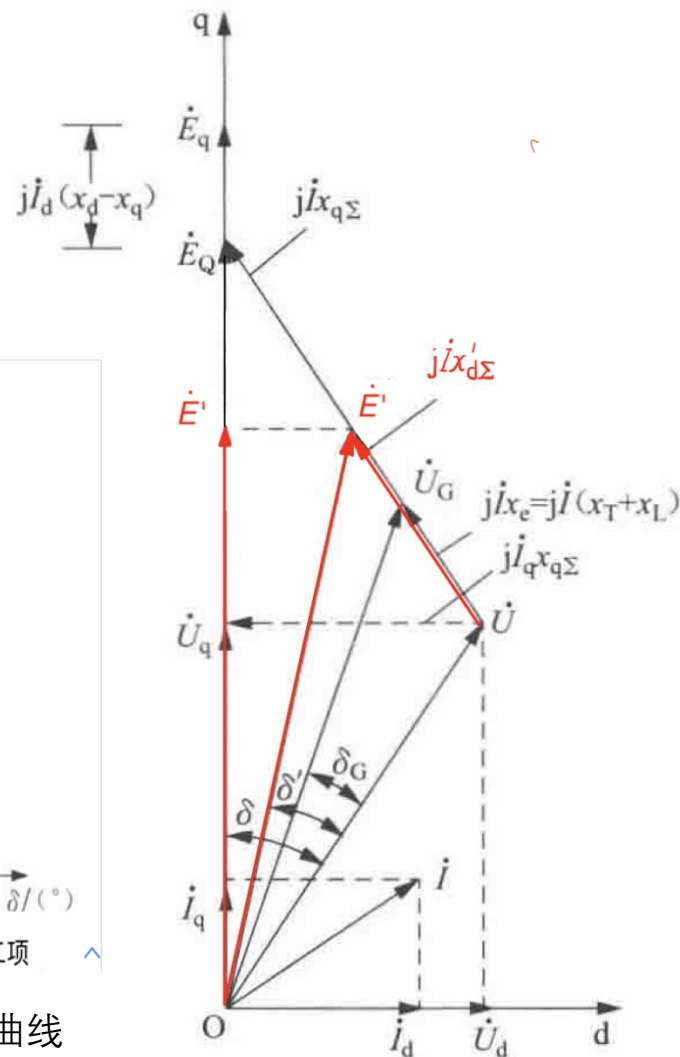
$$E_q = U_q + I_d x_{d\Sigma}$$

$$0 = U_d - I_q x_{q\Sigma}$$

$$\begin{aligned} \therefore P_{E_q} &= \left( \frac{E_q - U_q}{X_{d\Sigma}} \right) U_d + \frac{U_d}{X_{q\Sigma}} U_q \\ &= \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta \end{aligned}$$



$E_q$  为常数的凸极机功角特性曲线



## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

(2) 发电机以  $E'_q$  和  $X'_{d\Sigma}$  表示

$$\begin{cases} E'_q = U_q + I_d X'_{d\Sigma} \\ 0 = U_d - I_q X_{q\Sigma} \end{cases}$$

$$\therefore P_{E'_q} = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \frac{X_{q\Sigma} - X'_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta$$

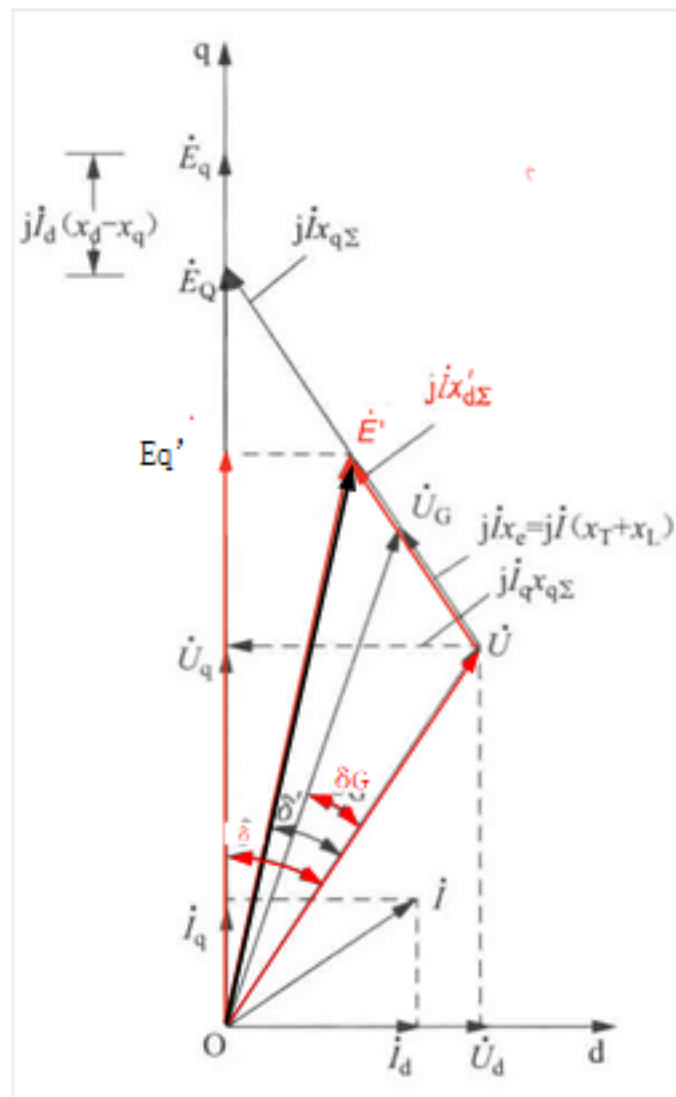
由于凸极机的交轴同步电抗小于隐极机的直轴同步电抗，凸极机功角曲线较隐极机畸变小。

