主 要 内 容

一、几个术语解释（极对数、相数、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

（运行原理、数学模型）

三、无刷直流电机的基本控制方法

（各参数相互关系、换流过程与换流模式）

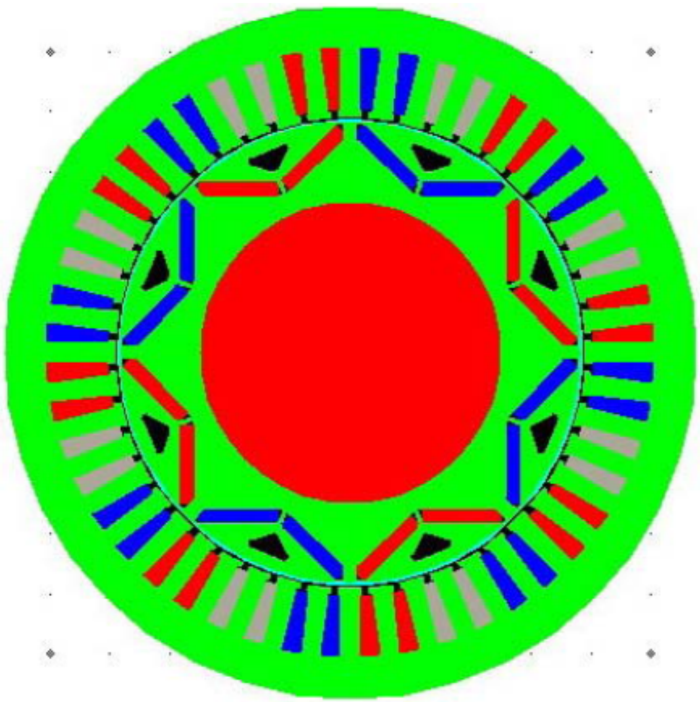
四、车用无刷直流电机及其控制系统

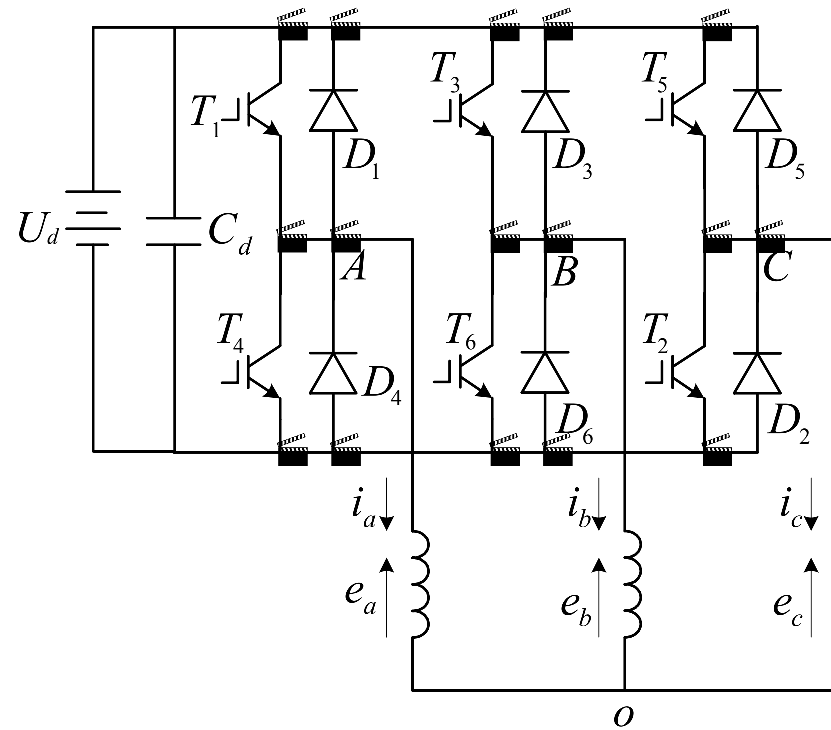
（基本控制、弱磁控制）

几个术语解释

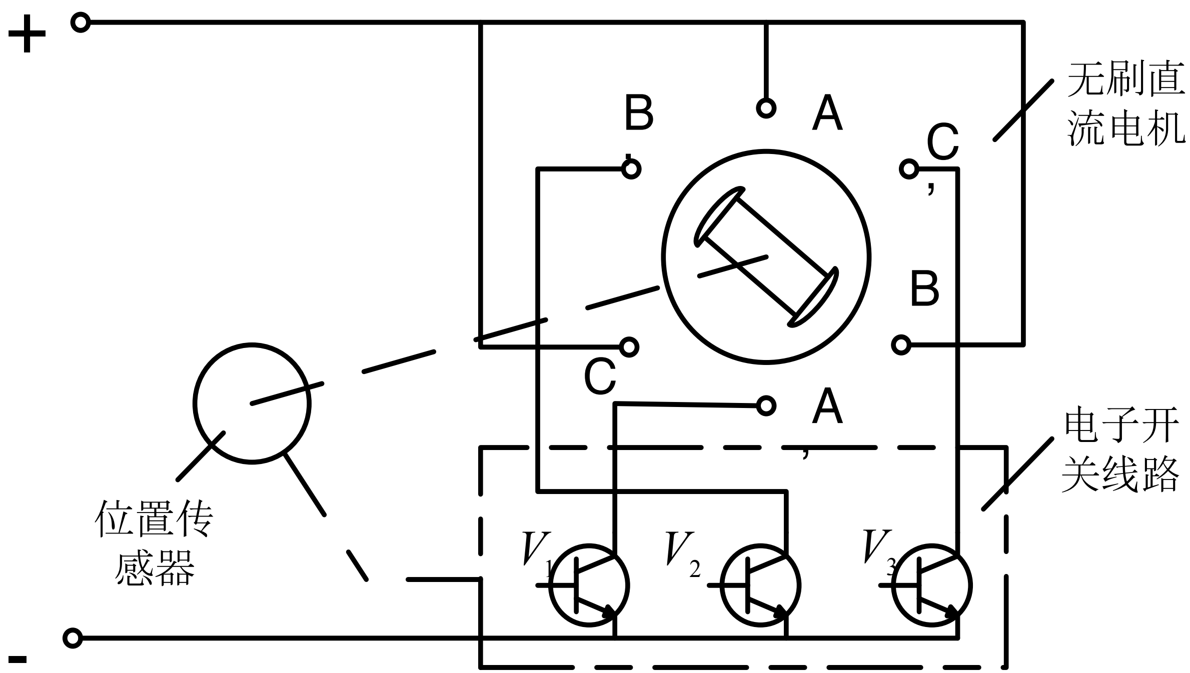
- 极对数（$2p$）：电机转子中N-S极的对数，2，3，4，……
- 相数（m）：电机绕组个数，3，6，12，……
- 电角度（θ_e）/机械角度（θ）：$\theta_e = p \cdot \theta$　$\theta_e = \int \omega_e dt$
- 电角频率（ω_e）/机械角频率（Ω）：$\omega_e = p \cdot \Omega$
- 电角频率与电机转速（n）：$n = 60\omega_e / p$
- 极（2p）槽（Z）配合：Z/2p
- 相电压：电机相绕组对电机中性点电压
- 线电压：电机两相绕组之间电压
- 反电动势：电机到拖时某一转速下对应电机线电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

几个术语解释



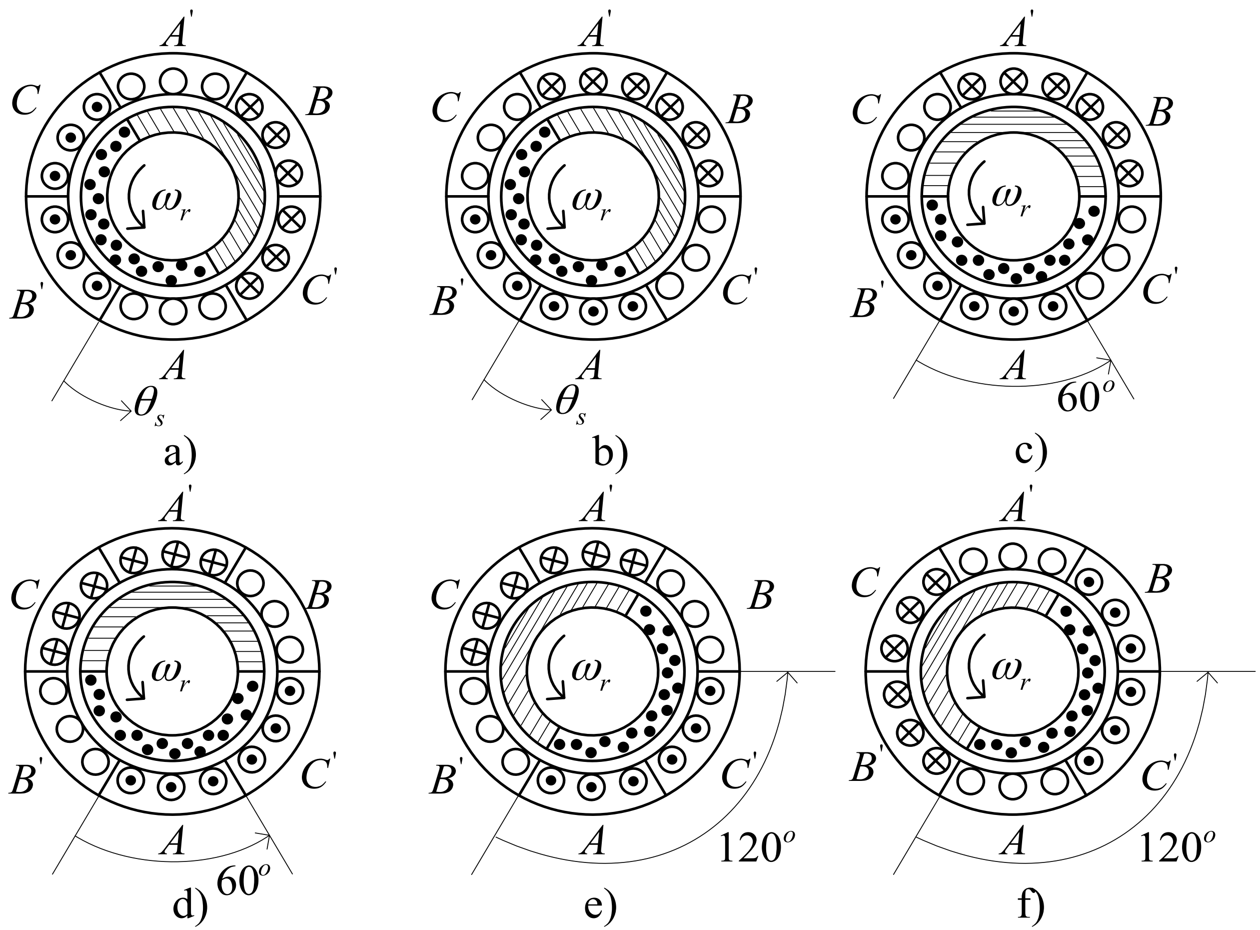


无刷直流电机的组成



- 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永磁同步电动机相似；
- 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) 0度（换相前）

b) 0度（换相后）

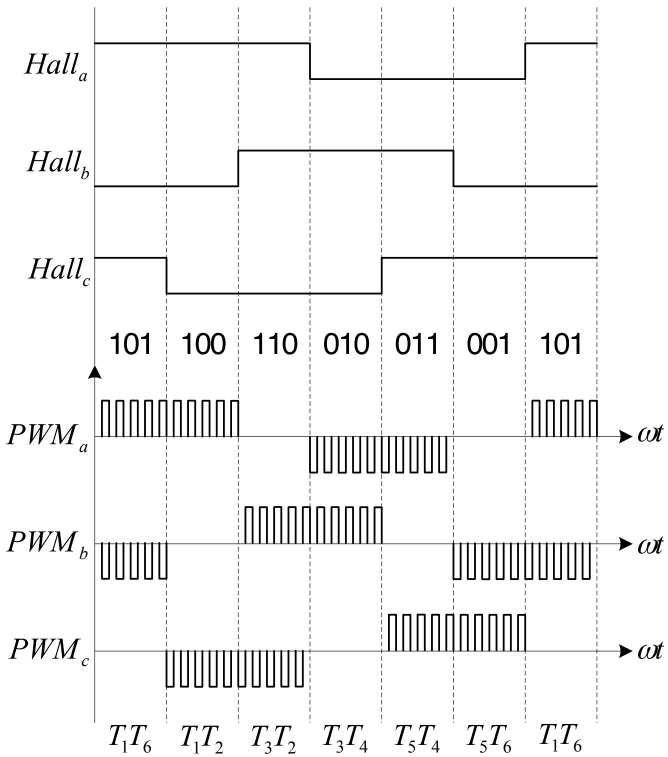
c) 60度（换相前）

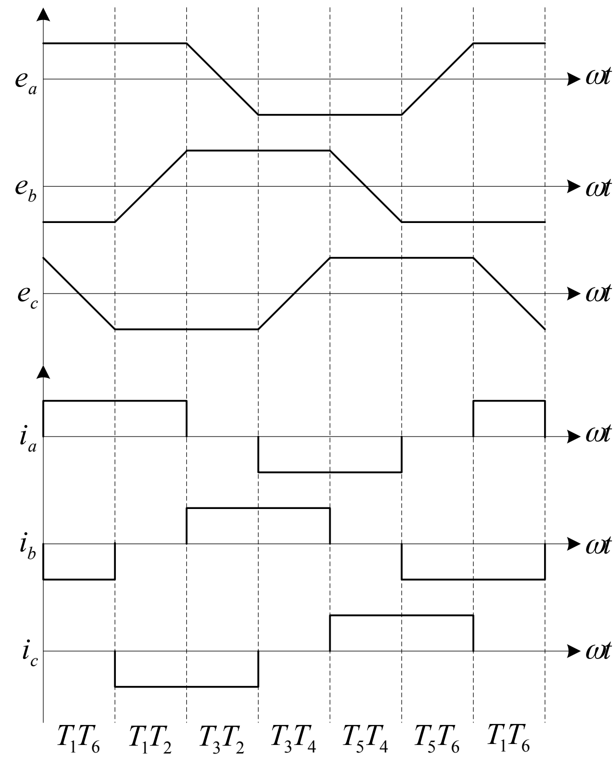
d) 60度（换相后）

e) 120度（换相前）

f) 120度（换相后）

HALL状态与PWM、三相反电势和三相相电流的对应关系





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。

无刷直流电机的数学模型

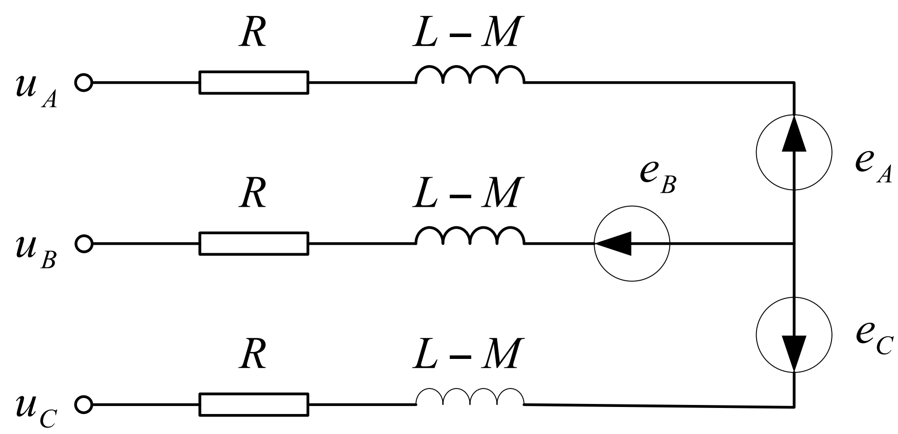
采用理想化的直流无刷电机用状态方程表示的数学模型， 电流为理想的方波，反电势为理想的梯形波，并作如下假设：

（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

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix}$$

无刷直流电机的数学模型

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

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

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

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

无刷直流电机的数学模型

在任何时刻，定子上只有两相同时导通，且导通相的定子电流幅值保持不变：

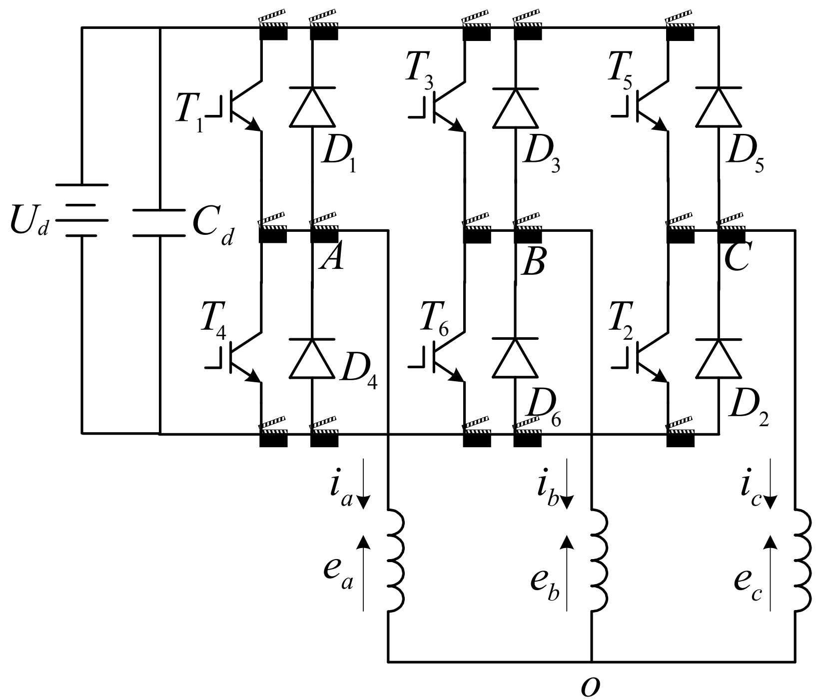
$$T_{em}=\frac{p_n}{\omega_r}\left(e_A i_A+e_B i_B+e_C i_C\right)=\frac{p_n}{\omega_r}\cdot 2E\cdot I$$

$$E=N\cdot B_g\cdot l\cdot r\cdot\omega_r$$

$$T_{em}=2N\cdot B_g\cdot l\cdot r\cdot I=K_M\cdot I$$

$$K_M=2NB_g lr$$ 称为转矩系数

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）；

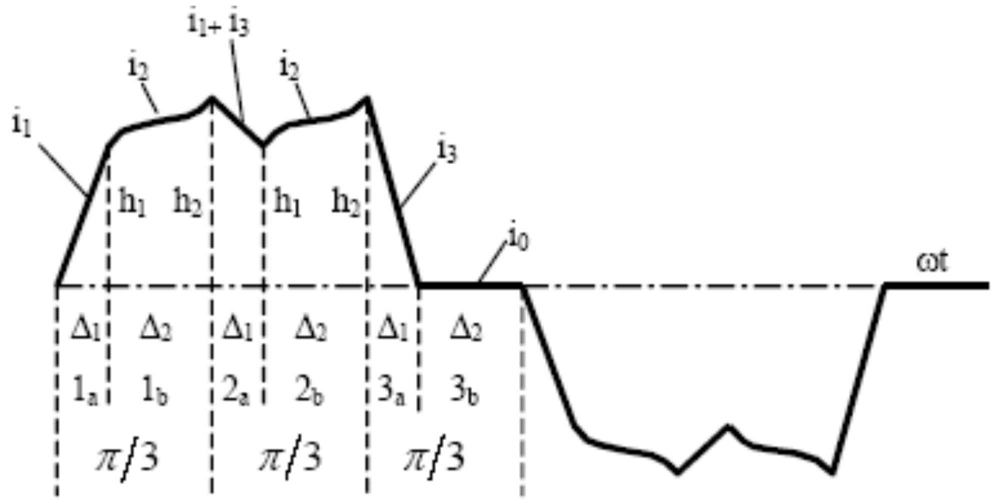
C_d 为中间直流回路支撑（滤波）电容（F）；

$T_1 \sim T_6$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



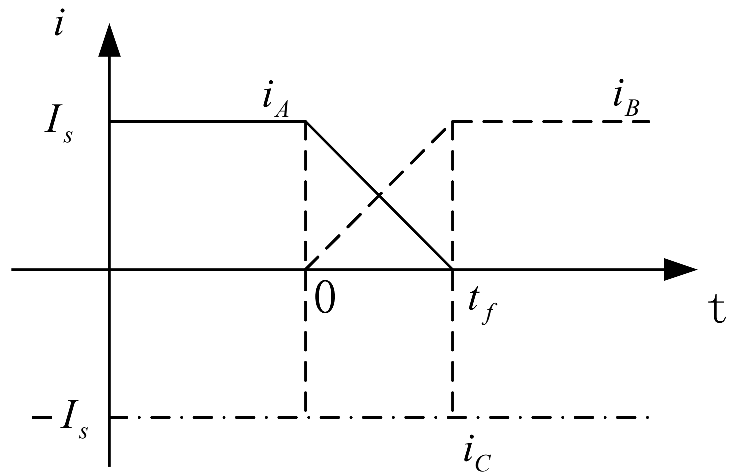
- The Periods 1a, 2a, and 3a are identical, and similarly for Periods 1b, 2b, and 3b;
- The current waveform during Period 1b is the same as that during Period 2b;
- The value of the current during Period 2a is the sum of the currents which flow during Periods 1a and 3a;
- The diode conduction time,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

