

主要内容

一、几个术语解释

（极对数、电角度、电角频率、相电压、线电压、反电动势）

二、无刷直流电机的运行原理和基本控制方法

（运行原理、数学模型、换流模式、控制方法）

三、永磁同步电机的运行原理和基本控制方法

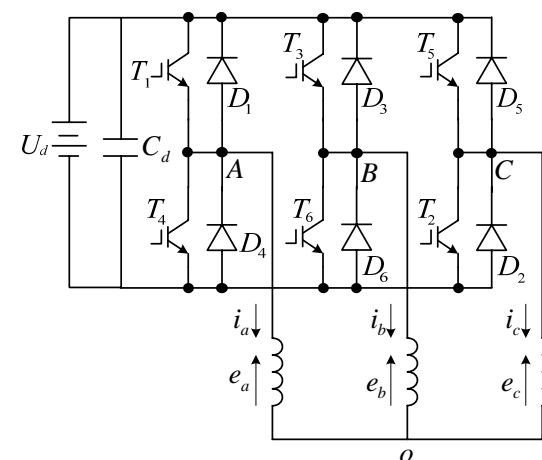
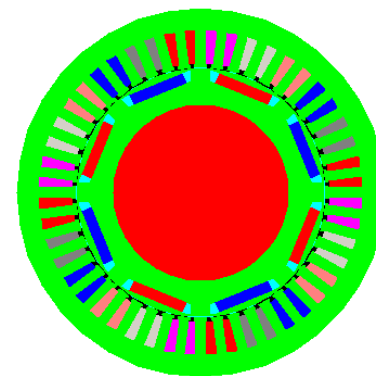
（矢量控制基础、数学模型、控制方法、旋转变压器）

四、两种电机及其控制系统的对比

（转子位置、三相电流、转矩脉动、调速范围）

几个术语解释

- 极对数 ($2p$) : 电机转子中N-S极的对数, 2, 3, 4,
- 相数 (m) : 电机绕组个数, 3, 6, 12,
- 电角度 (θ_e) /机械角度 (θ) : $\theta_e = p \cdot \theta$ $\theta_e = \int \omega_e dt$
- 电角频率 (ω_e) /机械角频率 (Ω) : $\omega_e = p \cdot \Omega$
- 电角频率与电机转速 (n) : $n = 60\omega_e / p$
- 极 ($2p$) 槽 (Z) 配合: $Z/2p$
- 相电压: 电机相绕组对电机中性点电压
- 线电压: 电机两相绕组之间电压
- 反电动势: 电机到拖时某一转速下对应电机线电压峰值



主要内容

一、几个术语解释

（极对数、电角度、电角频率、相电压、线电压、反电动势）

二、无刷直流电机的运行原理和基本控制方法

（运行原理、数学模型、换流模式、控制方法）

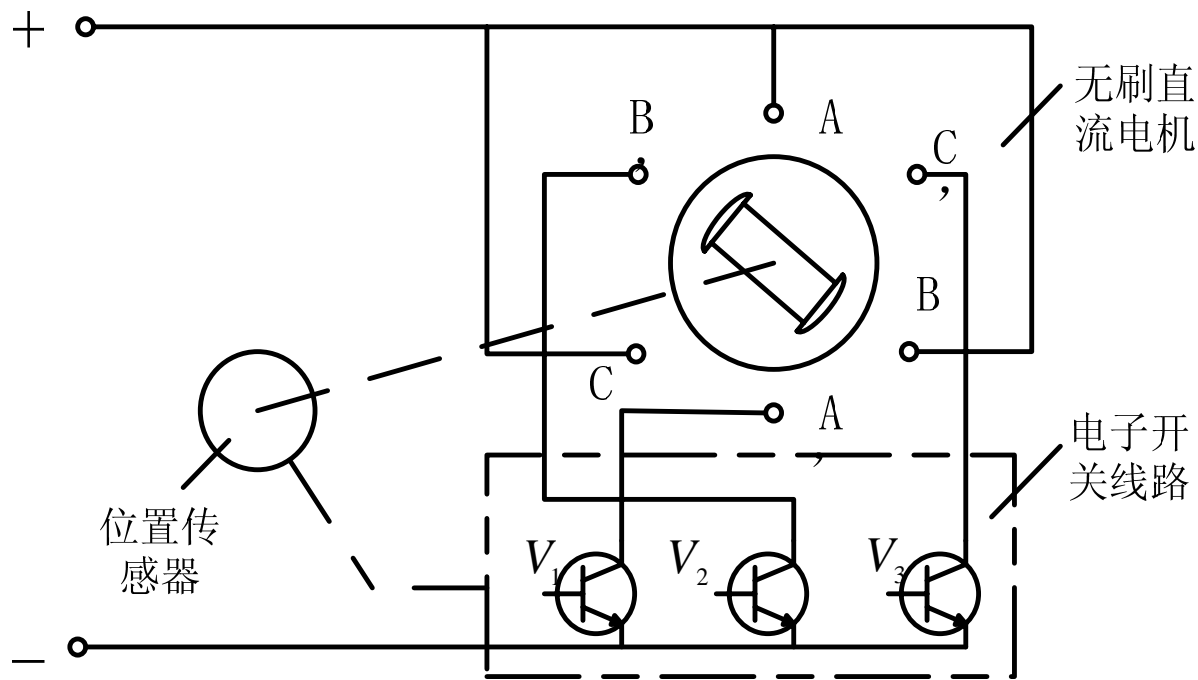
三、永磁同步电机的运行原理和基本控制方法

（矢量控制基础、数学模型、控制方法、旋转变压器）

四、两种电机及其控制系统的对比

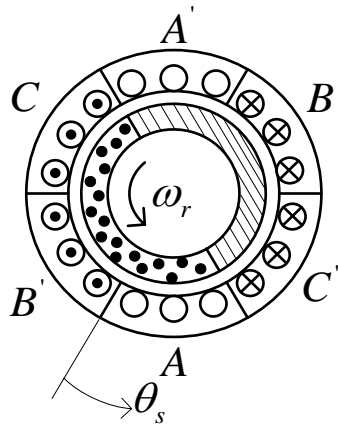
（转子位置、三相电流、转矩脉动、调速范围）

无刷直流电机的组成

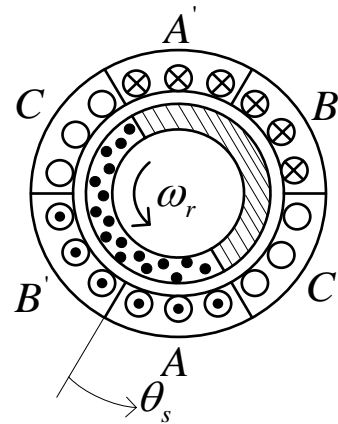


- ◆ 无刷直流电机组成部分：电机本体、位置传感器、电子开关线路；
- ◆ 电机本体在结构上与交流永磁电机相似；
- ◆ 电子开关线路由功率逻辑开关单元和位置传感器信号处理单元两部分组成；
- ◆ 电子开关线路导通次序是与转子转角同步的，起机械换向器的换向作用。

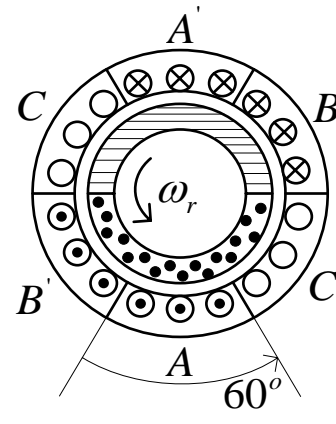
120度导通时转子位置与电流换相关系



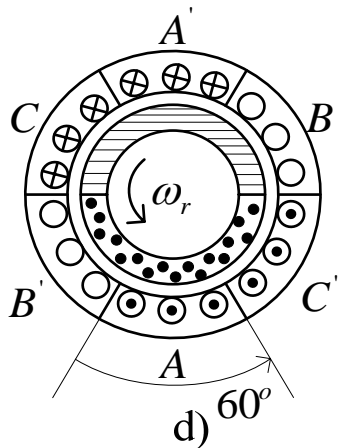
a)



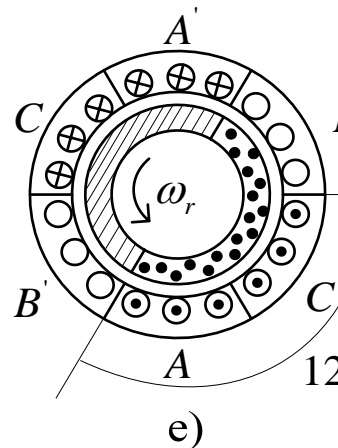
b)



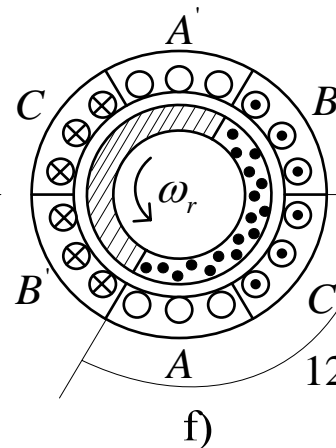
c)



d)



e)



f)

a) 0度 (换相前)

b) 0度 (换相后)

c) 60度 (换相前)

d) 60度 (换相后)

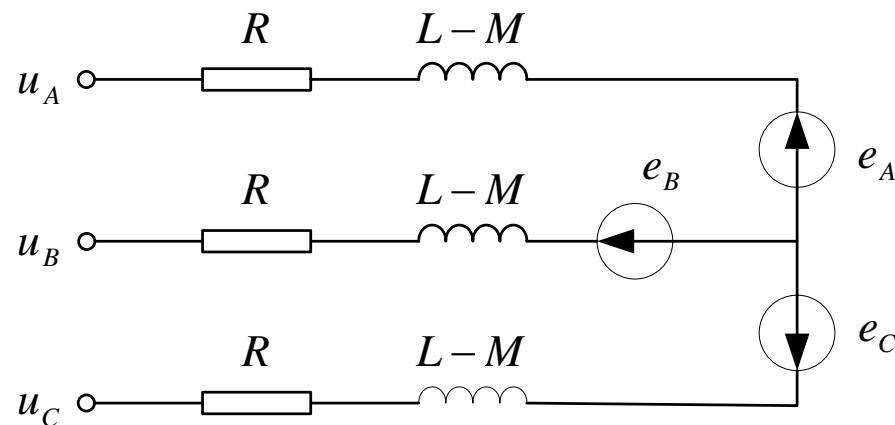
e) 120度 (换相前)

f) 120度 (换相后)

无刷直流电机的数学模型

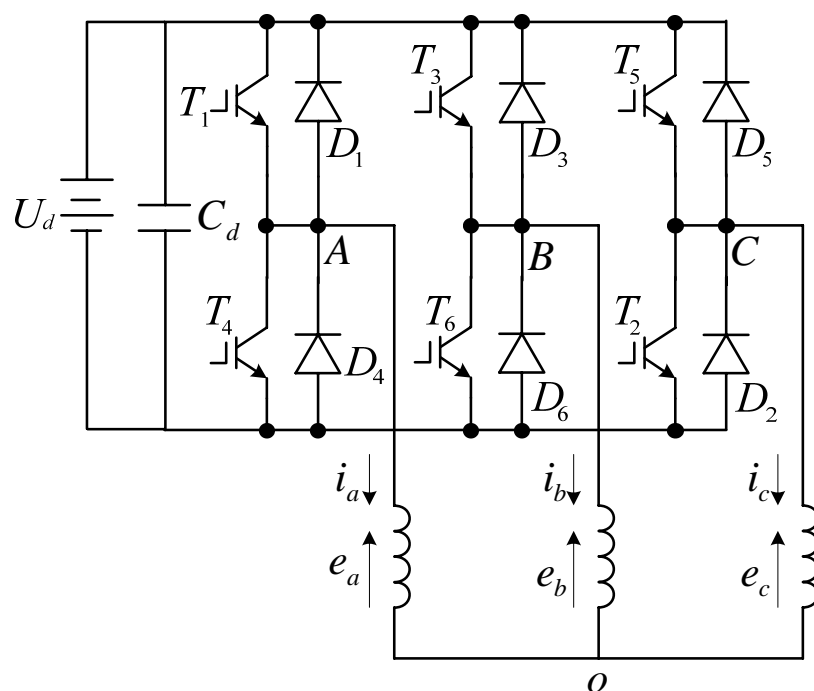
采用理想化的直流无刷电机用状态方程表示的数学模型，电流为理想的方波，反电势为理想的梯形波，并作如下假设：

- (1) 不计磁路饱和；
- (2) 电机涡流损耗和磁滞损耗；
- (3) 忽略定子电流的电枢反应；
- (4) 定子绕组采用Y形接法。



无刷直流电机的等效电路

无刷直流电机的电路模型



逆变器—永磁无刷电机系统示意图

U_d 为直流电源 (V) ;

C_d 为中间直流回路支撑
(滤波) 电容 (F) ;