同样可以用  $U_G$  代替  $E'_q$  近似计算

$$P_{U_G} = \frac{U U_G}{X_e} \sin \delta$$

$$\delta_G = \delta - \arcsin \frac{I_q X_{q\Sigma} - I_q X_e}{U_G} = \delta - \arcsin \left[ \frac{U}{U_G} \left( 1 - \frac{X_e}{X_{q\Sigma}} \right) \sin \delta \right]$$

例6-2 (p181)





## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

$$dE'_q/d\delta = - \left( \frac{x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}} \right) \sin\delta$$

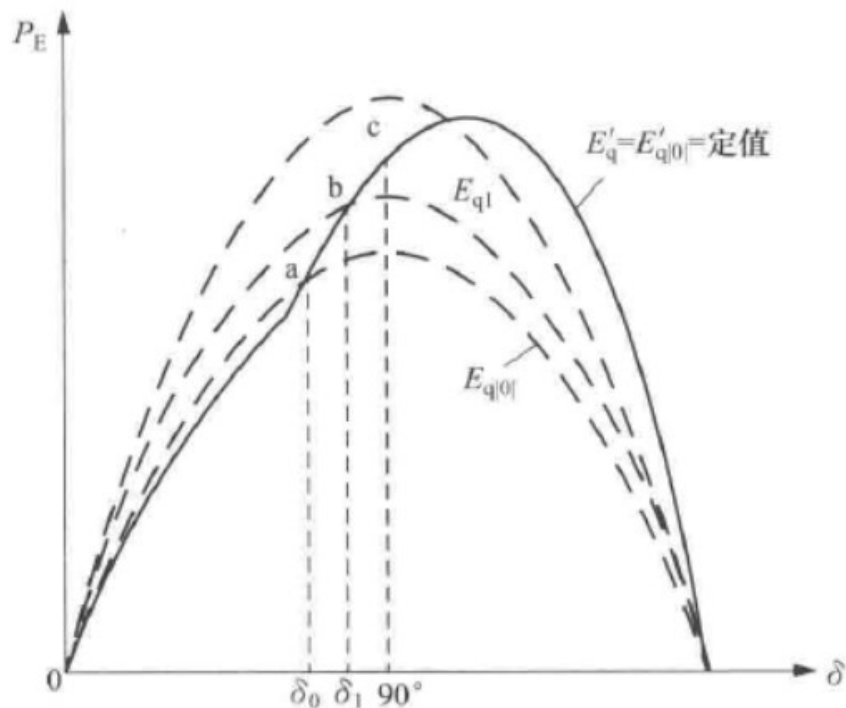


图 6-9  $E'_q$  为常数时的功率特性

- $a$ : 正常运行点
- $b$ : 功角增加, 为保持暂态电动势不变, 需要增加空载电动势
- 功率曲线:  
机端电压为常数 > 暂态电动势为常数 > 空载电动势为常数
- 与无限容量系统间的联系电抗

$$x_{d\Sigma} > x'_{d\Sigma} > x_e$$

与功率曲线关系相反

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

(二) 多机系统中的发电机电磁功率表达式

当发电机采用暂态电势和暂态电抗表示时：

$$P_{E'i} = \operatorname{Re} \left[ \dot{E}'_i \bullet \hat{I}_i \right] = E'_i \sum_{j=1}^n E'_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

◆任一发电机的功率角的改变，将引起全系统各机组电磁功率的变化。稳定分析是全系统的综合问题。

◆两机系统：
$$P_{E1} = E_1^2 G_{11} + E_1 E_2 |Y_{12}| \sin(\delta_{12} + \beta_{12})$$

$$P_{E2} = E_2^2 G_{22} - E_1 E_2 |Y_{12}| \sin(\delta_{12} - \beta_{12})$$

◆多机系统中各机组的极限功率不一致，见P186图6-11

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

## 三、电动势变化过程的方程式

励磁回路电压方程：

$$u_f = r_f i_f + \dot{\psi}_f$$

$$\frac{x_{ad}}{r_f} u_f = x_{ad} i_f + \frac{x_f}{r_f} \frac{x_{ad}}{x_f} \dot{\psi}_f$$

$$E_{qe} = E_q + T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt}$$

$$E_q = E'_q + I_d (x_d - x'_d)$$

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - (E'_q + I_d (x_d - x'_d))$$

$$\therefore I_d = \frac{E'_q - U_q}{x'_{d\Sigma}} = \frac{E'_q - U \cos \delta}{x'_{d\Sigma}}$$

$$\therefore T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - \frac{x_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma}} E'_q + \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} U \cos \delta$$

 $E_{qe}$  强制空载电动势第一项：励磁电流的空载电动势  $E_q$ 

第二项：励磁绕组本身时间常数 \* 暂态电动势

说明：

$E'_q$  的变化确定于励磁调节的作用和系统的运行方式，即须求解励磁调节方程和网络方程。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

