

# 绕线转子异步电动机双馈调速 工作原理

主讲人：孟繁荣 副教授

# 主要内容

- 绕线转子异步电动机转子附加电动势的作用
- 绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

●转差功率是人们在研究异步电动机调速方法时所关心的问题，因为节约电能也是异步电动机调速的主要目的之一。

●要提高调速系统的效率，除了尽量减小转差功率外，还可以考虑如何去利用它。

●对于绕线型异步电动机，定、转子电路可以同时与外电路相连，转差功率可以从转子输出，也可以向转子馈入，故称作双馈调速系统。

● “双馈”的一个特点是转差功率可以回馈到电网，也可以由电网馈入。至于电功率是馈入定子绕组和/或转子绕组，还是由定子绕组和/或转子绕组馈出，则要视电动机的工作而定。

● 绕线转子异步电动机双馈调速方法早在20世纪30年代就已被提出，到了60~70年代，当可控电力电子器件出现以后，才得到更好的应用。

# 绕线转子异步电动机双馈调速工作原理

●异步电动机由电网供电并以电动状态运行时，它从电网输入（馈入）电功率，而在其轴上输出机械功率给负载，以拖动负载运行。

●在双馈调速工作时，绕线型异步电动机定子侧与交流电网直接连接，转子侧与交流电源或外接电动势相连，通过控制附加电动势的幅值，实现绕线型异步电动机的调速。

# 一、绕线转子异步电动机转子附加电动势的作用

- 异步电动机运行时其转子相电动势为

$$E_r = sE_{r0}$$

$E_{r0}$  ——绕线型异步电动机转子开路相电动势，也就是转子开路额定相电压值。

- 转子频率  $f_2 = sf_1$

## 一、绕线转子异步电动机转子附加电动势的作用

- 在转子短路情况下，转子相电流的表达式为

$$I_r = \frac{sE_{r0}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2}}$$

$R_r$  —— 转子绕组每相电阻；

$X_{r0}$  ——  $s = 1$ 时的转子绕组每相漏抗。

# 一、绕线转子异步电动机转子附加电动势的作用

- 在绕线转子异步电动机转子串电阻调速时，转子电流会在外接电阻上产生一个交流电压，这一交流电压与转子电流有着相同的频率和相位，调速时产生的转差功率被消耗在外接电阻上。

# 一、绕线转子异步电动机转子附加电动势的作用

●在转子绕组回路中引入一个可控的交流附加电动势  $E_{add}$  来代替外接电阻, 吸收原先消耗在外接电阻上的转差功率。

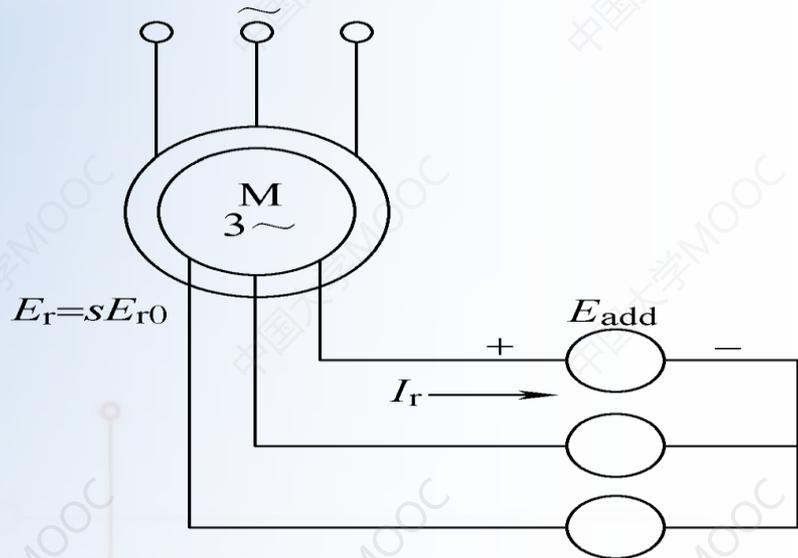


图1 绕线型异步电动机转子附加电动势的原理图

## 一、绕线转子异步电动机转子附加电动势的作用

- 引入附加电动势，电动机转子回路的合成电动势减小，转子电流和电磁转矩也相应减小，负载转矩未变，电动机必然减速， $s$ 增大。
- 转子电动势 $E_r = sE_{r0}$ 增大，转子电流增大，转差率增大到 $s_2$ 时，转子电流恢复到负载所需的值，电动机进入新的较低转速的稳定状态。

## 一、绕线转子异步电动机转子附加电动势的作用

- 串入附加电动势前、后转子电流相等。

$$\frac{s_1 E_{r0}}{\sqrt{R_r^2 + (s_1 X_{r0})^2}} = I_r = \frac{s_2 E_{r0} - E_{add}}{\sqrt{R_r^2 + (s_2 X_{r0})^2}}$$

- 在绕线型异步电动机转子侧引入一个可控的附加电动势，可调节电动机的转速。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

●在绕线型异步电动机转子侧引入可控的附加电动势并改变其幅值，可以实现对电动机转速的调节。

●从功率传送的角度看，可以认为是用控制差功率的大小与流向来实现对电动机转速的调节。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