$T_1 \sim T_6$ 为6个功率开关管;

$D_1 \sim D_6$ 为6个续流二极管;

采用 120° 的两两导通方式

, 对 $T_1 \sim T_6$ 分别在各自
 120° 导通时间内根据不同的
调制方式进行PWM调制。

无刷直流电机的数学模型

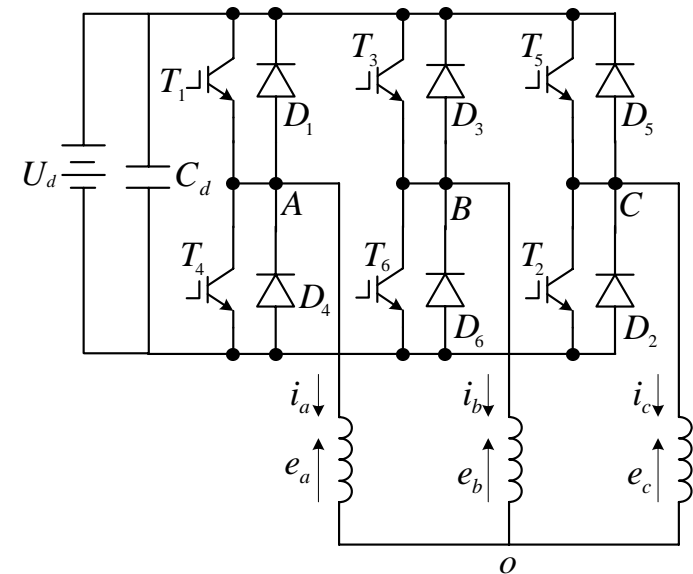
电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ON} \\ u_{ON} \\ u_{ON} \end{bmatrix}$$

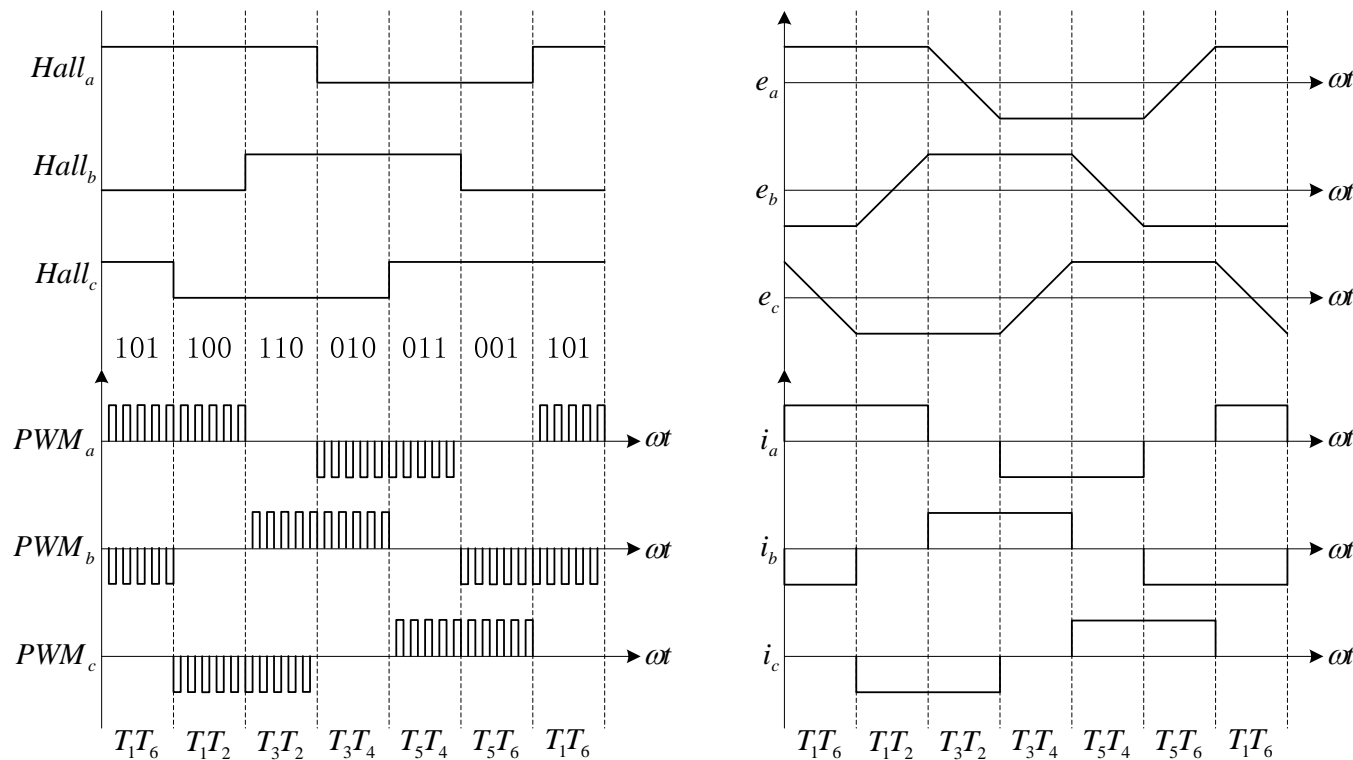
$$u_{ON} = \frac{(e_{AN} + e_{BN} + e_{CN}) - (e_A + e_B + e_C)}{3}$$

转矩方程: $T_{em} = \frac{p_n}{\omega_r} (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C)$

运动方程: $T_{em} - T_L = \frac{1}{p_n J} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + f_r \omega_r$



无刷直流电机换流关系



无刷直流电机的电流和感应电动势具有以下特点:

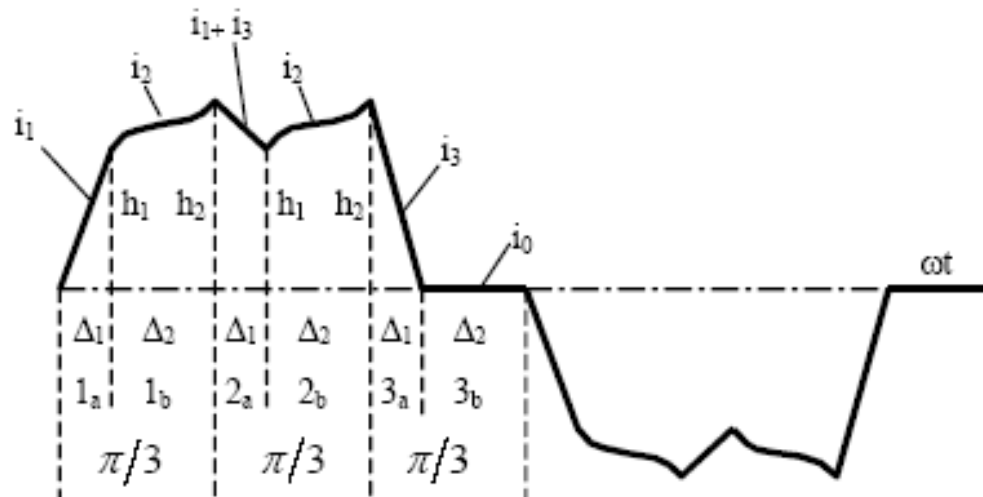
(1) 感应电动势为三相对称的梯形波, 其波顶宽为 120°

(2) 电流为三相对称的方波;

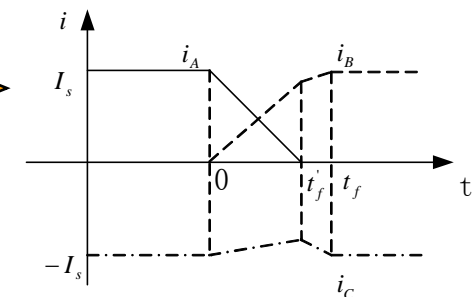
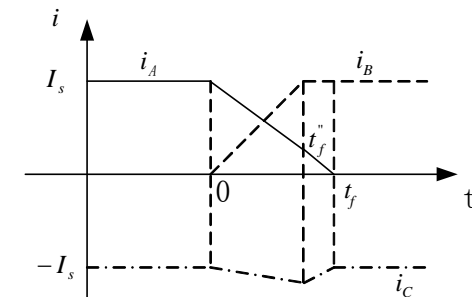
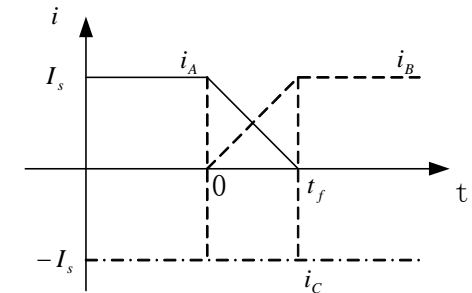
(3) 梯形波反电势与方波电流在相位上严格同步。

HALL状态与PWM、三相反电势和三相电流的对应关系

无刷直流电机的相电流分析

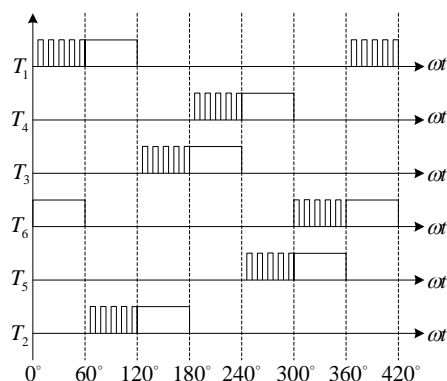


- The Periods 1a, 2a, and 3a are identical, and similarly for Periods 1b, 2b, and 3b;
- The current waveform during Period 1b is the same as that during Period 2b;
- The value of the current during Period 2a is the sum of the currents which flow during Periods 1a and 3a;
- The diode conduction time, Δ_1 , is most significantly influenced by the supply voltage, the back-emf, the winding inductance, and the load.