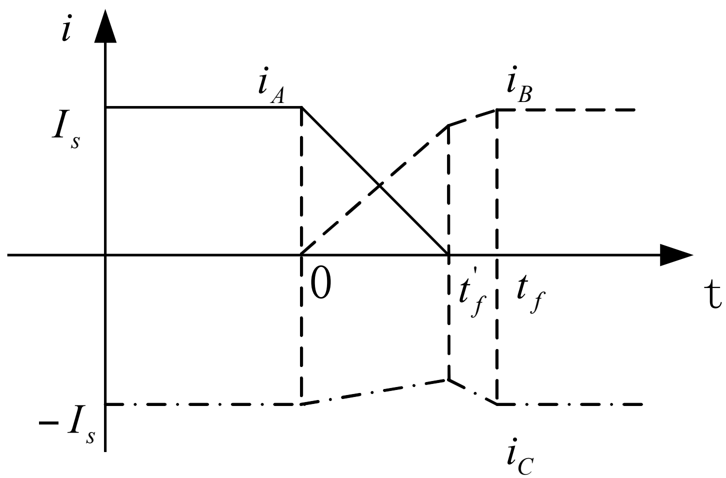
无刷直流电机的换相电流

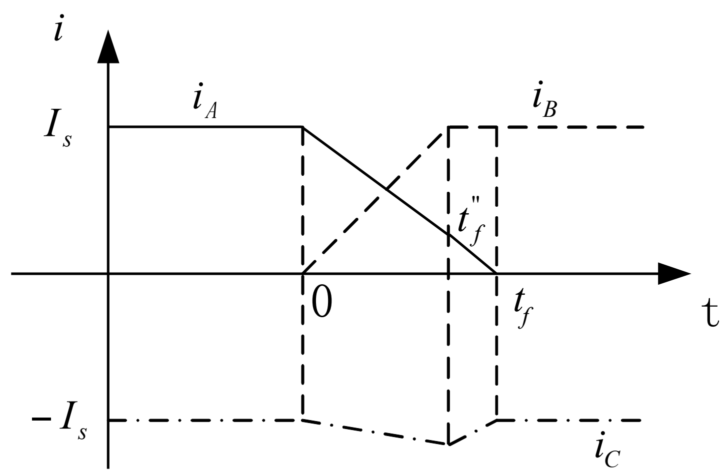
$$i_A = I_s - \frac{U_{dc} + 2E_s}{3L_M} t$$

$$i_B = \frac{2(U_{dc} - E_s)}{3L_M} t$$

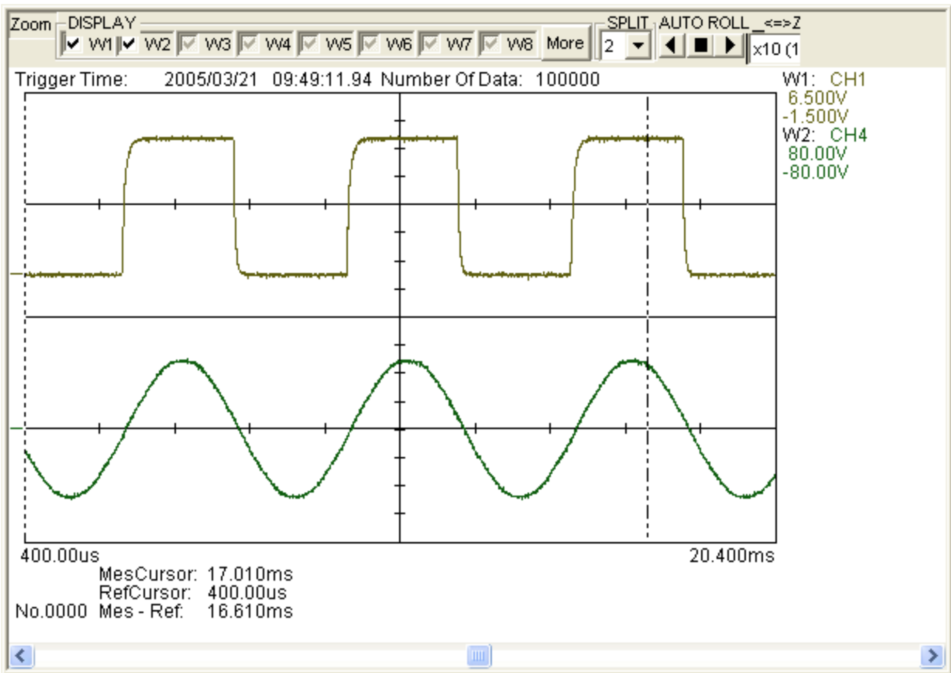
$$i_C = -I_s - \frac{U_{dc} - 4E_s}{3L_M} t$$

