



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106602941 B

(45)授权公告日 2019.03.05

(21)申请号 201611113385.8

(22)申请日 2016.12.06

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 106602941 A

(43)申请公布日 2017.04.26

(73)专利权人 南京邮电大学  
地址 210023 江苏省南京市文苑路9号

(72)发明人 郭鸿浩 胡明桦 杨艳

(74)专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200

代理人 许方

(51) Int. Cl.  
H02P 6/10(2006.01)  
H02P 6/17(2016.01)

(56)对比文件

CN 102307033 A, 2012.01.04,  
CN 103731076 A, 2014.04.16,  
CN 102780450 A, 2012.11.14,  
CN 101814881 A, 2010.08.25,  
CN 104796050 A, 2015.07.22,  
CN 102437805 A, 2012.05.02,

审查员 王伯恩

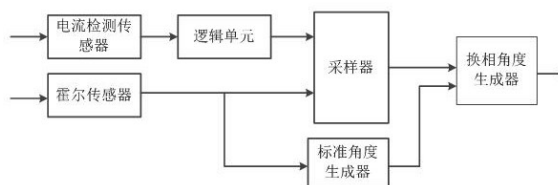
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种降低无刷直流电机换相转矩脉动的控制装置及方法

(57)摘要

一种降低无刷直流电机换相转矩脉动的控制装置及方法,属于永磁电机控制领域。本发明通过检测无刷直流电机定子各相电流,以及霍尔传感器输出信号,建立提前角度计算模块,在不同转速与负载状态下,实时调整无刷直流电机的提前换相角度,以使换相时开通相、关断相电流的相交时刻与对应反电动势的相交时刻一致,达到降低换相转矩脉动的效果。本发明不依赖于电机参数,无需复杂的公式计算,有效地降低了换相转矩脉动。



1. 一种降低无刷直流电机换相转矩脉动的控制装置,其特征在于,包括无刷直流电机、三相全桥逆变器、霍尔位置传感器、PWM产生和逻辑控制装置、反馈电流选择模块、电流调节器、速度计算模块、PI调节器、提前角度计算模块,其中霍尔位置传感器安装在无刷直流电机上,输出三相霍尔位置信号到速度计算模块和提前角度计算模块,速度计算模块输出电机转子旋转的机械角速度经过PI调节器输出给定电流值;通过电流传感器测得的电机三相绕组的相电流,其信号既输入到提前角度计算模块又输入到反馈电流选择模块;提前角度计算模块输出经过提前角度处理后的换相逻辑;反馈电流选择模块根据当前逻辑选择反馈电流,将两相导通区间的正相电流进行反馈,与给定电流相减后输出电流误差信号给电流调节器;电流调节器采用PI调节器或滞环比较器形式,其输出接入PWM产生和逻辑控制装置;PWM产生和逻辑控制装置输出三相全桥逆变器的六个开关管的驱动信号,控制无刷直流电机;

其中,提前角度计算模块中用于检测定子绕组电流的电流检测传感器产生三个电流信号输出到逻辑单元,经过异或逻辑处理成采样单元的触发信号,用于检测转子位置的霍尔传感器输出连续的转子位置信号到采样器,经过采样形成换相过程中电流幅值相等时刻角度信号;用于采集当前换相周期反电动势幅值交点位置信号的标准角度生成器,采样器输出信号与标准角度生成器输出的信号差值得到电流幅值交点落后或超前反电动交点的角度,换相角度生成器根据信号差值判断下一个周期是提前还是滞后导通。

2. 根据权利要求1所述的降低无刷直流电机换相转矩脉动的控制装置,其特征在于,所述提前角度计算模块包括三个比较器、异或逻辑处理模块、角度计算模块、角度采样模块、标准角度更新模块、角度差值计算模块、换相控制模块;上述提前角度计算模块中所述三个比较器的输入端接电流检测信号,输出端接所述异或逻辑处理模块;