- 电动机转子电动势与转子电流的频率与交流电网的频率往往不一致，不能把电动机的转子直接与交流电网相连，而必须通过一个中间环节。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

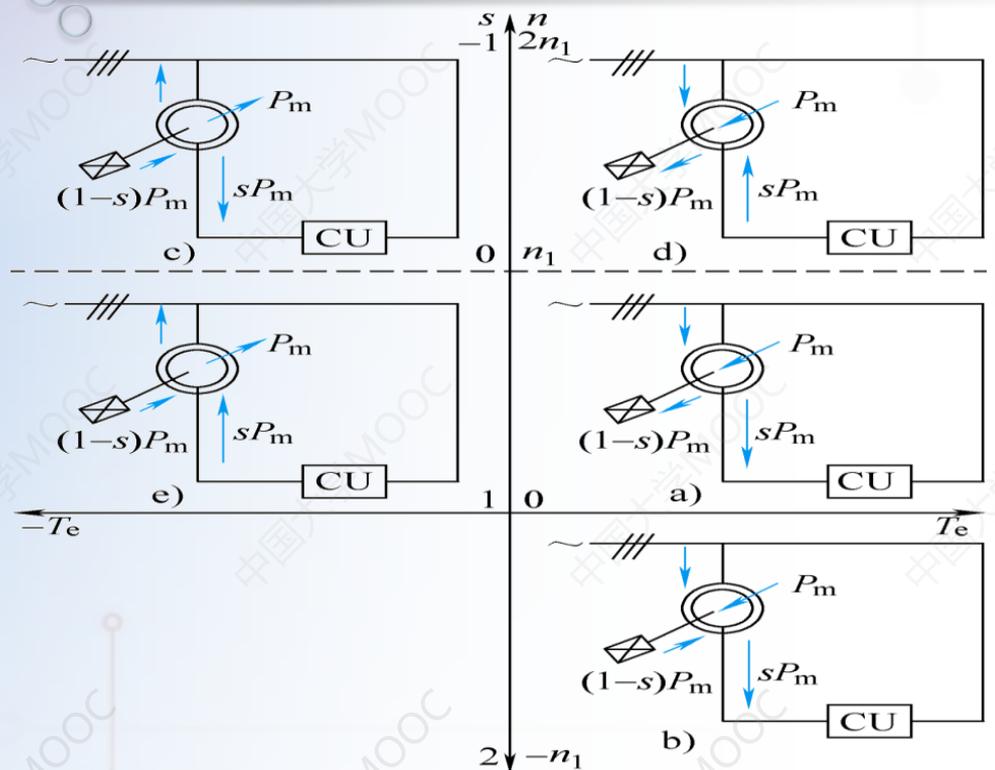


图2 绕线型异步电动机在转子附加电动势时的工况及其功率流程

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

- 忽略机械和杂散损耗时，异步电动机的功率关系为

$$P_m = sP_m + (1-s)P_m$$

$P_m$  ——电动机定子传入转子的电磁功率，

$sP_m$  ——包括转子损耗的转子电路输入功率，  
即转差功率，

$(1-s)P_m$  ——电动机轴上输出或输入的功率。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 1、电动机在次同步转速下作电动运行

● 定子接交流电网，转子短路，反抗性恒值额定负载。若在转子侧每相加上附加电动势  $+E_{add}$ （与  $sE_{r0}$  反相， $E_{add} < sE_{r0}$ ），转子电流将减小，从而使电动机减速，转子电流回升，最终进入新的稳态运行。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 1、电动机在次同步转速下作电动运行

● 转子回路的电势平衡方程式为

$$I_{rN} = \frac{s_1 E_{r0} - E_{add}}{\sqrt{R_r^2 + (s_1 X_{r0})^2}} \quad s_1 > s_N$$

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 1、电动机在次同步转速下作电动运行

●由于电动机作电动运行，转差率为  $0 < s < 1$ ，从定子侧输入功率，轴上输出机械功率，而转差功率在扣除转子损耗后由附加电势吸收从转子侧馈送到电网。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 2、电动机在反转时作倒拉制动运行

- 设异步电动机在转子侧已接入一定数值 $+E_{add}$ 的情况下作电动运行，其轴上带有位能性恒转矩负载。
- 逐渐增大 $+E_{add}$ 值，且使 $E_{add} > E_{r0}$ ，根据转子电流的平衡条件，可使 $s > 1$ ，则电动机将反转。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 2、电动机在反转时作倒拉制动运行

- $+E_{add}$  值越大，电动机的反向转速越高， $s > 1$ ，功率关系可写作：

$$P_m + |(1-s)| P_m = sP_m$$

- 由电网输入电动机定子的功率和由负载输入电动机轴的功率两部分合成转差功率，由附加电势吸收从转子侧馈送给电网。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 3、电动机在超同步转速下作回馈制动运行

●必要条件：有恒定机械外力作用在电动机轴上，方向与电动机转速方向相同，并使电动机能在超过其同步转速的情况下运行。

●典型的工况：电动车辆下坡的运动。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 3、电动机在超同步转速下作回馈制动运行