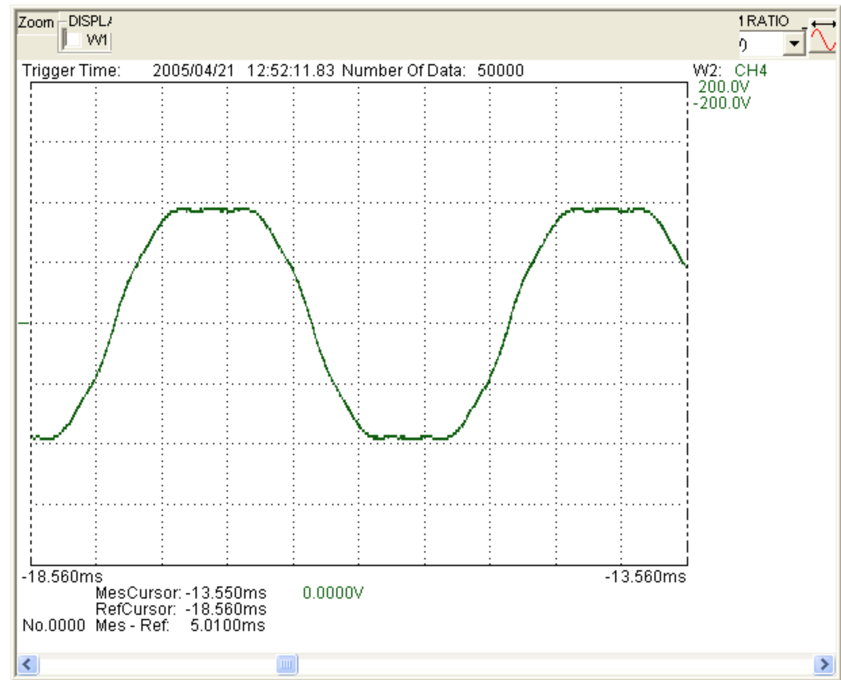




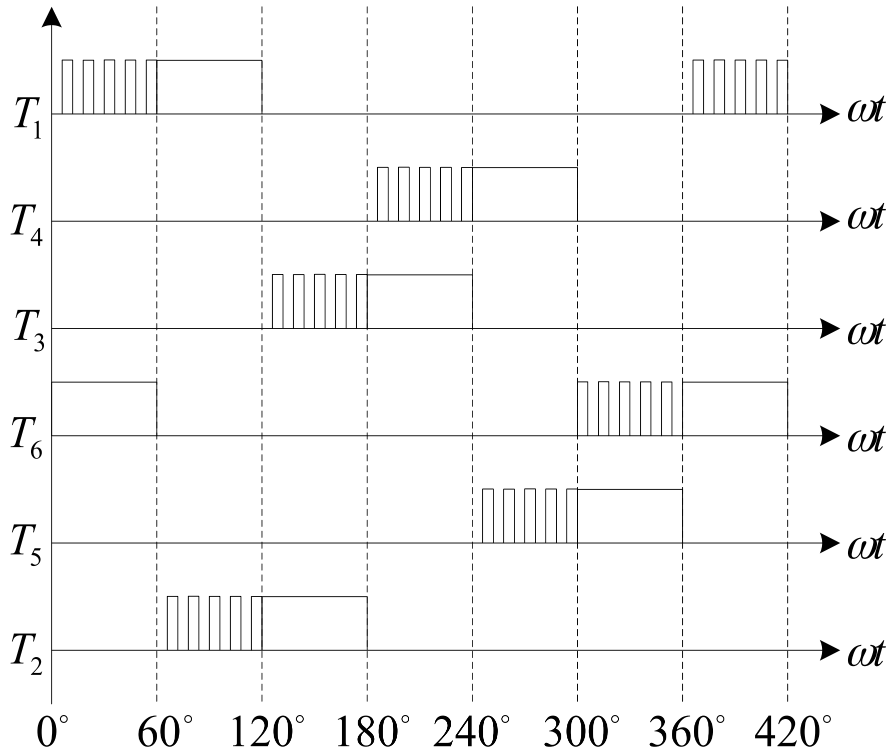


无刷直流电机的反电动势

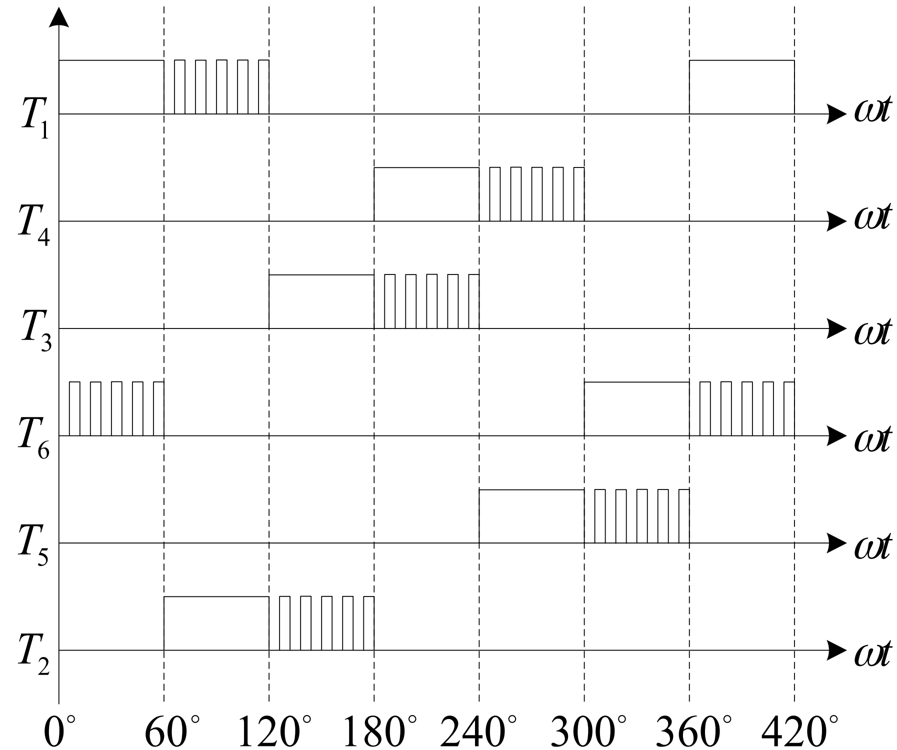




无刷直流电机的换流模式

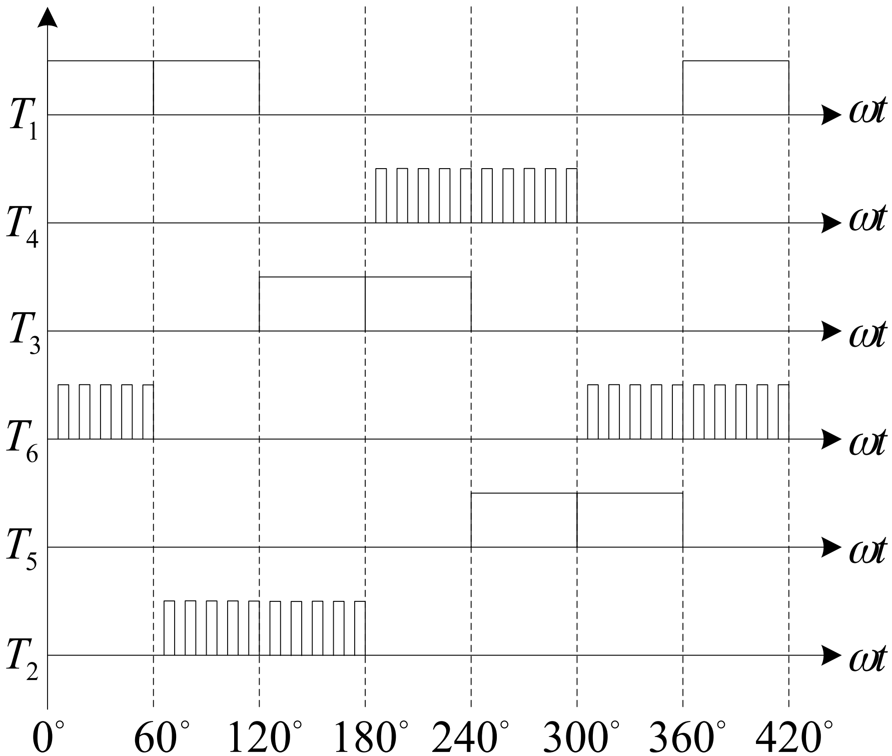


（1） pwm-on型调制方式

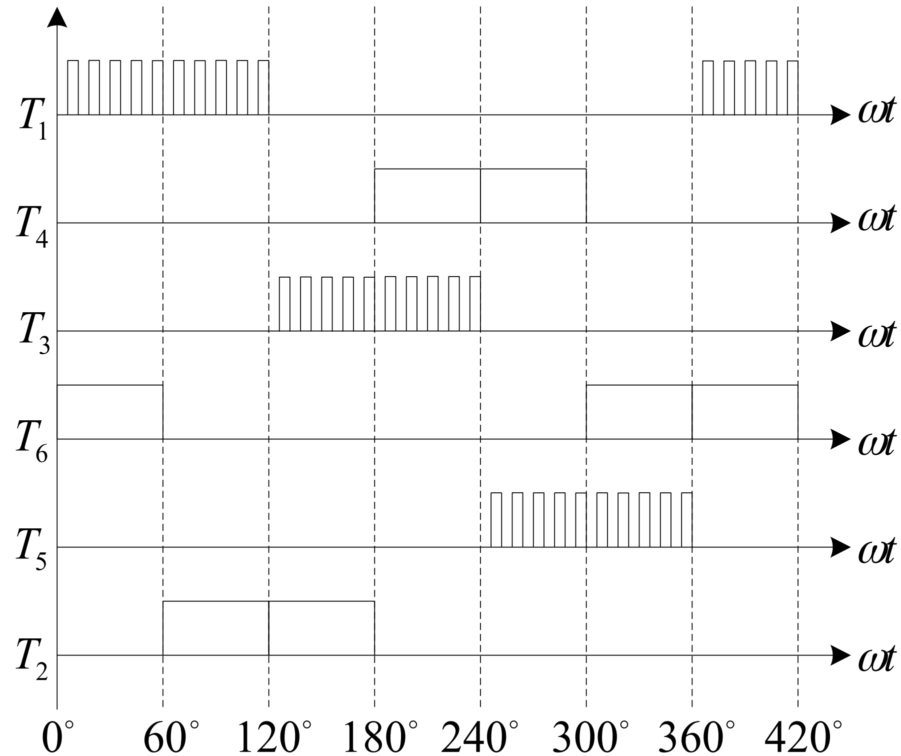


（2）on-pwm型调制方式

无刷直流电机的换流模式

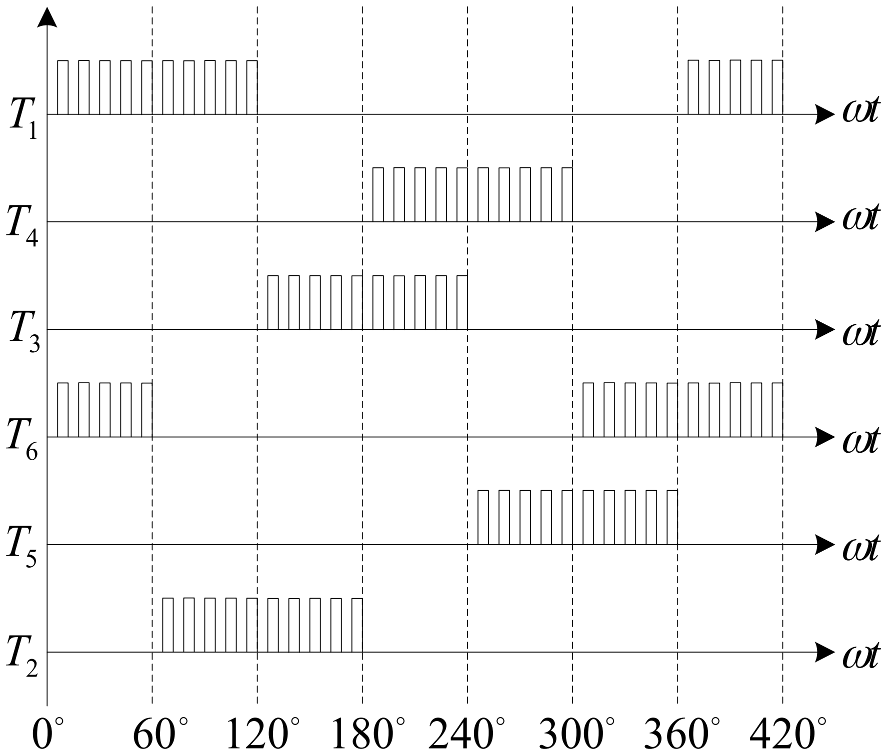


（3）H_on-L_pwm型调制方式

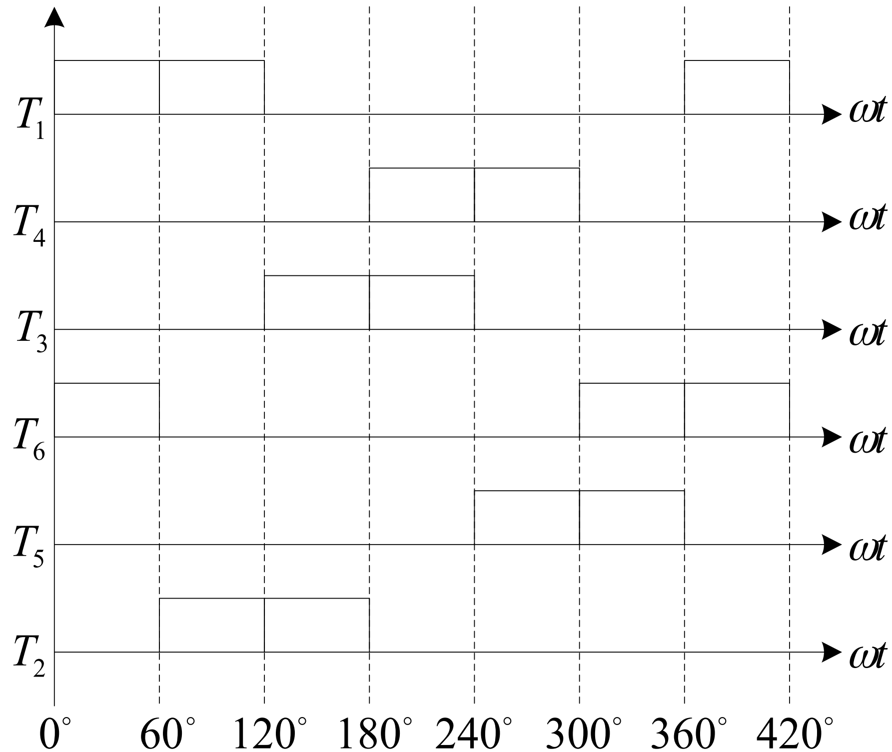


（4）H_pwm-L_on型调制方式

无刷直流电机的换流模式

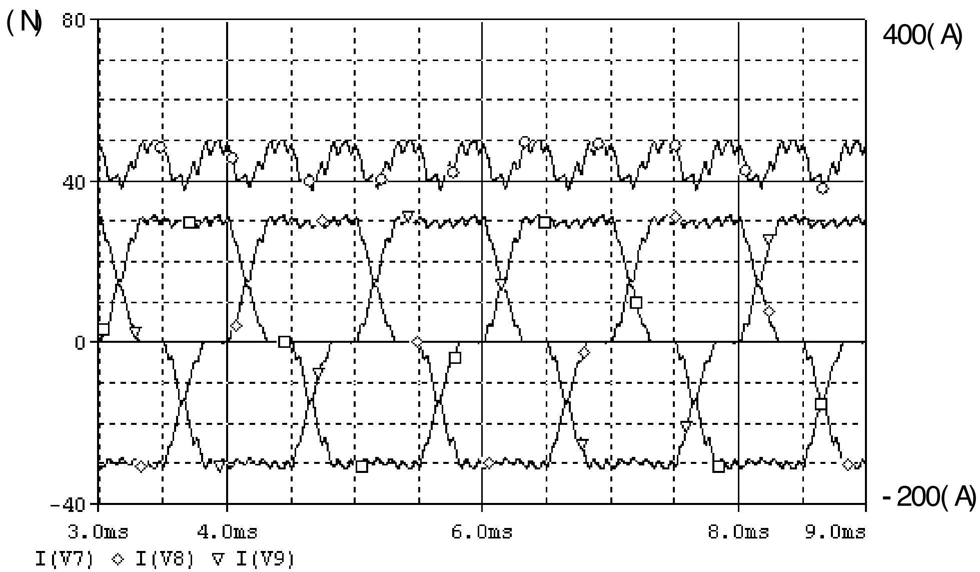


（5）L_pwm-H_pwm型调制方式

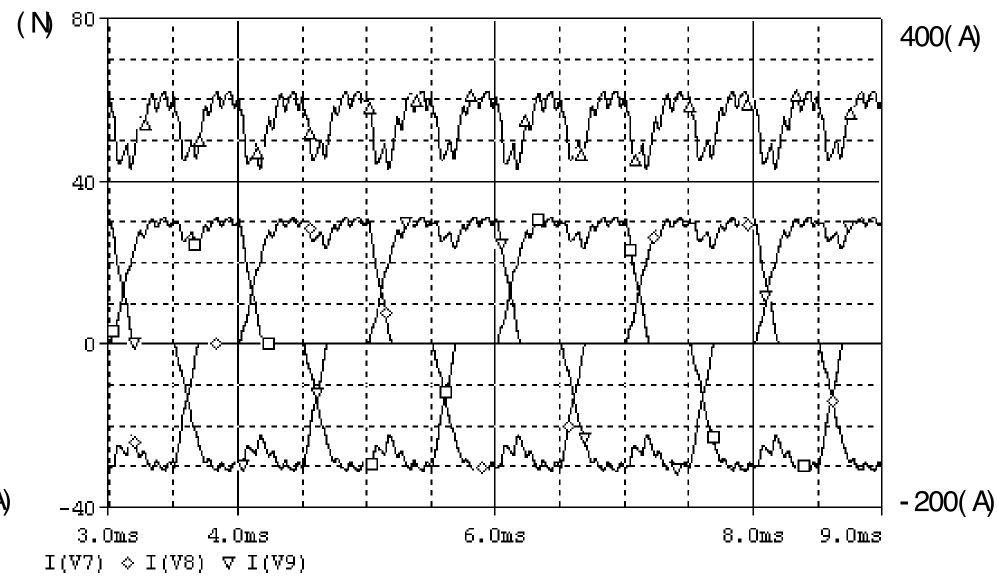


（6）on-on型调制方式

无刷直流电机的仿真结果

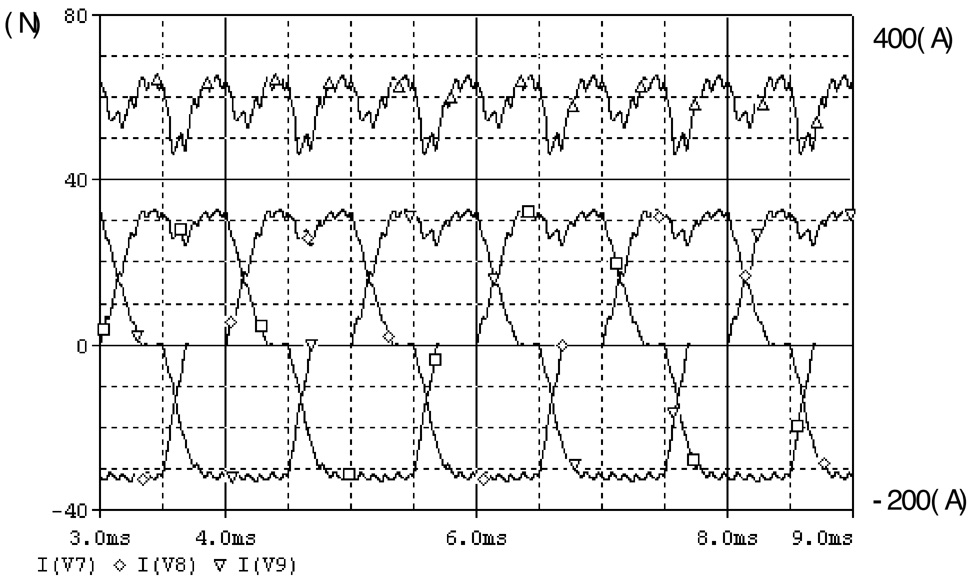


（1） pwm-on型调制方式

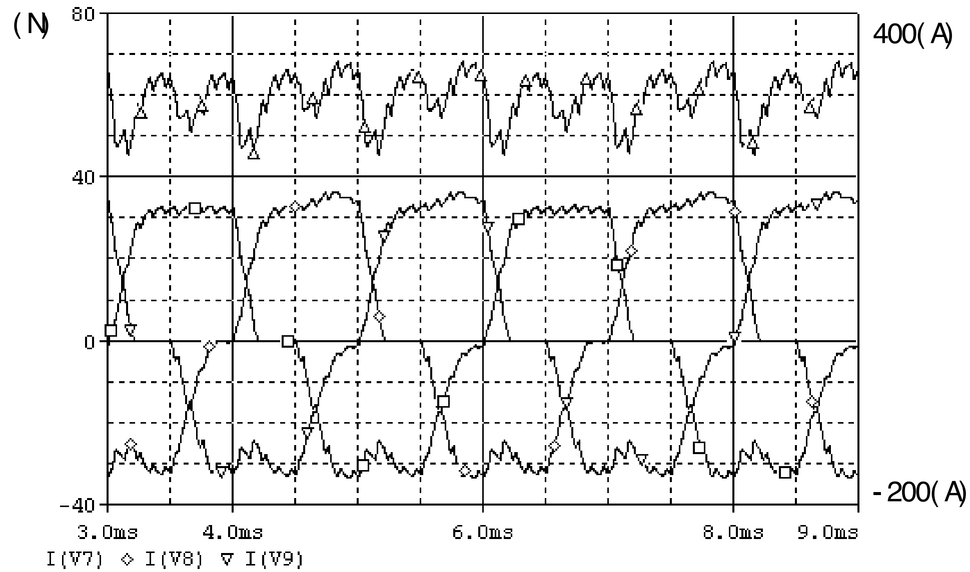


（2） on-pwm型调制方式

无刷直流电机的换流模式

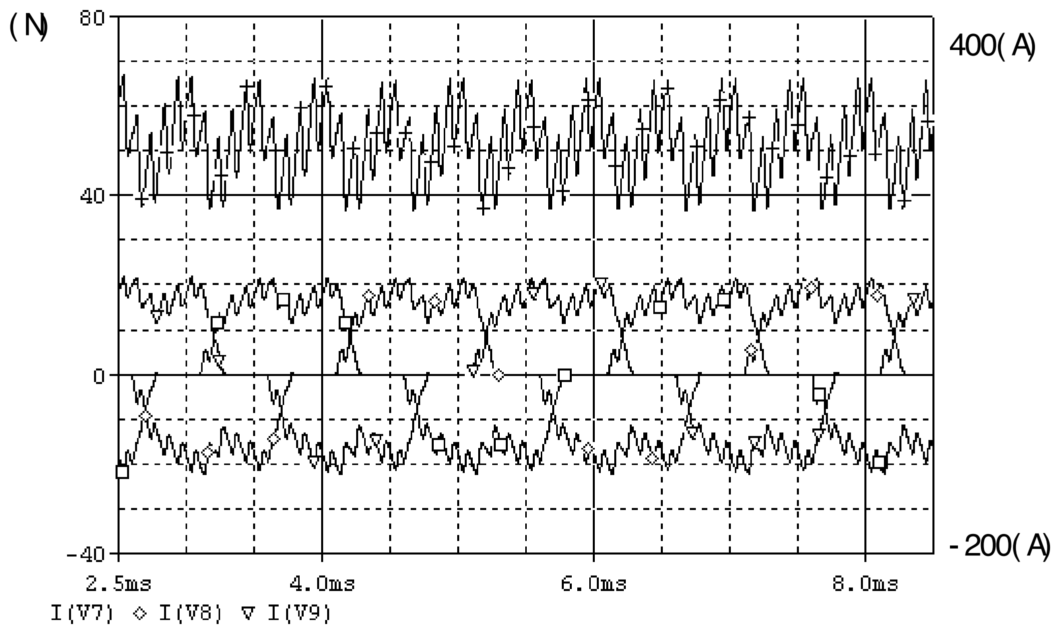


（3）H_on-L_pwm型调制方式



（4）H_pwm-L_on型调制方式

无刷直流电机的换流模式



（5）L_on-H_pwm型调制方式

调制方式	转矩脉动仿真结果	
	上桥	下桥
pwm-on	20%	20%
on-pwm	30%	30%
H_pwm-L_on	18.5%	37.5%
H_on-L_pwm	33.8%	15.4%
H_pwm-L_pwm	42.4%	42.4%

无刷直流电机的换流模式

（1）采用pwm-on方式时，下桥换相和上桥换相的换相转矩脉动相等，且最小；非换向相电流脉动也是最小的；

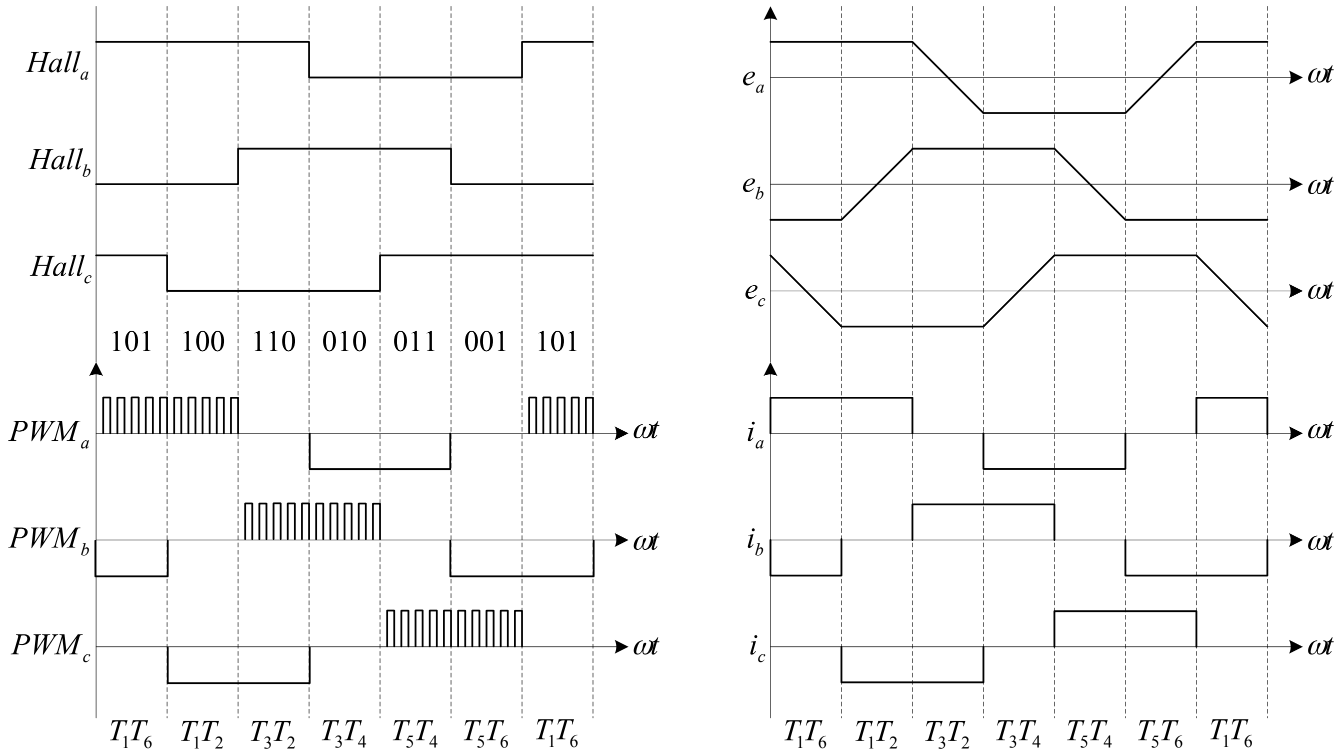
（2）采用on-pwm方式时，下桥和上桥换相转矩脉动相等且比pwm-on方式大，非换向相电流脉动也比pwm-on方式时大。

（3）采用H_pwm-L_on方式时，下桥换相转矩脉动和非换向相电流脉动大且与on-pwm方式时的转矩脉动和电流脉动相等，上桥换相转矩脉动和非换向相电流脉动小且与pwm-on方式时的转矩脉动和电流脉动相等。

（4）采用H_on-L_pwm方式时，下桥换相转矩脉动和非换向相电流脉动小且与pwm-on方式时的转矩脉动和电流脉动相等，上桥换相转矩脉动和非换向相电流脉动大且与on-pwm方式时的转矩脉动和电流脉动相等。

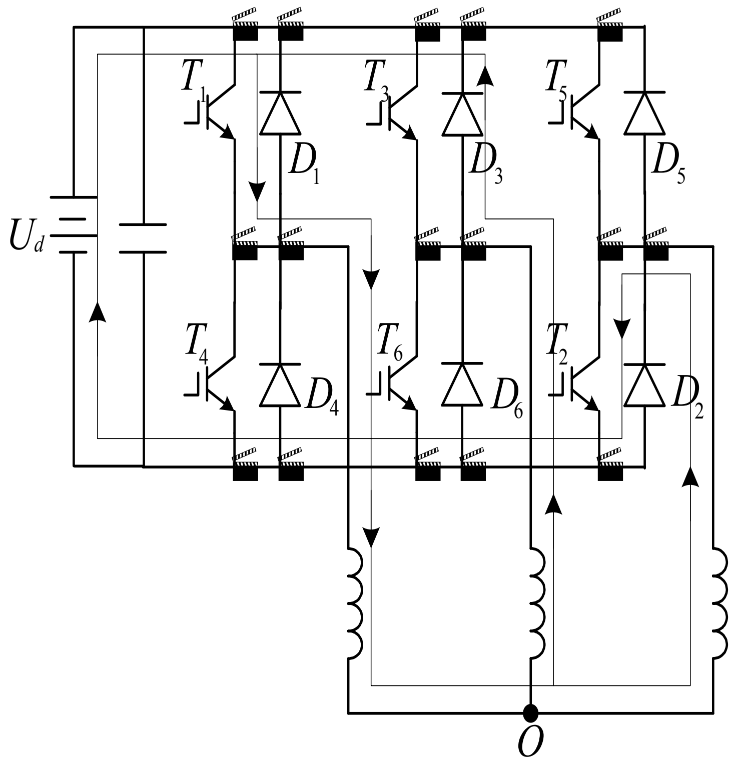
（5）采用H_pwm-L_pwm方式时，换相转矩脉动最大且非换向相电流脉动也最大。