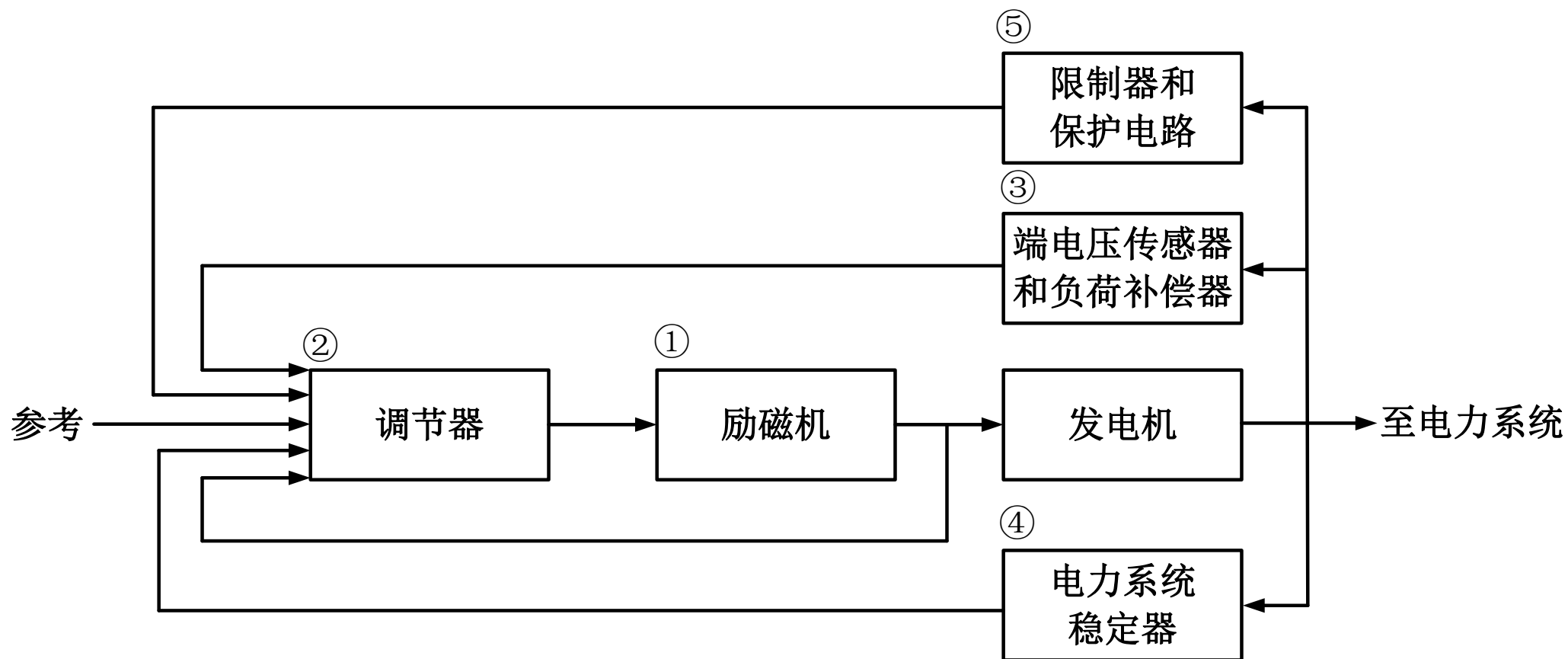
### 一、励磁系统的基本功能

- (1) 给同步电机磁场绕组提供直流电源
- (2) 控制和保护功能
  - 电压和无功潮流控制
  - 同步发电机和励磁系统以及其他设备不超过容量极限

### 二、励磁系统的要求

- (1) 从发电机考虑
  - 维持端电压
  - 响应暂态扰动
- (2) 从电力系统考虑
  - 控制电压
  - 提高系统稳定性（暂态稳定性、小信号稳定性、PSS稳定器）

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性



## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

### 三、励磁系统的功能框图

- (1) 励磁机：给发电机磁场绕组提供直流功率。
- (2) 调节器：处理和放大输入控制信号。
- (3) 端电压传感器和负荷补偿器：检测发电机端电压，将其整流和滤波成直流量，并与端电压参考信号比较。
- (4) 电力系统稳定器：给调节器提供附加输入信号（转子速度偏差或频率偏差或加速功率），以阻尼电力系统的振荡。
- (5) 限制器和保护电路：保证励磁机和发电机不超过容量极限，如：磁场电流限制器、最大励磁限制器、端电压限制器等，这些输出信号作用于不同地方。

