

# 永磁电机及其控制原理

## 第四讲永磁同步电机

# 第四讲永磁同步电机

## ● 1.概述

- 永磁同步电机与传统电励磁同步电机特性类似
  - 只是永磁体取代其转子上的励磁系统
  - 使电动机结构较为简单，降低了加工和装配费用，且省去了容易出问题的集电环和电刷，提高了电动机运行的可靠性；又无需励磁电流，省去了励磁损耗，提高了电动机的效率和功率密度。
  - 因而它是近年来研究得较多并在各个领域中得到越来越广泛应用的一种电动机。
- 
- **结构简单、体积小、重量轻、效率高、功率因数高**

# 第四讲永磁同步电机

- 1.概述

A .稀土永磁同步电机与电磁式同步电机的比较:

- (1)稀土永磁同步电机无需电流励磁，不设电刷和滑环，因此结构简单，使用方便，可靠性高。
- (2)转子上无励磁损耗，无电刷和滑环之间的摩擦损耗和接触电损耗。因此效率比电磁式同步电机要高，并且其功率因数可设计在1附近。
- (3)稀土永磁同步电机转子结构多样，结构灵活，不同转子结构往往带来自身性能上的特点，因而稀土永磁同步电机可根据使用需要选择不同的转子结构形式。
- (4)稀土永磁同步电机在一定功率范围内，比电磁式同步电机具有更小的体积和重量。

# 第四讲永磁同步电机

- 1.概述

- B.稀土永磁同步电机与鼠笼异步电机比较:

- 1. 高效节能

- 无滑差，转子上无基波铁铜损耗；
      - 转子永磁体励磁，功率因数可达1，节约了无功功率，另一方面也使定子电流下降，定子铜损减少，效率提高；
      - 极弧系数一般大于异步电机的极弧系数，当电源电压和定子结构一定时，其平均磁密较异步电机小，铁损耗小；
      - 稀土永磁同步电机的杂散损耗，一般认为由于其永磁体磁场的非正弦性增加了杂散损耗，但另一方面，稀土永磁同步电动机较大的气隙降低了杂散损耗。

$$D^2L = \frac{K}{\alpha_i AB_g} \cdot \frac{P_{em}}{n}$$

## 第四讲永磁同步电机

- 1.概述

B.稀土永磁同步电机与鼠笼异步电机比较:

2. 体积小、重量轻、功率密度高

- 从电磁负荷角度分析：其计算极弧系数较异步电机大，在电负荷**A**和气隙磁密**B**相同的条件下体积、重量减小。
- 从热负荷角度分析，由于其效率高，发热少，**A**、**B**可适当提高，使电机有效体积减小。
- 由于稀土永磁同步电动机体积小、重量轻、功率密度高，使其十分适应航空航天等军工领域的应用。

# 第四讲永磁同步电机

- 1.概述

B.稀土永磁同步电机与鼠笼异步电机比较:

- 3. 调速性能优

- 转速与频率严格成正比这一特点非常适合于转速恒定和精确同步的驱动系统中。

- 4. 不足

- 稀土永磁同步电动机与异步电机相比，结构复杂、成本高、起动困难。
- 单相稀土永磁同步电动机的发展目前还不很成熟。

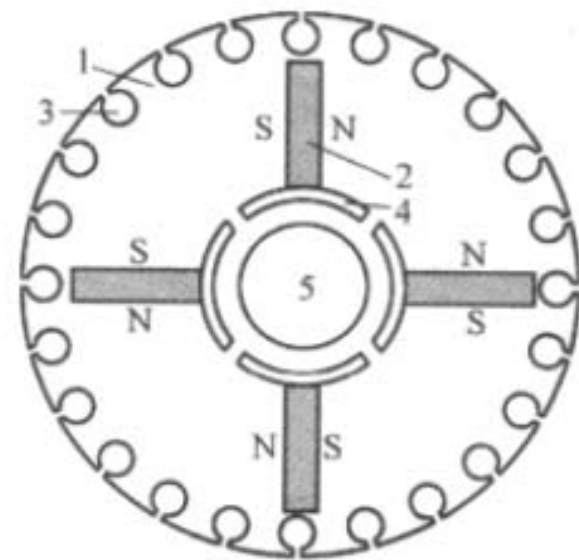
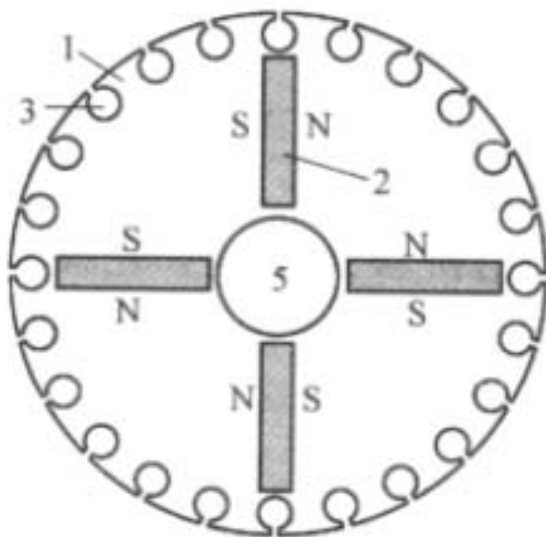
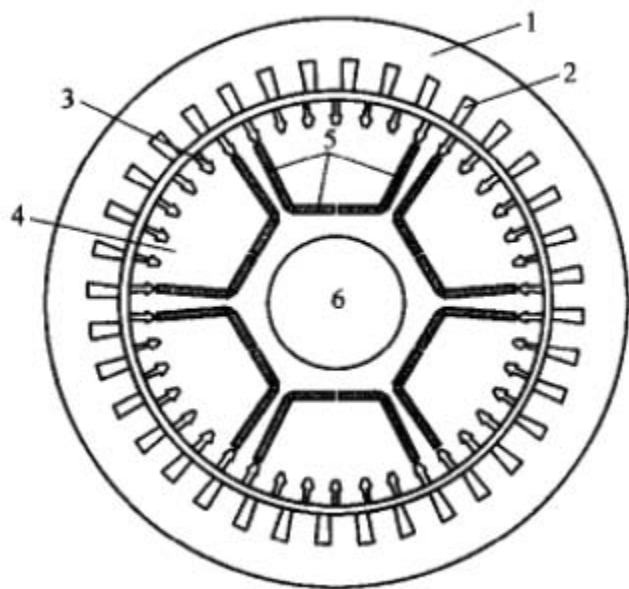
# 第四讲永磁同步电机

- 1.概述

- C.稀土永磁同步电机与永磁无刷直流电机比较：  
是从两个不同类型电机的基础上永磁化后形成的
  - 1.结构形式基本相同，绕组略有差异
  - 2.转矩脉动大大减小，更适合高精度驱动系统
  - 3.控制方式（策略）更加复杂，控制器成更高
  - 4.需要任意转子角度的位置传感器，精度高
  - 5.功率密度略小
  - 6.一种更精密的电机

# 第四讲永磁同步电机

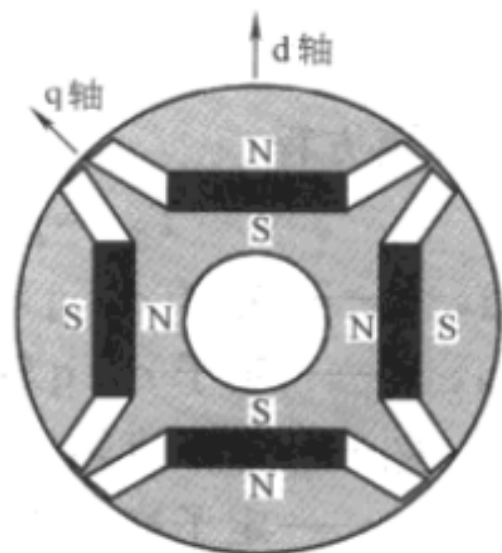
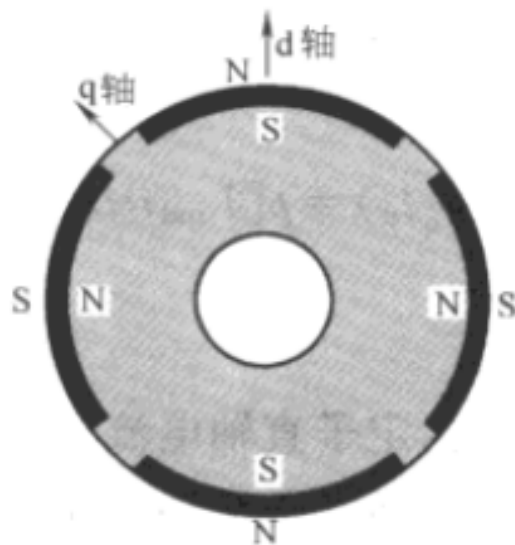
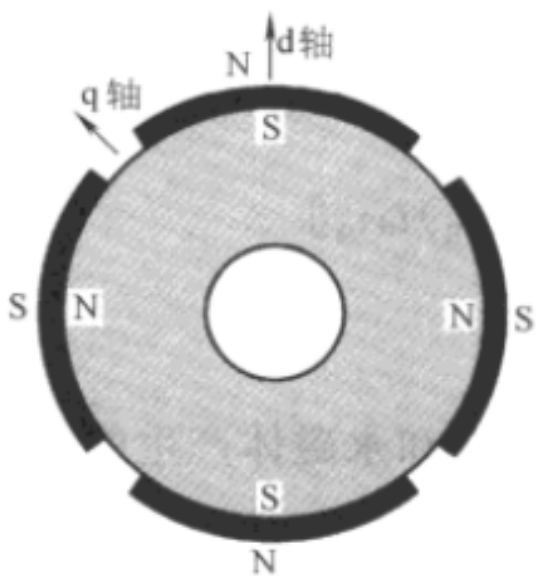
- 2. 基本结构形式