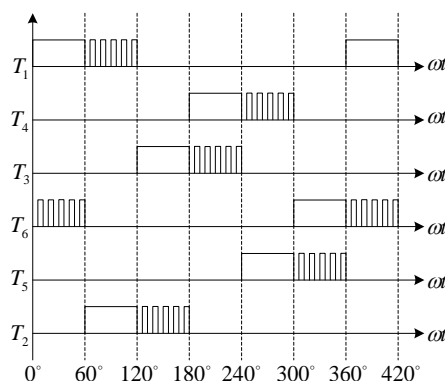


无刷直流电机的换流模式

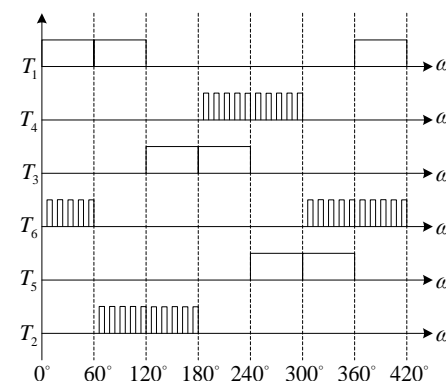
(1) pwm-on型调制方式



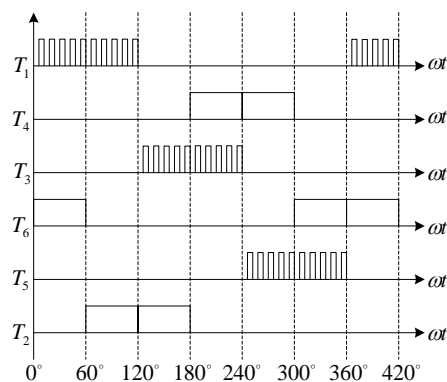
(2) on-pwm型调制方式



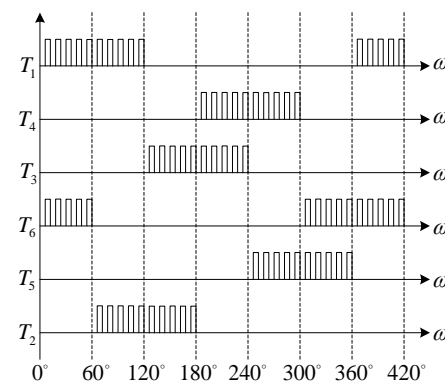
(3) H-on-L-pwm型调制方式



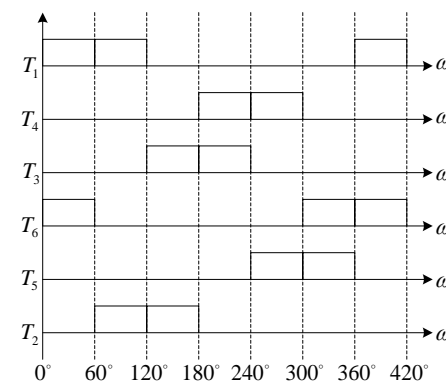
(4) H-pwm-L-on型调制方式



(5) L-pwm-H-pwm型调制方式



(6) on-on型调制方式

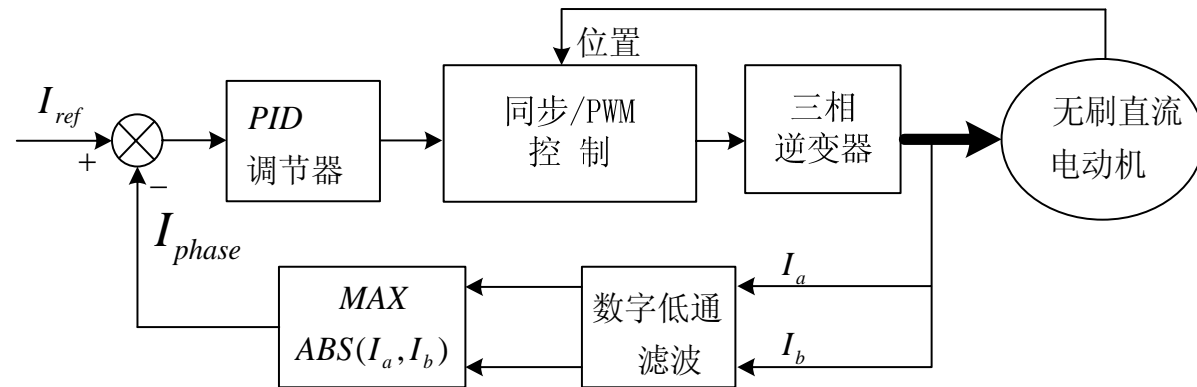


无刷直流电机的换流模式对比

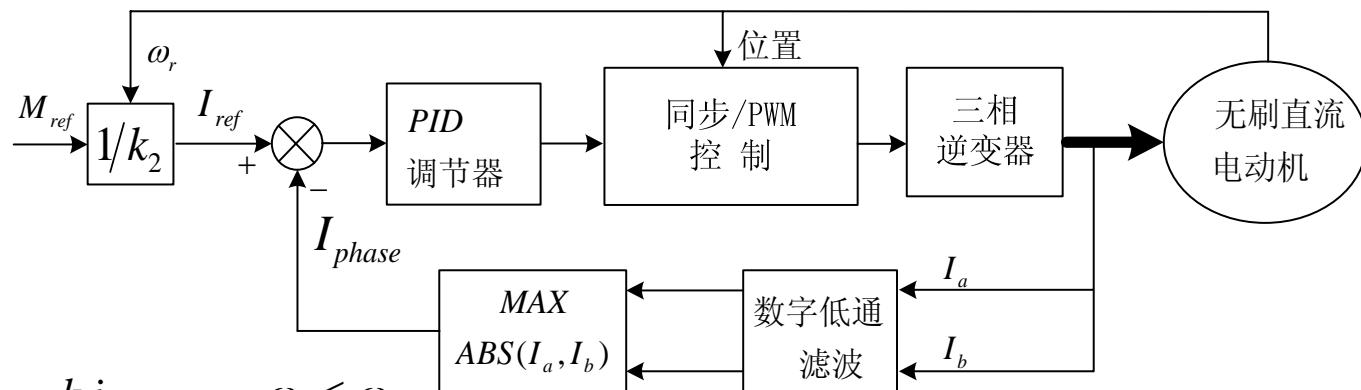
- (1) pwm-on换相转矩脉动最小，非换向相电流脉动最小；
- (2) on-pwm换相转矩脉动和非换相相电流均比pwm-on大；
- (3) H-pwm-L-on下桥换相转矩脉动和电流脉动与on-pwm相等，上桥换相转矩脉动和电流脉动与pwm-on相等，且均较小；H-on-L-pwm与H-pwm-L-on正好相反；
- (4) H-pwm-L-pwm换相转矩脉动最大，非换向相电流脉动也最大。
- (5) 功率管开通，转矩脉动相同；功率管关断，单侧调制转矩脉动大于双侧调制转矩脉动；
- (6) 单侧调制存在相见续流现象，换相时间长；双侧调制引入直流母线电压到续流回路，产生反电压，换相时间短；
- (7) 单侧调制较双侧调制损耗小。

无刷直流电机的基本控制系统

电流闭环控制结构



转矩闭环控制结构

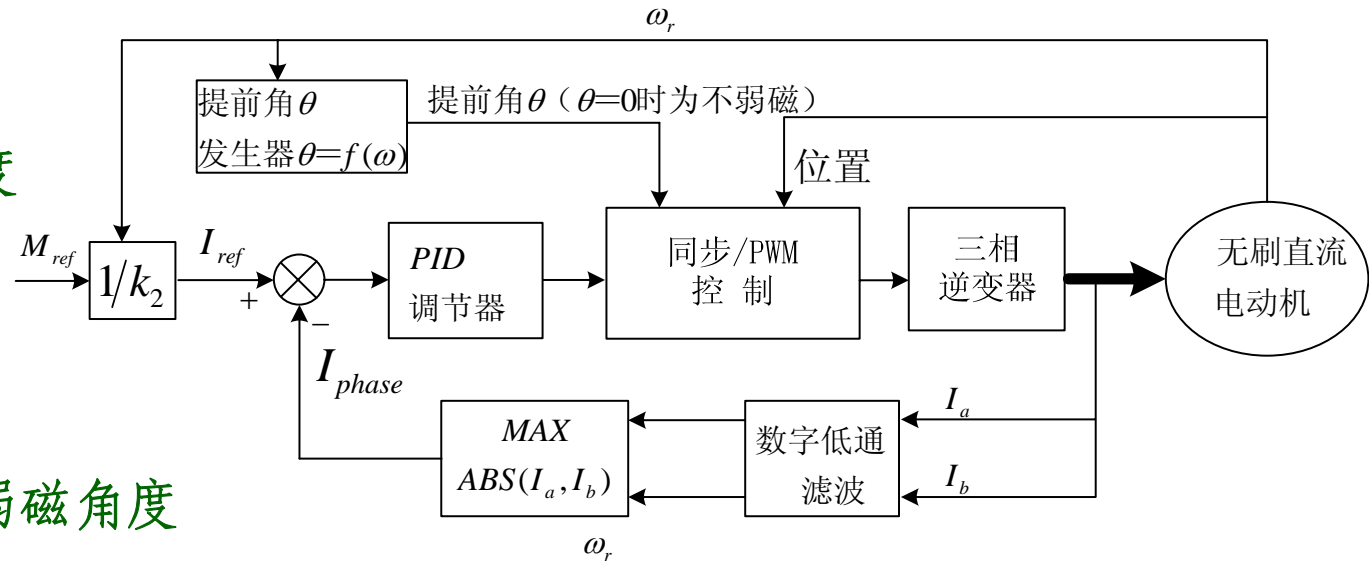


$$T_{em} = \begin{cases} K_m \cdot \phi_m \cdot i_A = k_1 i_A & \omega_r \leq \omega_{re} \\ K_m \cdot \phi_m \cdot \frac{\omega_r}{\omega_{re}} \cdot i_A = k_1 \cdot \frac{\omega_r}{\omega_{re}} \cdot i_A & \omega_r > \omega_{re} \end{cases}$$

无刷直流电机的基本控制系统

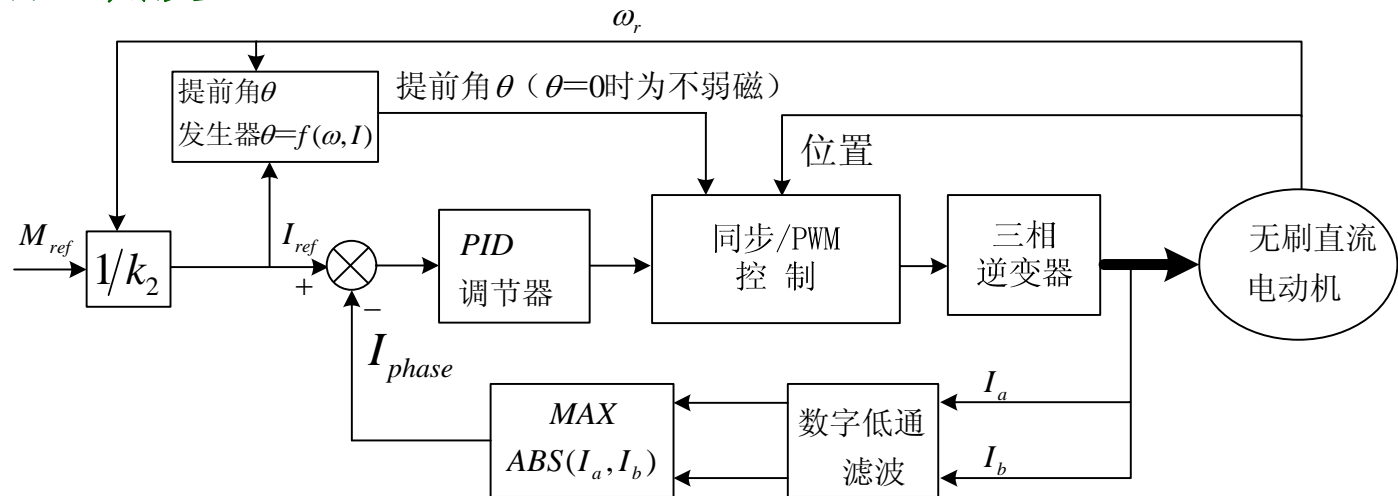
转矩闭环控制结构

依据转速控制弱磁角度



转矩闭环控制结构

依据转速和转矩控制弱磁角度



主要内容

一、几个术语解释

（极对数、电角度、电角频率、相电压、线电压、反电动势）

二、无刷直流电机的运行原理和基本控制方法

（运行原理、数学模型、换流模式、控制方法）

三、永磁同步电机的运行原理和基本控制方法

（矢量控制基础、数学模型、控制方法、旋转变压器）

四、两种电机及其控制系统的对比

（转子位置、三相电流、转矩脉动、调速范围）

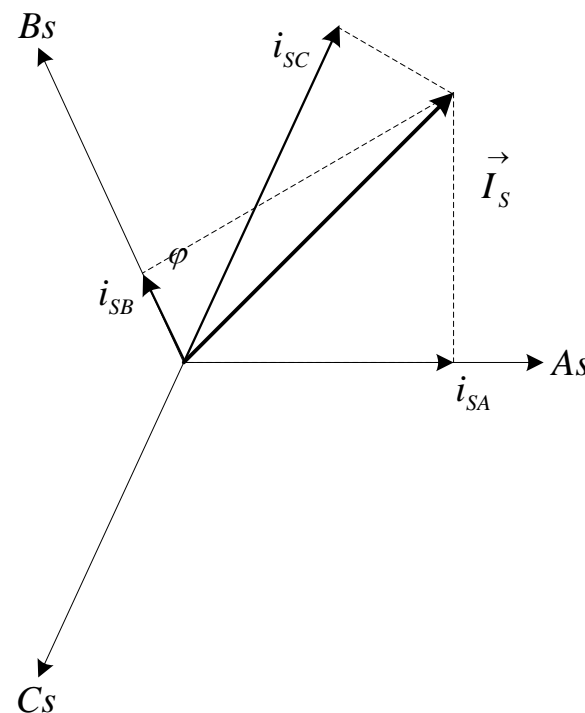
矢量控制基础——矢量的基本含义

永磁电机定子绕组的电压、电流、磁链等物理量都是随时间变化的，分析时常用时间相量来表示，但如果考虑到它们所在绕组的空间位置，也可以如图所示空间向量表示。矢量指得是定子电压、电流、磁链等空间矢量，该类矢量通过三相定子变量合成得到。

$$\begin{cases} i_{SA} = I_m \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi) \\ i_{SB} = I_m \cdot \sin(\omega_1 t + 120^\circ + \varphi) \\ i_{SC} = I_m \cdot \sin(\omega_1 t + 240^\circ + \varphi) \end{cases}$$

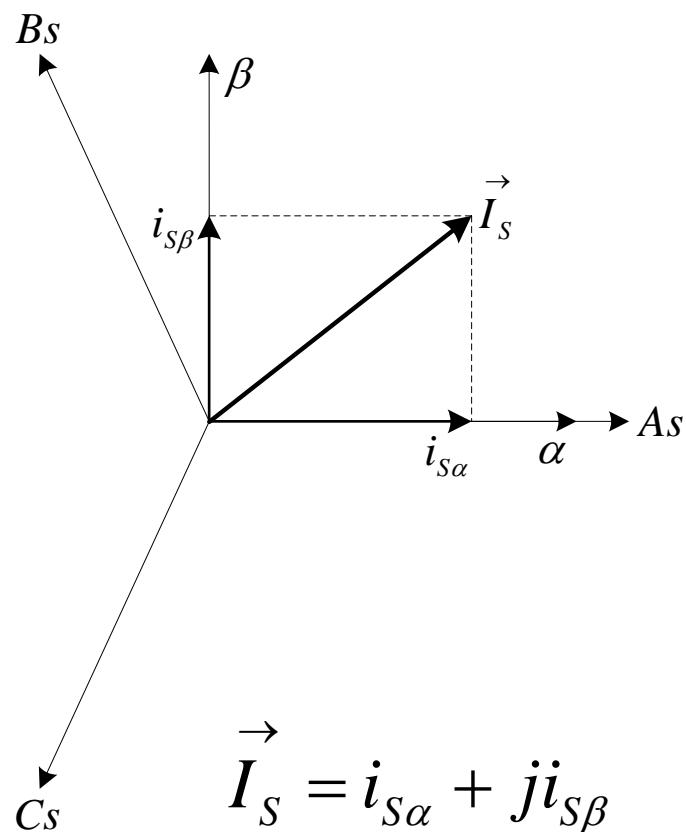
$$\vec{I}_S = \sqrt{2/3}(i_{SA} + i_{SB} \cdot \alpha + i_{SC} \cdot \alpha^2)$$