所述角度计算模块的输入端接霍尔传感器检测到的位置信号,第一输出端接所述角度采样模块与换相控制模块,第二输出接所述标准角度更新模块的第一输入端;

所述角度采样模块的第一输入端接所述异或逻辑处理模块的输出端,第二输入端接所述角度计算模块的第一输出端;输出端接所述角度差值计算模块的第二输入端;

所述标准角度更新模块的第二输入端接所述换相控制模块的输出端;输出端接所述角度差值计算模块第一输入端;

所述角度差值计算模块的输出端接换相控制模块的第二输入端。

3. 基于权利要求1或2任意一项所述的降低无刷直流电机换相转矩脉动的控制装置的控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1,构建提前角度计算模块;

步骤2,电流检测电路实时采集无刷直流电机三相绕组的相电流,三个比较器分别对三相电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 进行比较,其中第一个比较器对 $i_a$ 、 $i_b$ 进行比较,第二个比较器对 $i_b$ 、 $i_c$ 进行比较,第三个比较器对 $i_c$ 、 $i_a$ 进行比较,异或逻辑处理模块对三个比较器的输出结果进行异或处理,得到边沿与电流相交时刻对应的方波信号;

步骤3,用霍尔位置传感器检测电机转子位置,并通过角度计算模块算出在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内连续变化的电机电角度 $\theta$ ;

步骤4,在异或逻辑处理模块输出方波信号的每一个边沿时刻,触发对电机转子电角度 $\theta$ 的采样,得到电流相交时刻对应的转子电角度值 $\theta_T$ ;

步骤5:标准角度更新模块在每个换相过程开始阶段,对标准角度 $\theta_E$ 进行更新,标准角度为 $0^\circ$  ( $360^\circ$ )、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $240^\circ$ 和 $300^\circ$ ,该标准角度给出换相的两相反电动势交点相对应电角度位置;

步骤6:反电动势交点对应的角度值 $\theta_E$ 与电流相交时刻对应的转子电角度值 $\theta_I$ 做差,计算得到提前角度值,在下一换相周期时以该角度进行提前导通控制。

## 一种降低无刷直流电机换相转矩脉动的控制装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种无刷直流电机的提前角度控制策略及实现方法,属于永磁电机控制领域。

### 背景技术

[0002] 无刷直流电机具有高功率密度、高转矩电流比、结构简单等优点,近年来,随着永磁体性能的提升,无刷直流电机越来越广泛的应用于工业生产中。

[0003] 理想的无刷直流电机反电势波形为梯形波,以 $120^\circ$ 导通方式控制,通以方波电流时可产生恒定转矩。但实际中由于绕组电感的存在,电流上升与下降都需要一定的时间,电流值不可能迅速从稳态值降到0或从0升到稳态值,这会导致无刷直流电机存在一个明显的换相过程。在该换相过程中,通常需要控制开通相电流的上升率和关断相电流的下降率一致,以抑制换相转矩脉动,但无法完全消除换相转矩脉动。

[0004] 韩国学者Byoung-Hee Kang等2001年在IEEE International Symposium on Industrial Electronics (美国电子工程师协会工业电子国际研讨会)上发表文章《Analysis of torque ripple in BLDC motor with commutation time》(考虑换相时间的无刷直流电机转矩脉动分析)对开通相电流、关断相电流斜率一致时的换相转矩脉动进行了详细分析,指出由于换相过程会持续一段时间,在这段时间内即使开通相和关断相电流斜率相同,反电势波形的变化也会引起转矩脉动,其脉动分量 $T_{tc}$ 可表示为

$$[0005] \quad T_{tc} = \frac{6EI}{\pi} \left( \frac{\theta^2}{t_c} - \theta \right) \quad (1)$$