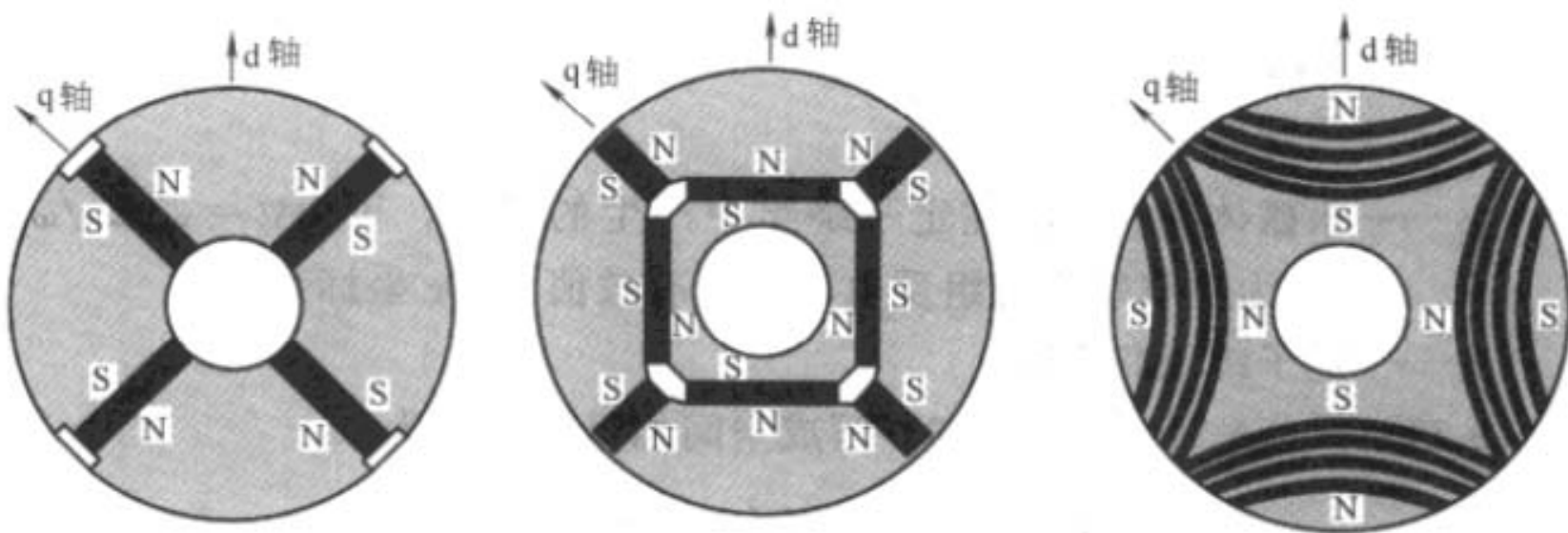
# 第四讲永磁同步电机

- 2. 基本结构形式



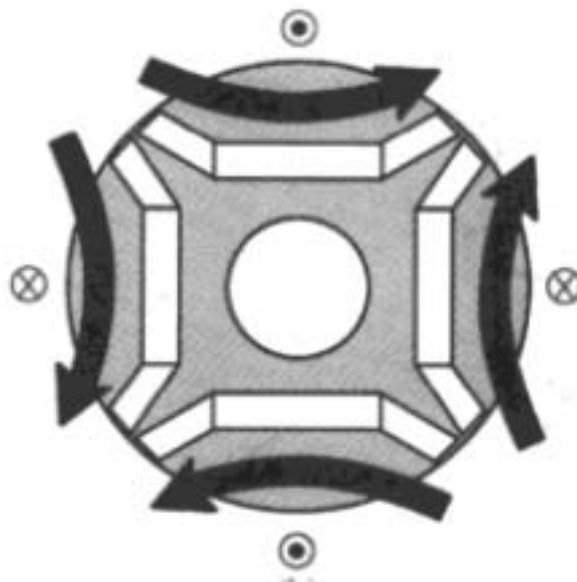
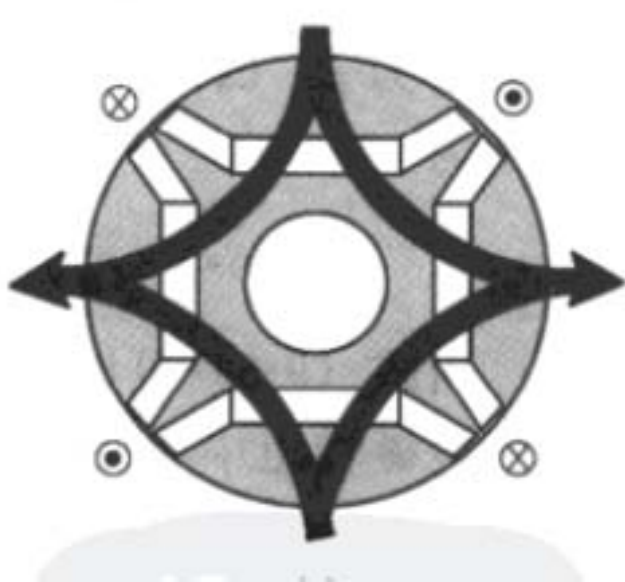
# 第四讲永磁同步电机

- 2. 基本结构形式



# 第四讲永磁同步电机

- 2. 基本结构形式



# 第四讲永磁同步电机

## ● 2.基本结构形式

### – 转子磁极结构形式选择的原则：

#### 1. 能放置足够多的永磁体以保证电机的性能

要保证电机性能，必须保证一定的气隙磁密，气隙磁密与每极永磁体的宽度直接相关，每极永磁体的宽度越大，聚磁效果就越明显，气隙磁密越高。但需要注意的是，在设计异步起动永磁同步电动机时，往往采用感应电动机的定子冲片，气隙磁密的提高必然引起定子齿部和轭部磁密的提高，从而导致铁耗的增加，必要时需要重新设计定子冲片。

#### 2. 隔磁措施要可行

由于内置式永磁同步电动机的永磁体在转子铁心内部，漏磁较大，永磁体利用率低，必须采取相应的隔磁措施。隔磁使转子结构趋于复杂、机械强度变差，因此在保证隔磁效果的前提下，隔磁措施越简单越好。

# 第四讲永磁同步电机

## ● 2.基本结构形式

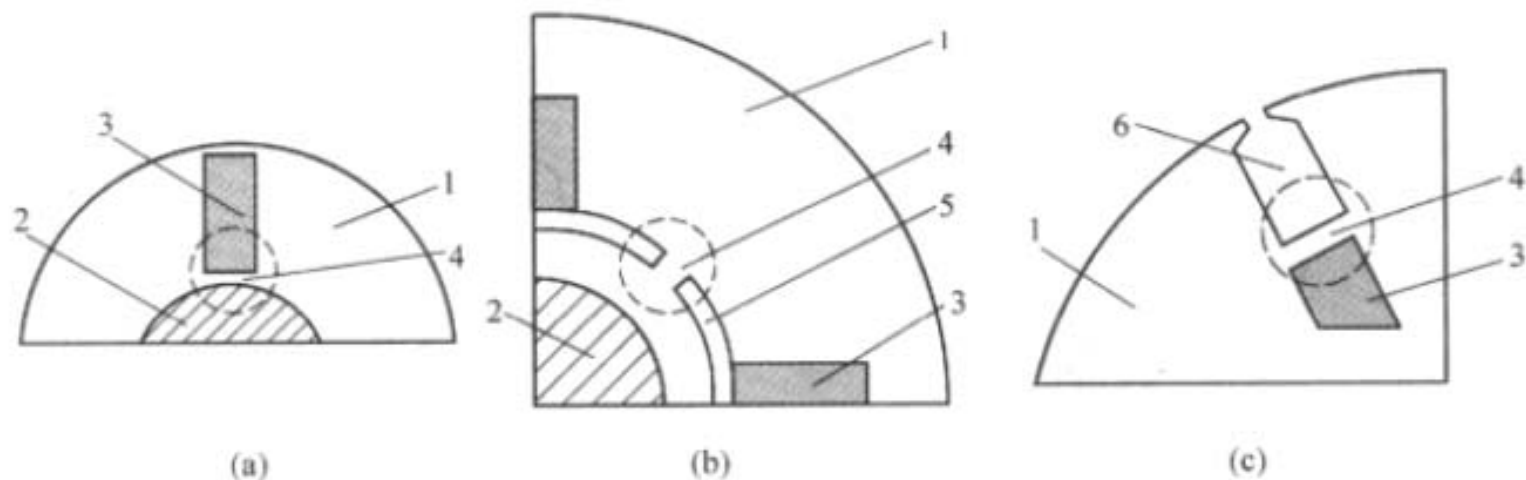


图 8-9 常用的隔磁方式

1—转子铁心；2—轴；3—永磁体；4—隔磁磁桥；5—空气槽；6—转子槽

# 第四讲永磁同步电机

## ●3. 永磁同步电机气隙磁场的主要系数

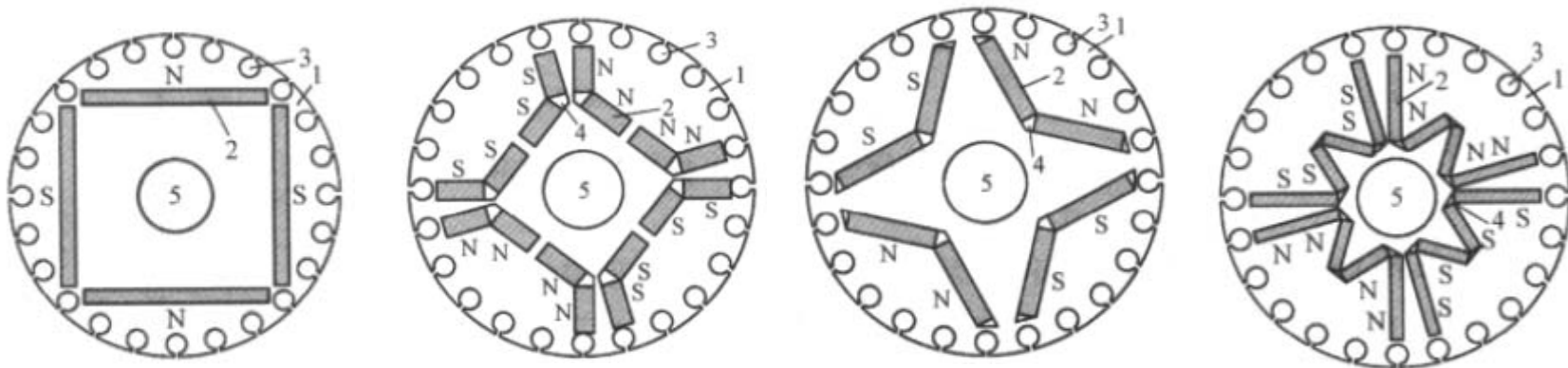
### -3.1 计算极弧系数:

通常永磁电机空载气隙磁场是带谐波的平顶波，而实现机电能量转换是以基波磁场为基础进行的。所以计算极弧系数的准确性会直接影响磁场基波大小  
计算极弧系数与转子磁极结构密切相关

# 第四讲永磁同步电机

## ●3. 永磁同步电机气隙磁场的主要系数

### -3.1 计算极弧系数:



计算极弧系数: 
$$\alpha_i = \alpha_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta} + \frac{6}{1 - \alpha_p}}$$

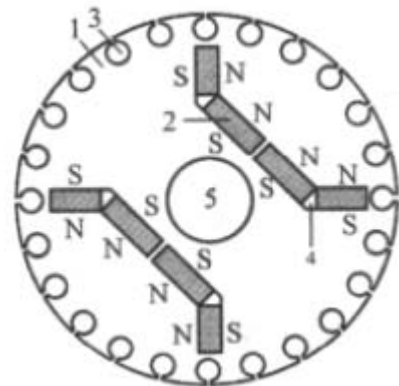
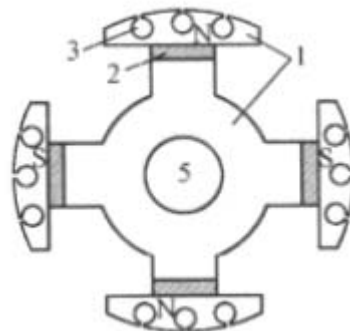
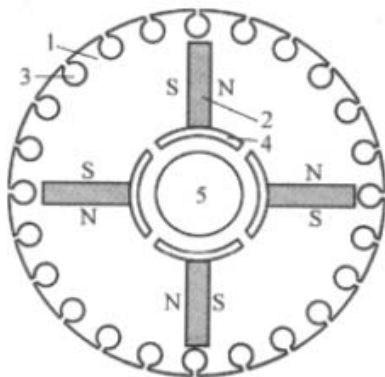
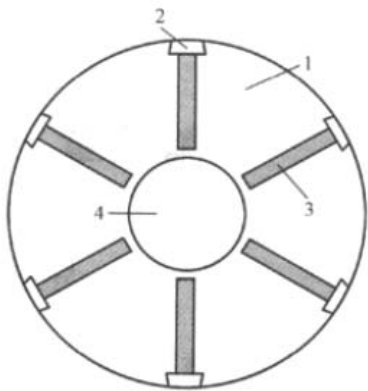
$$\alpha_p = \frac{q_m}{Q_2 / 2p}$$

永磁体跨过的定、转子槽数

# 第四讲永磁同步电机

## ●3. 永磁同步电机气隙磁场的主要系数

### -3.1 计算极弧系数:



计算极弧系数:

$$\alpha_i = \alpha_p + \frac{2\delta}{\tau}$$

$$\alpha_p = \frac{\hat{b}_p}{\tau}$$

磁极的极弧长度



# 第四讲永磁同步电机

## ●3. 永磁同步电机气隙磁场的主要系数

### -3.2 空载气隙磁密的波形系数:

在永磁同步电动机中, 忽略齿槽影响, 空载气隙磁密波形可以近似为矩形波, 如图 8-10 所示, 对其进行傅里叶分解, 得到如图中虚线所示的基波磁密, 其幅值为

$$B_{\delta 1} = \frac{4}{\pi} B_{\delta} \sin \frac{\alpha_1 \pi}{2} \quad (8-6)$$

气隙磁密波形系数定义为空载气隙磁场中基波磁密幅值与气隙磁密最大值的比值, 即

$$k_f = \frac{B_{\delta 1}}{B_{\delta}} = \frac{4}{\pi} \sin \frac{\alpha_1 \pi}{2} \quad (8-7)$$