α 为旋转因子， $\alpha = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ$



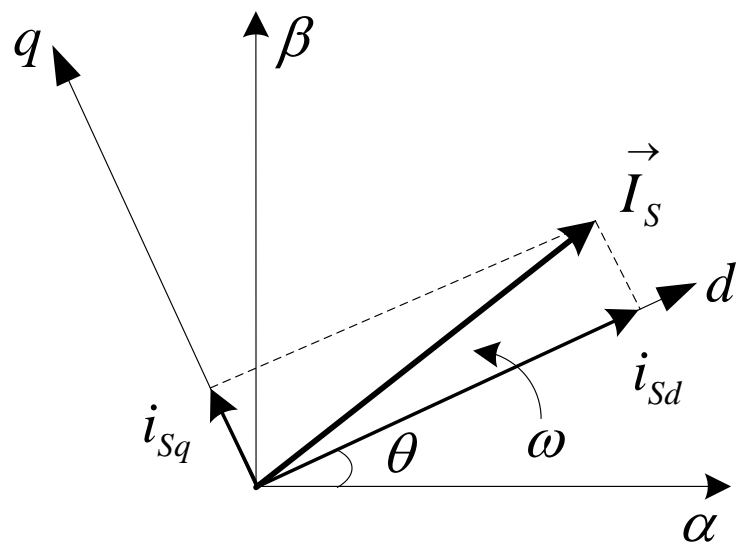
矢量控制基础——坐标变换

三相/2相变换：根据变换前后功率不变的约束条件，以定子电流为例：



$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} T_{ABC-\alpha\beta} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$
$$T_{ABC-\alpha\beta} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

矢量控制基础——坐标变换



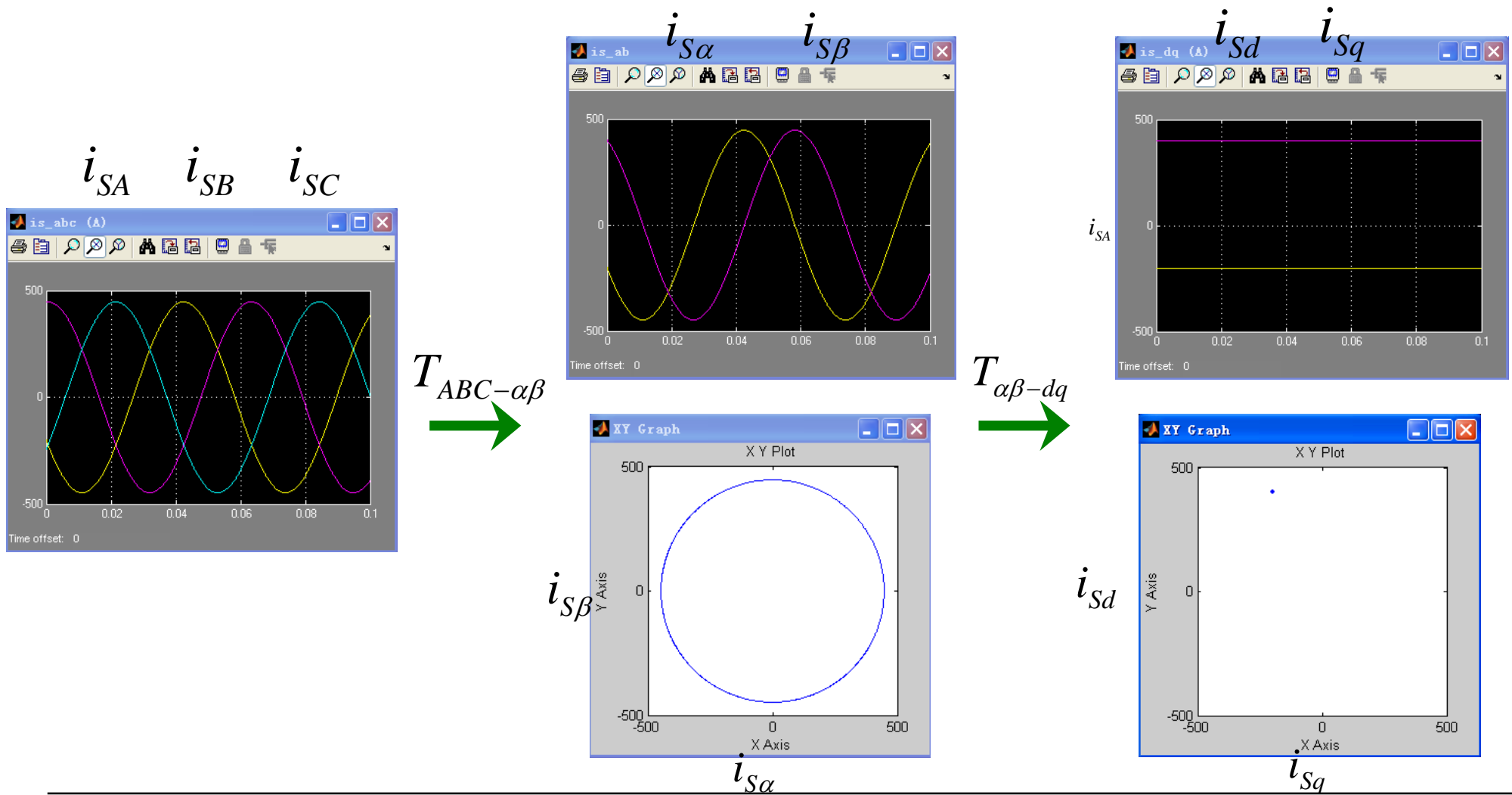
$$\vec{I}_s = i_{sd} + ji_{sq}$$

旋转变换：根据变换前后功率不变的约束条件，以定子电流为例：

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta-dq} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix}$$

$$T_{\alpha\beta-dq} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

矢量控制基础——图解各变量之间关系



矢量控制基础——矢量控制的基本思想

矢量控制是一种高性能交流电机控制方式，它基于交流电机的动态数学模型，通过对电机定子变量（电压、电流、磁链）进行三相/2相坐标变换，将三相正交的交流流量变换为两相正交的交流流量，再通过旋转变换，将两相正交的交流流量变换为两相正交的直流量，采用类似于他激直流电机的控制方法，分别控制电机的转矩电流和励磁电流来控制电机转矩和磁链，具有直流电动机类似的控制性能。

永磁电机数学模型与基本控制方法

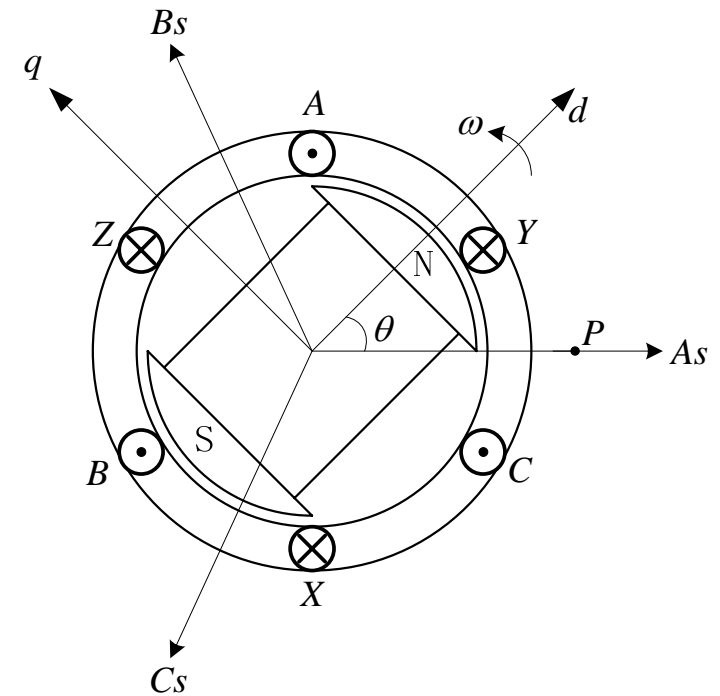
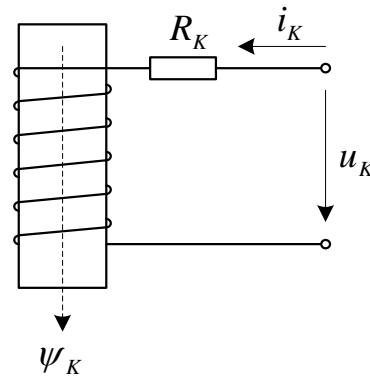
以三相两极永磁无刷电机为例，分析永磁无刷电机的一般化数学模型，并作如下假设：

(1) 定子绕组Y形接法，三相绕组对称分布，各绕组轴线在空间互差 120° ；

(2) 忽略定子铁心和转子铁心的涡流损耗和磁滞损耗；

(3) 采用饱和参数近似计算磁路饱和效应的影响；

(4) 定子绕组参数不随温度和频率变化。



永磁电机数学模型与基本控制方法

电压方程:

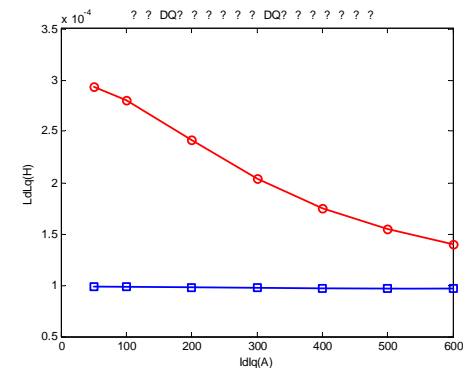
$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & L_q \\ -L_d & 0 \end{bmatrix} \cdot \omega_e \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{d(L_d - L_q)}{dI} \cdot \frac{dI}{dt} \\ \frac{d(L_d - L_q)}{dI} \cdot \frac{dI}{dt} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_e \cdot \psi_m \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

转矩方程:

$$T_m = \frac{n_p}{2} \cdot \frac{3}{2} [\psi_m \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d i_q]$$

直轴电感: $L_d = L_{\delta 0} + \frac{3}{2} L_{\delta 1} - \frac{3}{2} L_{\delta 2}$

交轴电感: $L_q = L_{\delta 0} + \frac{3}{2} L_{\delta 1} + \frac{3}{2} L_{\delta 2}$



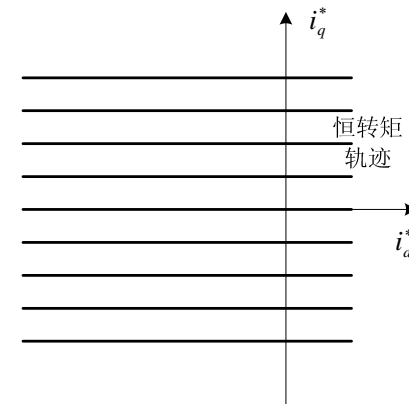
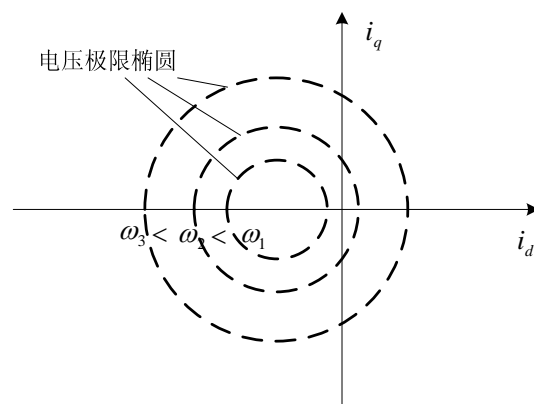
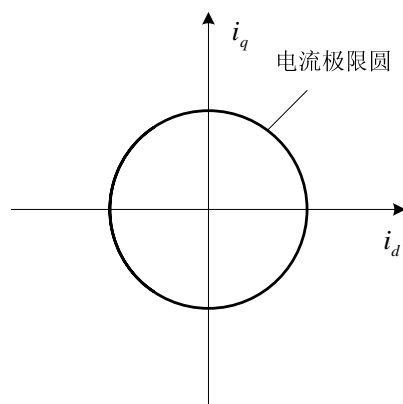
永磁同步电机的基本特性