[0006] 式中, $E$ 为反电势平顶部分的幅值, $I$ 为稳态时电流值, $t_c$ 为换相过程持续的时间, $\theta$ 为电机转子电角度。

[0007] 由式(1)可计算出脉动分量 $T_{tc}$ 的峰值 $T_{tc\_max}$ 为

$$[0008] \quad T_{tc\_max} = \frac{3EI t_c}{2\pi} \quad (2)$$

[0009] 上式表明在反电势幅值 $E$ 和电流稳态值 $I$ 不变的情况下,换相过程持续的时间越长,则引起的换相转矩脉动越大。

[0010] 通过上述分析可以看出,通过控制开通相电流与关断相电流的变化率一致,依然会存在换相转矩脉动。

### 发明内容

[0011] 本发明的目的,在于解决现有技术中通过控制开通相与关断相电流斜率一致,无法消除转矩脉动的问题,提供一种通过提前角度控制来降低无刷直流电机换相转矩脉动的控制装置及方法。

[0012] 本发明目的通过如下技术方案实现:

[0013] 降低无刷直流电机换相转矩脉动的控制装置,提前角度的计算依据为,开通相相

电流、关断相相电流的相交时刻与对应反电势的相交时刻一致。

[0014] 本发明包括无刷直流电机、三相全桥逆变器、霍尔位置传感器、PWM产生和逻辑控制、反馈电流选择、电流调节器、速度计算、速度PI调节、提前角度计算模块,其中霍尔位置传感器安装在无刷直流电机上,输出三相霍尔位置信号到速度计算模块和提前角度计算模块,速度计算模块输出电机转子旋转的机械角速度经过PI调节器输出给定电流值;通过电流传感器测得的电机三相绕组的相电流,其信号既输入到提前角度计算模块又输入到反馈电流选择模块;提前角度计算模块输出经过提前角度处理后的换相逻辑;反馈电流选择模块根据当前逻辑选择反馈电流,将两相导通区间的正相电流进行反馈,与给定电流相减后输出电流误差信号给电流调节器;电流调节器采用PI调节器或滞环比较器形式,其输出接入PWM产生逻辑控制装置;PWM产生逻辑控制装置输出三相全桥逆变器的六个开关管的驱动信号,控制无刷直流电机。

[0015] 基于降低无刷直流电机换相转矩脉动的控制装置的控制方法,包括以下步骤:

[0016] 步骤1,构建提前角度计算模块:

[0017] 所述提前角度计算模块,包括三个比较器、异或逻辑处理模块、角度计算模块、角度采样模块、标准角度更新模块、角度差值计算、换相控制模块;其中:

[0018] 所述三个比较器的输入端接电流检测信号,输出端接所述异或逻辑处理模块;

[0019] 所述角度计算模块的输入端接霍尔传感器检测到的位置信号,第一输出端接所述角度采样模块与换相控制模块,第二输出端接所述标准角度更新模块的第一输入端;

[0020] 所述角度采样模块的第一输入端接所述异或逻辑处理模块的输出端,第二输入端接所述角度计算模块的第一输出端;输出端接所述角度差值计算模块的第二输入端;

[0021] 所述标准角度更新模块的第二输入端接所述控制模块的输出端;输出端接所述输出端接所述角度差值计算模块第一输入端;

[0022] 所述角度差值计算模块的输出端接换相控制的第二输入端;

[0023] 步骤2,电流检测电路实时采集无刷直流电机三相绕组的相电流,三个比较器分别对三相电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 进行比较,其中第一个比较器对 $i_a$ 、 $i_b$ 进行比较,第二个比较器对 $i_b$ 、 $i_c$ 进行比较,第三个比较器对 $i_c$ 、 $i_a$ 进行比较,异或逻辑处理模块对三个比较器的输出结果进行异或处理,得到边沿与电流相交时刻对应的方波信号;

[0024] 步骤3,用霍尔位置传感器检测电机转子位置,并通过角度计算模块算出在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内连续变化的电机电角度 $\theta$ ;

[0025] 步骤4,在异或逻辑处理模块输出方波信号的每一个边沿时刻,触发对电机转子电角度 $\theta$ 的采样,得到电流相交时刻对应的转子电角度值 $\theta_I$ 。