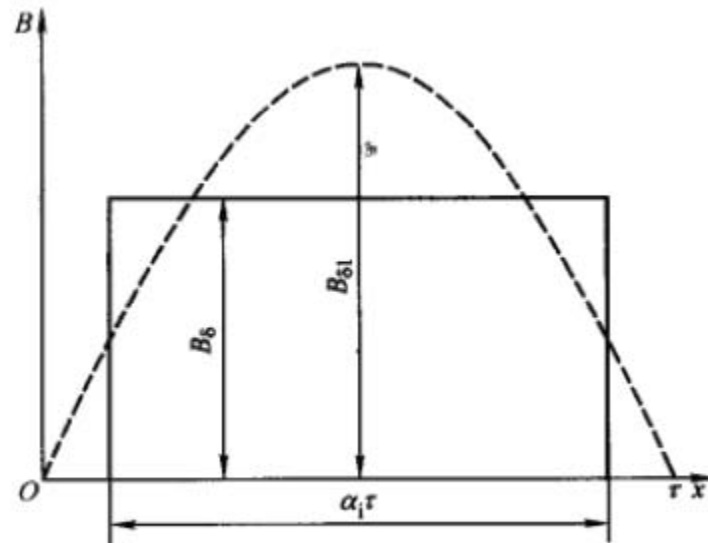


图 8-10 空载气隙磁场近似波形

# 第四讲永磁同步电机

## ●3. 永磁同步电机气隙磁场的主要系数

-3.3 电枢反应磁密波形系数:

-定义: Dq轴电枢反应产生的气隙磁场基波磁密与磁密最大值之比:

$$\begin{cases} k_d = \frac{B_{ad1}}{B_{ad}} \\ k_q = \frac{B_{aq1}}{B_{aq}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} B_{ad1} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B(x) \cos x dx \\ B_{aq1} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B(x) \sin x dx \end{cases}$$

# 第四讲永磁同步电机

## ●3. 永磁同步电机气隙磁场的主要系数

### -3.3 电枢反应磁密波形系数:

对于表面式磁极结构，交直轴磁阻基本相等，可视为隐极电机，因而有

$$k_d = k_q = 1$$

对于内置式磁极结构，有<sup>[1]</sup>

$$\begin{cases} k_d = \frac{4}{\pi} \frac{\alpha_i^2}{\alpha_i^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\alpha_i} \\ k_q = \frac{1}{\pi} (\alpha_i \pi - \sin \alpha_i \pi) \end{cases}$$

# 第四讲永磁同步电机

## ●3. 永磁同步电机气隙磁场的主要系数

### -3.4 电枢反应系数:

直轴电枢反应系数  $k_{ad}$  和交轴电枢反应系数  $k_{aq}$  分别定义为

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{ad} = \frac{k_d}{k_f} \\ k_{aq} = \frac{k_q}{k_f} \end{array} \right.$$

# 第四讲永磁同步电机

## ●4. 永磁同步电机电枢反应和电枢反应电抗

- 永磁同步电机电枢反应与电励磁同步机类似但由于dq轴磁阻不同引起电抗也不同

永磁同步电动机交、直轴上的磁阻通常不相等，同一电枢磁动势作用在不同位置，遇到的磁阻不同。在分析电枢反应时，不仅要知道电枢磁动势的大小和空间分布，还要知道磁阻的分布，才能求出电枢反应磁密的分布。解决这一问题的方法是双反应理论，即将电枢磁动势分解为作用在直轴上的直轴电枢反应磁动势和作用在交轴上的交轴电枢反应磁动势

## 第四讲永磁同步电机

### ●4. 永磁同步电机电枢反应和电枢反应电抗

$$\begin{cases} F_{ad} = F_a \sin\varphi \\ F_{aq} = F_a \cos\varphi \end{cases}$$

$\varphi$  为内功率因数角，定义为电枢电流  $\dot{i}$  和空载电动势  $\dot{E}_0$  之间的夹角； $F_a$  为电枢绕组磁动势

$$F_a = \frac{\sqrt{2}m N_1 k_{dp1}}{\pi p} I$$

# 第四讲永磁同步电机

## ●4. 永磁同步电机电枢反应和电枢反应电抗

直轴磁阻和交轴磁阻虽不相等，但数值固定，只要求出交、直轴磁阻，就可以求出直轴电枢反应产生的磁通  $\Phi_{ad}$  和交轴电枢反应产生的磁通  $\Phi_{aq}$ 。电枢电流  $i$  也可分解为直轴分量  $i_d$  和交轴分量  $i_q$ ，即

$$\begin{cases} I_d = I \sin\varphi \\ I_q = I \cos\varphi \end{cases}$$

它们分别产生相应的直、交轴电枢磁动势  $F_{ad}$  和  $F_{aq}$ 。

# 第四讲永磁同步电机

## ●4. 永磁同步电机电枢反应和电枢反应电抗

不考虑饱和时，直、交轴电枢反应电抗分别为

$$\begin{cases} X_{ad} = 4m\mu_0 f \frac{(N_1 k_{dp1})^2 \tau L_{ef}}{\pi p k_\delta \delta} k_d \\ X_{aq} = 4m\mu_0 f \frac{(N_1 k_{dp1})^2 \tau L_{ef}}{\pi p k_\delta \delta} k_q \end{cases}$$

直轴同步电抗  $X_d$  和交轴同步电抗  $X_q$  分别为

$$\begin{cases} X_d = X_1 + X_{ad} \\ X_q = X_1 + X_{aq} \end{cases}$$

式中， $X_1$  为定子绕组每相漏电抗。

电励磁同步电机中， $X_d > X_q$ ，但在永磁同步电动机中，除少数磁极结构外，都有  $X_d < X_q$ 。



# 第四讲永磁同步电机

## ●5. 永磁同步电机的感应电势

定子绕组每相空载感应电动势的有效值为

$$E_0 = \sqrt{2} \pi f N_1 k_{dp1} \Phi_{f1}$$

式中， $\Phi_{f1}$  为永磁体产生的基波磁通

$$\Phi_{f1} = \frac{2}{\pi} B_{\delta 1} \tau L_{ef}$$

直轴电枢反应磁通  $\Phi_{ad}$  在定子每相绕组中感应的直轴电枢反应电动势为

$$E_{ad} = \sqrt{2} \pi f N_1 k_{dp1} \Phi_{ad}$$

$\dot{E}_{ad}$  与直轴电枢反应电抗之间满足

$$\dot{E}_{ad} = -j \dot{I}_d X_{ad}$$

# 第四讲永磁同步电机

## ●5. 永磁同步电机的感应电势

交轴电枢反应磁通  $\Phi_{aq}$  在定子每相绕组中感应的交轴电枢反应电动势为

$$E_{aq} = \sqrt{2} \pi f N_1 k_{dp1} \Phi_{aq}$$

$\dot{E}_{aq}$  与交轴电枢反应电抗之间满足

$$\dot{E}_{aq} = -j \dot{I}_q X_{aq}$$

气隙合成磁场在定子每相绕组中感应的电动势为

$$E_{\delta} = \sqrt{2} \pi f N_1 k_{dp1} \Phi_{\delta}$$

式中， $\Phi_{\delta}$  为永磁体和电枢反应磁动势共同产生的基波磁通。

# 第四讲永磁同步电机

- 6. 永磁同步电机的稳态电磁关系----电压方程

正弦波永磁同步电动机与电励磁同步电动机有着相似的内部电磁关系，故可采用双反应理论来研究。

注意采用**电动机惯例**来规定正方向，以凸极机为例：

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{E}_0 + \dot{I}r_1 + j\dot{I}X_1 + j\dot{I}_d X_{ad} + j\dot{I}_q X_{aq} \\ &= \dot{E}_0 + \dot{I}r_1 + j\dot{I}_d (X_1 + X_{ad}) + j\dot{I}_q (X_1 + X_{aq}) \\ &= \dot{E}_0 + \dot{I}r_1 + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q\end{aligned}$$

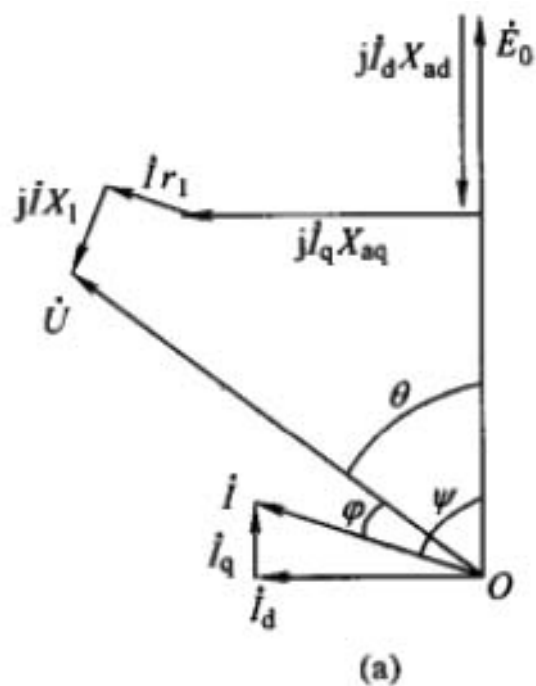
I超前E为正;  
 U超前E为正;  
 I滞后U为正

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}r_1 + j\dot{I}X_1 + j\dot{I}_d X_{ad} + j\dot{I}_q X_{aq}$$

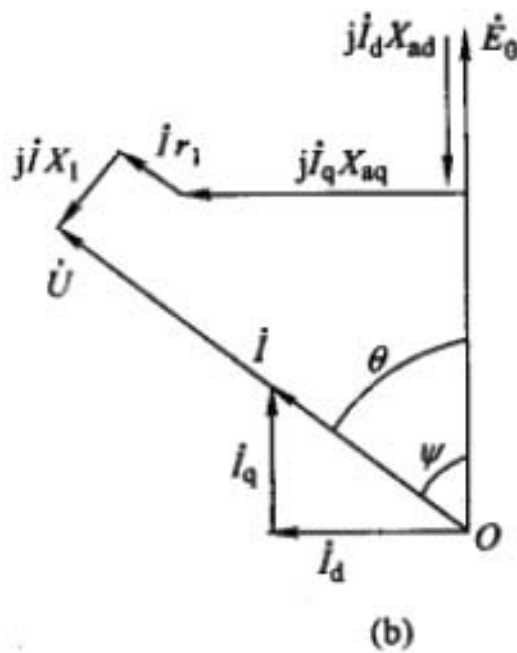
## 第四讲永磁同步电机

$$\theta = \psi + \varphi$$

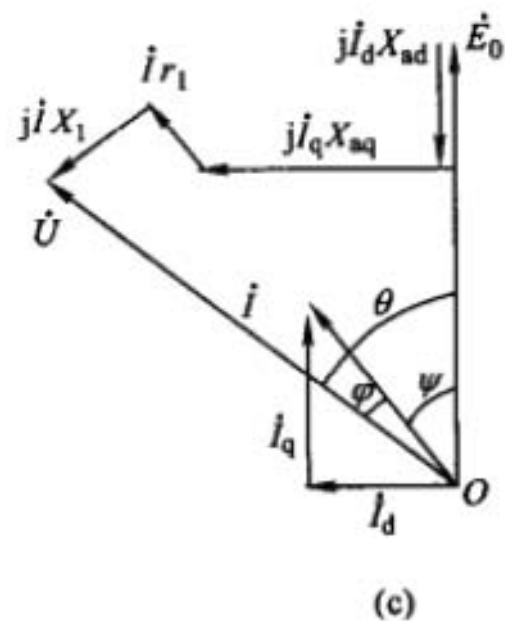
### 6. 永磁同步电机的稳态电磁关系----向量图1



(a) 过激去磁 (超前功率因数)



(b) 过激去磁 (单位功率因数);

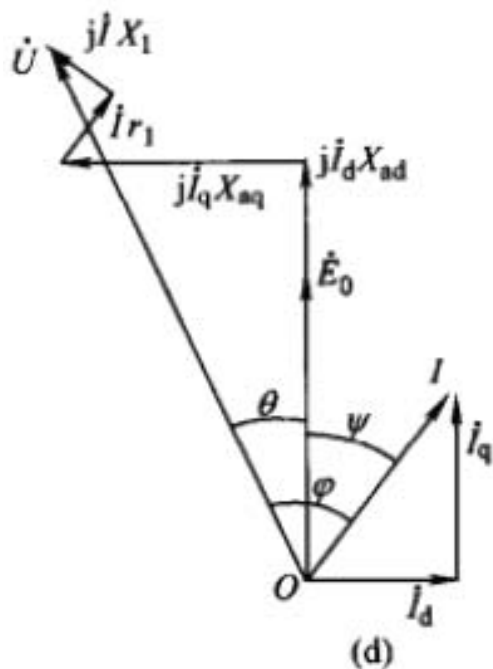


(c) 过激去磁 (滞后功率因数)