电流极限圆

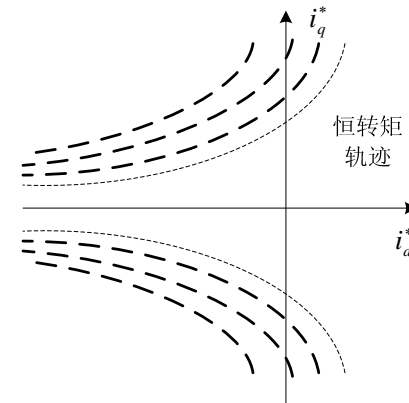
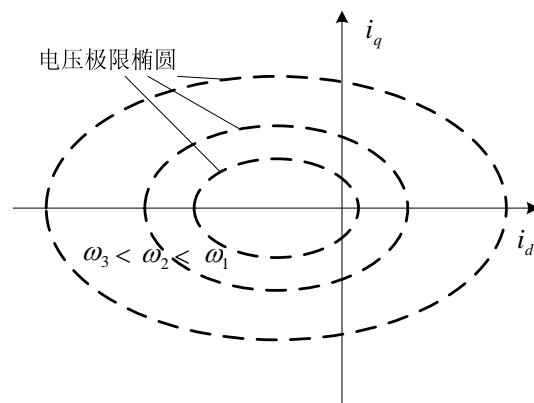
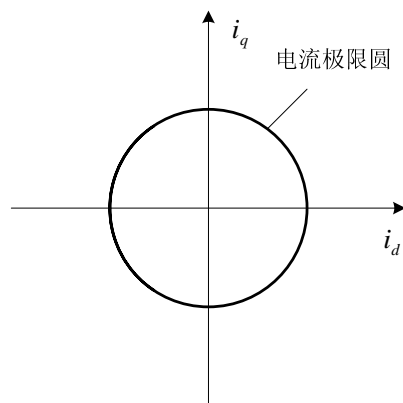
电压极限椭圆

恒转矩曲线

$L_d = L_q$:

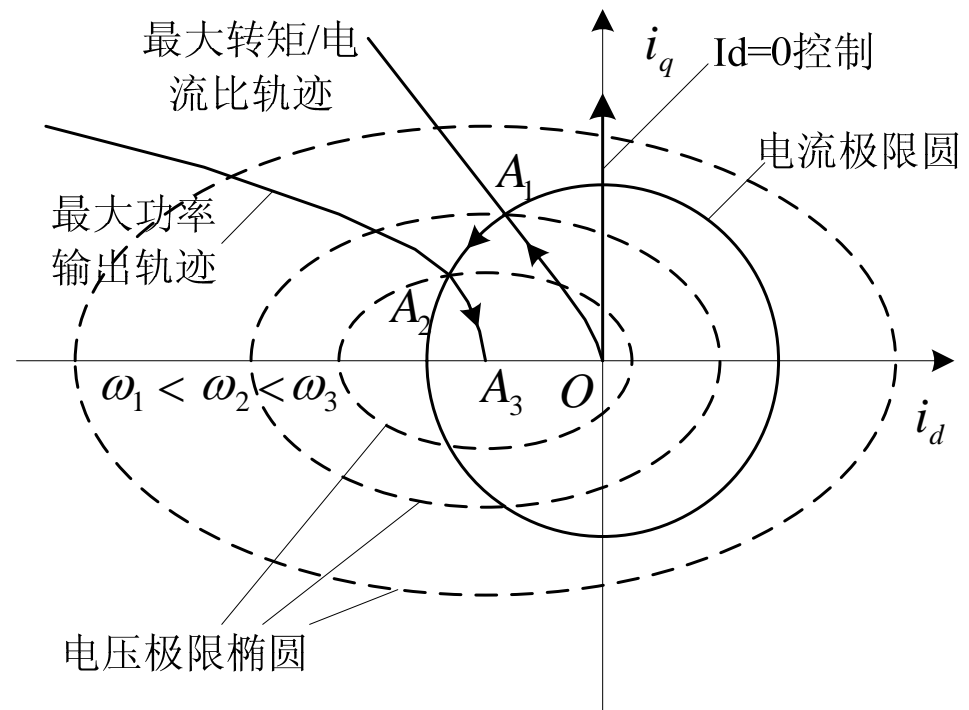


$L_d < L_q$:



永磁同步电机的基本控制方法

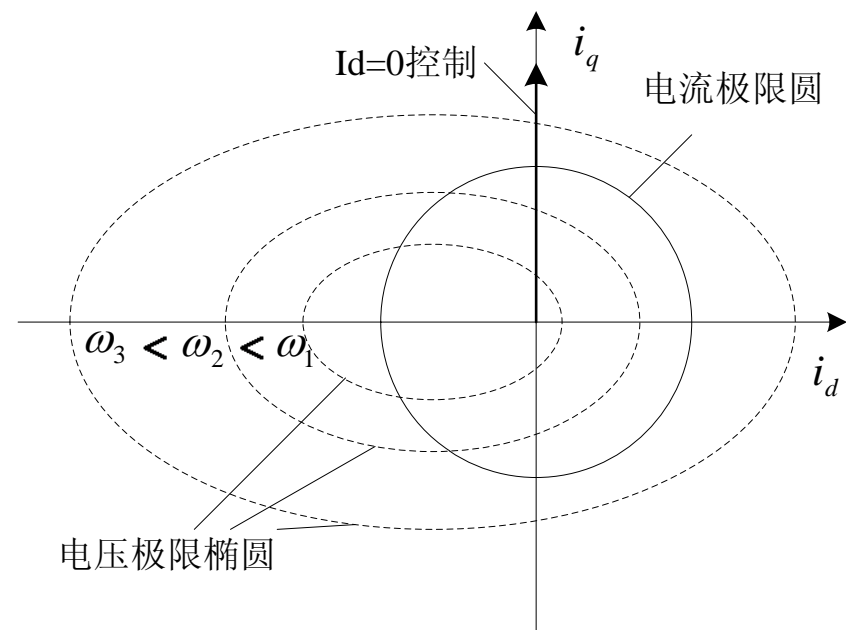
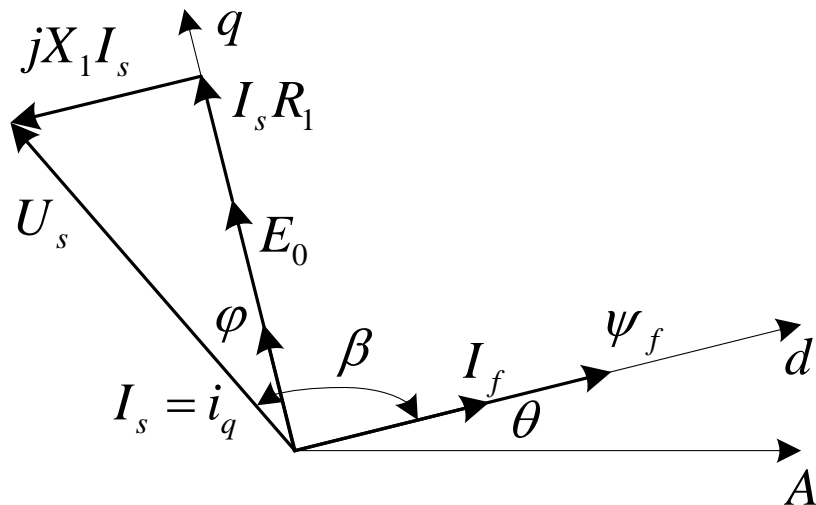
- $I_d=0$ 控制
- 最大转矩/电流比控制
- 恒功率弱磁控制
- 最大功率控制



永磁同步电机的基本控制方法

1、 $I_d=0$ 控制:

$$T_{em} = p \psi_m i_s \quad \omega_{\max} = u_{\lim} / \sqrt{(p \psi_m)^2 + (T_{em} L_q / \psi_m)^2}$$



永磁同步电机的基本控制方法

2、最大转矩/电流比控制:

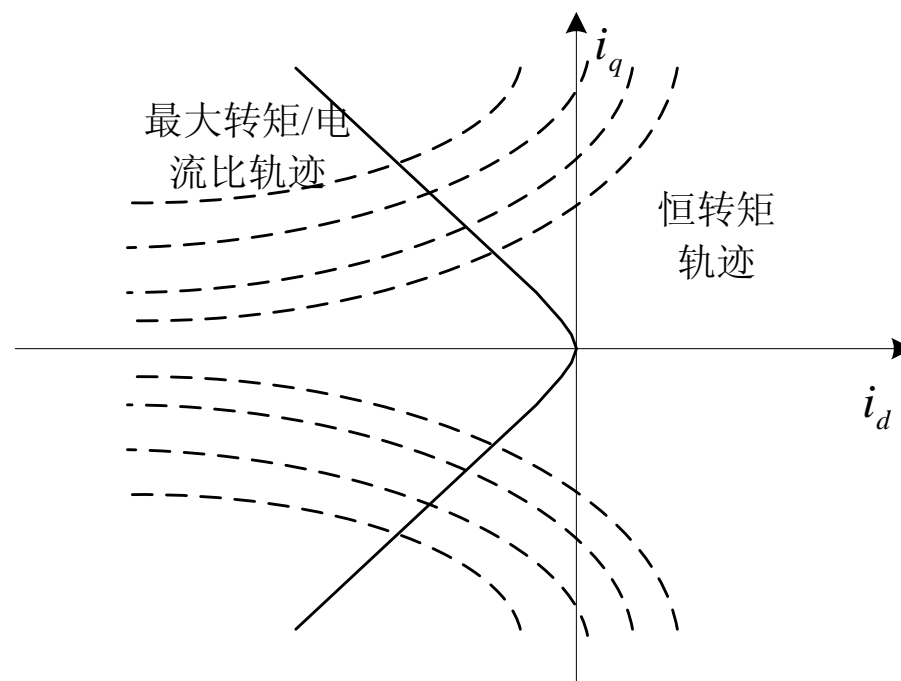
$$\frac{\partial(T_{em}/i_s)}{\partial i_d} = \frac{\partial(T_{em}/i_s)}{\partial i_q} = 0$$

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

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

$$\omega_b = \frac{u_{\lim}}{p \sqrt{(L_q i_{\lim})^2 + \psi_m^2 + \frac{(L_d + L_q)C^2 + 8\psi_m L_q C}{16(L_d - L_q)}}}$$

$$(C = -\psi_m + \sqrt{\psi_m^2 + 8(L_d - L_q)^2 i_{\lim}^2})$$



永磁同步电机的基本控制方法

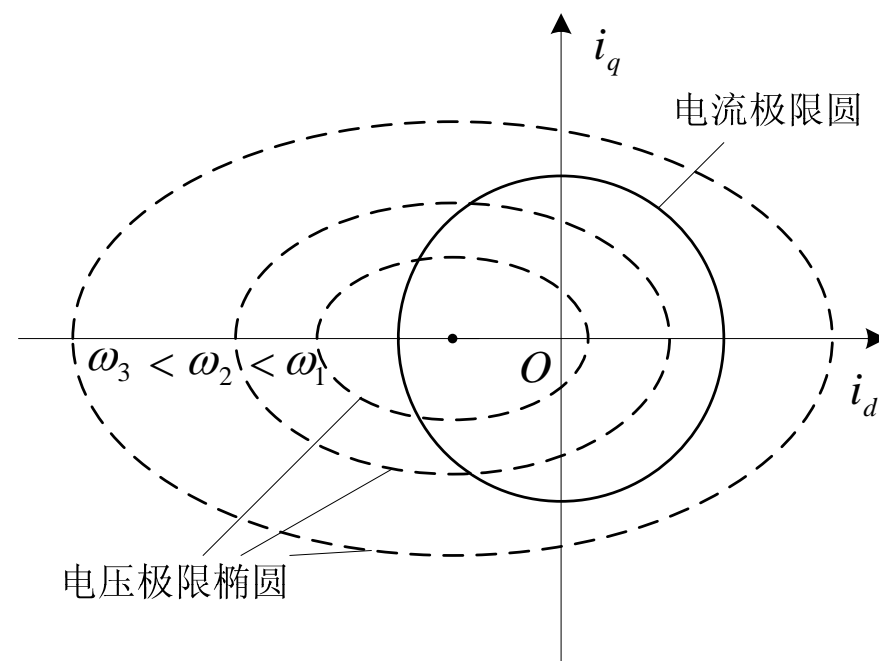
3、恒功率弱磁控制:

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

$$i_d = -\frac{\psi_m}{L_d} + \sqrt{\left(\frac{u_{\text{lim}}}{\omega_e L_d}\right)^2 - \left(\frac{L_q \cdot i_q}{L_d}\right)^2}$$

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

$$\omega_b = \frac{1}{p_n} \frac{U_{s\max}}{\sqrt{(\psi_m - L_d I_d)^2 + (L_q I_q)^2}}$$