无刷直流电机的电路模型

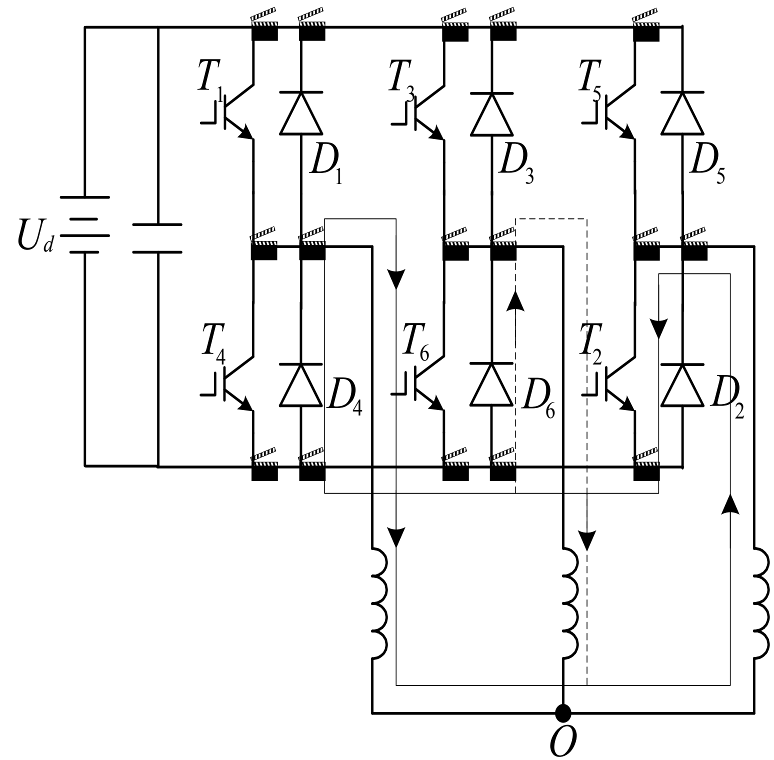


HALL状态	101	100	110	010	011	001
导通功率管	T_6T_1	T_1T_2	T_2T_3	T_3T_4	T_4T_5	T_5T_6

单侧调制下桥臂换向过程分析

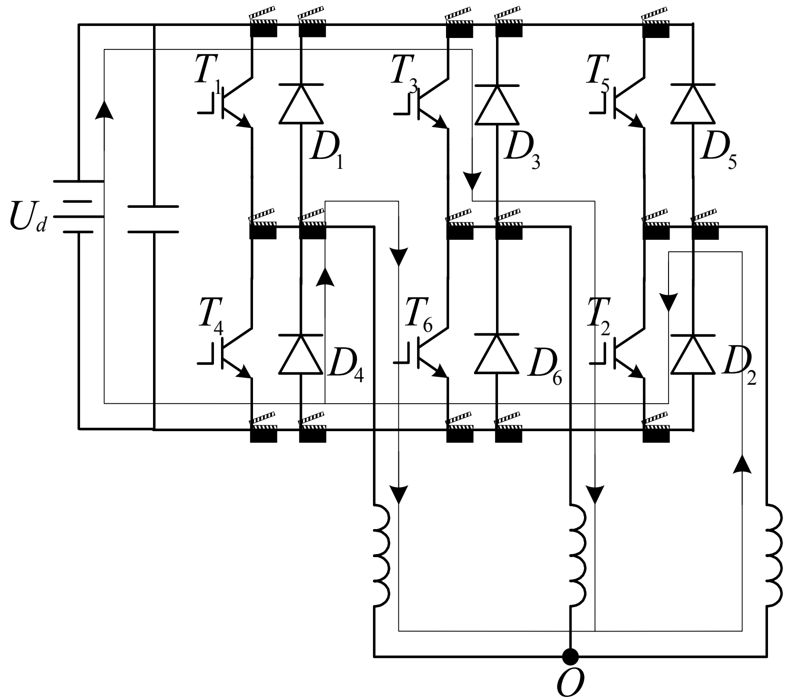


T1、T2同时导通

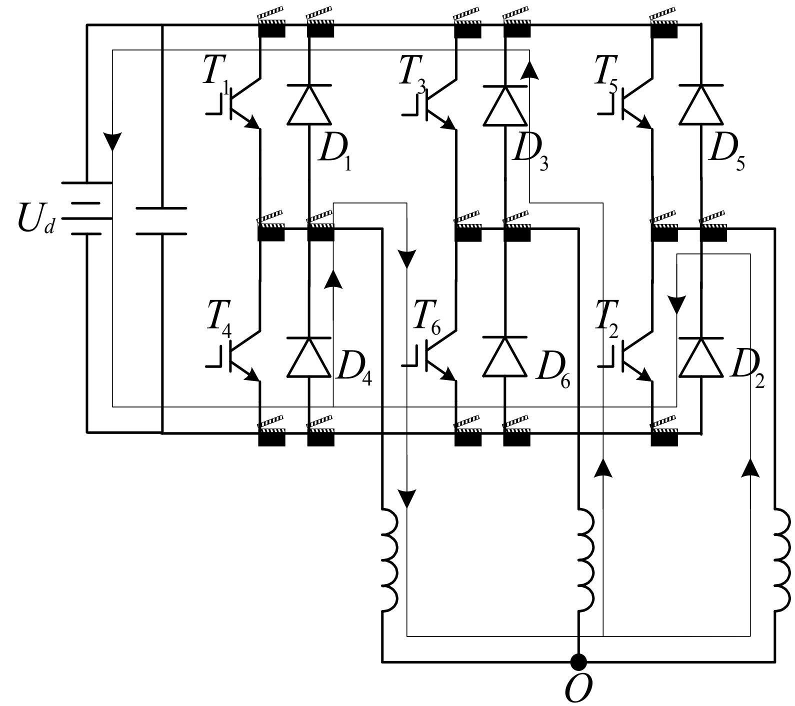


T1关断、T2导通

单侧调制上桥臂换向过程分析

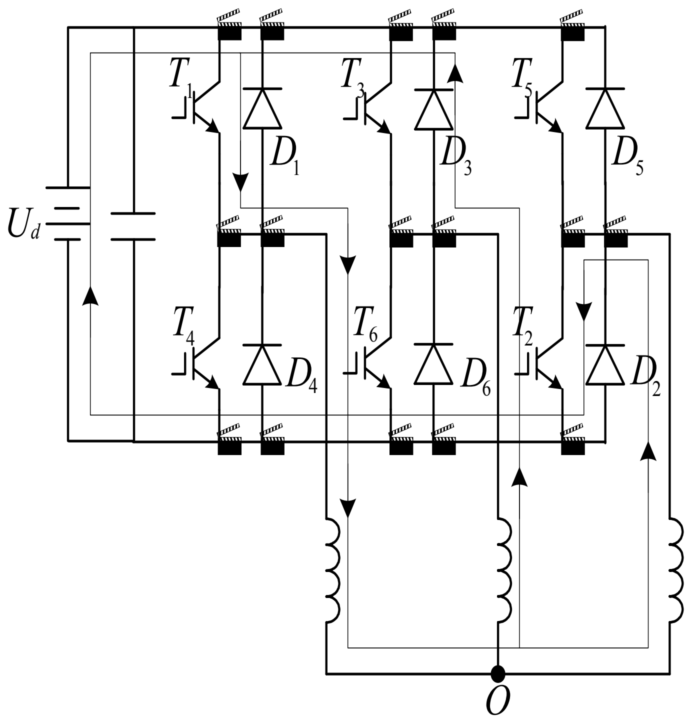


T2、T3同时导通

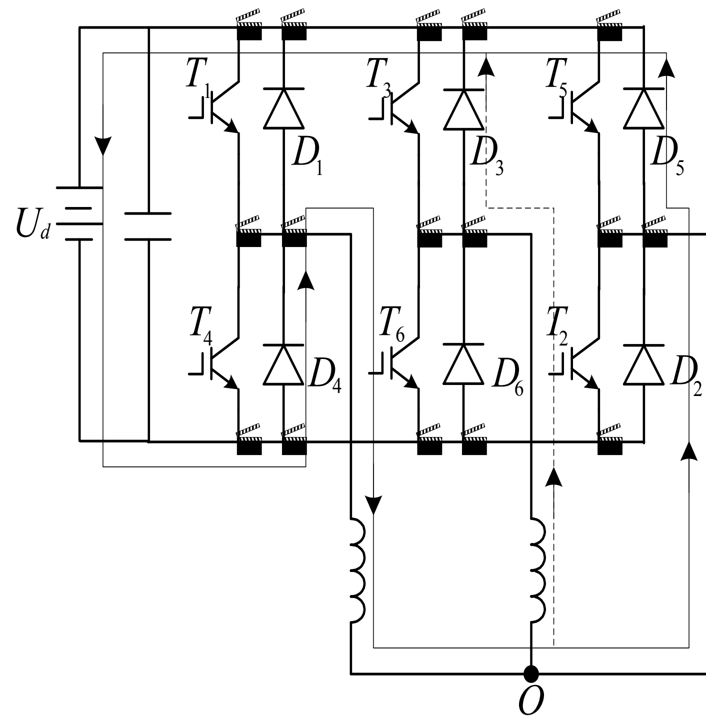


T3关断、T2导通

双侧调制下桥臂换向过程分析

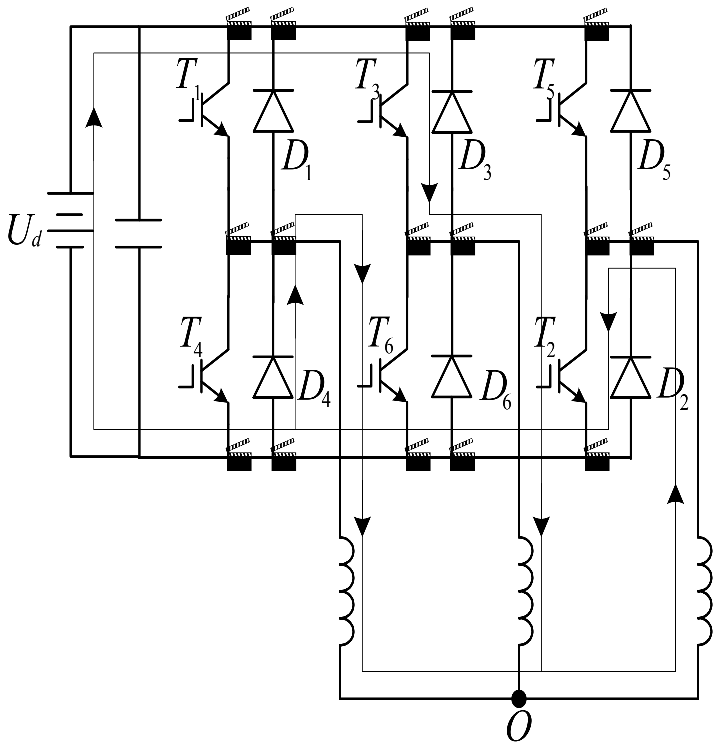


T1、T2同时导通

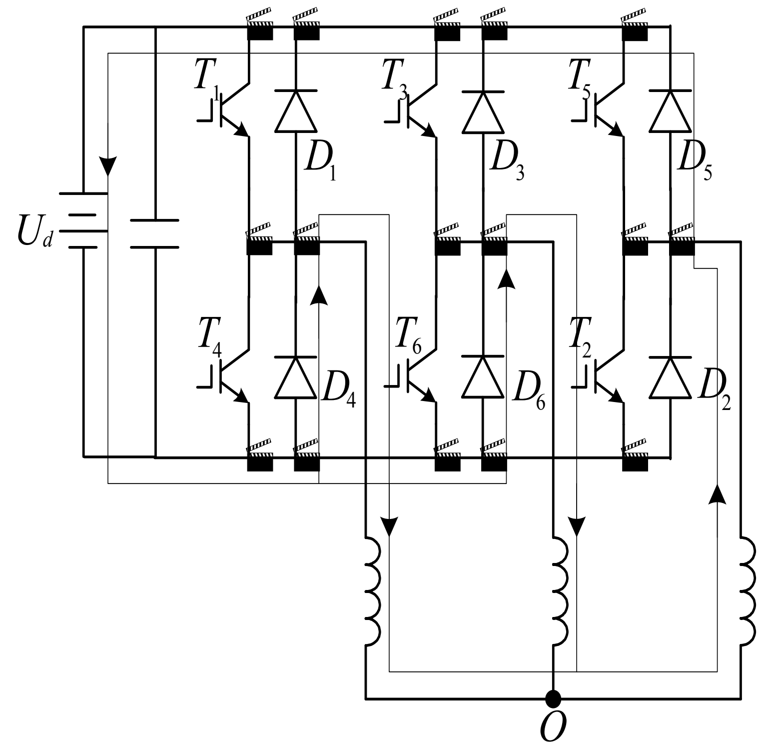


T1、T2同时关断

双侧调制上桥臂换向过程分析



T2、T3同时导通

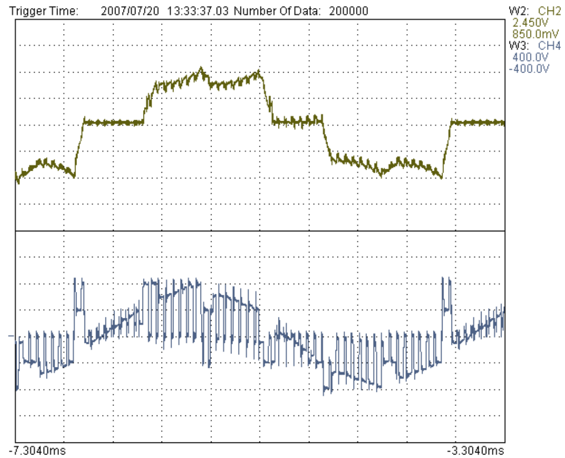


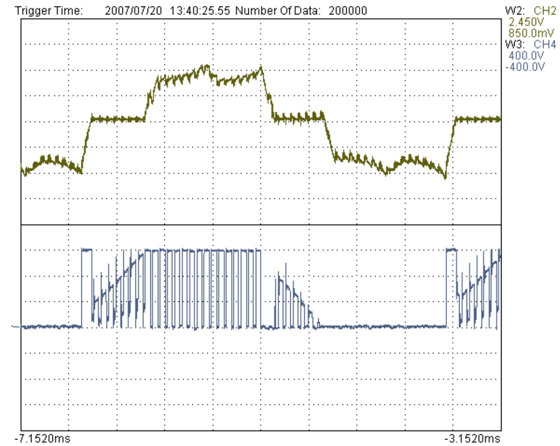
T2、T3同时关断

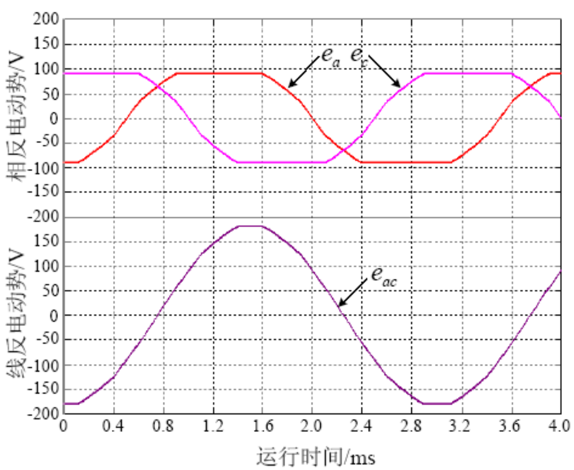
不同调制方式的转矩脉动对比分析

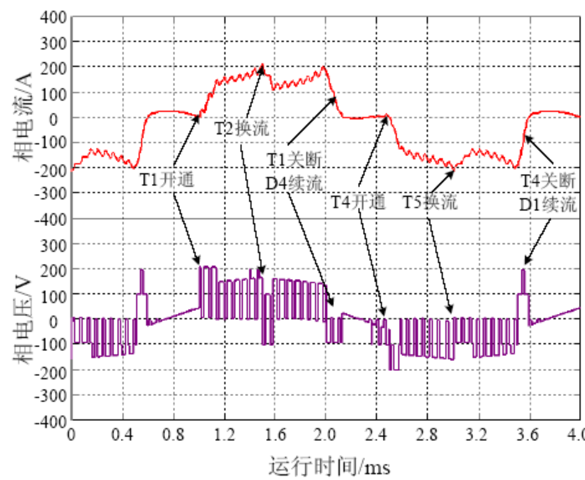
- 功率管开通，转矩脉动相同；
- 功率管关断，单侧调制转矩脉动大于双侧调制转矩脉动；
- 单侧调制存在相见续流现象，换相时间长；
- 双侧调制引入直流母线电压到续流回路，产生反电压，换相时间短；
- 单侧调制较双侧调制损耗小。