见图：6-20，6-21

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

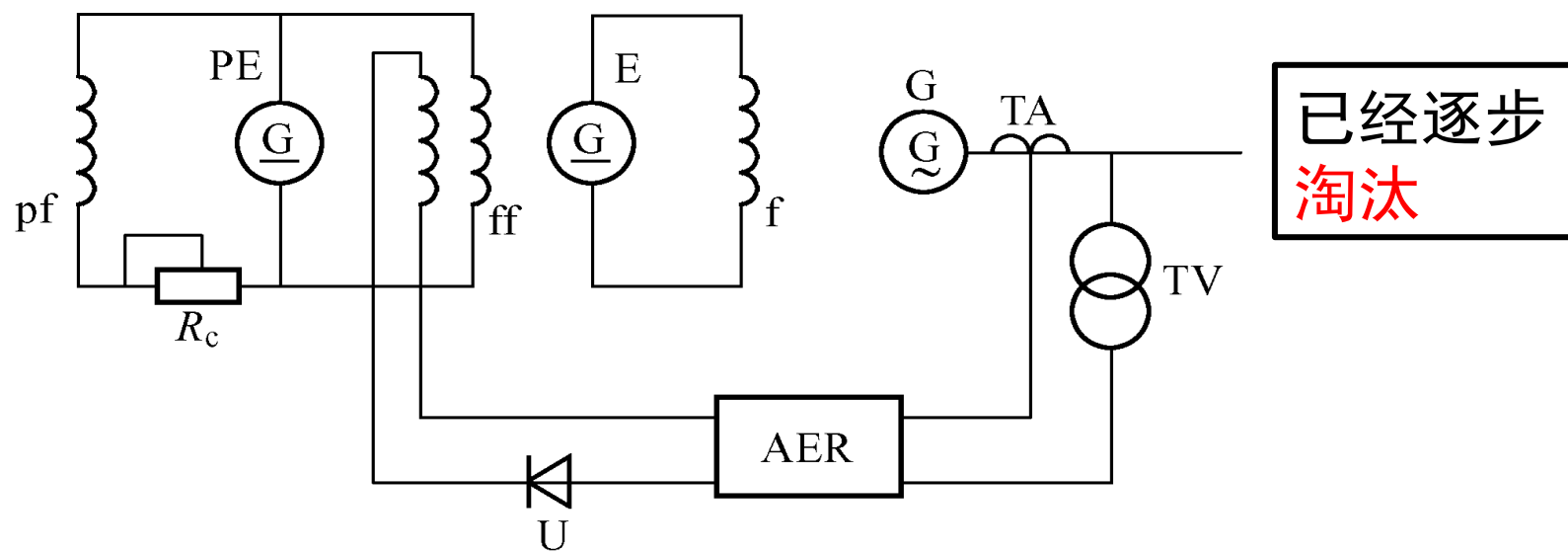
### 一、主励磁系统

电力系统中励磁发电机的种类很多，容量也大小各异。对应地，主励磁系统的种类也十分庞杂。主励磁系统可分为直流励磁机，交流励磁机和静止励磁系统三大类。静止励磁系统的励磁电源取自发电机或电网，仅以电压源提供励磁功率的称为自并励，若同时有电压源和电流源的则称为自复励。以下仅重点介绍前两类。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

### (一) 直流励磁机励磁

直流励磁机是一台与发电机同轴旋转的直流发电机。直流励磁机发出的直流电输入发电机励磁绕组，是发电机的励磁电源。直流励磁机自身的励磁有**自励**或**他励**两种类型。自励直流励磁机利用其剩磁自励；他励直流励磁机需另用一台自励直流发电机励磁，这时称他励励磁机为主励磁机，而给主励磁机励磁的自励直流发电机为副励磁机。下图所示为他励直流励磁机励磁系统