永磁同步电机的基本控制方法

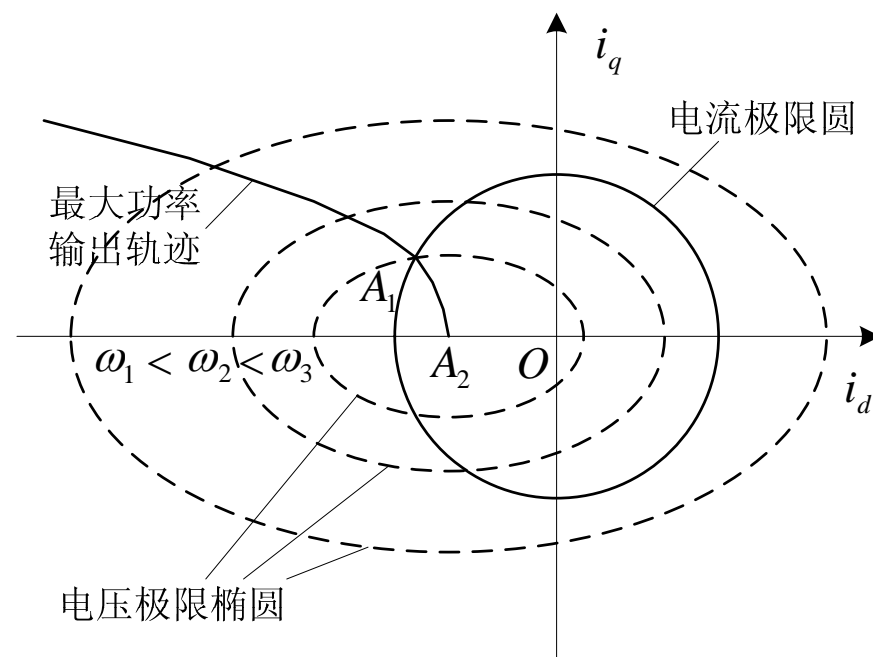
4、最大功率控制:

$$\frac{\partial P_1}{\partial i_d} = 0$$

$$i_q = \frac{\sqrt{(u_{\text{lim}}/\omega)^2 - (L_d \Delta i_d)^2}}{L_q}$$

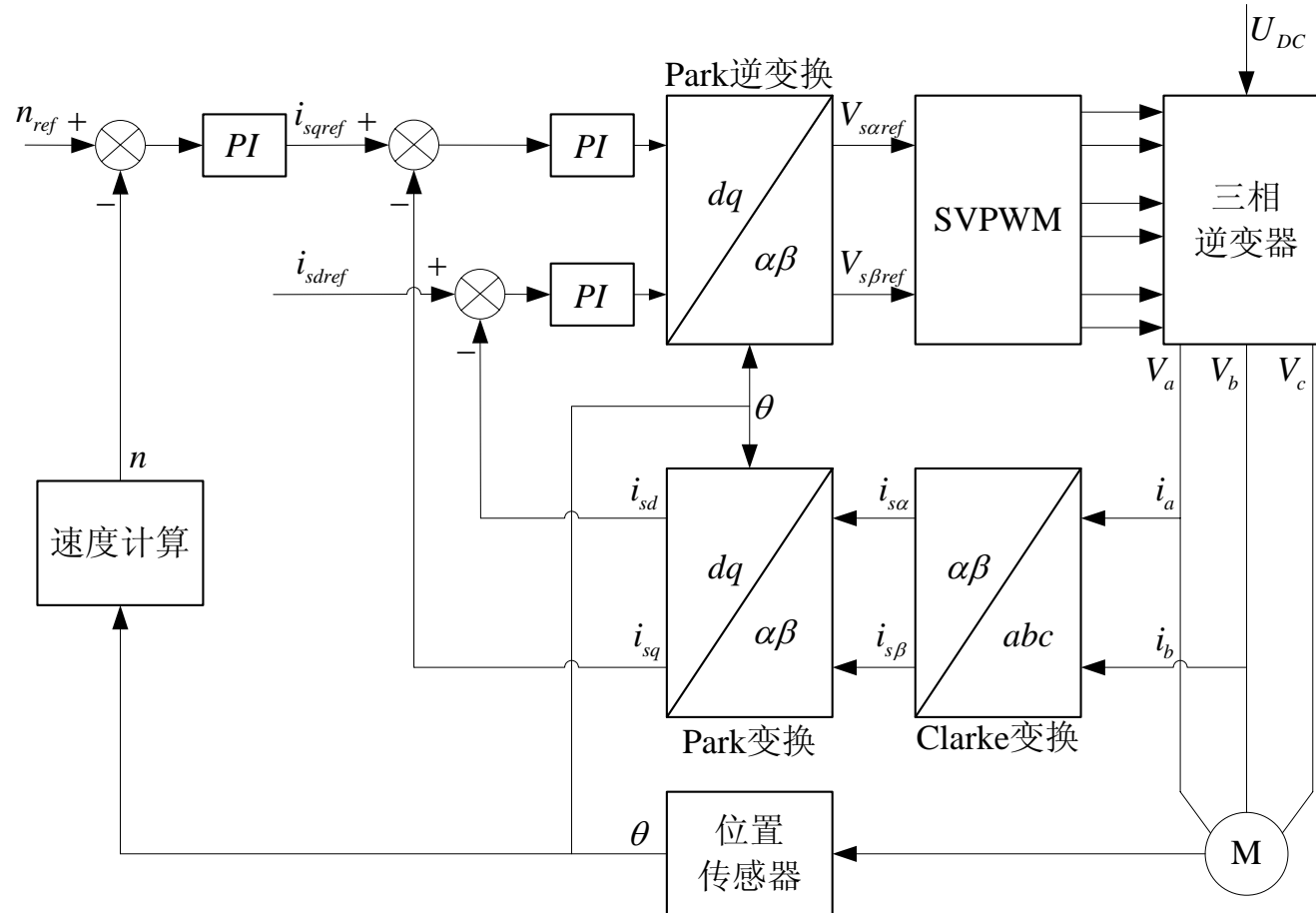
$$i_d = \frac{\psi_m}{L_d} + \Delta i_d$$

$$\Delta i_d = \frac{\rho \psi_m - \sqrt{(\rho \psi_m)^2 + 8(\rho - 1)^2 \cdot (u_{\text{lim}}/\omega)^2}}{4(\rho - 1)L_d}$$