[0026] 步骤5:标准角度更新模块在每个换相过程开始阶段,对标准角度 $\theta_E$ 进行更新,标准角度为 $0^\circ$  ( $360^\circ$ )、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $240^\circ$ 和 $300^\circ$ ,该标准角度给出换相的两相反电动势交点相对应电角度位置。

[0027] 步骤6:反电动势交点对应的角度值 $\theta_E$ 与电流相交时刻对应的转子电角度值 $\theta_I$ 做差,计算得到提前角度值,在下一换相周期时以该角度进行提前导通控制。

[0028] 上述提前角度控制可抑制转矩脉动的原因分析如下:

[0029] 传统无刷直流电机控制时,通常在反电势波形相交时刻开始进行换相,由于换相时间不能为零,电流波形总是滞后于反电动势波形,即使通过调制使开通相电流和关断相

电流的变化率一致,也会产生换相转矩波动,该转矩波动的峰值可表示为

$$[0030] \quad T_{tc\_max} = \frac{3EI t_c}{2\pi} \quad (2)$$

[0031] 式中,E为反电势平顶部分的幅值,I为稳态时电流值, $t_c$ 为换相过程持续的时间。

[0032] 采用本发明提出的提前导通控制方式,以AC相到BC相的换相过程为例,若开通相和关断相提前 $t_c/2$ 开始换相,对应提前角度为 $\omega_e t_c/2$ , $\omega_e$ 为电机电角速度。假设开始换相时电角度为0度,依然以开通相电流和关断相电流的变化率一致为基础进行分析,则换相过程中电机的三相反电动势和电流可表示如下,

$$[0033] \quad e_a = \begin{cases} E & \theta \in (0, \frac{t_c}{2}\omega_e) \\ E - \frac{6E}{\pi}(\theta - \frac{t_c}{2}\omega_e) & \theta \in (\frac{t_c}{2}\omega_e, t_c\omega_e) \end{cases} \quad (3)$$

$$[0034] \quad e_b = \begin{cases} E + \frac{6E}{\pi}(\theta - \frac{t_c}{2}\omega_e) & \theta \in (0, \frac{t_c}{2}\omega_e) \\ E & \theta \in (\frac{t_c}{2}\omega_e, t_c\omega_e) \end{cases} \quad (4)$$

$$[0035] \quad e_c = -E \quad (5)$$

$$[0036] \quad i_a = I - \frac{2I}{t_c\omega_e}\theta \quad (6)$$

$$[0037] \quad i_b = \frac{2I}{t_c\omega_e}\theta \quad (7)$$

$$[0038] \quad i_c = -I \quad (8)$$

[0039] 其中 $i_a, i_b, i_c$ 为A,B,C相电流, $e_a, e_b, e_c$ 为A,B,C相反电动势,E为反电动平顶部分幅值,I为稳态时电流值, $\theta$ 为电机转子电角度。根据反电动势与电流值,可计算出电机转矩为

$$[0040] \quad T_e = \frac{1}{\omega_m} [E(I - \frac{I}{t_c\omega_e}\theta) + (E - \frac{6E}{\pi} \frac{t_c}{2}\omega_e + \frac{6E}{\pi}\theta) \frac{I}{t_c\omega_e}\theta + EI] \quad \theta \in (0, \frac{t_c}{2}\omega_e) \quad (9)$$

$$[0041] \quad T_e = \frac{1}{\omega_m} [(E - \frac{6E}{\pi}(\theta - \frac{t_c}{2}\omega_e))(I - \frac{I}{t_c\omega_e}\theta) + E \frac{I}{t_c\omega_e}\theta + EI] \quad \theta \in (\frac{t_c}{2}\omega_e, t_c\omega_e) \quad (10)$$