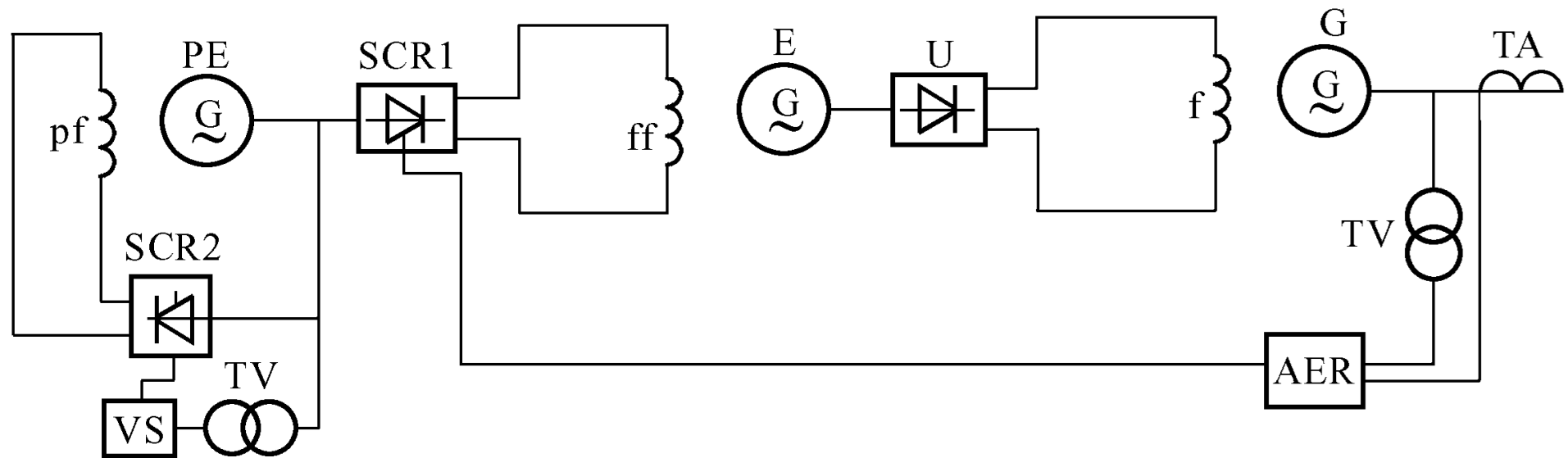


## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

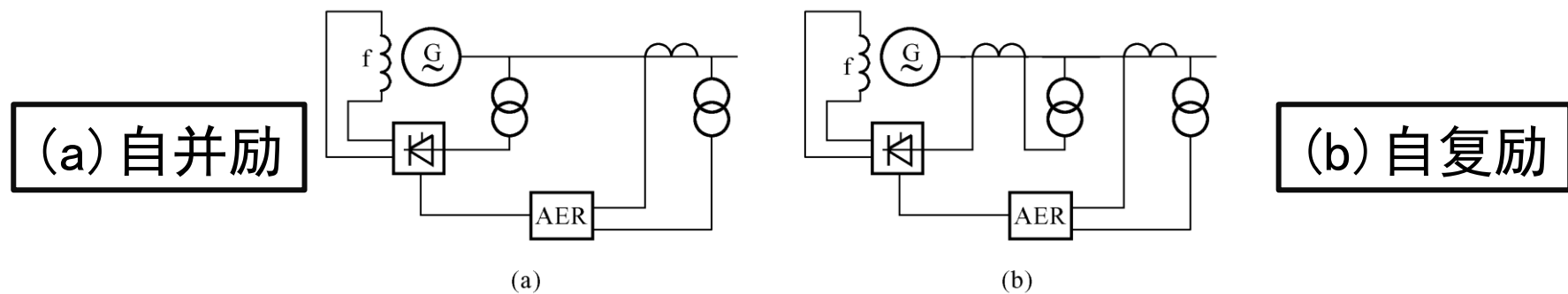
### (二) 交流励磁机励磁

交流励磁机是一台与发电机同轴旋转的交流发电机，其输出电流经大功率整流器整流后供给发电机励磁回路。这种励磁方式根据励磁机电源和整流方式的不同又分为：**自励式静止半导体励磁**；**他励式静止半导体励磁**；**他励式旋转半导体励磁**。副励磁机的定子交流电经整流后供给交流励磁机的定子励磁，交流励磁机的交流电直接输至同轴旋转的整流装置，经整流后作发电机励磁绕组电源，因而**无需滑环和电刷等接触元件**。相较于直流励磁机，交流励磁机励磁系统具有便于制造、成本低、工作可靠以及反应迅速等一系列**优点**。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性



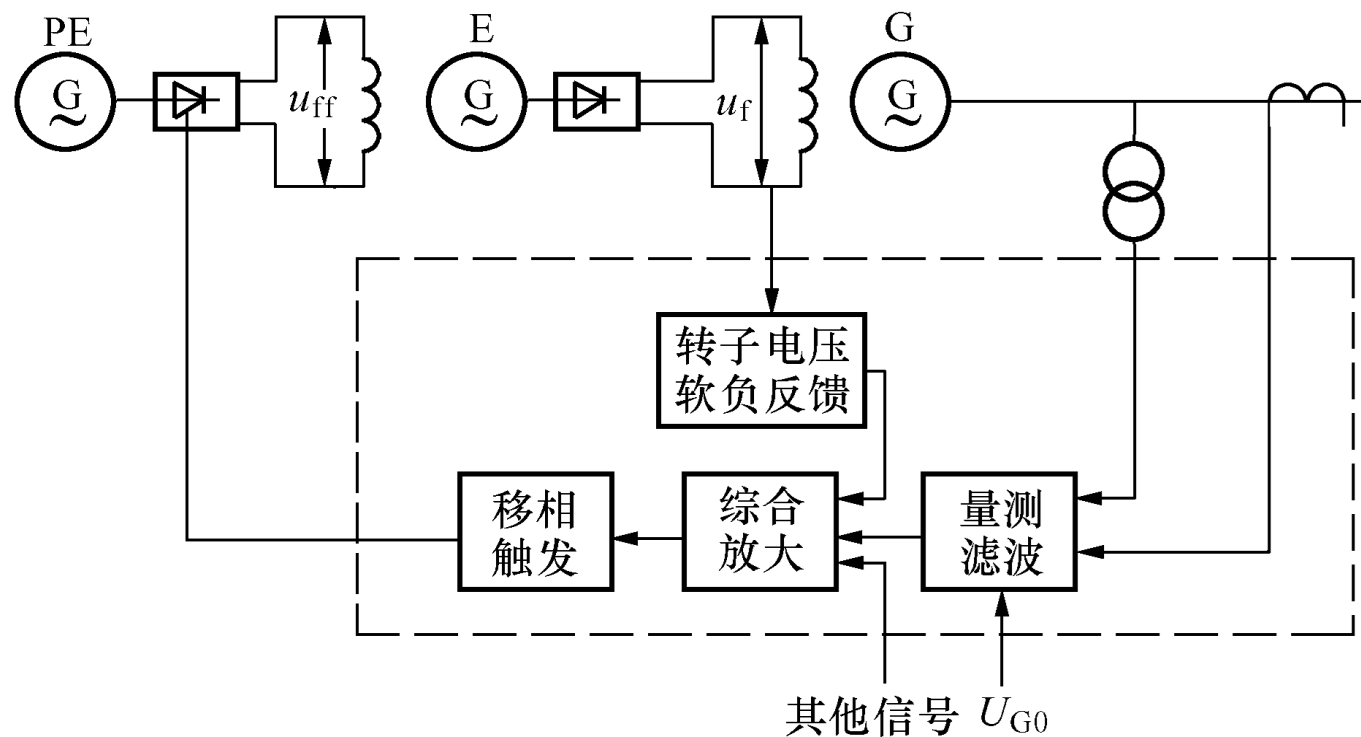
上图示出的是他励式交流励磁机、静止不可控半导体整流励磁系统的原理接线图。其中励磁机、副励磁机与发电机同轴旋转。下图为静止励磁系统（电力电子），其励磁电源取自发电机本身。



## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

### 二、自动调节励磁装置及其框图

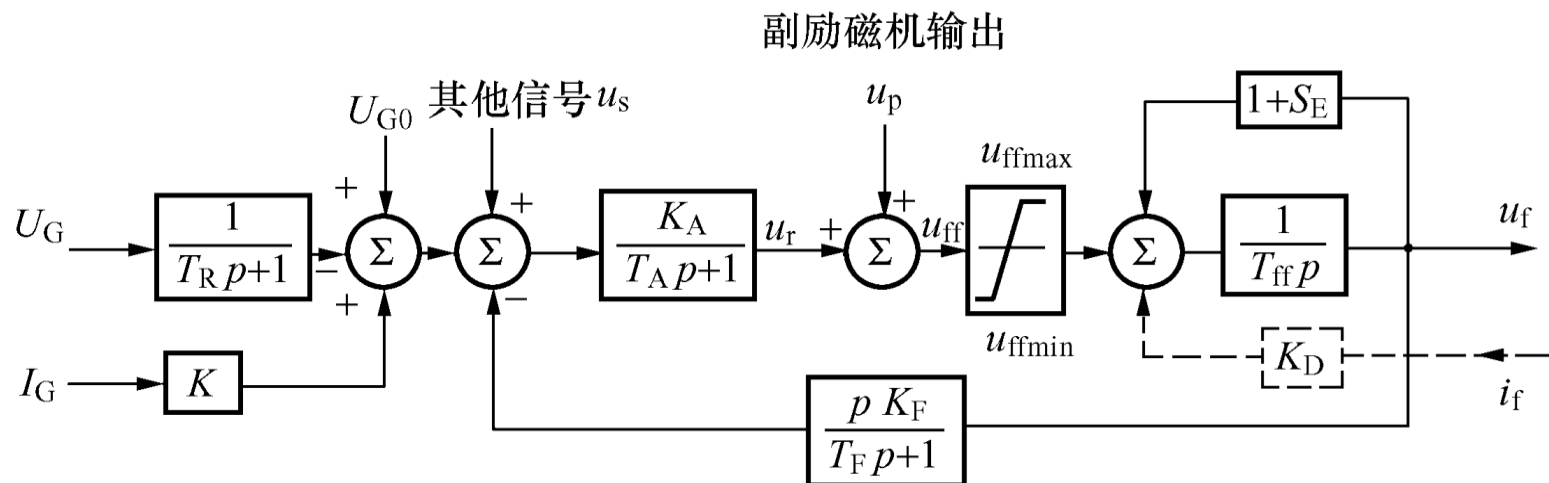
励磁调节器的作用是接收、处理和放大控制器的输入信号，以形成合适的励磁调节。控制信号通常选用发电机定子电压、电流等等。励磁调节器中一般包括测量、放大、稳定作用以及限幅等环节。下图是晶闸管励磁调节器原理框图：



## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

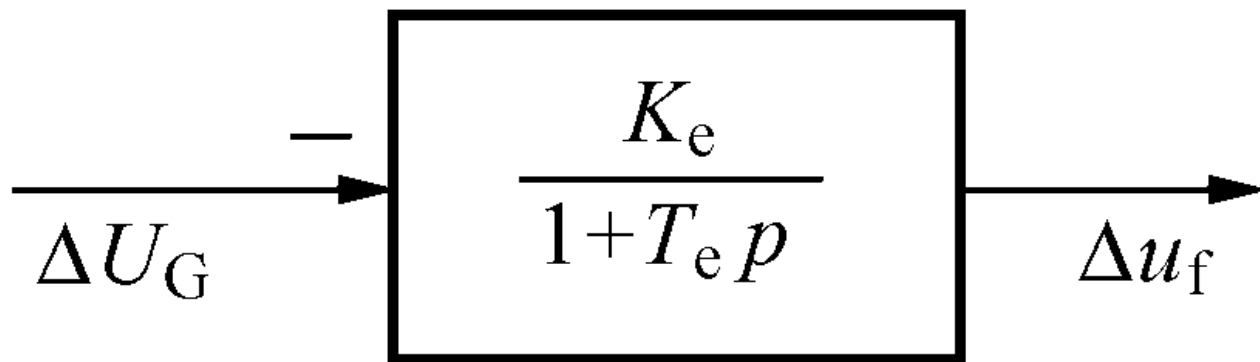
上图中虚线框中为**调节器**，调节器的输入信号为发电机端电压（和定子电流）。当发电机端电压（和定子电流）发生波动时，测量单元测得的电压信号与给定的电压相比较，得到**电压偏差信号**，该信号经放大环节放大后，作用于移相触发单元，产生不同相位的**触发脉冲**，进而改变晶闸管的**导通角**，使励磁机励磁绕组的电压  $u_{ff}$  得到调节，最终达到调节发电机励磁绕组电压乃至发电机电压的目的。

对于机电暂态分析问题，由下图即可列出励磁系统的、关于  $E_{qe}$  的微分和代数方程组。



### 三、自动调节励磁系统的简化模型

上图的框图得到的励磁系统数学方程将引入过多的微分变量，即状态变量，从而使分析的计算负担加重。因此，在近似的简化分析中，可以将上图的框图简化为用偏差量表示的一个等值的一阶惯性环节，如下图所示：



其表达式为：

$$-K_e \Delta U_G = (1 + T_e s) \Delta u_f$$

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

由于励磁电压  $u_f$  和强制空载电动势  $E_{qe}$  间为线性关系，在标幺制中若取它们的基准值满足此比例关系，则  $u_f$  和  $E_{qe}$  的标幺值相等。上式可改写为：

$$-K_e \Delta U_G = (1 + T_e s) \Delta E_{qe}$$

当发电机电压由于系统发生短路而大幅度下降时，强行励磁或立即短接  $R_c$ ，或开放晶闸管导通角，这时可以认为  $u_{ff}$  立即跃变至最大值  $u_{ffm}$ 。如忽略饱和有：

$$u_{fm} = u_f + T_{ff} \frac{du_f}{dt}$$

相应的有：

$$E_{qem} = E_{qe} + T_{ff} \frac{dE_{qe}}{dt}$$

左式即为计及励磁调节器和强行励磁作用后，描述强制空载电动势变化规律的方程。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

- 在电力系统的暂态过程中，电力网络的节点电压和频率都是变化的。
- 连接于节点的电力负荷从系统中实际吸收的功率也是变化的。
- 负荷功率的变化又反过来影响节点电压和系统频率，即影响系统的暂态过程。
- 负荷特性是指 **负荷功率** 与其 **电源电压和频率** 的关系。一般而言，描述这种关系的方程式是一组微分代数方程。建立这种数学关系的研究称为 **负荷建模**。
- 在电力系统分析问题中，通常采用 **综合负荷** 的数学模型。综合负荷是指连接于一个变电站低压母线的配电网及由其供电的所有负荷。建立综合负荷模型是一个专门的研究领域，本节只对其作简要介绍。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