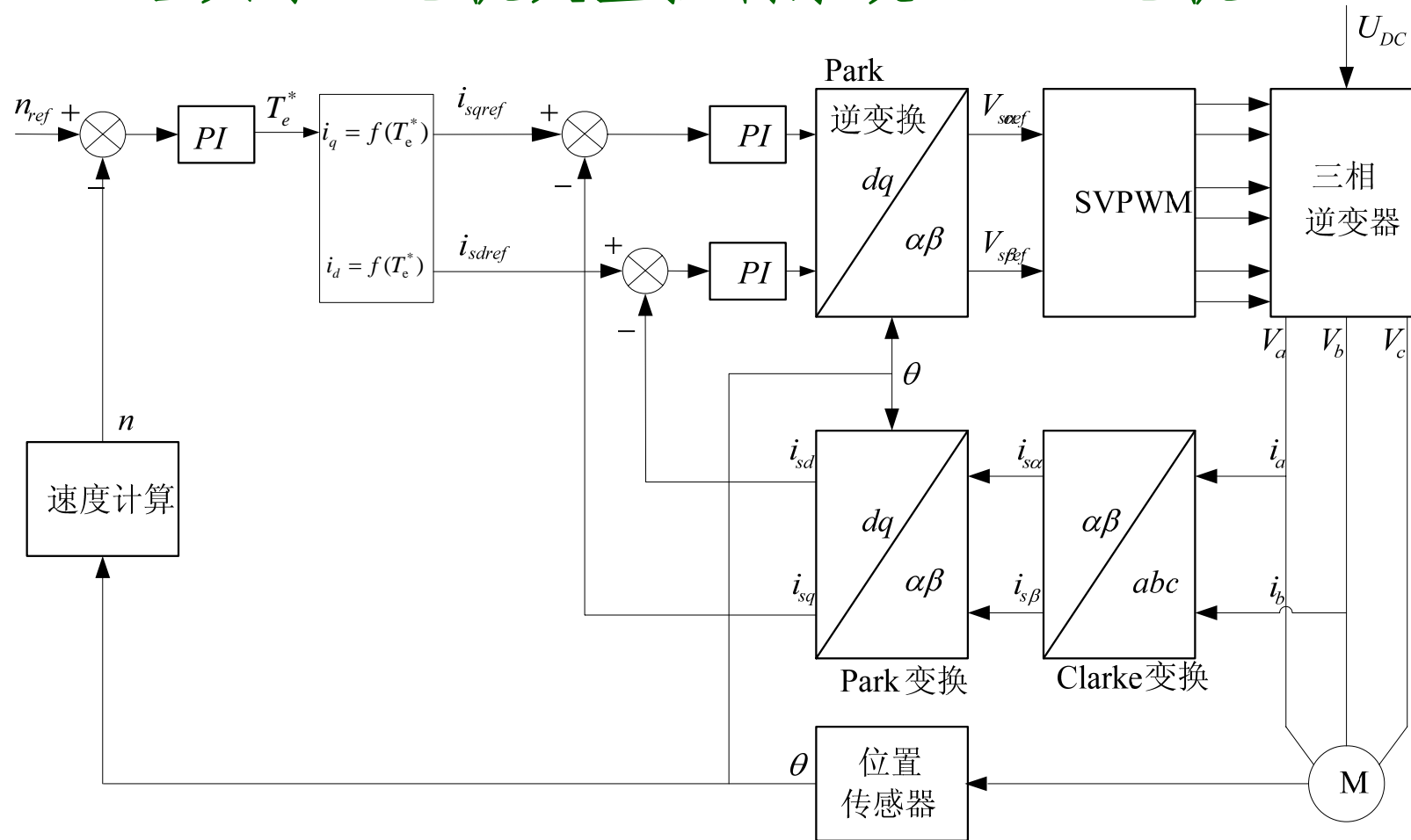
永磁同步电机矢量控制系统

经典永磁电机矢量控制系统（SPM电机）



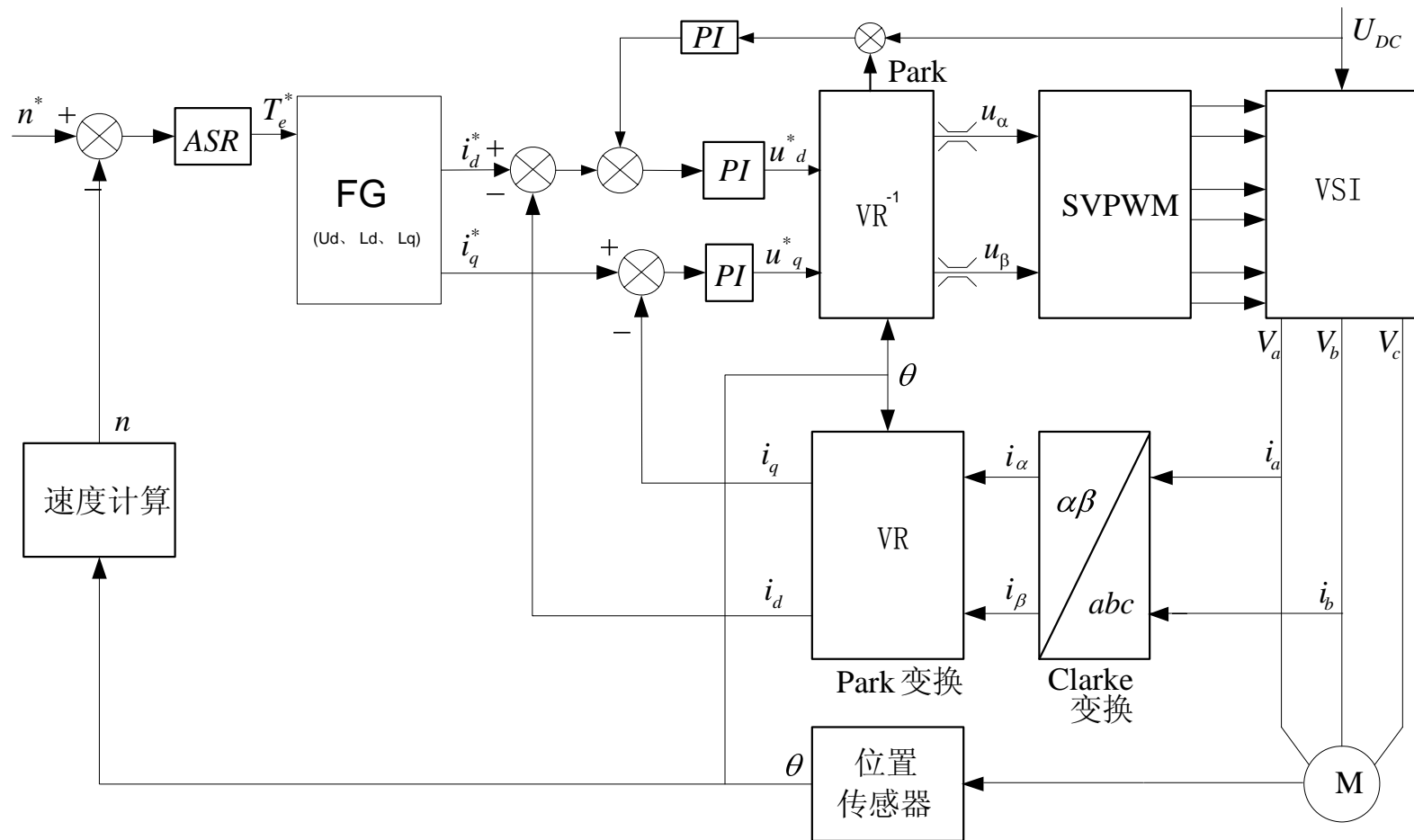
永磁同步电机矢量控制系统

经典永磁电机矢量控制系统（IPM电机）



永磁同步电机矢量控制系统

电压补偿式永磁电机矢量控制系统（IPM电机）



旋转变压器

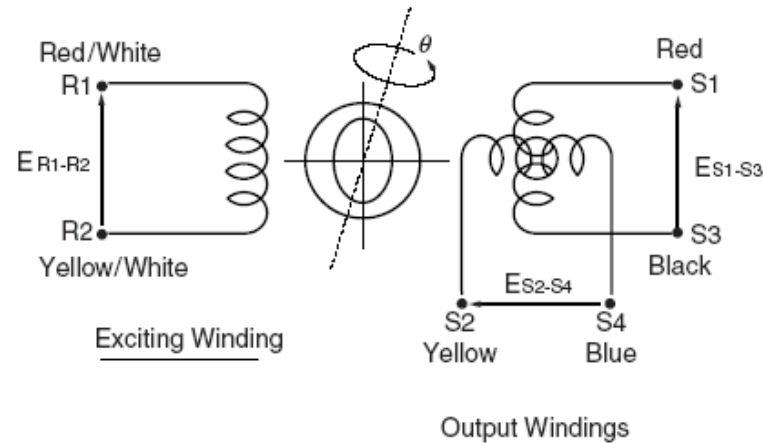
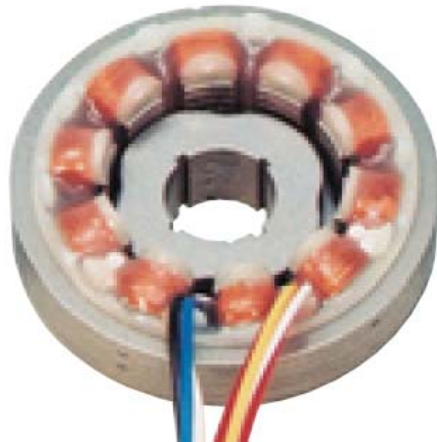
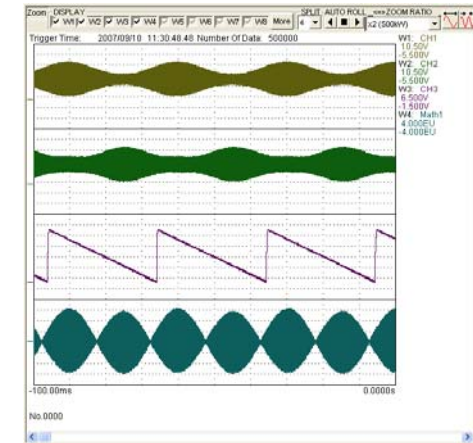


Fig. 1 Wiring Diagram



<Excitation Voltage>

$$E_{R1-R2} = E \sin \omega t \quad (1)$$

<Output Voltage>

$$E_{S1-S3} = KE \sin \omega t \cdot \cos (X \cdot \theta) \quad (2)$$

$$E_{S2-S4} = KE \sin \omega t \cdot \sin (X \cdot \theta) \quad (3)$$

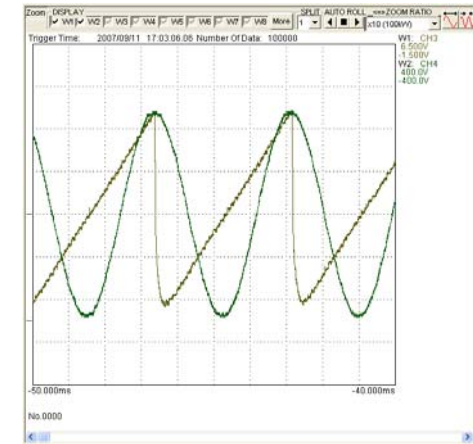
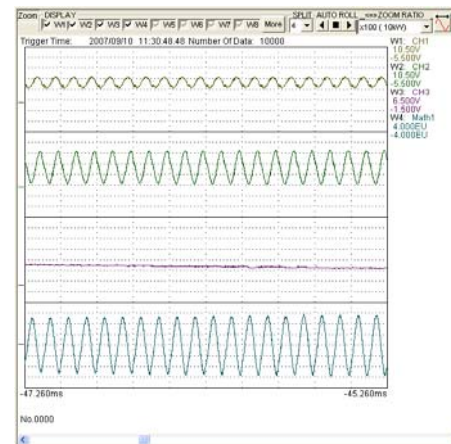
where

K : Transformation Ratio t : Time (s)

θ : Shaft Angle (deg) f : Excitation Frequency (Hz)

$\omega : 2 \pi f$ E : Excitation Voltage (V)

X : Multiplication Factor of Angle (X = 2, 3 or 4)



主要内容

一、几个术语解释

（极对数、电角度、电角频率、相电压、线电压、反电动势）

二、无刷直流电机的运行原理和基本控制方法

（运行原理、数学模型、换流模式、控制方法）

三、永磁同步电机的运行原理和基本控制方法

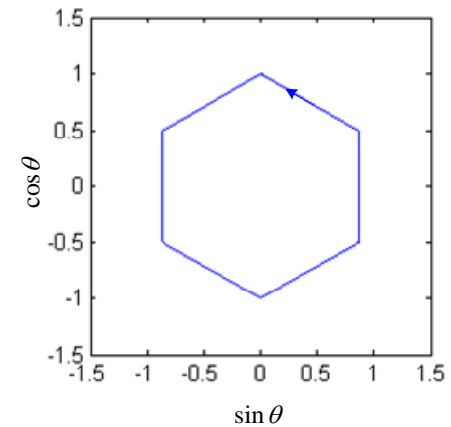
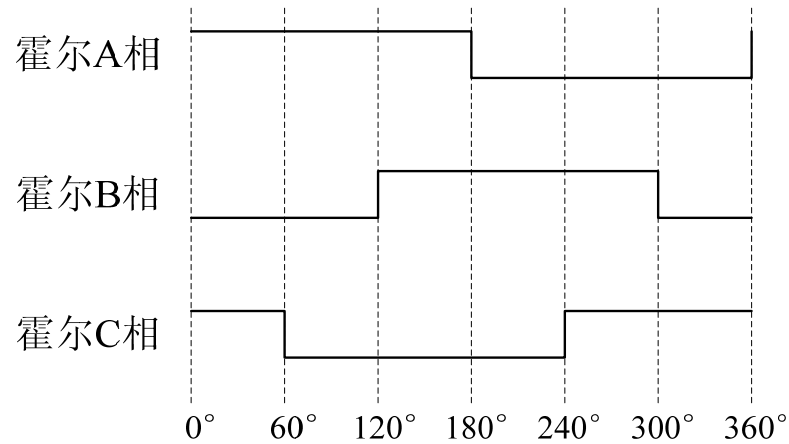
（矢量控制基础、数学模型、控制方法、旋转变压器）

四、两种电机及其控制系统的对比

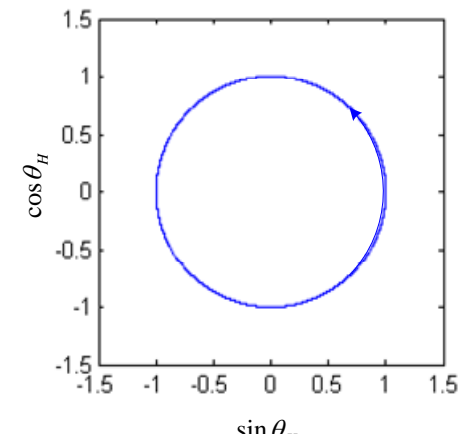
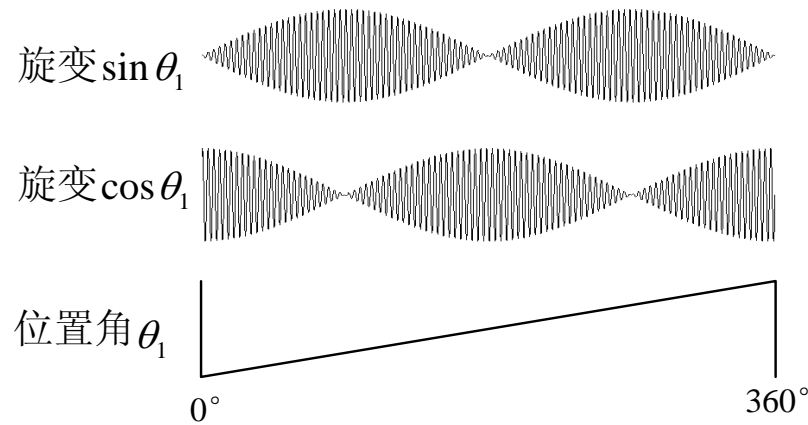
（转子位置、三相电流、转矩脉动、调速范围）