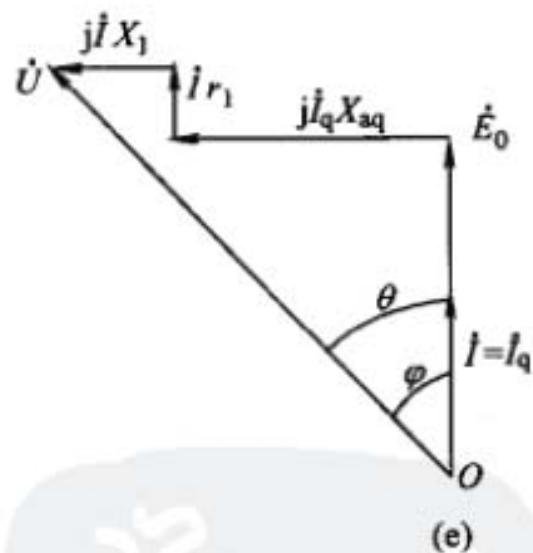
# 第四讲永磁同步电机

$$\theta = \psi + \varphi$$

- 6. 永磁同步电机的稳态电磁关系----向量图1



(d) 欠激增磁；



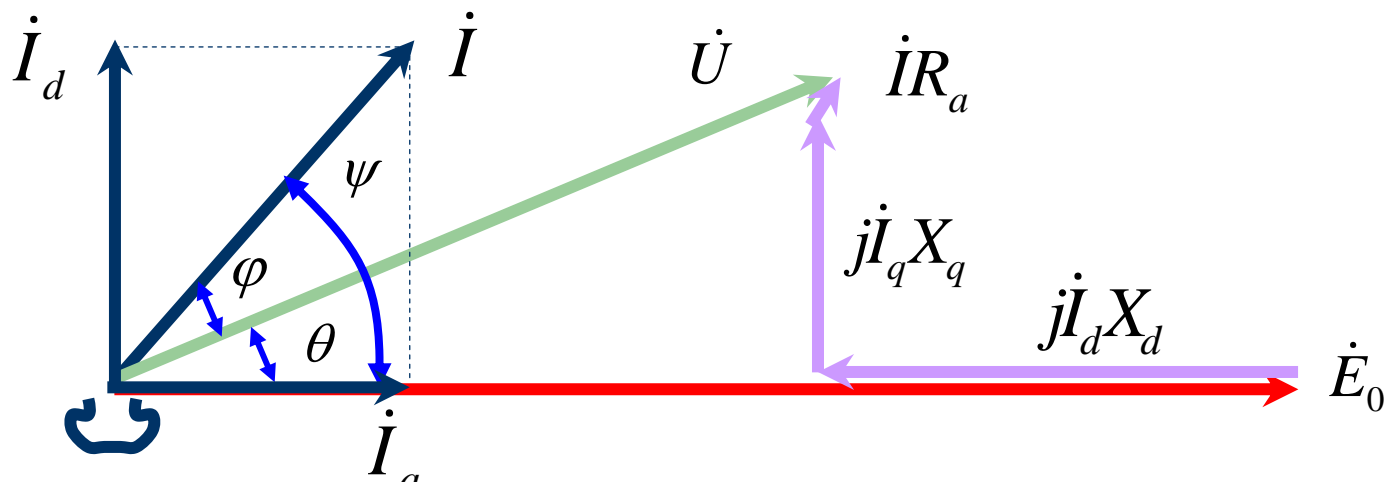
(e) 增去磁临界状态

# 第四讲永磁同步电机

- 6. 永磁同步电机的稳态电磁关系
  - 由向量图可以看出各量的关系：

$$\begin{cases} \psi = \arctan(I_d/I_q) \\ U \sin\theta = r_1 I_d + X_q I_q \\ U \cos\theta = E_0 + r_1 I_q - X_d I_d \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_d = \frac{r_1 U \sin\theta + X_q (E_0 - U \cos\theta)}{r_1^2 + X_d X_q} \\ I_q = \frac{X_d U \sin\theta - r_1 (E_0 - U \cos\theta)}{r_1^2 + X_d X_q} \end{cases}$$



# 第四讲永磁同步电机

- 6. 永磁同步电机的稳态电磁关系----电磁功率

永磁同步电动机的输入功率为

$$P_1 = mUI\cos\varphi = mUI\cos(\psi - \theta) = m(UI_d\sin\theta + UI_q\cos\theta)$$

将式 (8-27) 代入得

$$P_1 = m[I^2 r_1 + I_q I_d (X_q - X_d) + E_0 I_q]$$

将式 (8-30) 扣除定子绕组损耗  $mI^2 r_1$  就是包括铁耗和杂散损耗在内的电磁功率，即

$$P_{em} = P_1 - mI^2 r_1 = m[I_q I_d (X_q - X_d) + E_0 I_q] = \frac{m}{(r_1^2 + X_d X_q)^2} [X_d U \sin\theta - r_1 (E_0 - U \cos\theta)]$$

$$[r_1 U \sin\theta (X_q - X_d) + X_q (E_0 - U \cos\theta) (X_q - X_d) + E_0 (r_1^2 + X_d X_q)]$$

# 第四讲永磁同步电机

- 6. 永磁同步电机的稳态电磁关系----电磁功率

通常定子绕组电阻较小，忽略其影响，则

$$\begin{aligned} P_{em} &\approx \frac{m}{X_d X_q} U \sin\theta [(E_0 - U \cos\theta)(X_q - X_d) + E_0 X_d] \\ &= \frac{m U E_0}{X_d} \sin\theta + \frac{m U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \end{aligned}$$

则永磁同步电动机的电磁转矩为

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_{em} p}{\omega} \approx \frac{m p U E_0}{\omega X_d} \sin\theta + \frac{m p U^2}{2\omega} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

式中， $\Omega$  和  $\omega$  分别为电动机的机械角速度和电角速度。



# 第四讲永磁同步电机

- 6. 永磁同步电机的稳态电磁关系----电磁功率

从式 (8-33) 可以看出, 电磁转矩由两部分组成: 一是由永磁磁场和电枢反应磁场相互作用产生的基本电磁转矩, 称为**永磁转矩**; 二是由于交、直轴磁阻不相等引起的**磁阻转矩**, 当交直轴磁阻相等时, 该项转矩为零。由于通常情况下永磁同步电动机的直轴电抗小于交轴电抗, 与普通同步电动机中直轴电抗大于交轴电抗的情况相反, 磁阻转矩的作用也不同。在普通同步电动机中, 合成转矩最大值对应的功角小于  $90^\circ$ , 而永磁同步电动机中, 合成转矩最大值对应的功角大于  $90^\circ$ 。图 8-12 为某永磁同步电动机的永磁转矩、磁阻转矩和合成电磁转矩。

## 第四讲永磁同步电机

- 6. 永磁同步电机的稳态电磁关系----电磁功率

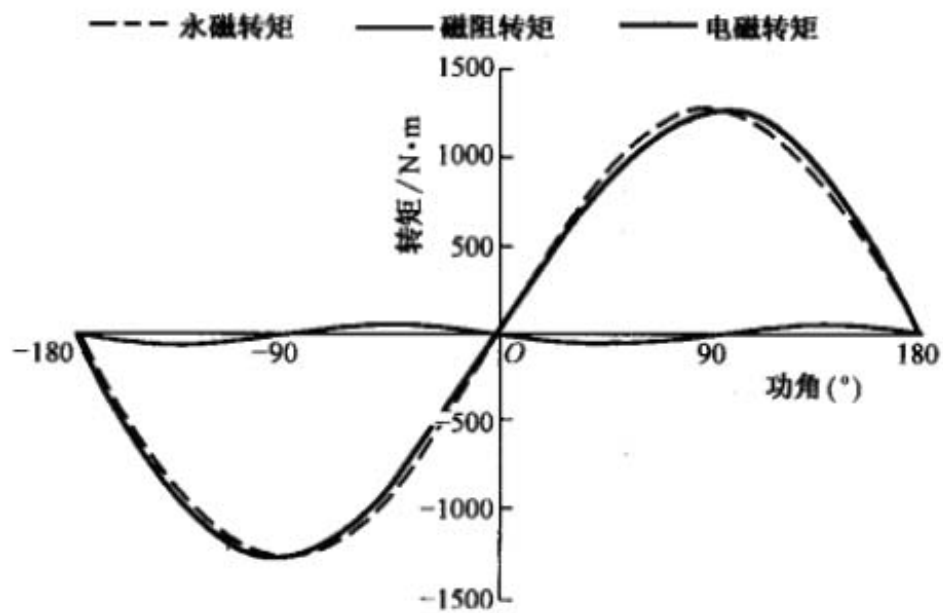


图 8-12 某永磁同步电动机的永磁转矩、磁阻转矩和合成电磁转矩

# 第四讲永磁同步电机

## ● 6. 永磁同步电机的稳态电磁关系----电磁功率

在  $0^\circ \sim 90^\circ$  功角范围内，永磁转矩为正值，磁阻转矩为负值，合成转矩有为负的可能，下面讨论出现这种可能的条件。合成电磁转矩为负时满足

$$\frac{mpUE_0}{\omega X_d} \sin\theta_0 < \frac{mpU^2}{2\omega} \left( \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \sin 2\theta_0 \quad (8-34)$$

整理得

$$\cos\theta_0 > \frac{E_0}{U} \frac{X_q}{X_q - X_d} \quad (8-35)$$

电动机运行时，在  $90^\circ \sim 180^\circ$  功角范围内，电磁转矩恒为正，负值只能出现在  $0^\circ \sim 90^\circ$ ，故

$$\theta_0 < \arccos \frac{E_0}{U} \frac{X_q}{X_q - X_d} \quad (8-36)$$

# 第四讲永磁同步电机

- 6. 永磁同步电机的稳态电磁关系----电磁功率

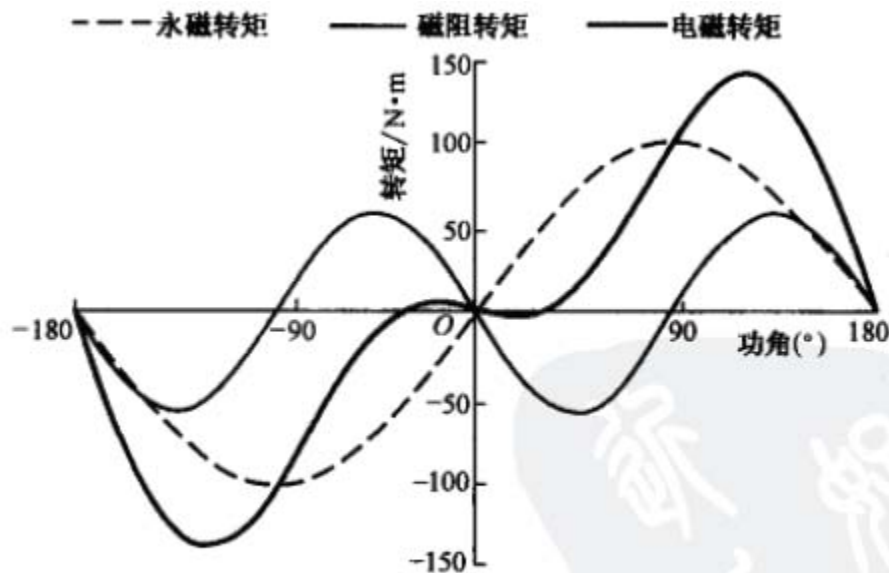


图 8-13 电磁转矩出现负值时的电磁转矩曲线

# 第四讲永磁同步电机

## ● 6. 永磁同步电机的稳态电磁关系----无功调节和V形曲线

永磁同步电动机在制成之后，励磁无法调节，但在设计阶段，可以通过调整  $E_0$  来调整功率因数，也就是调节无功功率。在电机制成之后，也可以通过调节供电电压来调节无功功率和功率因数。

为便于分析，假定永磁同步电动机交直轴磁阻相等，忽略定子电阻，用隐极同步电动机的相量图进行分析。当电动机负载转矩不变即输出功率不变时，不计  $U$  和  $E_0$  的变化引起的定子铁耗和附加损耗的变化，则电磁功率也不变，有