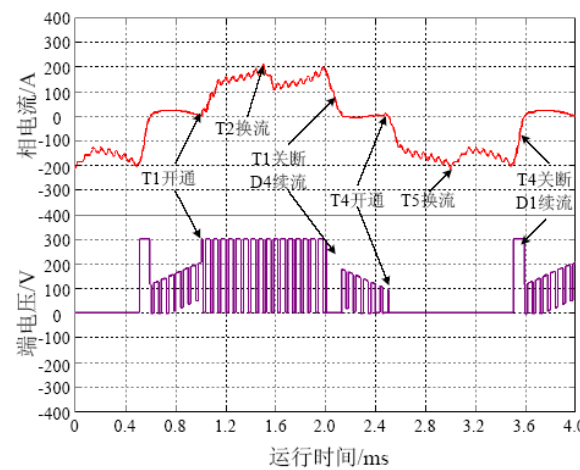
无刷直流电机的相电流分析



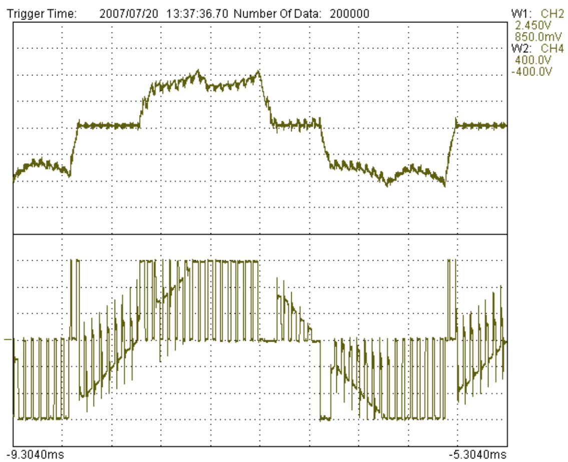


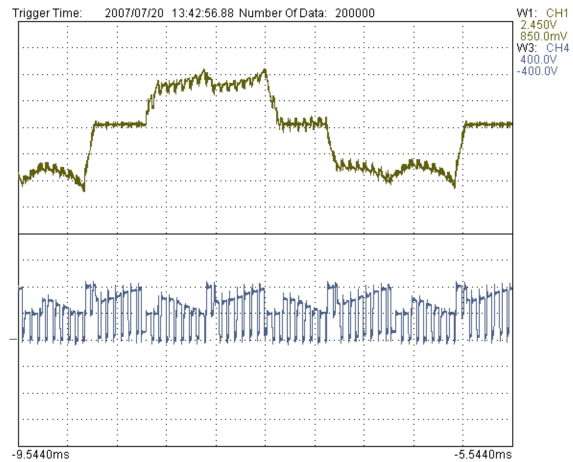


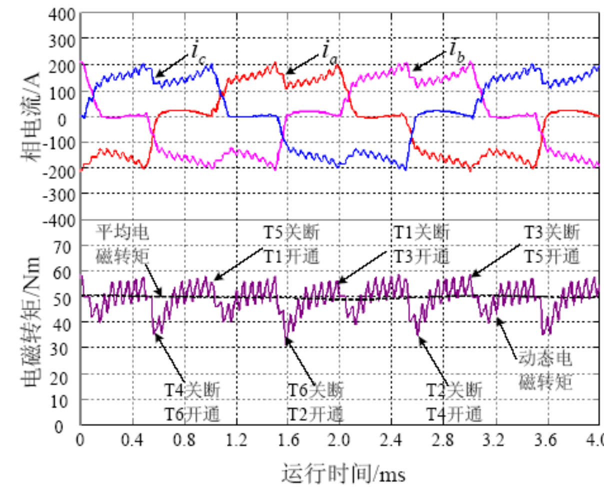


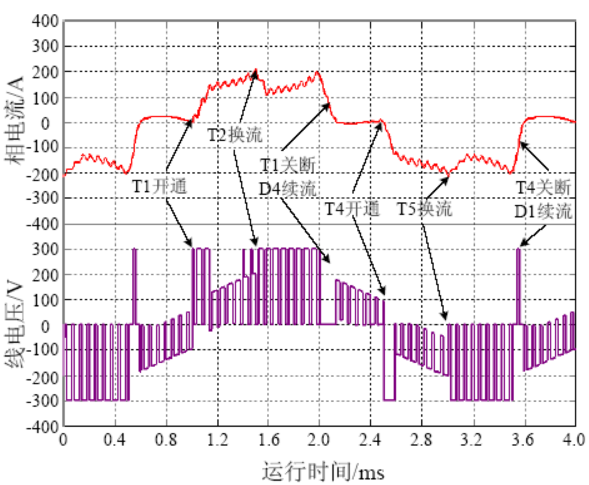


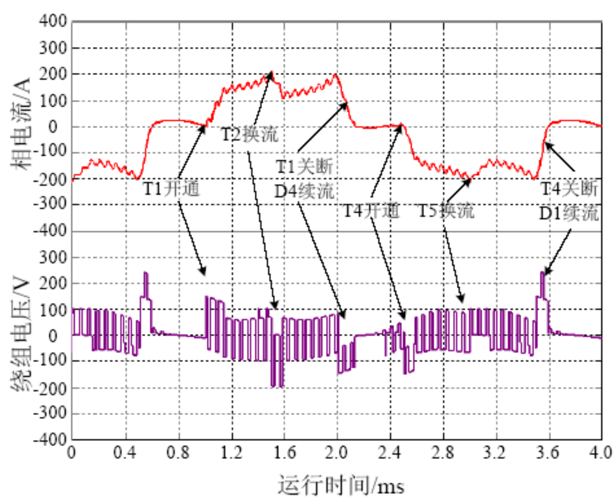
无刷直流电机的相电流分析

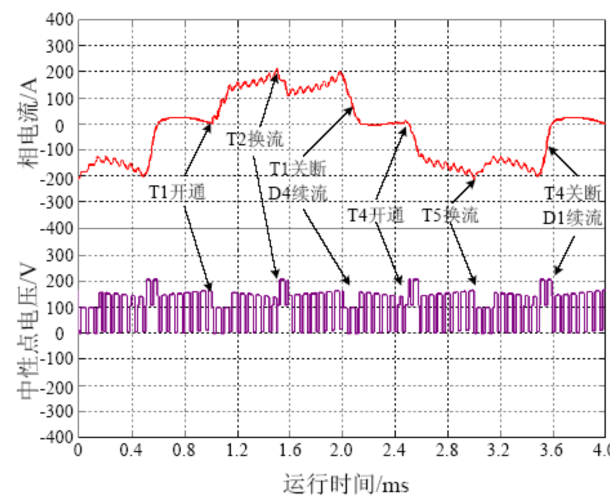




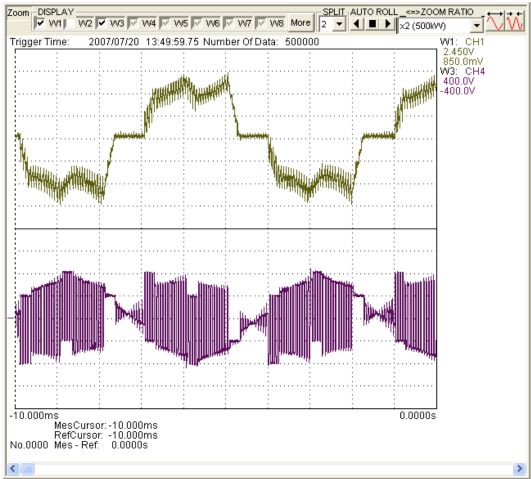


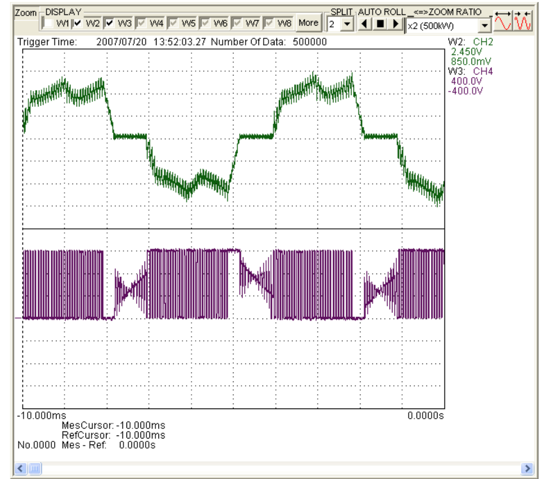


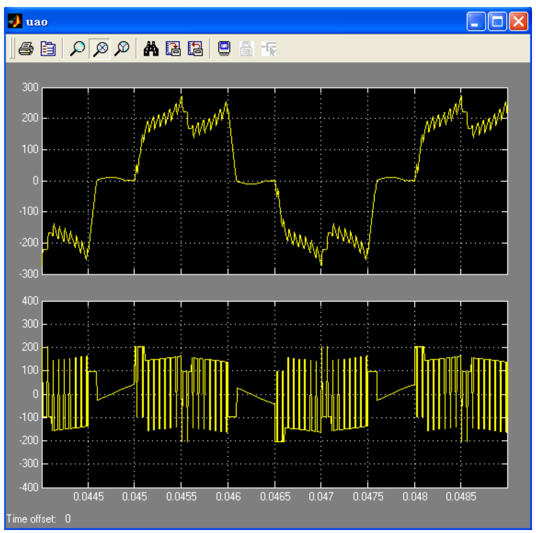


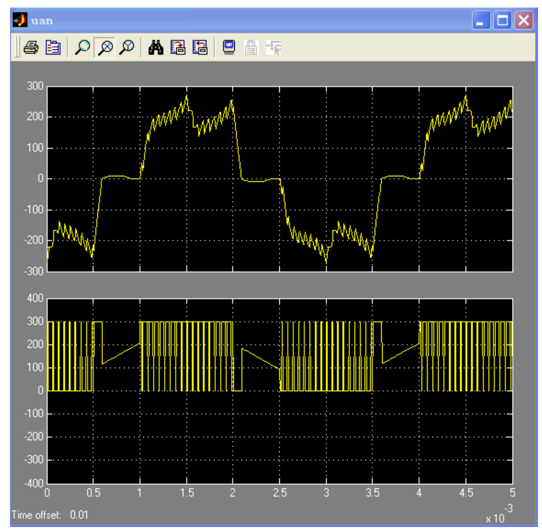


无刷直流电机的相电流分析

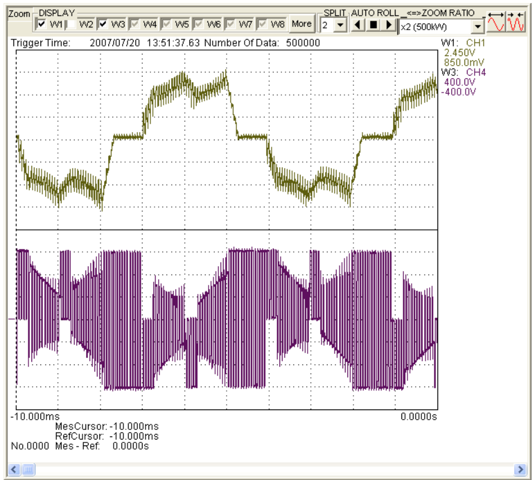


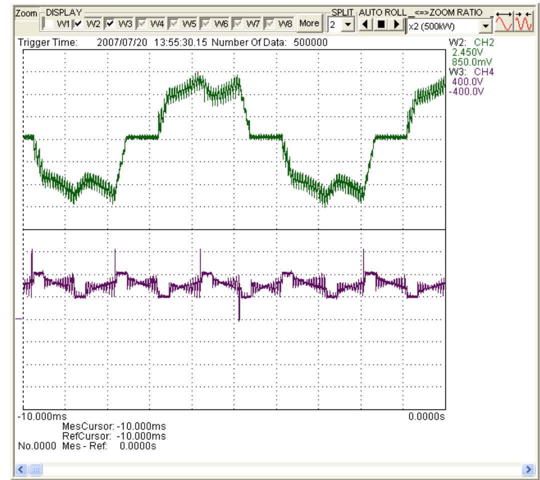


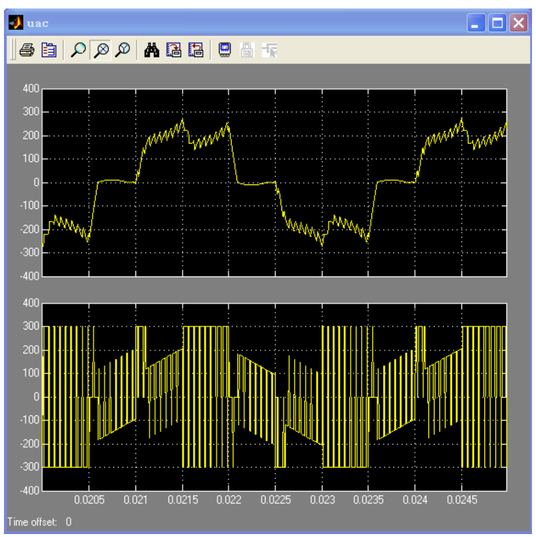


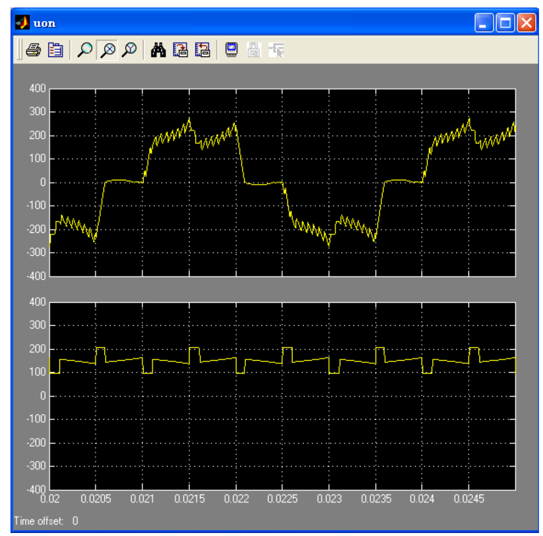


无刷直流电机的相电流分析

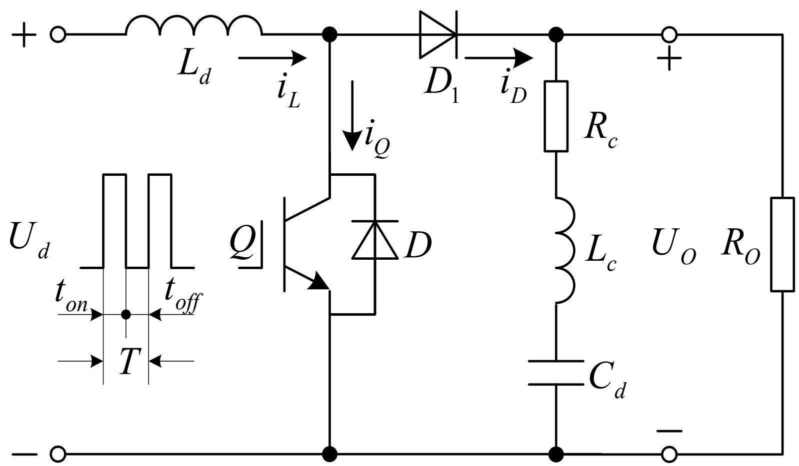


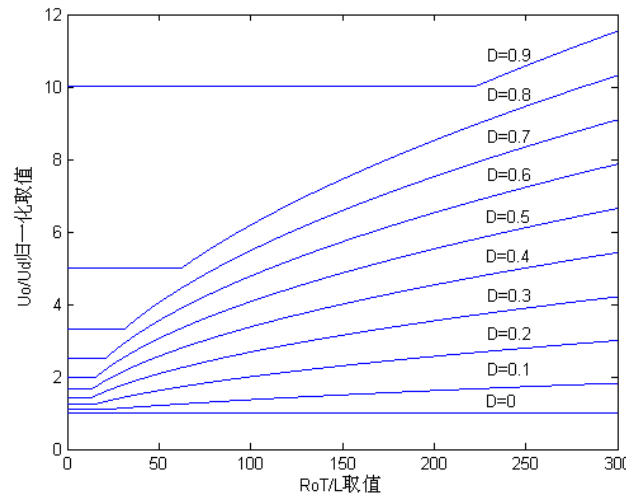






无刷直流电机的制动控制