- 电动机的运转方向和上坡时一样
- 运行状态为回馈制动
- 转速超过同步转速，转差率 $s < 0$
- 转子电动势 $sE_{r0}$ 和转子电流的相位都与电动运行时相反

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 3、电动机在超同步转速下作回馈制动运行

- 发电状态运行的电动机转子回路串入转子电动势反相的附加电动势。

$$I_r = \frac{sE_{r0} + E_{add}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2}} = -\frac{|s|E_{r0} - E_{add}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2}}$$

- 电动机将在比未串入附加电动势时的转速更高的状态下作回馈制动运行。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 3、电动机在超同步转速下作回馈制动运行

- 电动机处在发电状态工作，负载通过电动机轴输入机械功率，经过机电能量变换分别从电动机定子侧与转子侧馈送至电网。

$$|P_m| + |sP_m| = |(1 - s)P_m|$$

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 4、电动机在超同步转速下作电动运行

- 电动机已在 $0 < s < 1$  的情况下作电动运行
- 轴上拖动恒转矩的额定负载
- 若转子侧串入了与 $sE_{r0}$  同相的附加电动势, 则转子电流为:

$$I_{rN} = \frac{sE_{r0} + E_{add}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2}}$$

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 4、电动机在超同步转速下作电动运行

- 当电动机的转速到达或超过额定转速时，如继续加大附加电动势，转子电动势必然反相变负，电动机将加速到的新的稳态下工作，即超同步电动运行状态。
- 电动机转速虽然超过了其同步转速，但它仍拖着负载作电动运转。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 4、电动机在超同步转速下作电动运行

- 电动机轴上输出机械功率由定子侧与转子侧两部分输入电功率合成，电动机处于定、转子双输入状态
- 功率平衡关系可写成：

$$P_m + |s| P_m = (1 - s) P_m$$

式中  $S < 0$

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 5、电动机在次同步转速下作回馈制动运行

- 电动机在低于同步转速下作电动运行，其转子侧已加入与转子电动势反相的附加电动势。
- 使附加电动势大于转子电动势，转子电流变为负值，电动机进入制动状态，工作在 $0 < s < 1$ 范围内的第二象限。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

### 5、电动机在次同步转速下作回馈制动运行

- 回馈电网的功率一部分由负载的机械功率转换而成，另一部分则由转子提供。

- 电动机的功率关系为：

$$|P_m| = (1 - s)|P_m| + s|P_m|$$

- 转子从电网获取转差功率  $s|P_m|$ 。

## 二、绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况

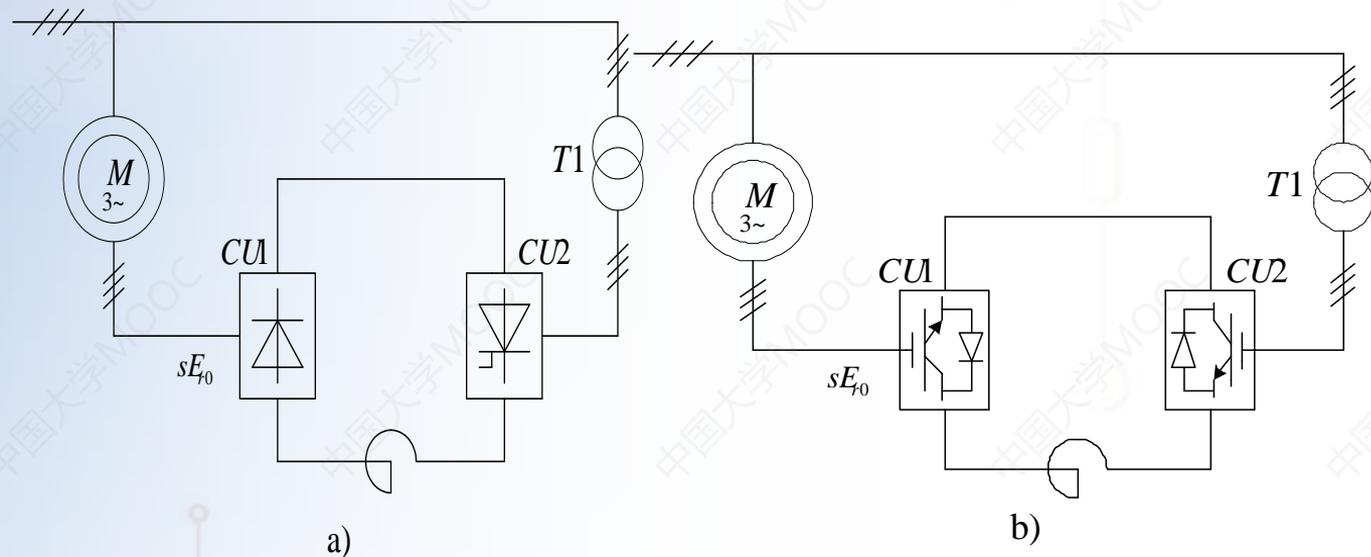


图3 绕线型异步电动机转子侧连接的功率变换单元