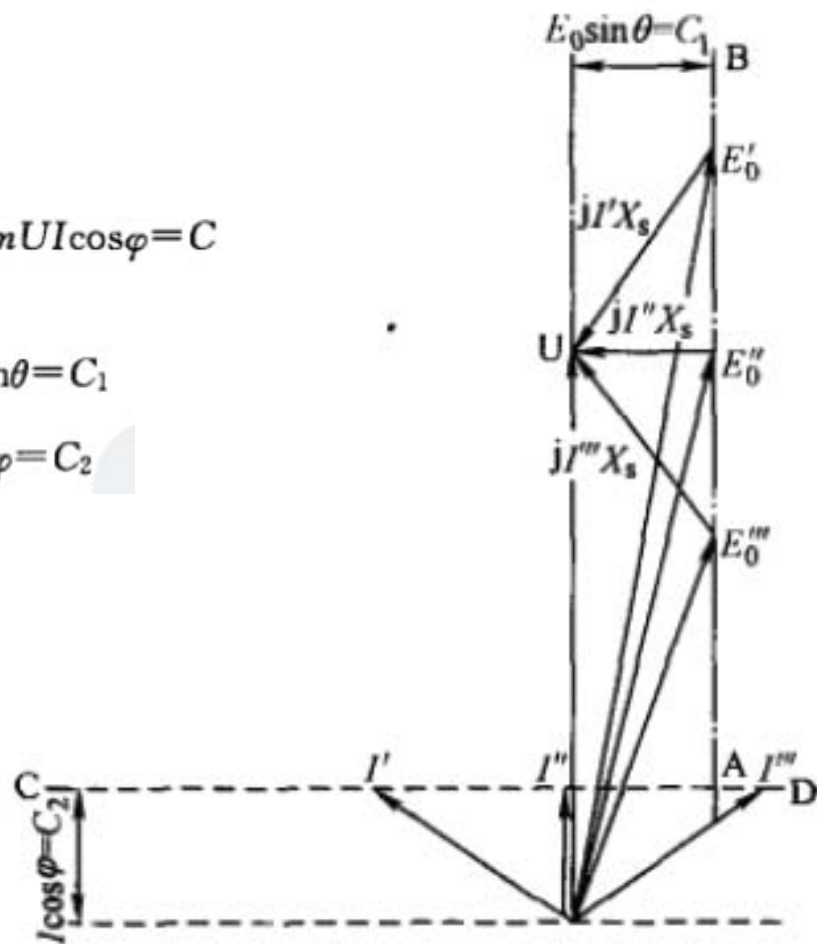
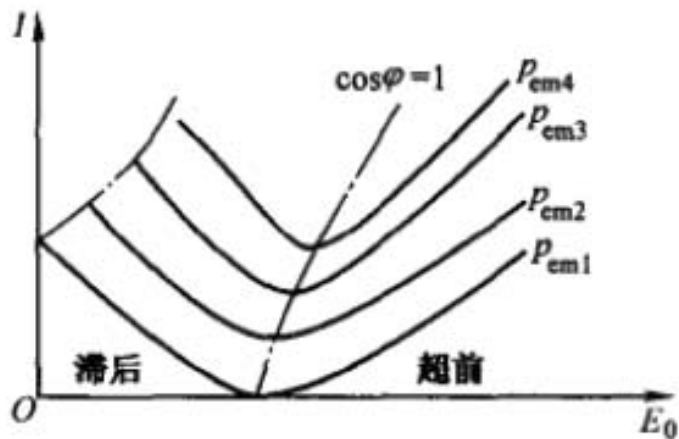
$$P_{em} = \frac{mUE_0}{X_s} \sin\theta = mUI \cos\varphi = C \quad (8-37)$$

# 第四讲永磁同步电机

- 无功调节和V形曲线
  - 1. 当U不变时的无功调节  
(有功不变)

$$P_{em} = \frac{mUE_0}{X_s} \sin\theta = mUI \cos\varphi = C$$

$$\begin{cases} E_0 \sin\theta = C_1 \\ I \cos\varphi = C_2 \end{cases}$$



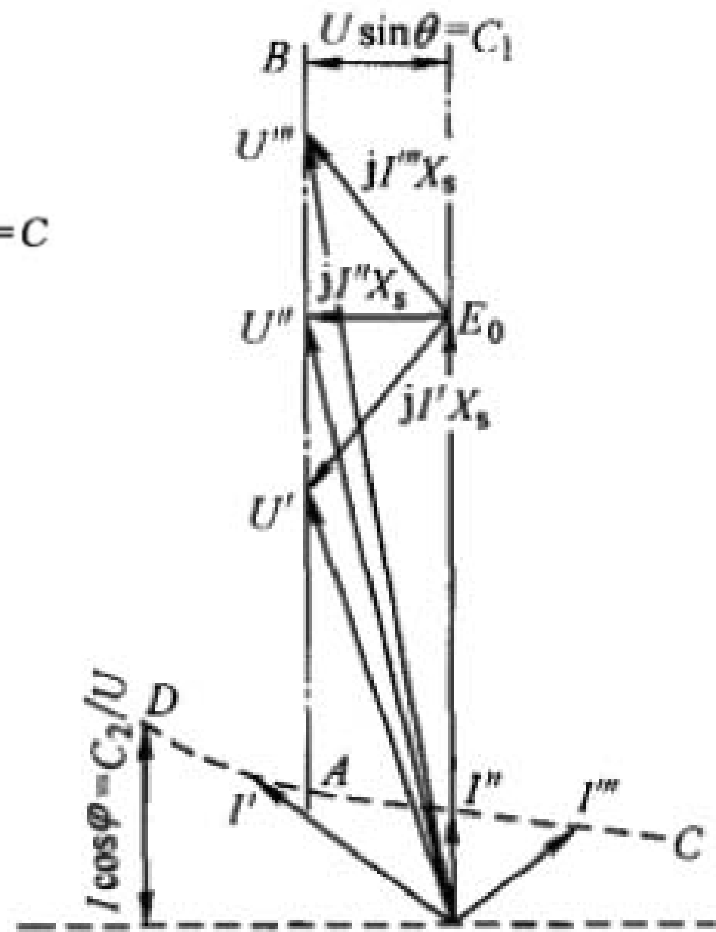
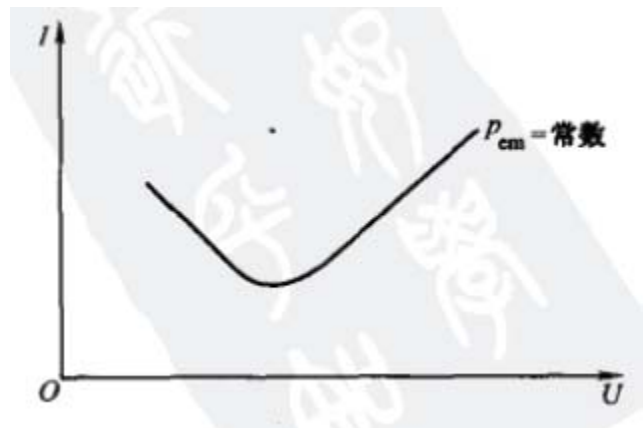
综上所述，在设计阶段，可以通过调节  $E_0$ （调整永磁体用量和每相串联匝数）对永磁同步电动机的功率因数进行调节，使其工作在超前功率因数、单位功率因数和滞后功率因数。在电机运行过程中，可以通过调节供电电压来调节永磁同步电动机的功率因数。

## 第四讲永磁同步电机

- 无功调节和V形曲线
  - 2. 当  $E_0$  不变时的无功调节

（有功不变） 
$$P_{em} = \frac{mUE_0}{X_s} \sin\theta = mUI \cos\varphi = C$$

$$\begin{cases} U \sin\theta = C_1 \\ I \cos\varphi = C_2/U \end{cases}$$



# 第四讲永磁同步电机

## ● 7 永磁同步电机的动态数学模型

为建立正弦波永磁同步电动机的d、q轴数学模型（同步旋转坐标系）

- 1) 忽略电动机铁心的饱和；
- 2) 不计电动机中的涡流和磁滞损耗；
- 3) 电动机的电流为对称的三相正弦波电流。

由此可以得到如下的电压、磁链、电磁转矩机械运动方程(式中各量为瞬态值):

电压方程:

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q + r_1 i_d \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d + r_1 i_q \end{cases}$$

磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + L_{md} i_f = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases}$$



# 第四讲永磁同步电机

## ● 7 永磁同步电机的动态数学模型

电磁转矩：

$$T_{em} = p[\psi_d i_q - \psi_q i_d] = p[L_{md} i_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = p[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

$u_d$ 、 $u_q$ ——定子 d、q 轴电压；

$i_d$ 、 $i_q$ ——定子 d、q 轴电流；

$\psi_d$ ——定子直轴磁链，包括定子直轴电流产生的磁链和永磁体产生的磁链；

$\psi_q$ ——定子交轴磁链，只包括定子交轴电流产生的磁链；

$L_d$ 、 $L_q$ ——定子绕组 d、q 轴电感；

$i_f$ ——永磁体等效励磁电流，其值为  $\psi_f / L_{md}$ ；

$L_{md}$ ——d 轴励磁电感；

$\omega$ ——角频率；

$\psi_f$ ——永磁体基波磁场在定子绕组中产生的磁链，可由  $\psi_f = \sqrt{3} E_0 / \omega$  求取，其中  $E_0$  为空载每相绕组反电动势的有效值（ $abc$  坐标系下）；

# 第四讲永磁同步电机

## ● 7 永磁同步电机的动态数学模型

动态模型的稳态形式:

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q + r_1 i_d \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d + r_1 i_q \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} u_d = -\omega L_q i_q + r_1 i_d \\ u_q = \omega L_d i_d + \omega\psi_f + r_1 i_q \end{cases}$$

$$T_{em} = p[\psi_d i_q - \psi_q i_d] = p[L_{md} i_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = p[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

$$T_{em} = p[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = \frac{p}{\omega} [e_0 i_q + (X_d - X_q) i_d i_q]$$

$$P_{em} = \omega T_{em} = p[e_0 i_q + (X_d - X_q) i_d i_q]$$

# 第四讲永磁同步电机

## ● 8 永磁同步电机的矢量控制----矢量控制原理

电机的速度控制实质是控制转矩，在直流机中改变电枢电流可独立对转矩的控制， $T=C_e\Phi I_a$ ，电枢磁场与励磁磁场始终正交，是解耦的。

但永磁同步电机不同，其电枢磁场与永磁磁场不正交，相互耦合，难以通过控制电枢电流独立控制电机的转矩，但是从静止abc坐标系变换到旋转dq坐标系后，则可以解耦。

电磁转矩的形式为：

$$T_{em} = p[\psi_d i_q - \psi_q i_d] = p[L_{md} i_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = p[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

对于隐极机，如控制 $i_q$ ，可与直流机通过 $I_a$ 控制转矩类似；

对于凸极机，如控制 $i_q$ ，保持 $i_d$ 不变，也与直流机通过 $I_a$ 控制转矩类似；

另外还可以控制 $i_d$ 来实现类似与直流机的励磁控制， $i_q$ ， $i_d$ 到底如何控制取决于需要的特性及相应的控制策略

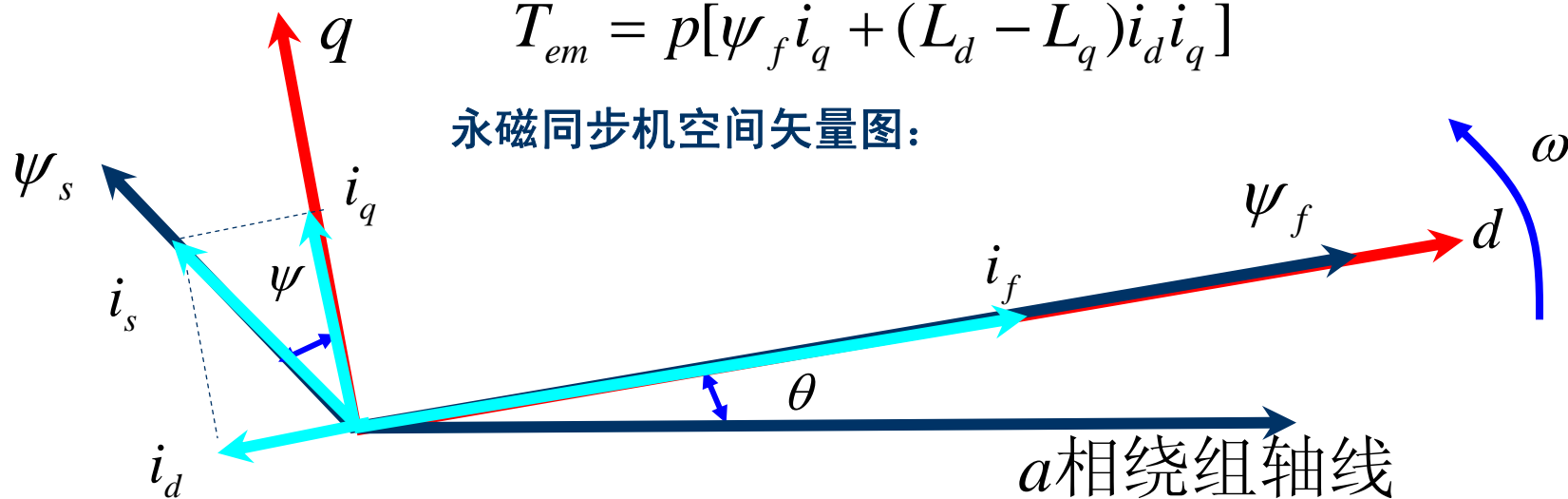
# 第四讲永磁同步电机

## ● 8 永磁同步电机的矢量控制----矢量控制原理

矢量控制实际上是对**定子电流矢量相位和幅值的控制**。当永磁体励磁磁链和 $L_d$ 、 $L_q$ 确定后，电机 $T$ 便取决于定子电流的空间矢量 $i_s$ ，而 $i_s$ 的大小和相位又取决于 $i_d$ 和 $i_q$ ，也就是说控制 $i_d$ 和 $i_q$ 便可以控制电机 $T$ 。一定的转速和转矩对应于一定的 $i_d^*$ 和 $i_q^*$ ，通过这两个电流的独立控制，使实际 $i_d$ 和 $i_q$ 跟踪指令值 $i_d^*$ 和 $i_q^*$ ，便实现了电动机的转矩和转速的控制。

$$T_{em} = p[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

永磁同步机空间矢量图：



# 第四讲永磁同步电机

## ● 8 永磁同步电机的矢量控制----矢量控制原理

由于实际馈入电机电枢绕组的电流是三相交流电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ ，因此，三相电流的指令值 $i^*_a$ 、 $i^*_b$ 、 $i^*_c$ 必须由下面的变换从 $i^*_d$ 、 $i^*_q$ 得到：

$$\begin{bmatrix} i'_a \\ i'_b \\ i'_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix}$$