两种电机及其控制系统的对比

永磁无刷电机
位置信号



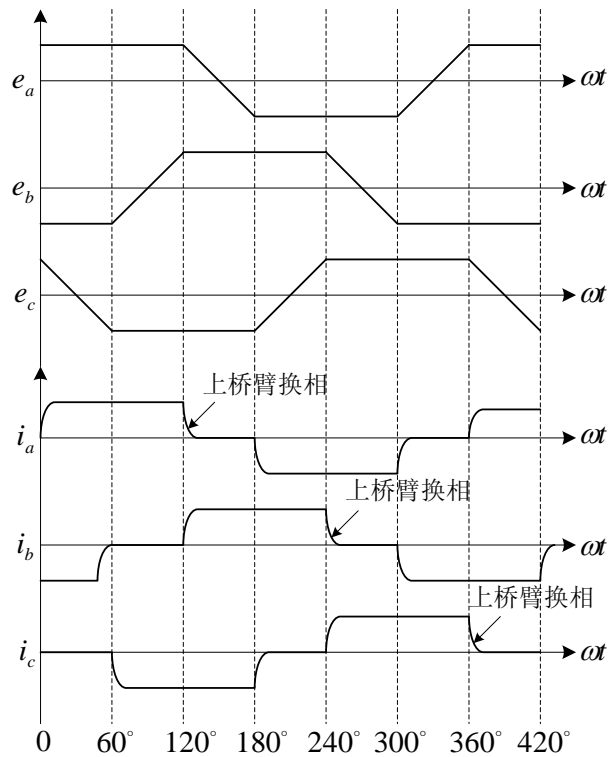
永磁同步电机
位置信号



两种电机及其控制系统的对比

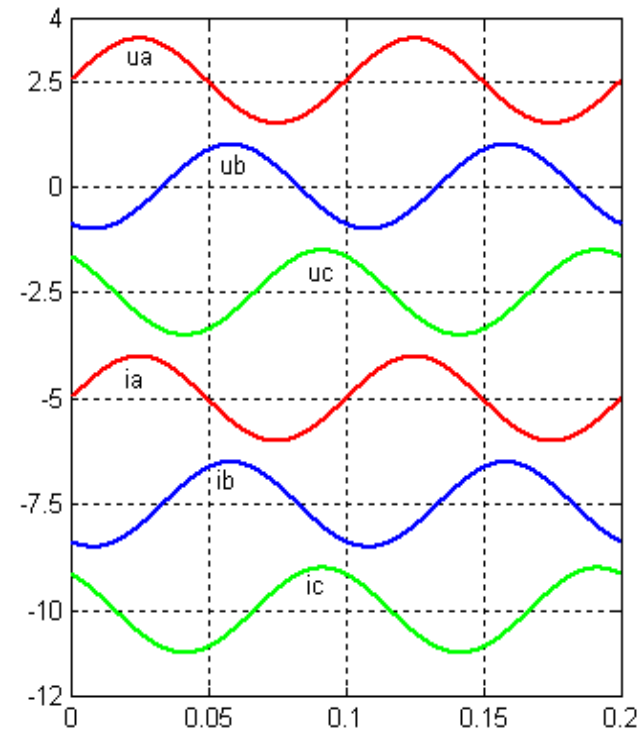
永磁无刷电机

三相反电动势与三相电流



永磁同步电机

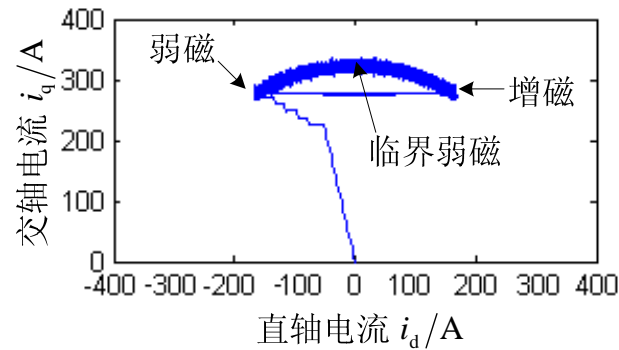
三相反电动势与三相电流



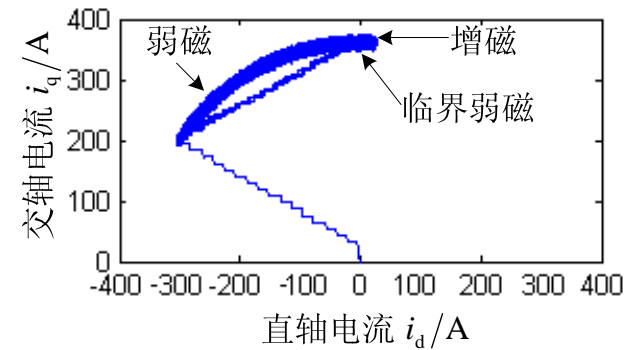
两种电机及其控制系统的对比

永磁无刷电机
三相电流

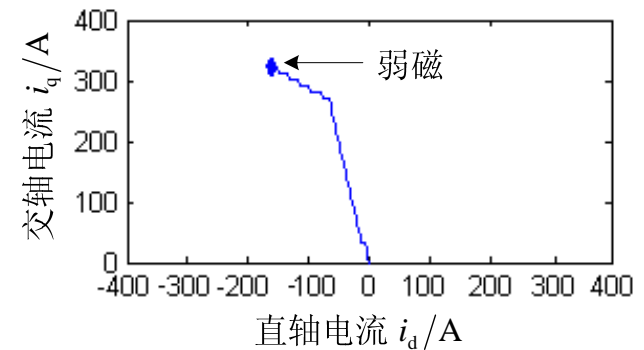
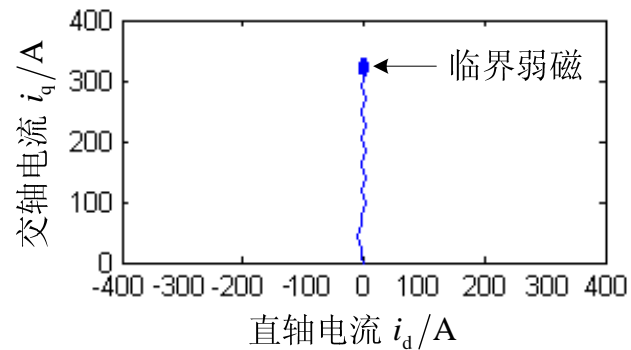
$I_d=0$ 控制



最大转矩电流比控制

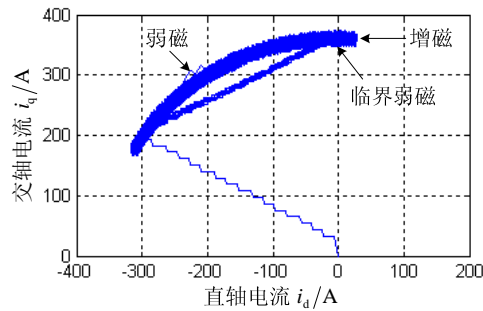


永磁同步电机
三相电流

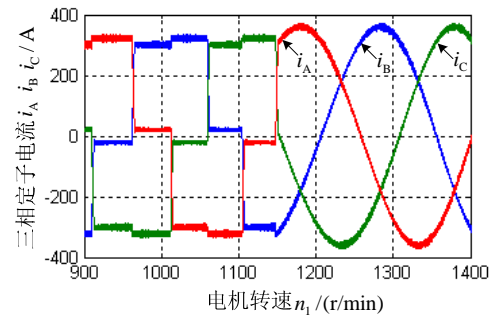


两种电机及其控制系统的对比

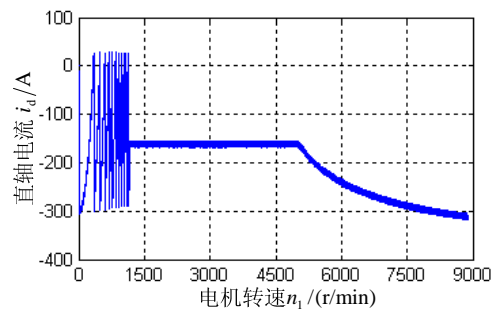
(a) 定子电流相平面图



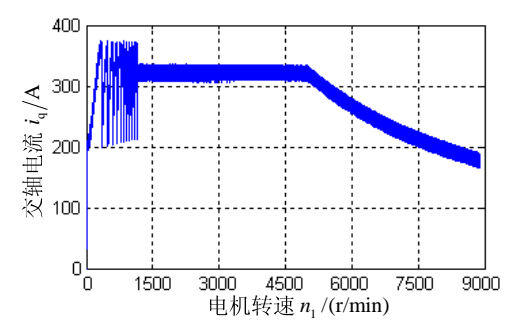
(b) 三相定子电流



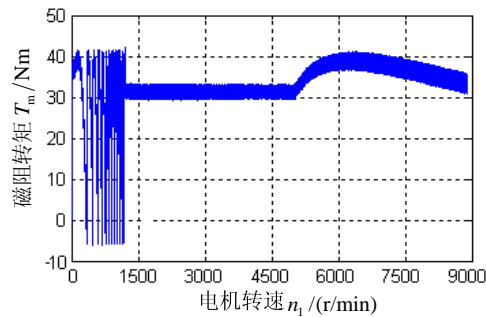
(c) 直轴电流分量



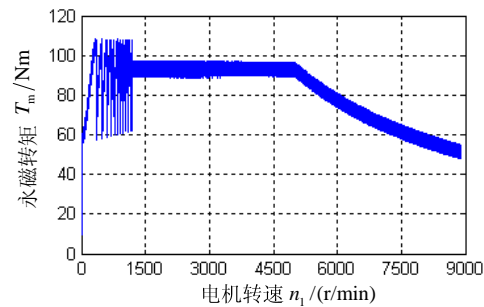
(d) 交轴电流分量



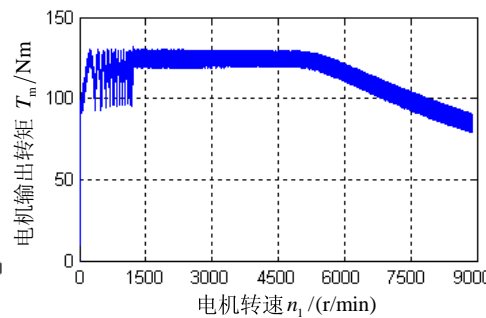
(e) 磁阻转矩分量



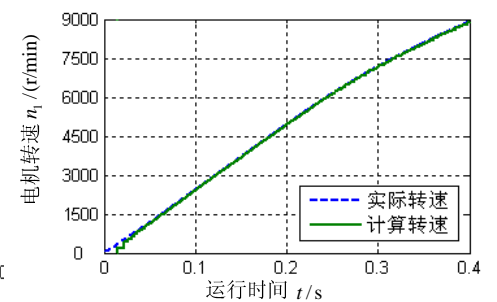
(f) 永磁转矩分量



(g) 电机输出转矩

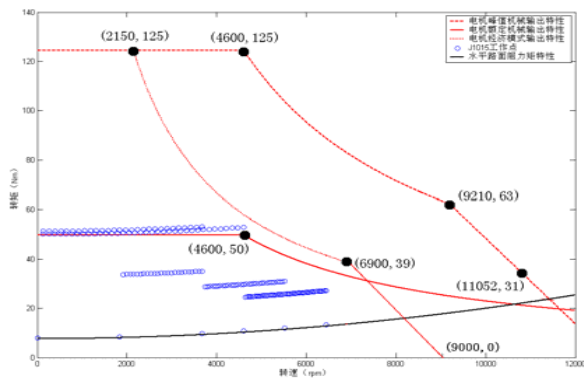


(h) 实际转速与计算转速

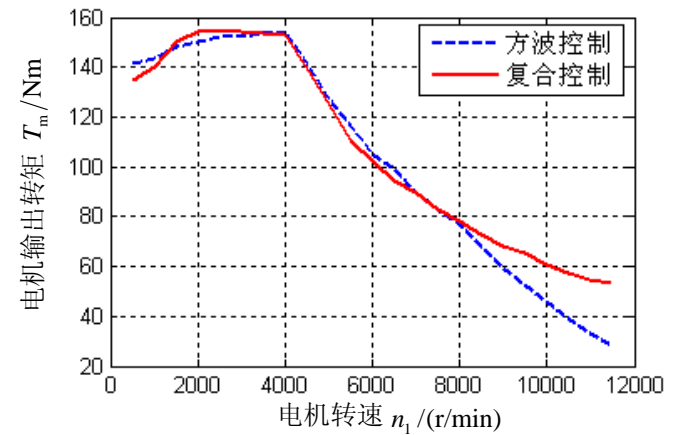


两种电机及其控制系统的对比

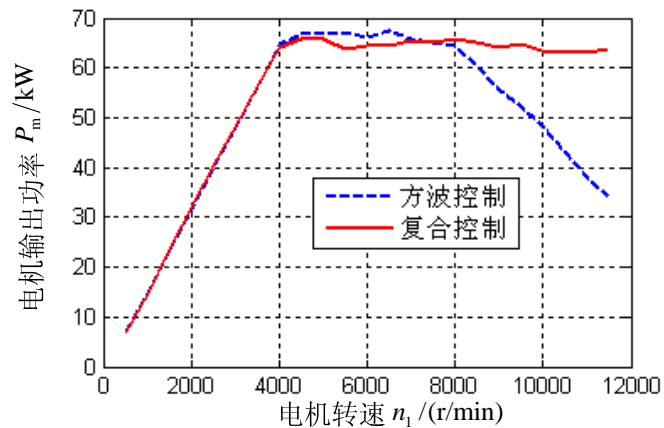
电机输出特性需求



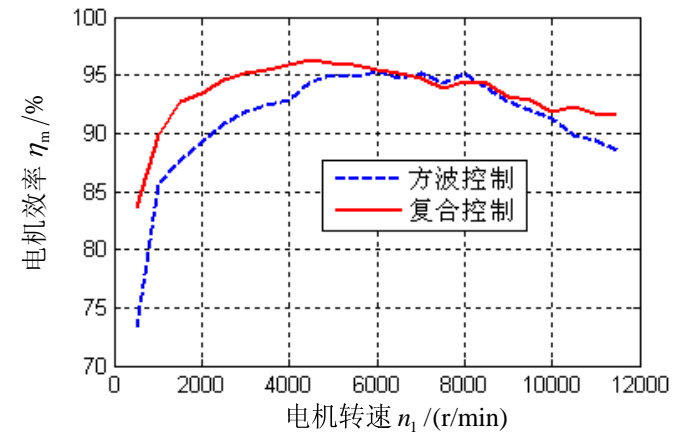
(a) 转矩—转速特性曲线



(b) 功率—转速特性曲线



(c) 电机效率—转速特性曲线



两种电机及其控制系统的对比

1、低速出力（转矩/电流比，功率模块利用率）

- 以车用驱动电机为例：无刷直流电机转矩/电流有效值比为**0.456**，转矩/电流峰值比为**0.297**；永磁同步电机相对应的分别为**0.563**和**0.375**，同比增加**20%**以上；
- 无刷直流电机低速电流/转矩脉动大，换相噪声大，低速电机抖动明显；永磁同步电机可实现零转速控制，转矩可达到最大转矩值；
- 驱动电机采用矢量控制技术，功率模块电流裕量提高。

2、高速恒功率（恒功率调速范围，弱磁率）

- 以某额定转速**6000rpm**的车用驱动电机为例，无刷直流电机采用提前换相控制的最高转速为**8000rpm**，弱磁率为**1:1.3**；永磁同步电机可控制的恒功率最高转速为**12000rpm**，弱磁率为**1:2**；以混合动力客车ISG电机为例，无刷直流电机的弱磁率为**1:1.2**，永磁同步电机的弱磁控制率为**1:1.5**；
- 无刷直流电机恒功率运行时，电流脉动和转矩脉动大，电机运行噪声大；而永磁同步电机可实现电流和转矩平稳，噪声较小。

两种电机及其控制系统的对比

永磁电机类型	无刷直流电机	永磁同步电机
控制方法	简单，位置换相	复杂，需要矢量变换
转矩脉动	换相脉动大	小
恒功率调速范围	1: 1.2~1.3	1: 1.5~2.0
制动效率	较低	较高，可四象限运行
运行噪声	较高	较低
气隙	大，参数稳定	小，参数易饱和
传感器	霍尔，无位置	旋变
可靠性	霍尔低，无位置高	高
生产成本	较低	较高
维护成本	较高	较低



谢谢各位！