### 一、综合负荷的静态电压特性

在暂态过程分析中，由前边的基本假设，近似认为电力网络中的电压、电流只有基波分量，而且频率与系统额定频率的偏差~~不大~~，这样就可以只考虑电压对负荷取用功率的影响。在忽略综合负荷的暂态过程的条件~~下~~，通常将特性曲线近似地用二次多项式拟合：

$$\left. \begin{aligned} P_D &= a_p U^2 + b_p U + c_p \\ Q_D &= a_q U^2 + b_q U + c_q \end{aligned} \right\}$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} a_p + b_p + c_p &= 1 \\ a_q + b_q + c_q &= 1 \end{aligned} \right\}$$



## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

由上式可见，功率的第一项与电压平方成正比，代表恒定阻抗负荷；第二项代表恒定电流负荷，第三项为恒定功率负荷。因此，该负荷模型也称为**ZIP模型**。

在前面讨论多机系统的发电机功率特性时即假设所有负荷均为恒定阻抗（导纳）。因此，负荷的等值阻抗可以写成：

$$Z_L = \frac{U^2}{P_D - jQ_D}$$

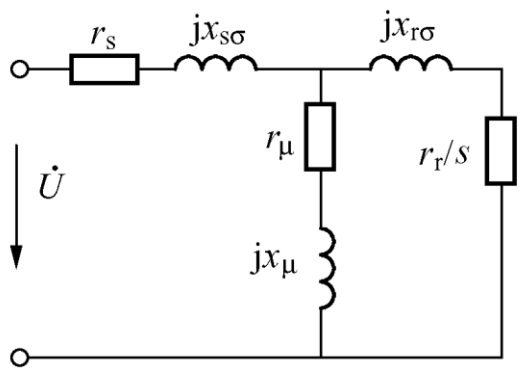
在暂态过程中，节点电压幅值  $U(t)$  是随时间变化的，因而综合负荷的等值阻抗也随时间变化。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

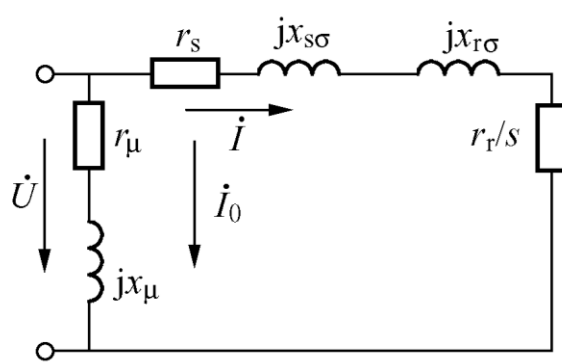
### 二、用典型异步电动机描述的综合负荷动态等值阻抗

在暂态过程中，当节点电压幅值的变化速度和幅度较大时，忽略负荷的暂态过程而仅仅采用上式描述负荷时对系统暂态过程分析的结果误差较大，因此需要考虑负荷的暂态过程。由于实际电力系统中负荷中容量份额最大的动态负荷是异步电动机，因此，这里介绍一种忽略异步电动机转子电磁暂态过程的异步电动机等值方法。

#### (一) 异步机的动态等值电抗



(a)



(b)

左图 (a) 为异步电动机稳态运行时的T型等值电路，可简化为 (b) 的  $\Gamma$  型等值电路。

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

由于不计异步电动机转子的电磁暂态过程，这样即可以应用异步电动机**稳态运行**时的等值电路分析其等值阻抗和电磁转矩。

异步机的转差率为：

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0} = (1 - \omega_{r*})$$

由图（b）可得：

$$Z_M = \frac{(r_\mu + jx_\mu)(r_s + r_r/s + jx_{s\sigma} + jx_{r\sigma})}{(r_\mu + jx_\mu) + (r_s + r_r/s + jx_{s\sigma} + jx_{r\sigma})}$$

由上式可见，**异步机的等值阻抗随异步机的转差率s变化而变化。**

## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

### (二) 异步电动机转子运动方程

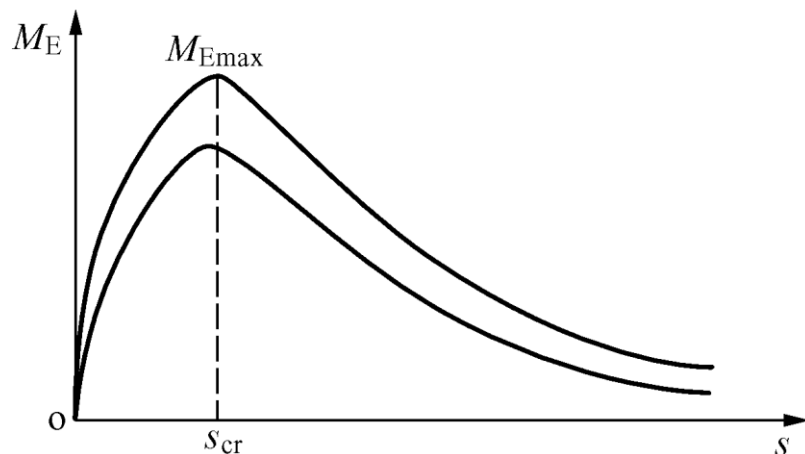
描述异步电动机组的转子运动方程式为：
$$T_J \frac{ds}{dt} = M_m - M_E$$

注意负载转矩增大将使异步机转差增大而电磁转矩增大将使转差减小。

临界转差率  $s_{cr}$ ，即转矩最大时所对应的转差率为 
$$s_{cr} = \frac{r_r}{x_{s\sigma} + x_{r\sigma}}$$