转子位置信号由位置传感器(如光电编码器或旋转变压器等)提供。通过电流控制环，可以使电机实际输入三相电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ ，与给定的指令值 $i^*_a$ 、 $i^*_b$ 、 $i^*_c$ 一致，从而实现了电动机转矩的控制。

需要指出的是，上述电流矢量控制对电动机稳态运行和瞬态运行都适用。而且， $i_d$ 、 $i_q$ 是各自独立控制的，因此更便于实现各种先进的控制策略。

# 第四讲永磁同步电机

- 8 永磁同步电机的矢量控制----矢量控制极限问题
- 正弦波永磁同步电动机的控制运行与系统中逆变器密切相关，电动机的运行性能要受到逆变器的制约。
- 最为明显的是电动机相电压有效值的极限值 $U_{lim}$ 和相电流有效值的极限值 $I_{lim}$ 要受到逆变器直流侧电压和逆变器的最大输出电流限制。
- 当逆变器直流侧电压最大值为 $U_c$ 时， $\gamma$ 接的电动机可达到的最大基波相电压有效值为：

$$U_{lim} = \frac{U_c}{\sqrt{3}\sqrt{2}} = \frac{U_c}{\sqrt{6}}$$

而在dq轴系统中的电压极限值： $U_{lim}=1.732 \times U_c$

# 第四讲永磁同步电机

- 8 永磁同步电机的矢量控制----电压极限问题

电机稳定运行时，电压矢量的幅值  $U_s = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$

代入dq轴下稳态电压：

$$\begin{cases} u_d = -\omega L_q i_q + r_1 i_d \\ u_q = \omega L_d i_d + \omega \psi_f + r_1 i_q \end{cases}$$

忽略电阻，简化得：

$$U_s = \sqrt{(-\omega L_q i_q)^2 + (\omega L_d i_d + \omega \psi_f)^2}$$

代入电压极限：

$$(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2 = (U_{\text{lim}} / \omega)^2$$

# 第四讲永磁同步电机

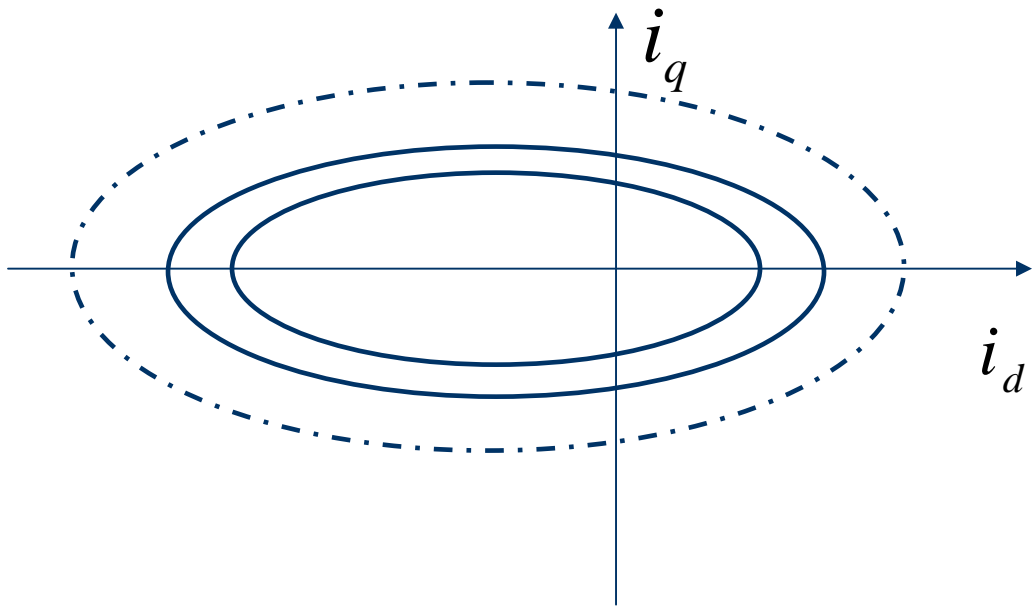
## ● 8 永磁同步电机的矢量控制----电压极限轨迹

电压极限轨迹方程： $(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2 = (U_{\text{lim}} / \omega)^2$

隐极机，圆方程

凸极机，椭圆方程

电机稳定运行时，对应某一转速，定子电流矢量不能超过该转速下的椭圆轨迹，转速提高椭圆变小





# 第四讲永磁同步电机

## ● 8 永磁同步电机的矢量控制----电流极限问题

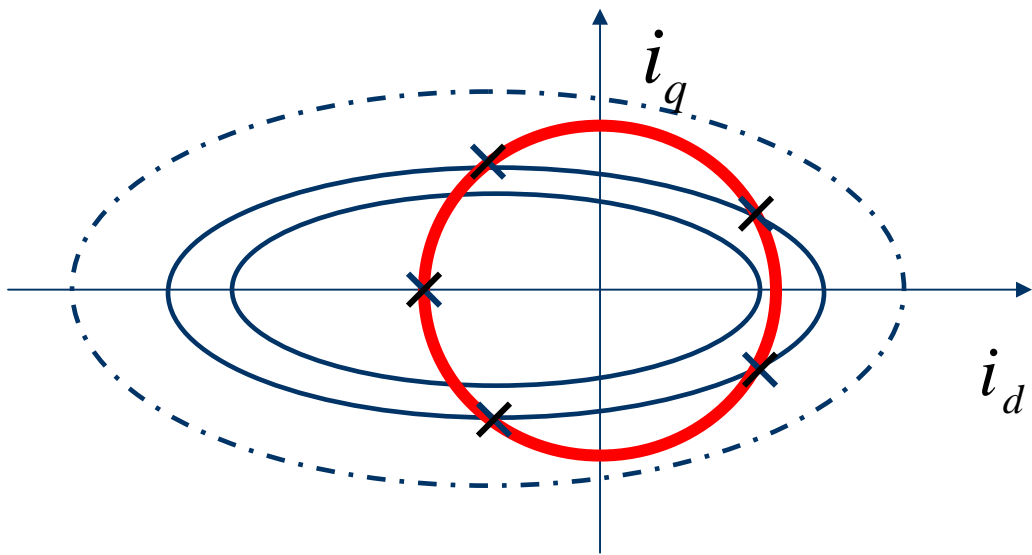
电机稳定运行时，  
电流矢量的幅值

$$i_{\text{lim}} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$$

其中： $i_{\text{lim}} = \sqrt{3}I_{\text{lim}}$ ， $I_{\text{lim}}$ 为电机个达到的最大相电流有效值

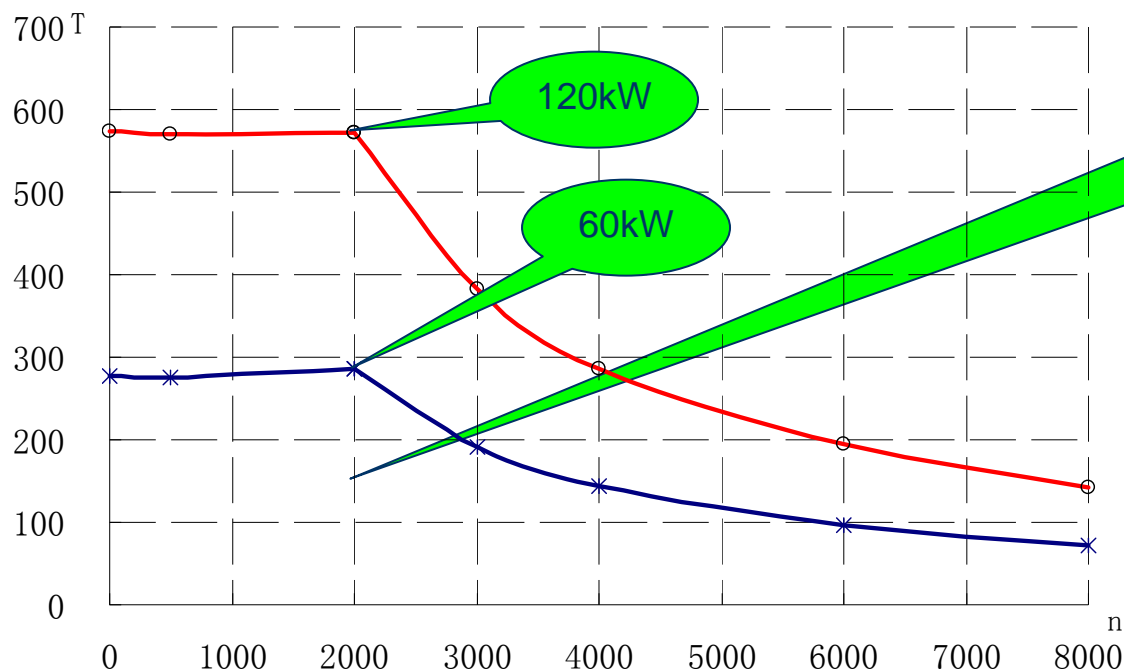
电流极限轨迹为一园轨迹

电机稳定运行时，电流电压的空间矢量均不能超出相应轨迹范围，因此某一转速下电机只能运行在轨迹之内。



# 第四讲永磁同步电机

- 8 永磁同步电机的矢量控制----恒转矩运行电流轨迹
  - 永磁同步电机工作特性曲线:
  - 例:某电机转速0-8000rpm, 低速转矩275NM, 高速恒功率60kW, 1分钟2倍过载。



# 第四讲永磁同步电机

- 8 永磁同步电机的矢量控制----恒转矩运行电流轨迹
- 为分析恒转矩运行时电流变化轨迹，将转矩公式标么值化：

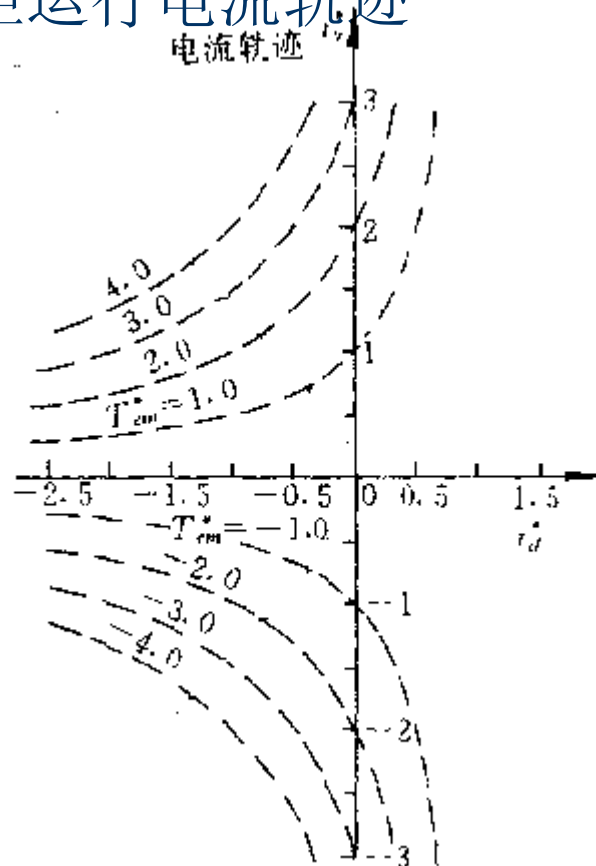
$$T_{em} = p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]$$