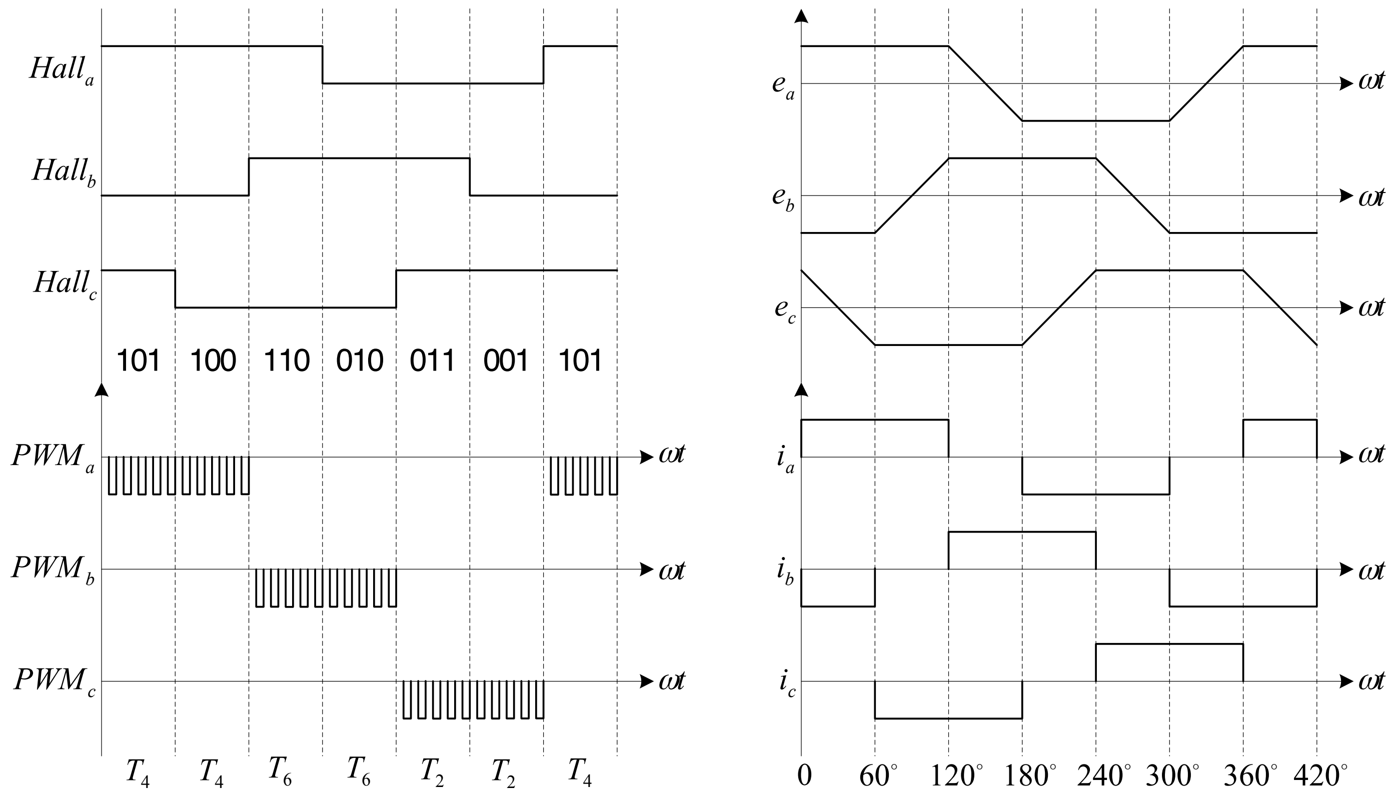
升压斩波器原理

$$\frac{L_d}{R_O \cdot T} \geq \frac{d(1-d)^2}{2}$$

$$\frac{U_O}{U_d} = \frac{1+\sqrt{L_d + 2d^2 \cdot (R_O \cdot T / L_d)}}{2}$$

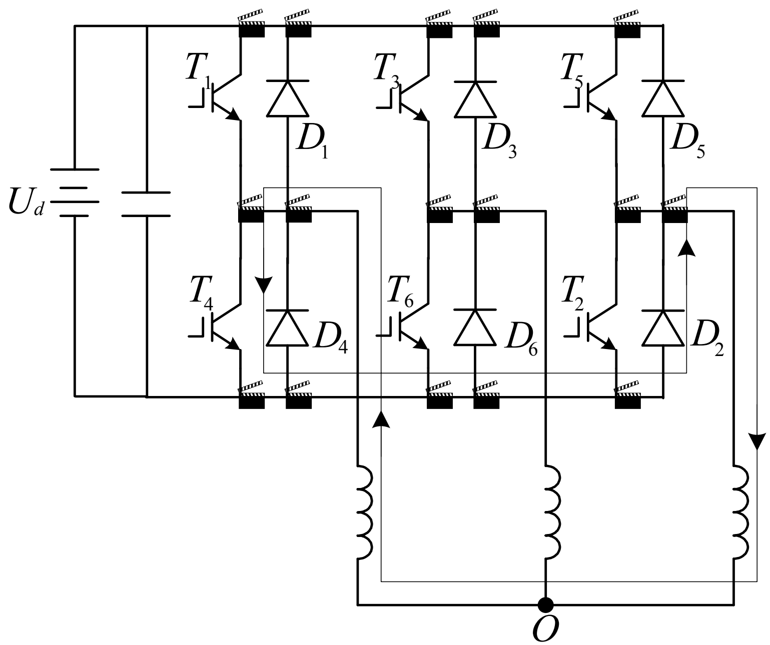
$$\frac{U_O}{U_d} = \frac{1}{1-d}$$

无刷直流电机的制动控制

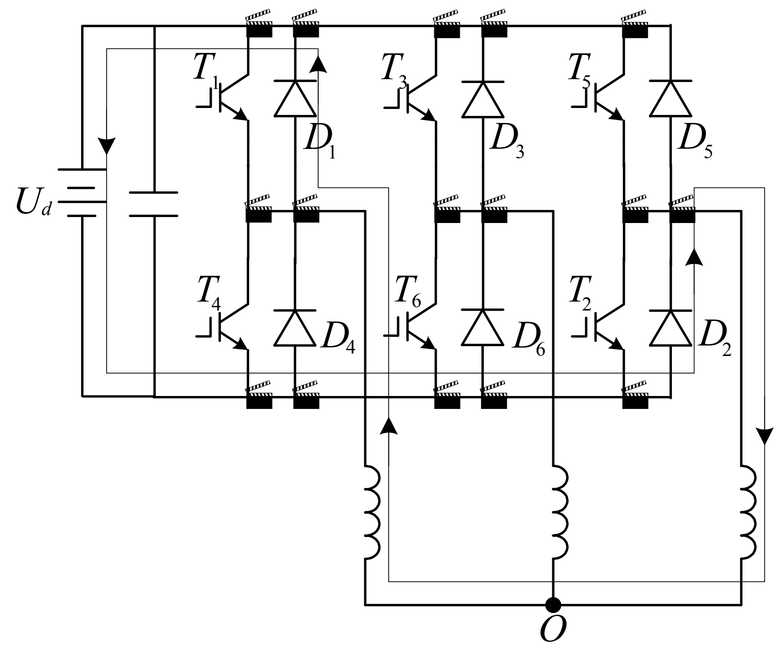


HALL状态	101	100	110	010	011	001
导通功率管	T_4	T_4	T_6	T_6	T_2	T_2

无刷直流电机的制动控制

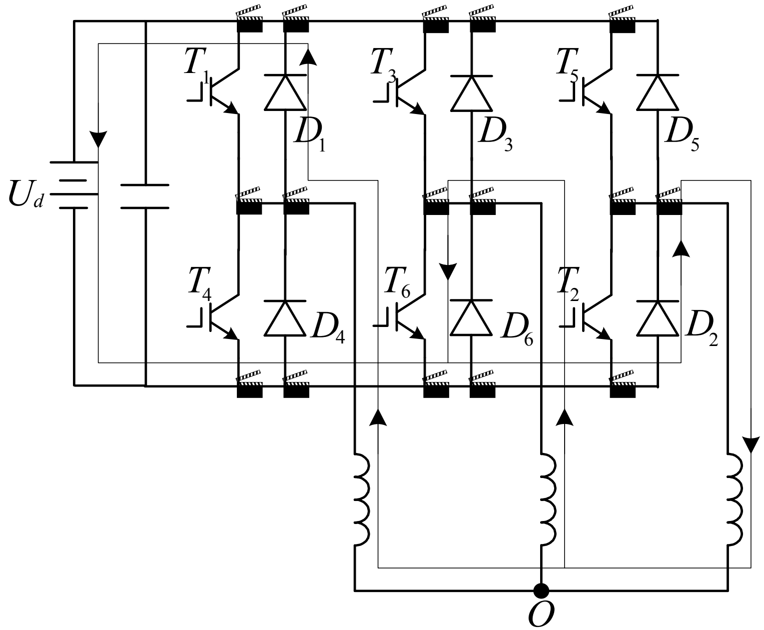


T4开通时电流流向

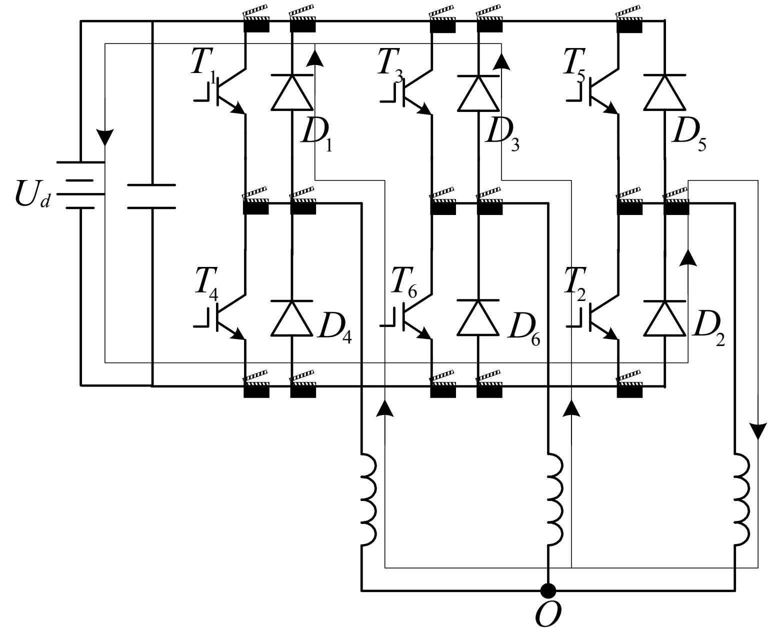


T4关断时的电流流向

无刷直流电机的制动控制

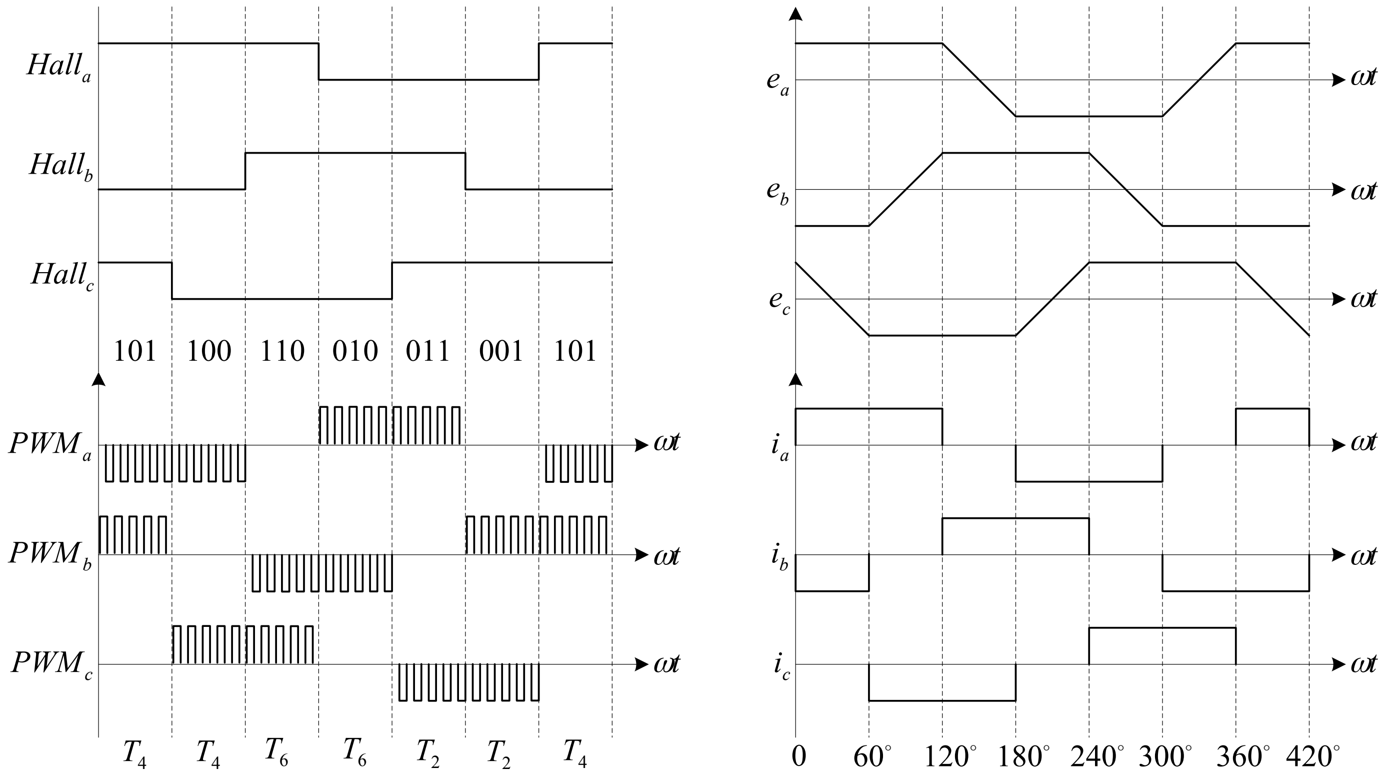


T6开通时电流流向



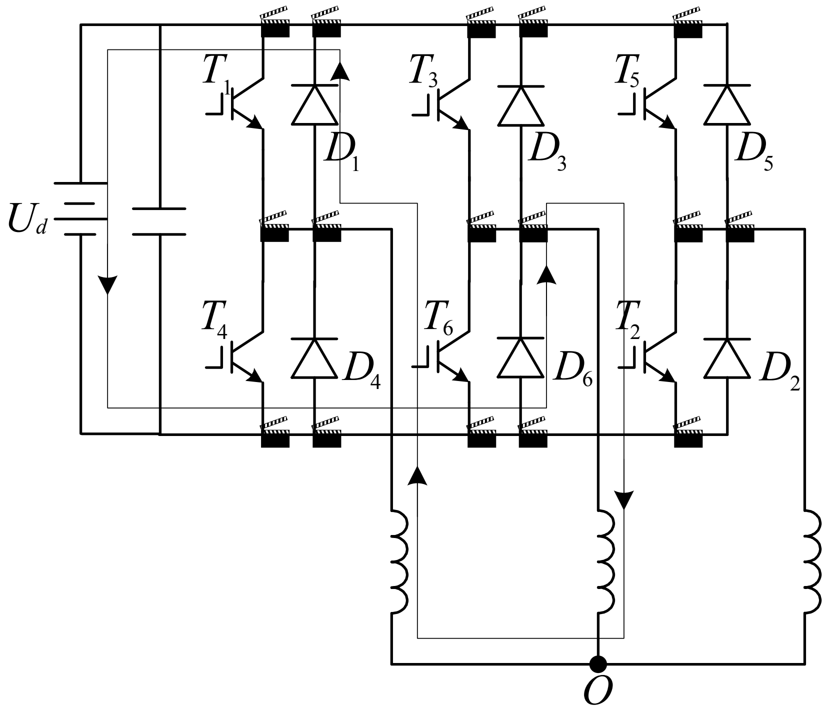
T6关断时的电流流向

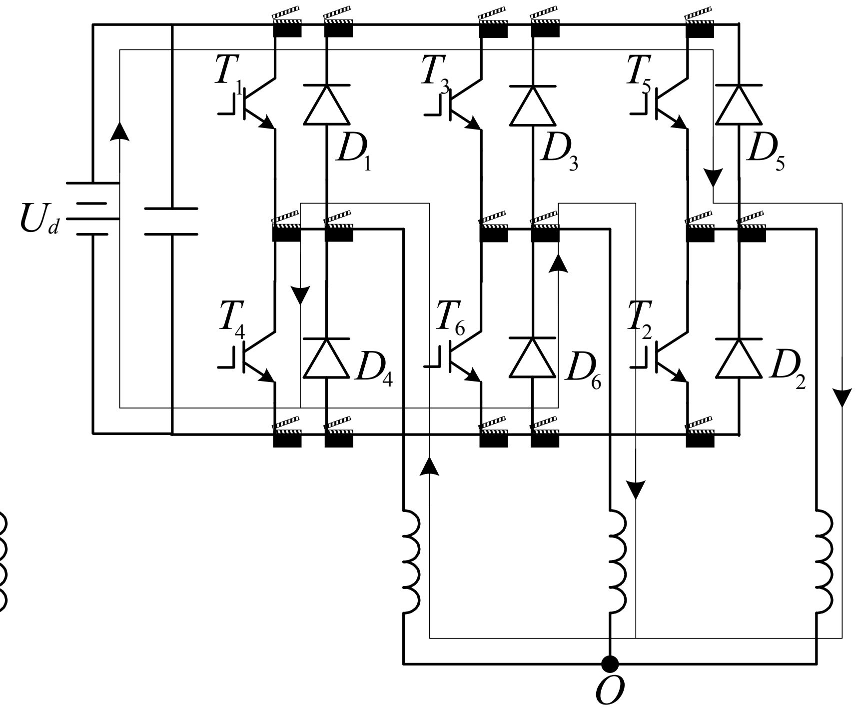
无刷直流电机的制动控制



HALL状态	101	100	110	010	011	001
导通功率管	T_3T_4	T_4T_5	T_5T_6	T_6T_1	T_1T_2	T_2T_3

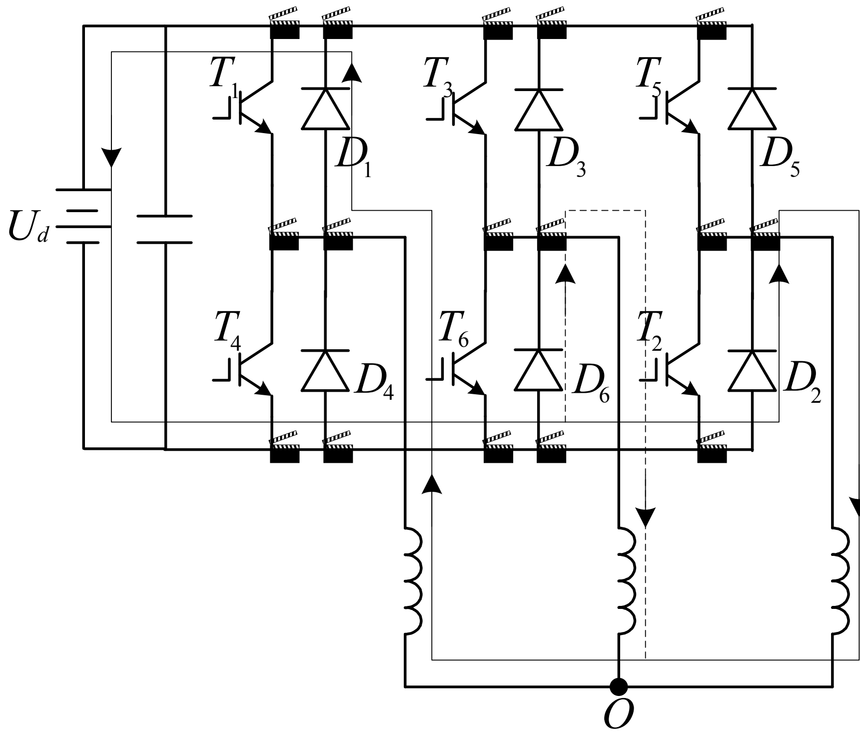
无刷直流电机的制动控制

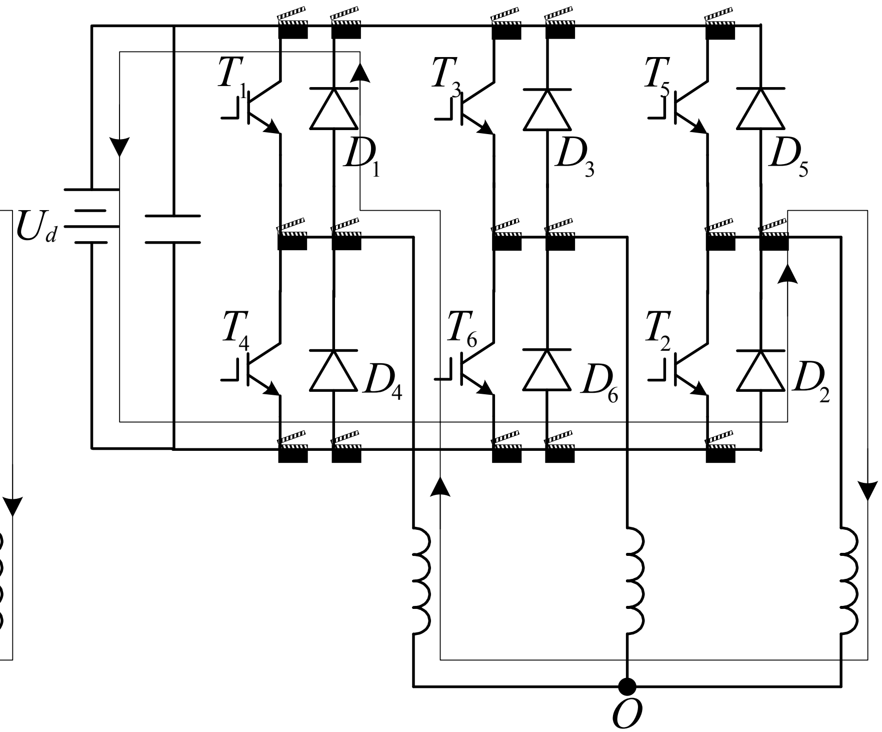