以及与之对应的最大转矩：
$$M_{E_{max}} = \frac{U^2}{2(x_{s\sigma} + x_{r\sigma})} \quad \Longrightarrow \quad M_E = \frac{2M_{E_{max}}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}}$$

下图为异步电动机电磁转矩-转差率特性：



由上式可知，异步机的最大电磁转矩与电压平方成正比而实际电磁转矩由最大转矩和异步机转差率共同确定。

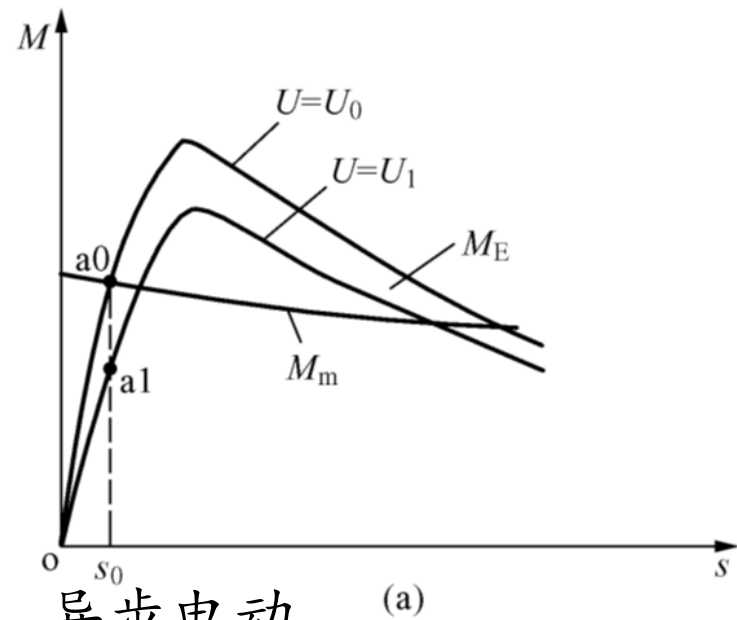
## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

对暂态过程中典型机等值阻抗的计算有两种方法：

(1) 考虑异步机转子运动的动态过程。

在正常稳态运行时异步电动机的电磁转矩与机械转矩相等，见交点  $a_0$ ，相应的转差率为  $s_0$ 。按等值电路求得的异步电动机等值阻抗与正常运行时的等值阻抗相对应。

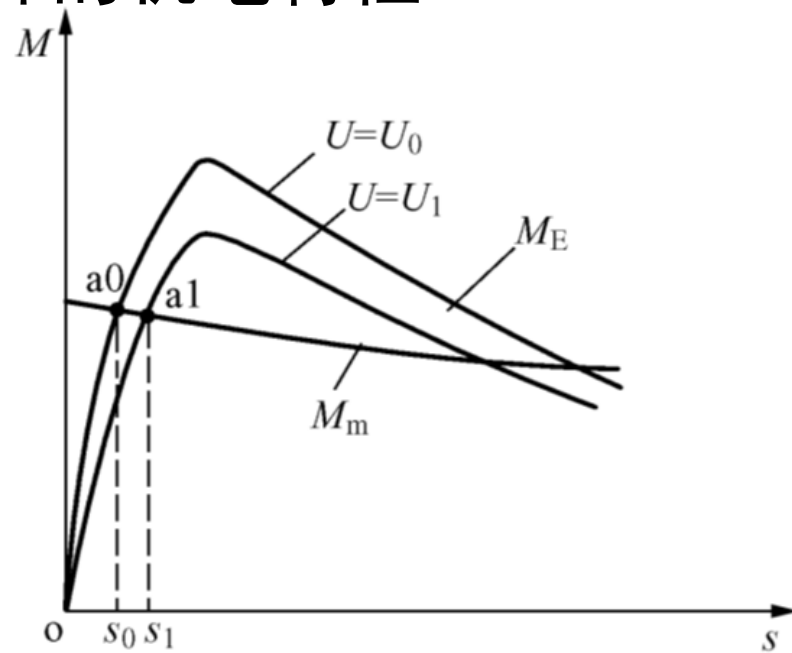
当网络受到扰动，异步电动机端电压突然变化时，异步电动机的电磁转矩也突然变化。当端电压突然降至  $U_1$ ，而在电压突变瞬间转差率不能突变而仍为  $s_0$ ，机械转矩不变，而电磁转矩则降至  $a_1$  点，出现了不平衡。在不平衡转矩作用下可求得转差率的变化，相应地得到异步电动机等值阻抗的变化。这就是在系统动态过程中计及异步电动机转子运动过程，从而决定转差率乃至异步电动机等值阻抗的变化。



## 第六章 电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

### (2) 不考虑转子运动的动态过程

这种处理方法近似地认为节点电压变化过程中典型机的电磁转矩和机械转矩**始终平衡**，端电压降至  $U_1$  时转差率由  $s_0$  变为  $s_1$ ，即为新的电磁转矩和机械转矩特性的交点。不同转差率、不同的等值阻抗和不同的异步电动机吸收的功率，后者即为异步电动机功率随电压变化的**静态特性**。



- 当异步电动机端电压**下降**时，其转差率会**增加**。
- 由电动机等值电路知，转差率的增加导致其等值电阻乃至等值阻抗**减小**，功率因数也会**下降**。
- 如果电压降得很多，以致电磁转矩的最大值也小于机械转矩时，异步电动机的转子会因转差率不断增加趋向停转，这时转差率为常数1，异步电动机即成为**恒定阻抗**。
- 对于真实的异步电动机，当转差率为1的时间过长时，电机的过流保护就会动作而**切除电机**。