对于隐极机：  $T_{em} = p\psi_f i_q$ ， 电流轨迹为平行于d轴直线

对于凸极机， 标么值化：  $T_{em}^* = i_q^*(1 - i_d^*)$ ，

为关于d轴对称曲线

转矩基值为  $T_b = p\psi_f i_b$ ； 电流基值为  $i_b = \psi_f / i_q (L_q - L_d)$



# 第四讲永磁同步电机

## ● 8 永磁同步电机的矢量控制----最大转矩的电流轨迹

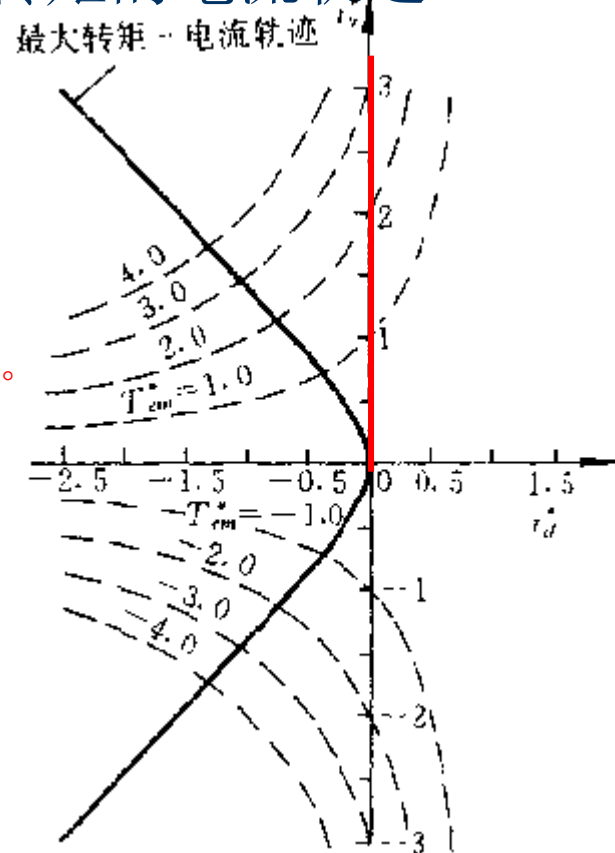
恒转矩时电流轨迹存在最小定子电流矢量，电流越小，效率越高，逆变器容量越低。

恒转矩轨迹上距离坐标原点最近的点，即为产生该转矩时所需的最小电流。把产生不同转矩值所需的最小电流点连起来，形成电机的T/I轨迹

对 $L_d=L_q$ 电机，由于磁阻转矩为零，其最大T/I轨迹就是q轴。  
 $i_d=0$

凸极永磁同步电动机的最大T/I轨迹线接近45度的直线。

q轴代表永磁转矩，恒转矩曲线上各点是永磁转矩和磁阻转矩的合成。当转矩较小时，最大T/I轨迹靠近q轴，表明永磁转矩起主导作用。当转矩增大后，与电流平方成正比的磁阻转矩要比与电流成线性关系的永磁转矩增加得更快，故最大T/I轨迹越来越偏离q轴。进一步的研究发现，定子齿部局部饱和将导致定子电流增加时电动机最大T/I轨迹向q轴靠近。



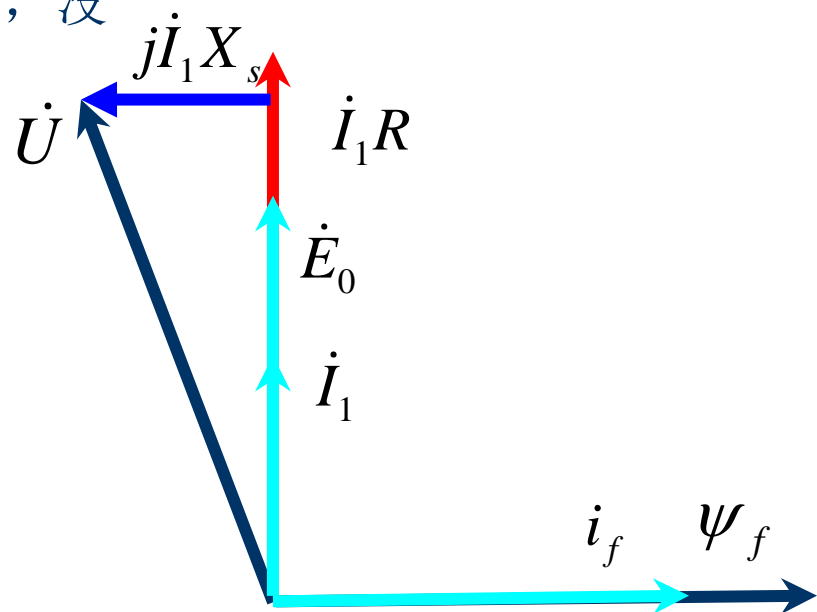
# 第四讲永磁同步电机

- 9 永磁同步电机的矢量策略
  - 永磁同步电机用途不同，定子电流矢量控制的方法和策略也不同，各有优缺点
    - $I_d=0$ 控制
    - 最大T/I控制
    - 弱磁控制
    - 最大 $P_2$ 控制
    - 最优电流控制

# 第四讲永磁同步电机

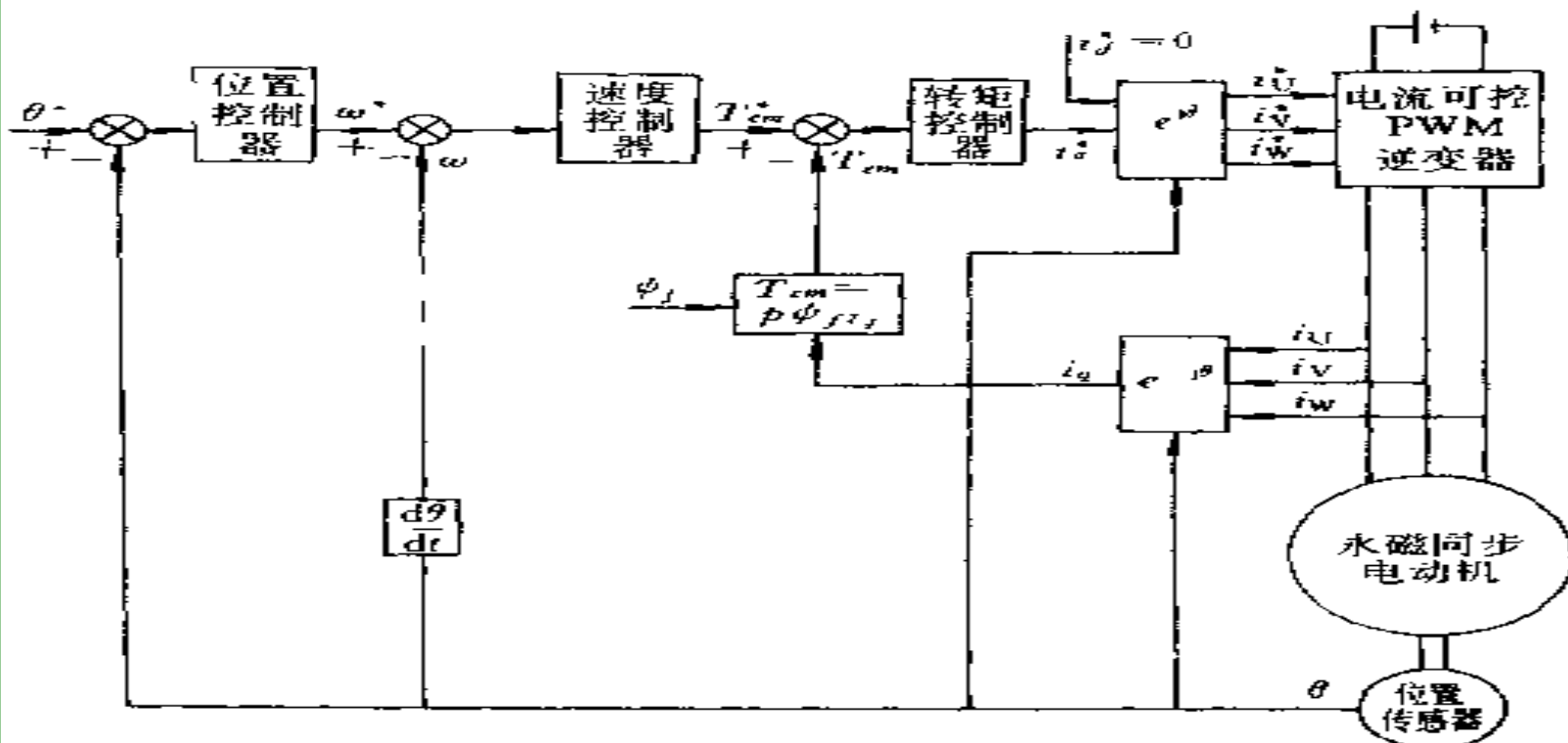
- 9 永磁同步电机的矢量策略----  $I_d=0$ 控制，隐极机常用
- $I_d=0$ 控制，定子电流只有交轴分量，且定子磁动势空间矢量与永磁体磁场空间矢量正交，电机转矩中只有永磁转矩分量，没有利用磁阻转矩，因此适合隐极机：

$$\begin{aligned} T_{em} &= p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \\ &= p\psi_f i_q \end{aligned}$$



# 第四讲永磁同步电机

- 9 永磁同步电机的矢量策略----  $I_d=0$ 控制，隐极机常用
  - $I_d=0$ 控制，控制系统原理图



# 第四讲永磁同步电机

- 9 永磁同步电机的矢量策略----  $I_d=0$ 控制，隐极机常用
  - $I_d=0$ 控制，电机的最高转速：

由电压极限轨迹： $(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2 = (U_{\text{lim}} / \omega)^2$ ，取  $i_d = 0$  得：
$$\omega_b = \frac{U_{\text{lim}}}{\sqrt{(L_q i_q)^2 + \psi_f^2}}$$

又由： $T_{em} = p \psi_f i_q$ ， $i_q = \frac{T_{em}}{p \psi_f}$ ，代入：得：
$$\omega_b = \frac{U_{\text{lim}}}{\sqrt{\left(\frac{T_{em} L_q}{p \psi_f}\right)^2 + \psi_f^2}} = \frac{p U_{\text{lim}}}{\sqrt{\left(\frac{T_{em} L_q}{\psi_f}\right)^2 + (p \psi_f)^2}}$$

最高机械速度：
$$\Omega_b = \frac{\omega_b}{p} = \frac{U_{\text{lim}}}{p \sqrt{\left(\frac{T_{em} L_q}{\psi_f}\right)^2 + (p \psi_f)^2}}$$

- 说明  $I_d=0$  控制，电机最高转速（转折速度）与逆变器供电电压成正比，与转矩成反比



# 第四讲永磁同步电机

- 9 永磁同步电机的矢量策略---- 最大T/I控制，凸极机常用
  - 有单位电流最大转矩控制，对隐极机而言也就是Id=0控制

最大T/I控制时， $\frac{\partial T_{em} / i_s}{\partial i_d} = 0$ ，且 $\frac{\partial T_{em} / i_s}{\partial i_q} = 0$   
电流应满足：

将 $T_{em} = p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]$ 和 $i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ 代入，求得：

$$i_d = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_q^2}}{2(L_d - L_q)} = \frac{\psi_f - \sqrt{\psi_f^2 + 4(\rho - 1)^2 L_d^2 i_q^2}}{2(\rho - 1)L_d}$$

$\rho = L_q / L_d$ 为电机的凸极率

标么值化：

$$\text{电流基值为 } i_b = \psi_f / i_q (L_q - L_d), \quad i_d^* = \frac{1 - \sqrt{1 + 4(\rho - 1)^2 L_d^2 i_q^2 / \psi_f^2}}{2}$$