T3、T4关断时电流流向 **T4、T5导通时的电流流向**

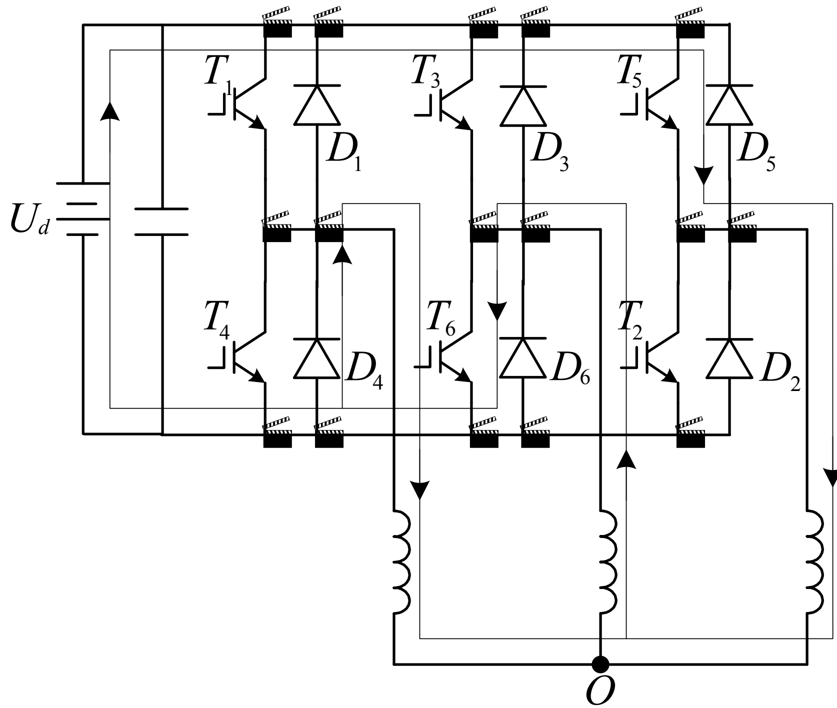
无刷直流电机的制动控制



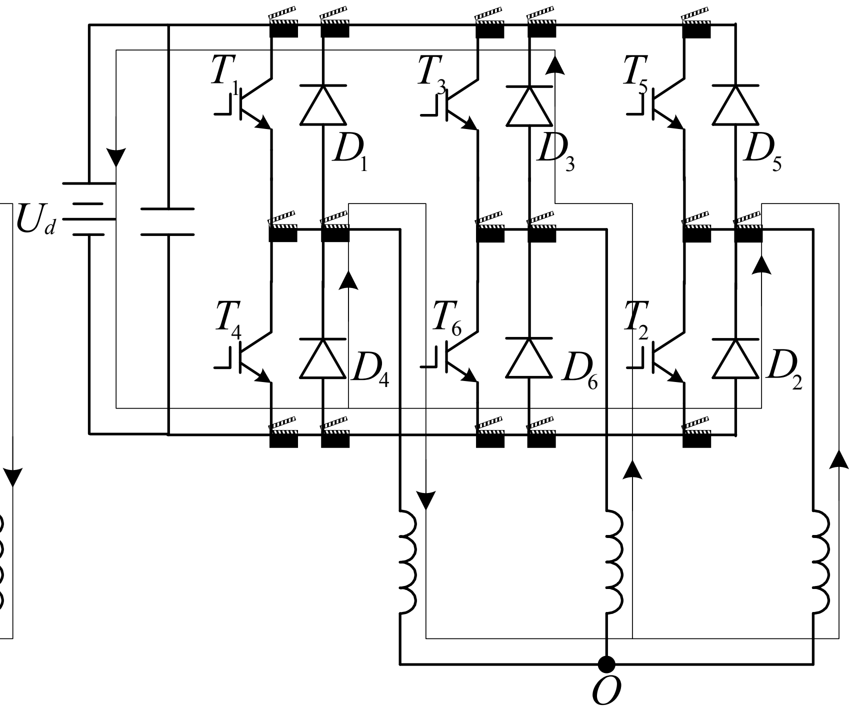


T4、T5关断时电流流向（$i_B>0$）T4、T5关断时的电流流向（$i_B=0$）

无刷直流电机的制动控制

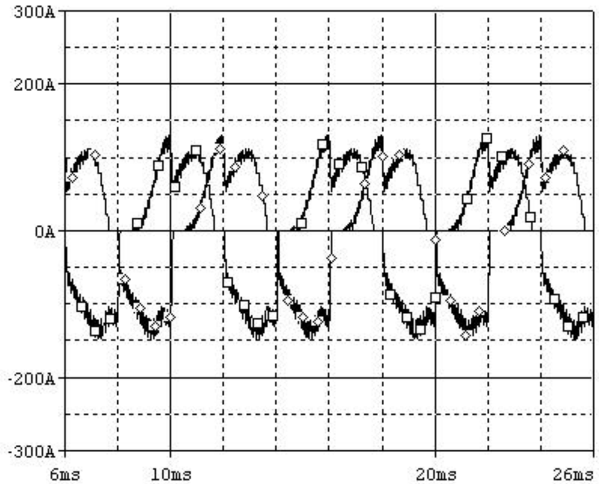


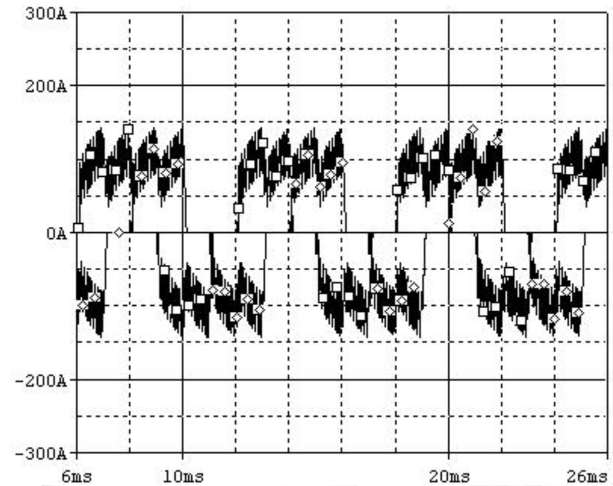
T3、T4关断时电流流向

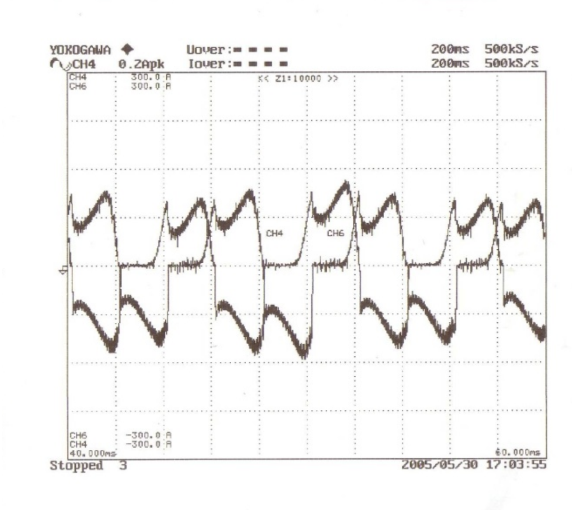


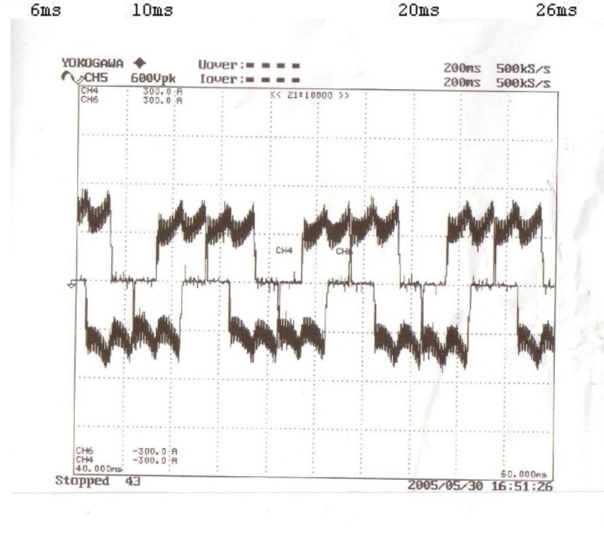
T4、T5导通时的电流流向

无刷直流电机的制动相电流分析



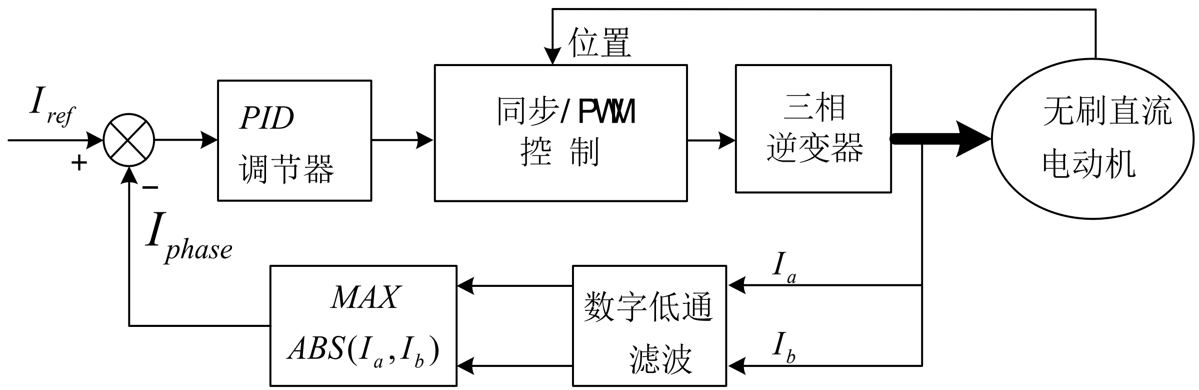




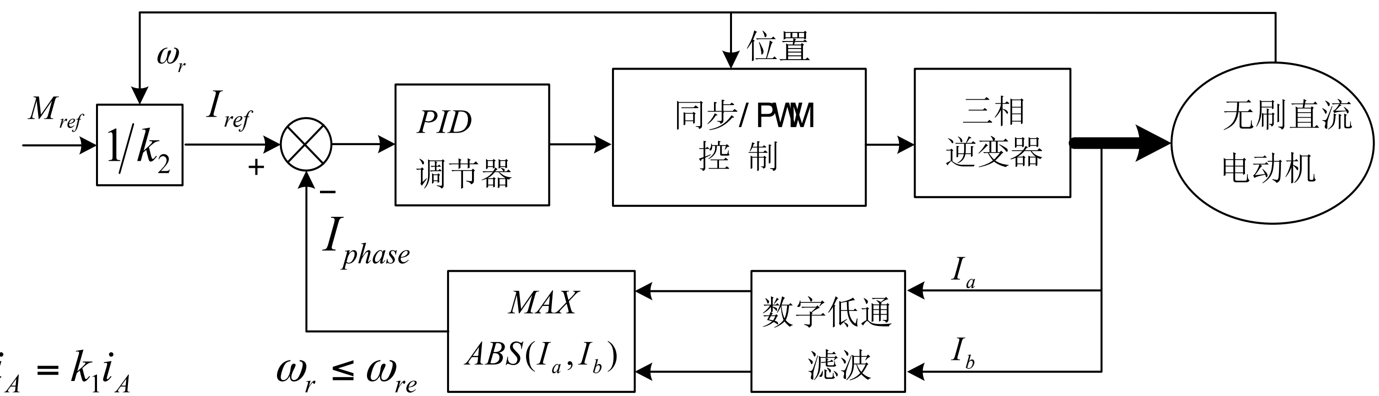


无刷直流电机的控制系统

电流闭环控制结构



转矩闭环控制结构

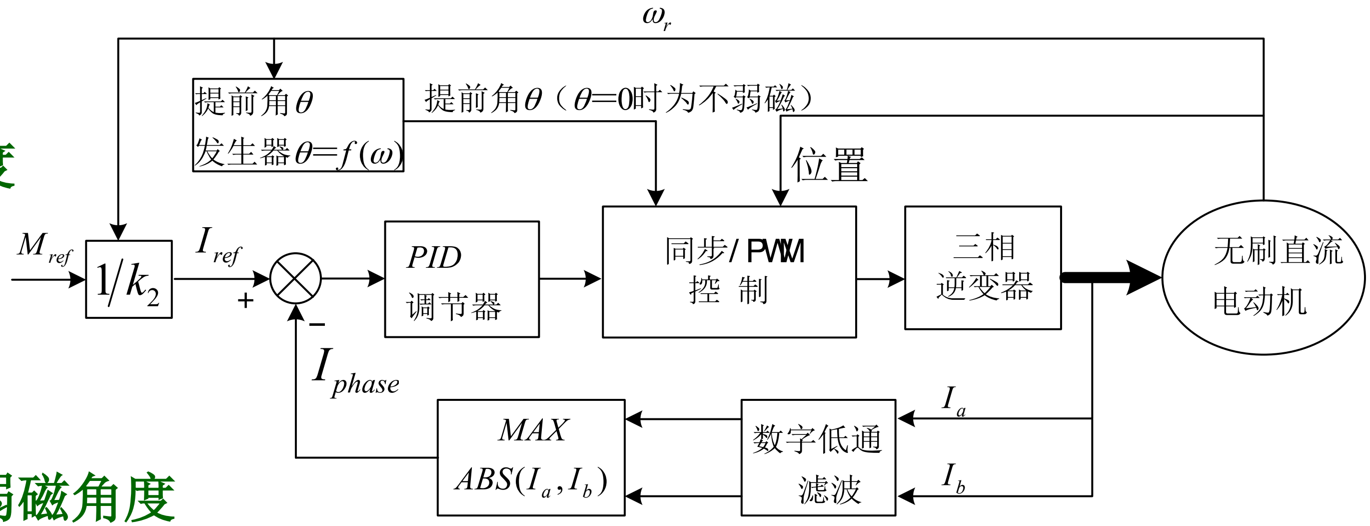


$$T_{em} = \begin{cases} K_m \cdot \phi_m \cdot i_A = k_1 i_A & \omega_r \le \omega_{re} \\ K_m \cdot \phi_m \cdot \dfrac{\omega_r}{\omega_{re}} \cdot i_A = k_1 \cdot \dfrac{\omega_r}{\omega_{re}} \cdot i_A & \omega_r > \omega_{re} \end{cases}$$