# 第四讲永磁同步电机

## ● 9 永磁同步电机的矢量策略---- 最大T/I控制，凸极机常用

代入 $T_{em}^* = i_q^* (1 - i_d^*)$ 得

交、直轴电流与电磁转矩的关系：

$$T_{em}^* = \sqrt{i_d^* (1 - i_d^*)^3}$$

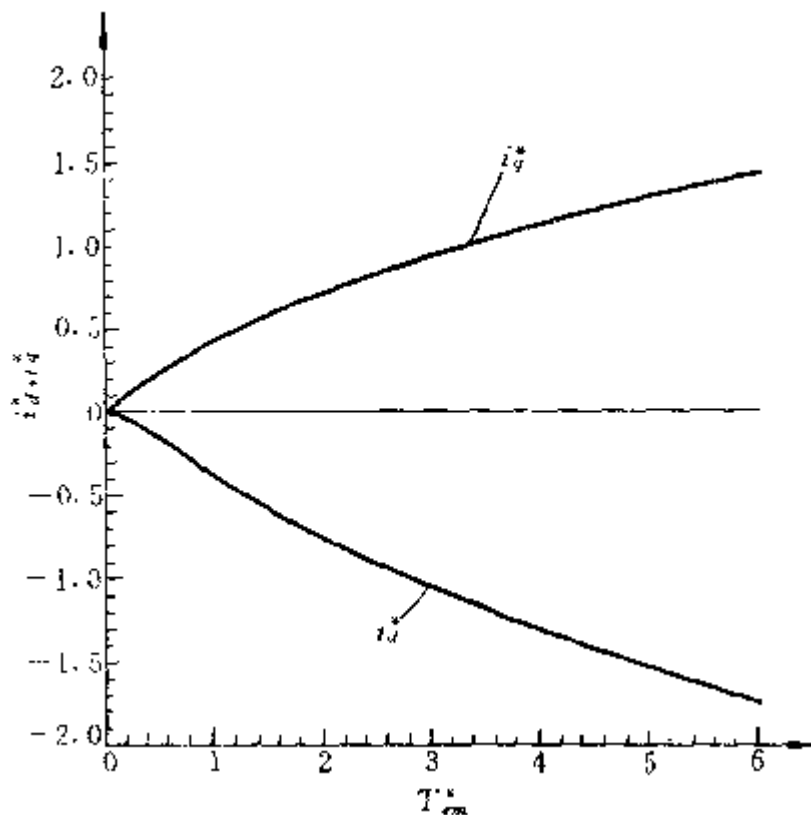
$$T_{em}^* = \frac{i_d^*}{2} (1 + \sqrt{1 + 4i_q^{*2}})$$

反过来，产生不同的转矩，

按照最大T/I要求，所需的电流为：

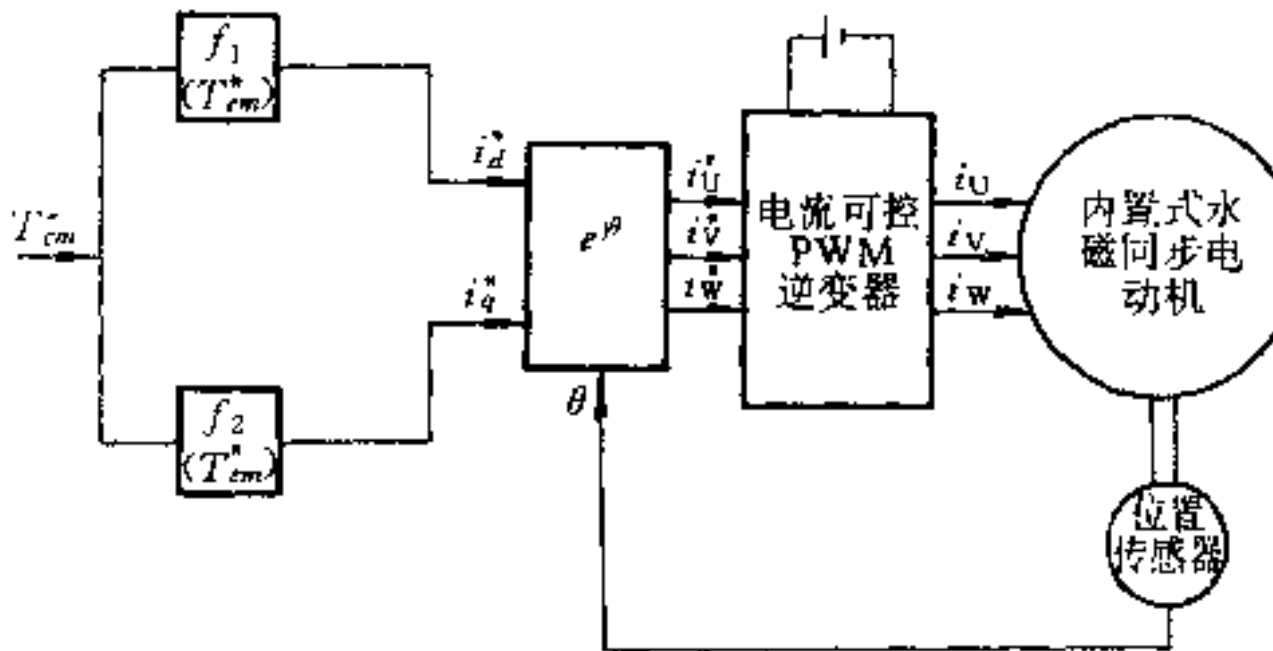
$$i_d^* = f_1(T_{em}^*);$$

$$i_q^* = f_2(T_{em}^*)$$



# 第四讲永磁同步电机

- 9 永磁同步电机的矢量策略---- 最大T/I控制，凸极机常用  
最大T/I控制系统转矩控制环节原理图：

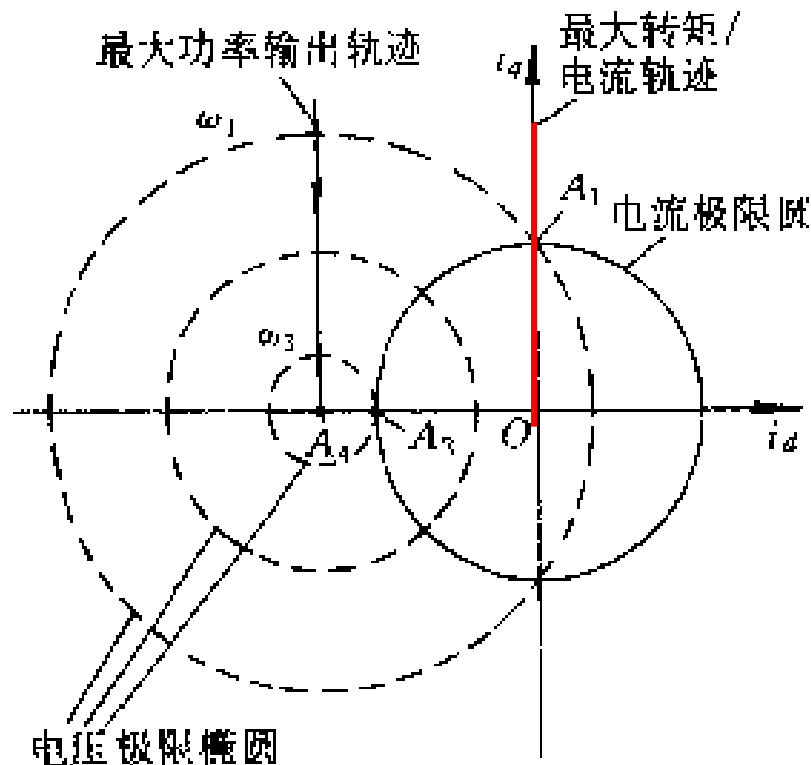


# 第四讲永磁同步电机

## ● 9 永磁同步电机的矢量策略---- 最大T/I控制，凸极机常用

最大T/I控制的电流极限图：

- 隐极机：最大T/I迹与电流极限圆相交于A1点，过A1点的电压极限圆对应的速度 $\omega_1$ 在最大T/I迹的OA1段上，电机以该轨迹上的各点作恒转矩运行，过该点电压极限圆对应的转速即为该转矩下的转折速度，
- 转矩值越大，转折速度越低。由于电压和电流不能超过各自的极限，故A1电机最大转矩，此时电机的电压和电流均达到了极限值。

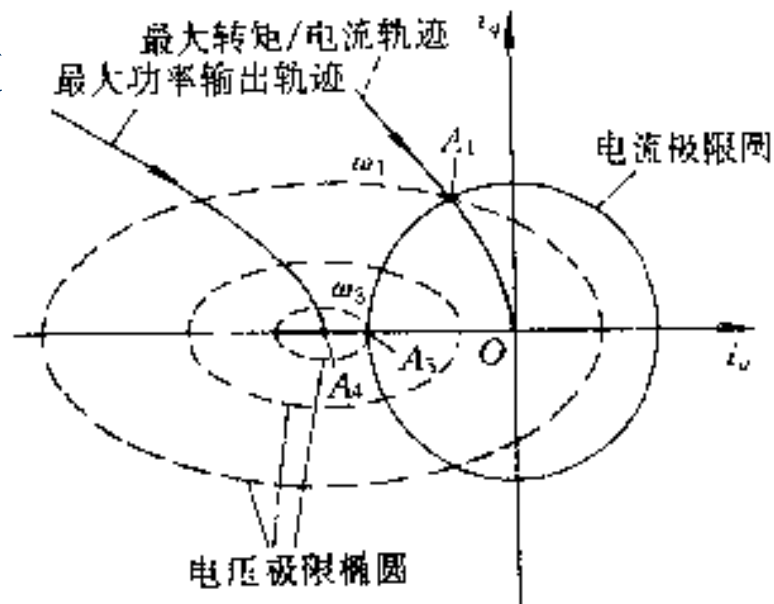


# 第四讲永磁同步电机

## ● 9 永磁同步电机的矢量策略---- 最大T/I控制，凸极机常用

最大T/I控制的电流极限图：

- 凸极机：最大T/I迹与电流极限圆相交于A1点，过A1点的电压极限椭圆对应的速度 $\omega_1$ 在最大T/I迹的OA1段上，电机以该轨迹上的各点作恒转矩运行，过该点的电压极限椭圆对应的转速即为在该转矩下的转折速度，
- 转矩值越大，转折速度越低。由于电压和电流不能超过各自的极限，故A1电机最大转矩，此时电机的电压和电流均达到了极限值。



# 第四讲永磁同步电机

- 9 永磁同步电机的矢量策略---- 弱磁控制思想
- 他励直流电动机可通过降低励磁电流而弱磁扩速。
- 永磁同步电动机由永磁体励磁而无法调节，只有通过定子直轴去磁电流来维持高速运行时电压的平衡，达到弱磁扩速的目的。

永磁同步电机弱磁扩速本质

$$U_{\text{lim}} = \omega \sqrt{(\rho L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2}$$

当电机电压达到逆变器极限电压后，要继续升速并维持电压平衡关系，只有调节 $i_d$ 、 $i_q$ ，增加 $i_d$ 去磁和减小 $i_q$ ，都得到“弱磁”效果，前者“弱磁”能力与 $L_d$ 相关，后者与 $L_q$ 相关。

由于电机电流也有极限，增加 $i_d$ 而同时保证 $i_s$ 不超限， $i_q$ 应相应减小。因此，弱磁控制时电机通常是恒功率运行

# 第四讲永磁同步电机

- 9 永磁同步电机的矢量策略---- 弱磁控制中的最大功率控制
- 在转折速度以上的弱磁扩速时，电机输出最大功率时的电流为：

$$\frac{dP_1}{di_s} = 0, \text{ 而 } P_1 = U_d i_d + U_q i_q, \text{ 结合电压极限轨迹: } (L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2 = (U_{\text{lim}} / \omega)^2$$

$$\text{可解的: } i_d = -\frac{\psi_f}{L_d} + \Delta i_d; \quad i_q = \frac{\sqrt{(U_{\text{lim}} / \omega)^2 - (L_d \Delta i_d)^2}}{L_q}$$

$$\text{其中: 隐极机 } \Delta i_d = 0; \quad \text{凸极机 } \Delta i_d = \frac{\rho \psi_f - \sqrt{(\rho \psi_f)^2 + 8(\rho - 1)^2 (U_{\text{lim}} / \omega)^2}}{4(\rho - 1) L_d}$$

# 第四讲永磁同步电机

- 9 永磁同步电机的矢量策略---- 弱磁控制中的最大功率控制
- 实质是上述各种控制策略在不同转速下的组合



# 第四讲永磁同步电机

- 9 永磁同步电机的矢量策略---- 最佳电流控制
- 在转折速度以上的弱磁扩速时，电机输出最大功率时的电流为：