无刷直流电机的控制系统

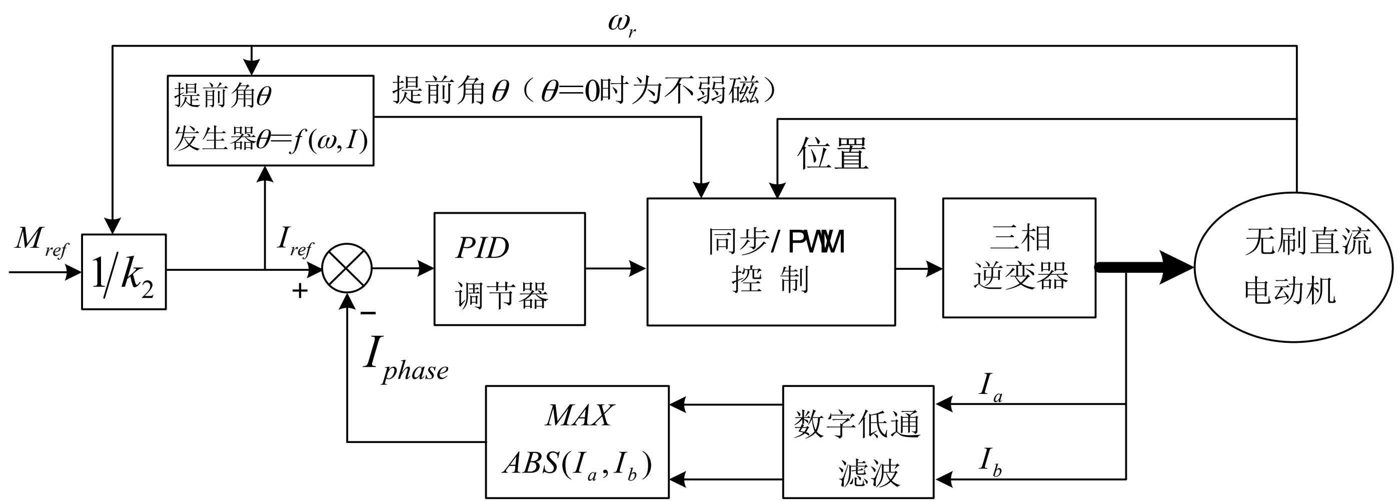
转矩闭环控制结构

依据转速控制弱磁角度

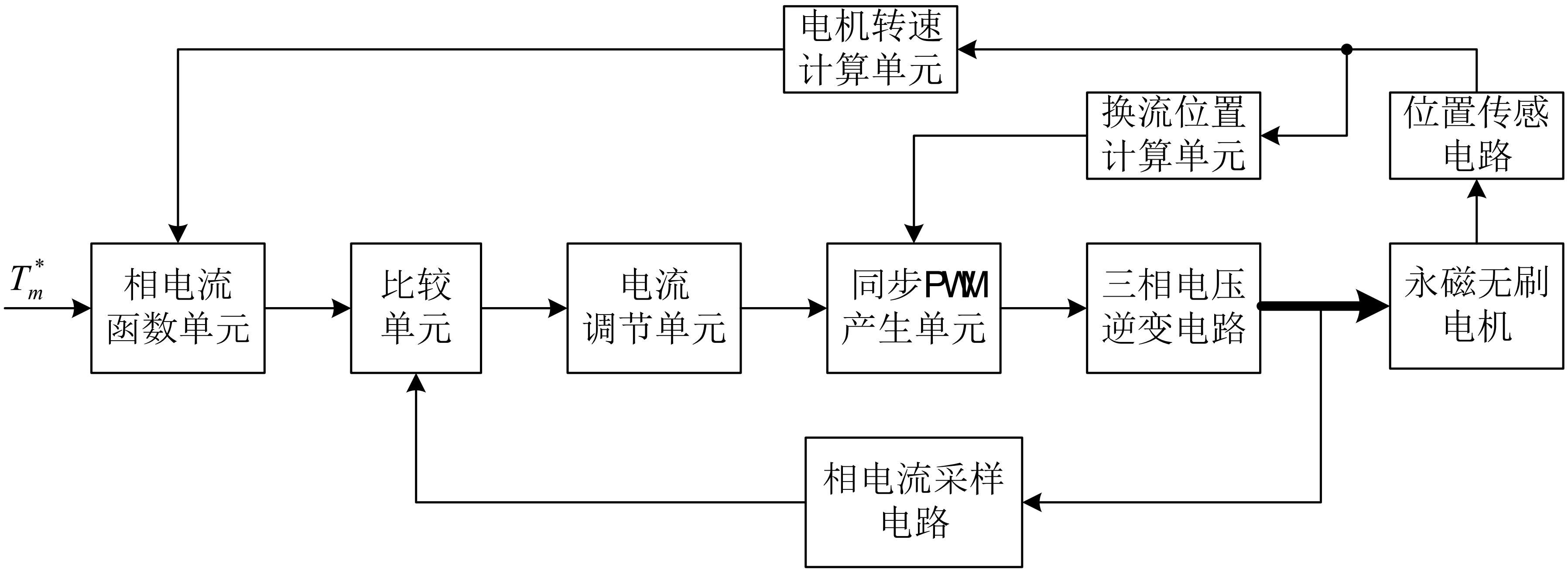


转矩闭环控制结构

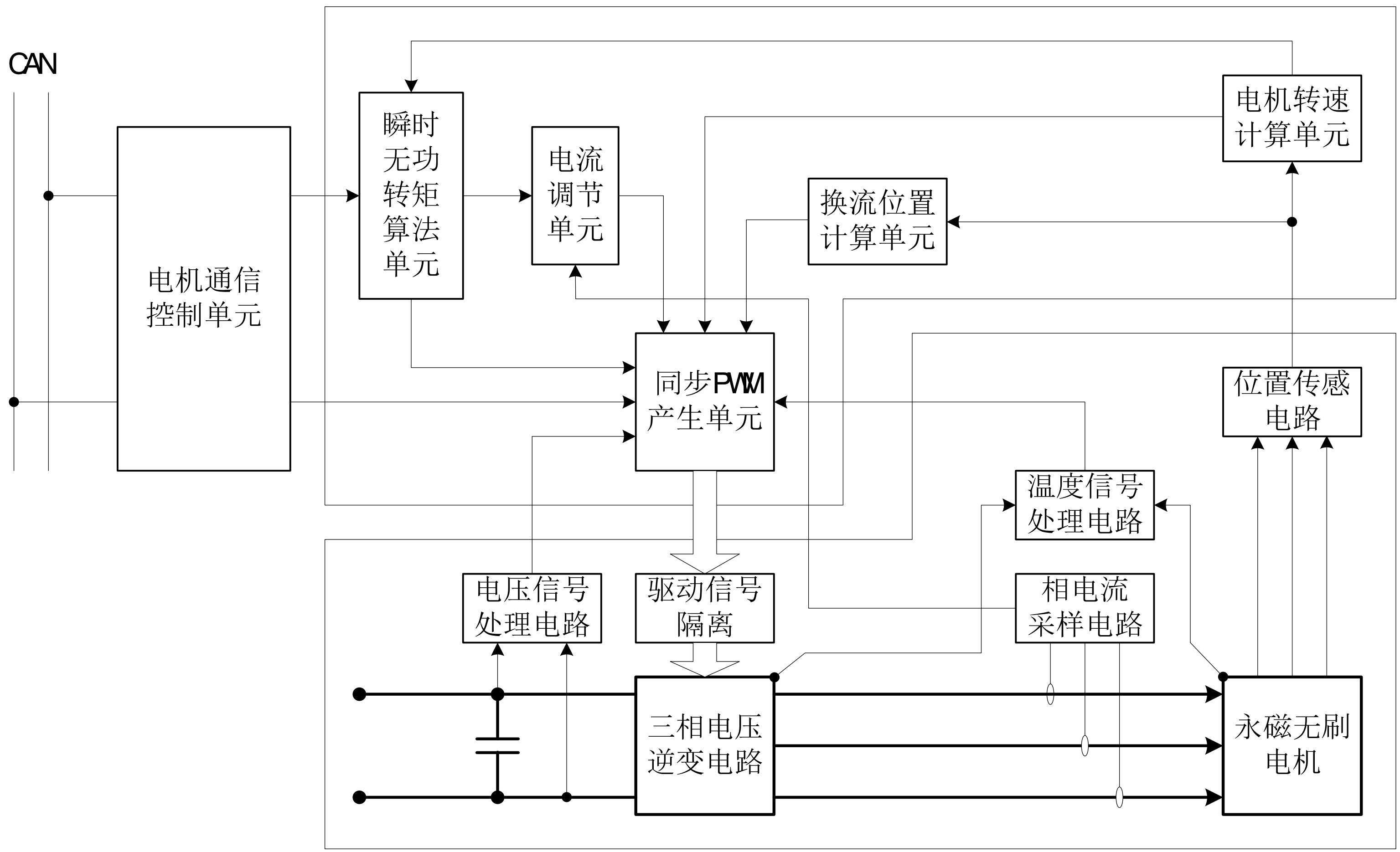
依据转速和转矩控制弱磁角度



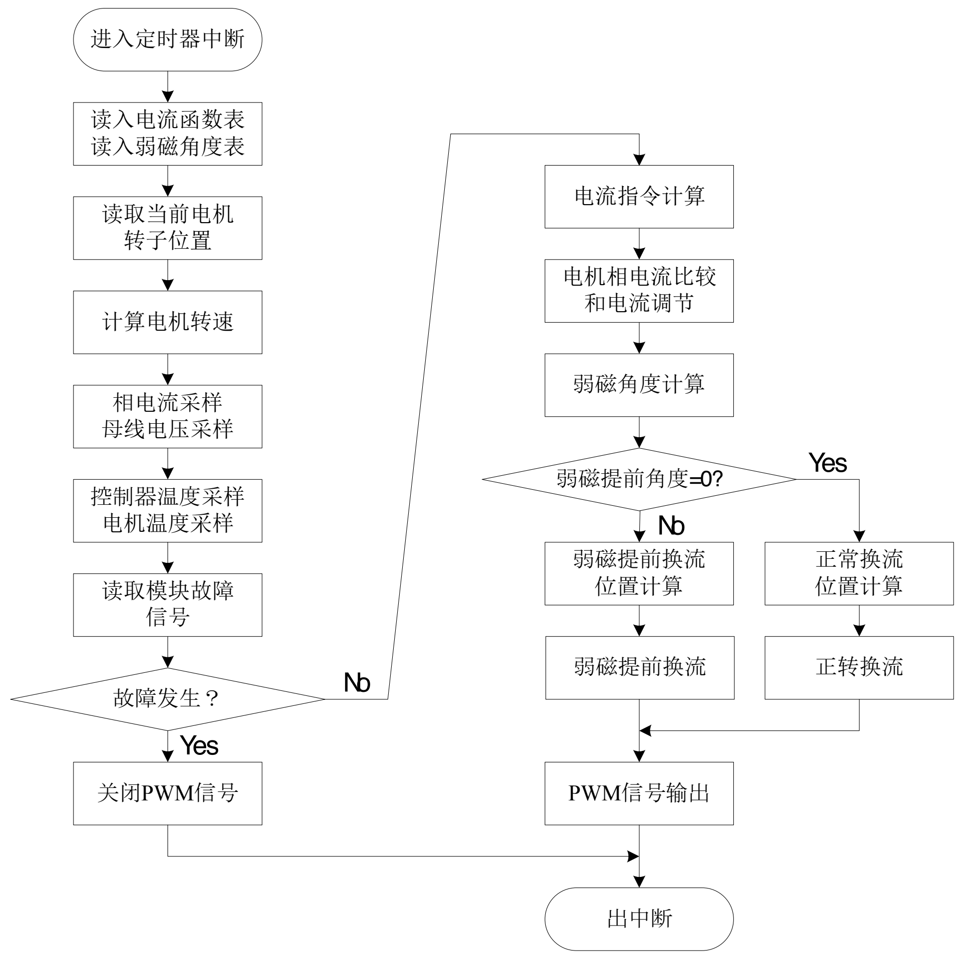
无刷直流电机的控制系统



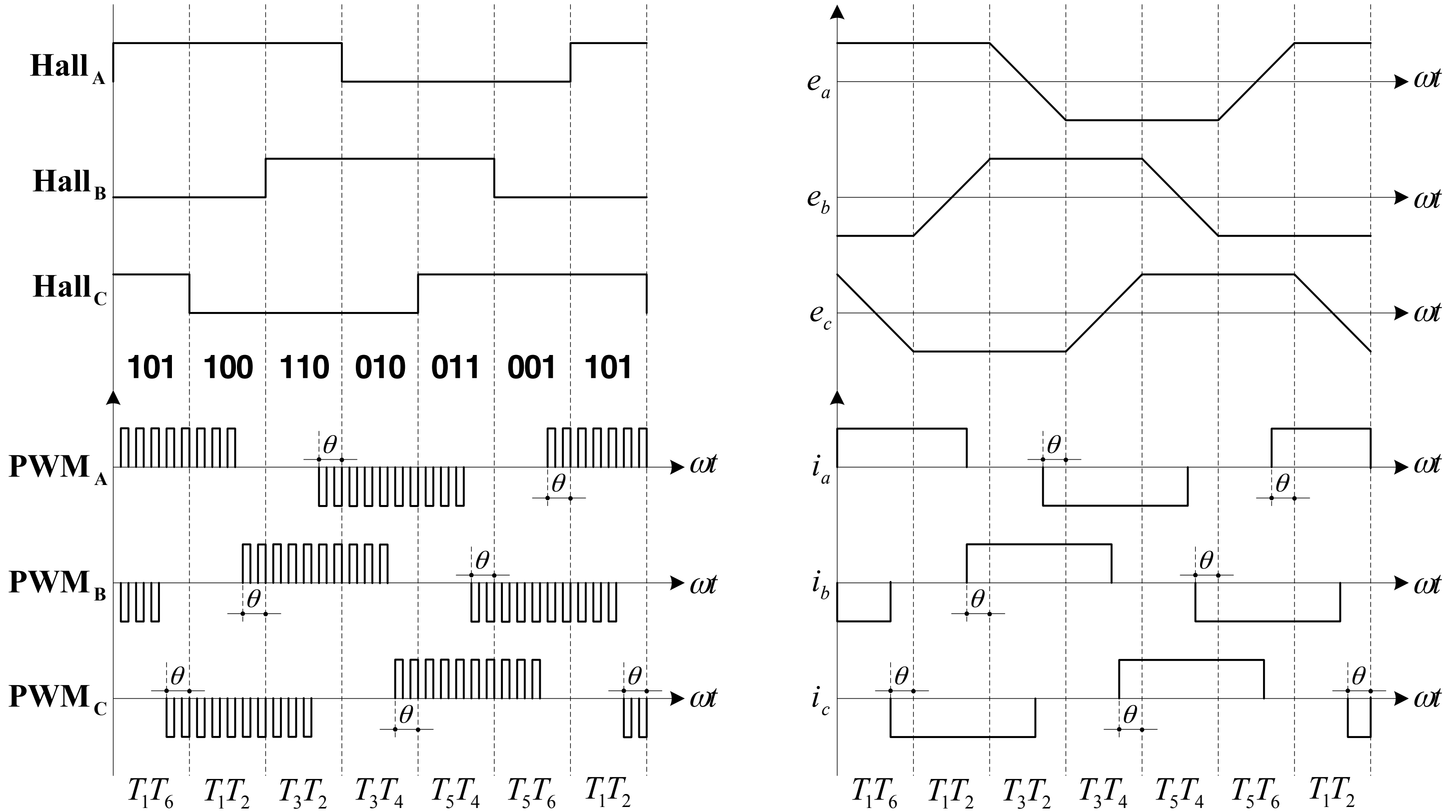
无刷直流电机的控制系统



无刷直流电机的控制系统

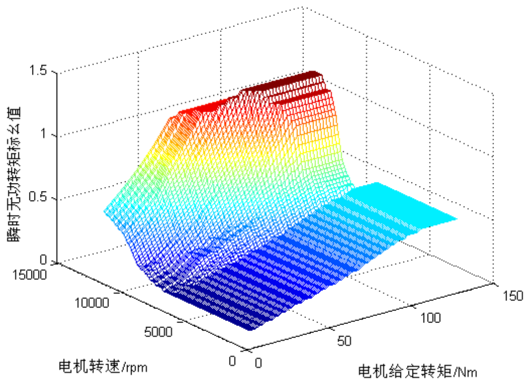


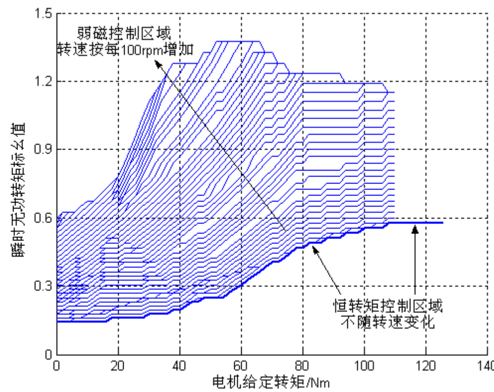
无刷直流电机的控制系统

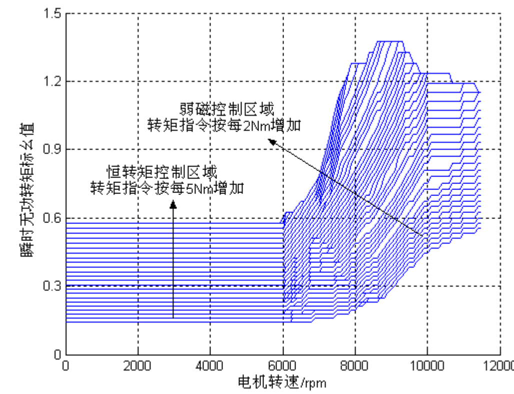


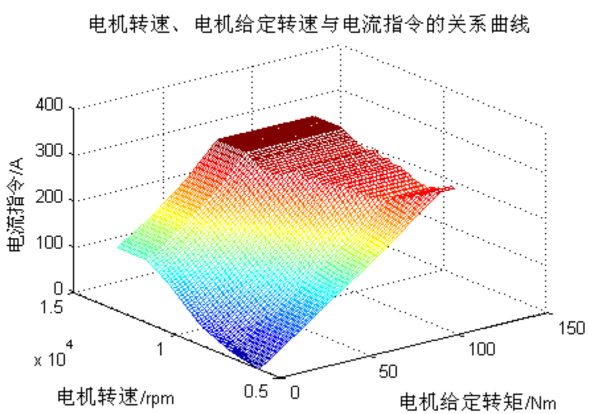
HALL状态	101	100	110	010	011	001
导通功率管	T_1T_2	T_2T_3	T_3T_4	T_4T_5	T_5T_6	T_6T_1

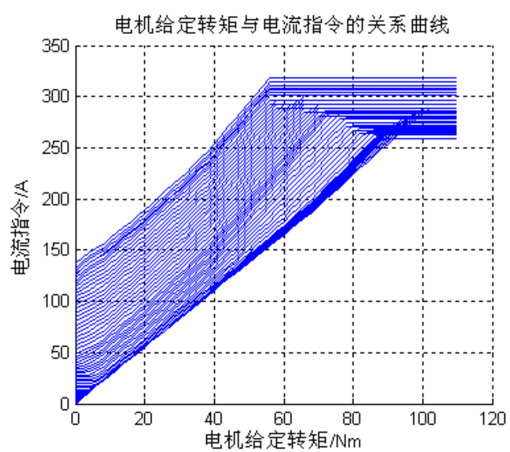
无刷直流电机的控制系统

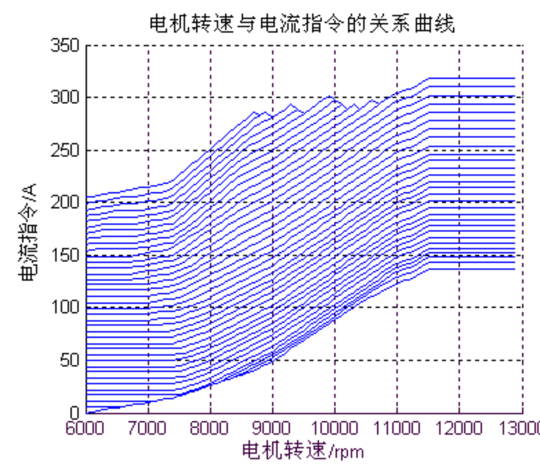




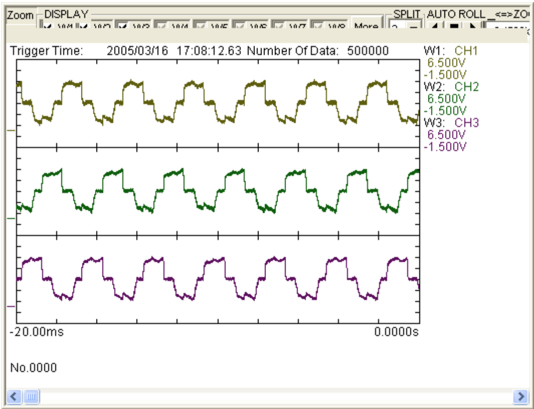


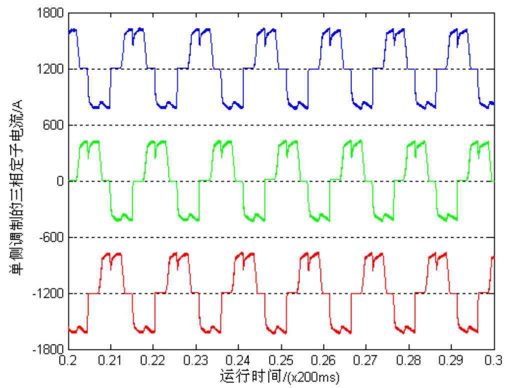


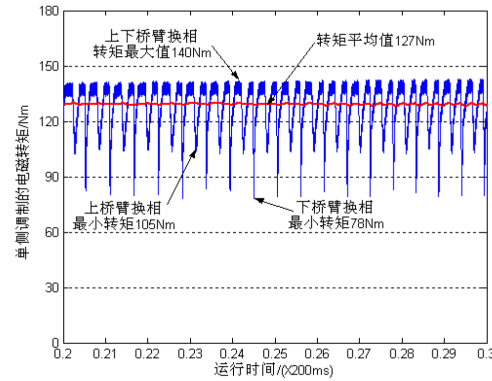


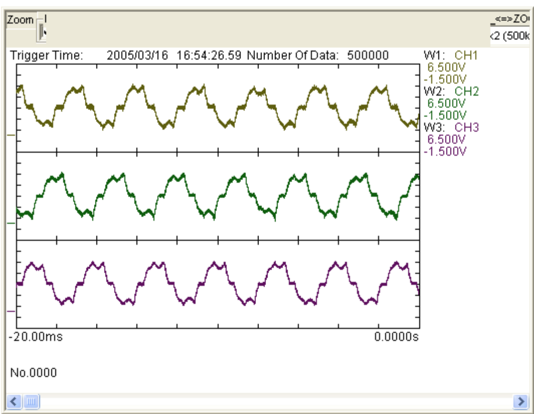


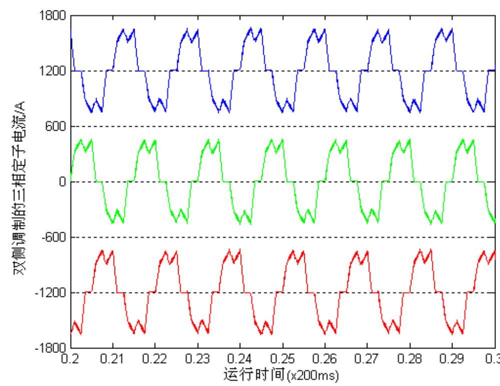
无刷直流电机的控制系统

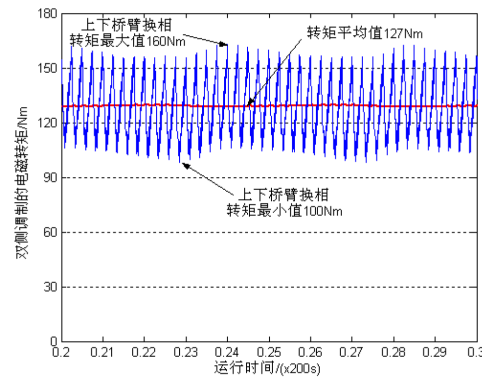




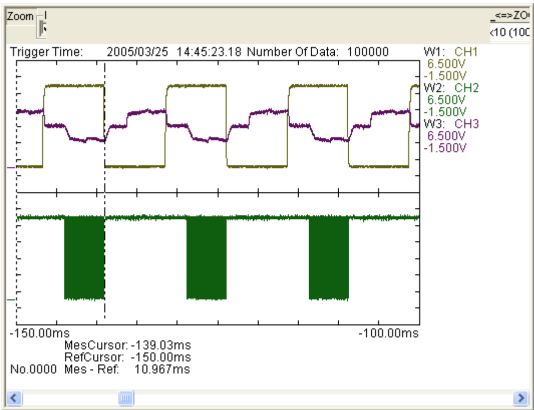


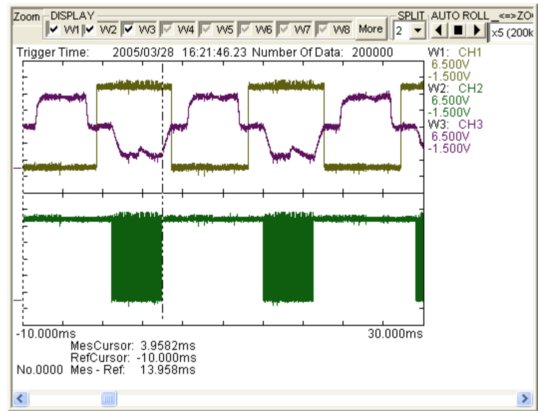


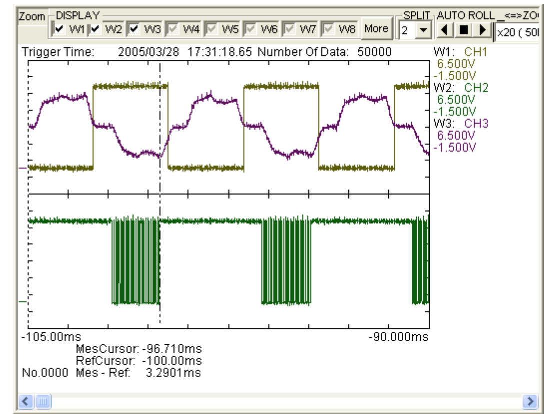


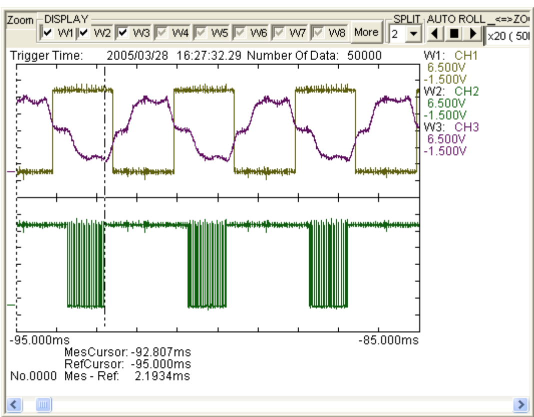


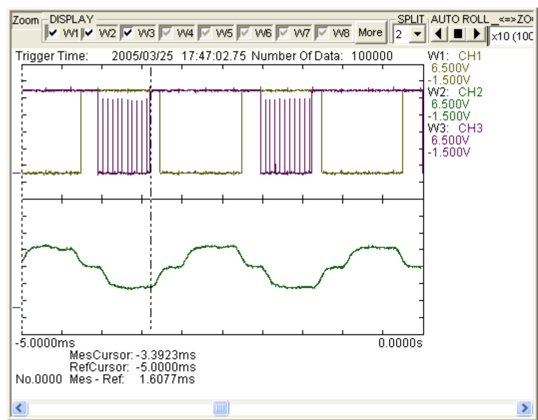
无刷直流电机的控制系统

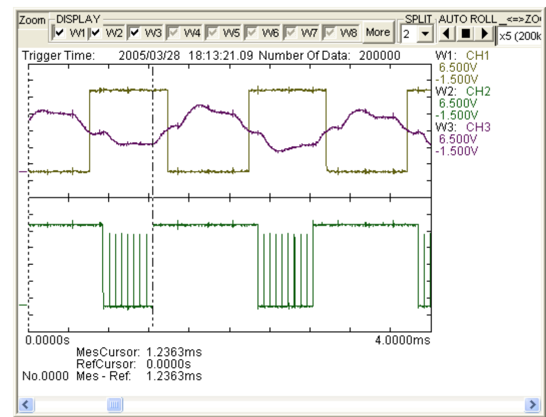












谢谢各位！