[0042] 式中 $\omega_m$ 为电机机械角速度。对式(9)、(10)中转矩的波动分量进行化简可得

$$[0043] \quad T_{tc} = \frac{1}{\omega_m} (\frac{6EI}{\pi t_c\omega_e}\theta^2 - \frac{3EI}{\pi\omega_e}\theta\omega_e) \quad \theta \in (0, \frac{t_c}{2}\omega_e) \quad (11)$$

$$[0044] \quad T_{tc} = \frac{1}{\omega_m} [\frac{6EI}{\pi t_c\omega_e}\theta(\theta - \frac{t_c}{2}\omega_e) - \frac{6EI}{\pi}(\theta - \frac{t_c}{2}\omega_e)] \quad \theta \in (\frac{t_c}{2}\omega_e, t_c\omega_e) \quad (12)$$

[0045] 式(11)和式(12)分别给出了换相过程中 $(0, \omega_e t_c/2)$ 和 $(\omega_e t_c/2, \omega_e t_c)$ 区间转矩波动的变化情况。两式分别对 $\theta$ 求导,可知在 $\omega_e t_c/2$ 和 $3\omega_e t_c/4$ 时转矩达到极值,极值为

$$[0046] \quad T_{tc,MAX1} = T_{tc} \Big|_{\theta=\frac{t_c}{4}} = -\frac{3EI t_c}{8\pi} \quad (13)$$

$$[0047] \quad T_{ic,MAX2} = T_{ic} \Big|_{\theta = \frac{3t_c}{4}} = -\frac{3EI t_c}{8\pi} \quad (14)$$

[0048] 由此可见,换向过程中转矩波动分量两次到达极值,极值相同。与式(1)所示标准角度换相时的转矩波动对比可见,采用本发明提出的提前换相方法后,换相时的转矩波动大幅减小,起到了降低换相转矩脉动的效果。

[0049] 采用上述方案后,本发明与现有方案相比,主要优点在于:

[0050] (1) 通过提前角度控制可降低换相转矩脉动;

[0051] (2) 提前角度控制无需高精度的位置传感器,角度计算简单,成本较低;

## 附图说明

[0052] 图1为本发明无刷直流电机速度电流双闭环控制系统框图。

[0053] 图2为本发明提前角度计算模块的结构框图。

[0054] 图3为本发明提前角度实现的计算框图。

[0055] 图4为提前角度过小时三相反电动势和电流波形示意图。

[0056] 图5为提前角度过大时三相反电动势和电流波形示意图。

[0057] 图6为反电动势交点与电流交点重合的波形示意图。

## 具体实施方式

[0058] 下面结合附图对本发明的技术方案进行详细说明:

[0059] 如图1所示是包含本发明所述方法的无刷直流电机速度电流双闭环控制系统框图。由无刷直流电机、三相全桥逆变器、霍尔位置传感器、PWM产生和逻辑控制、反馈电流选择、电流调节器、速度计算、速度PI调节和提前角度计算模块构成。其中霍尔位置传感器安装在无刷直流电机上,输出三相霍尔位置信号 $H_a$ 、 $H_b$ 、 $H_c$ 到速度计算模块和提前角度计算模块,速度计算模块输出电机转子旋转的机械角速度 $\omega$ ;给定速度与电机实际的反馈速度相减得到速度误差后经过PI调节器输出给定电流值;电机三相绕组的相电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 通过电流传感器分别测得,其信号既输入到提前角度计算模块又输入到反馈电流选择模块;提前角度计算模块输出经过提前角度处理后的换相逻辑;反馈电流选择模块根据当前逻辑选择反馈电流,将两相导通区间的正相电流进行反馈,与给定电流相减后输出电流误差信号给电流调节器;电流调节器采用PI调节器或滞环比较器形式,其输出接入PWM产生逻辑控制装置;PWM产生逻辑控制装置输出三相全桥逆变器的六个开关管的驱动信号,控制无刷直流电机。

[0060] 如图2所示,电流检测传感器检测定子绕组电流,形成三个电流信号输出到逻辑单元,经过逻辑异或成采样单元的触发信号。霍尔传感器检测转子位置,输出连续的转子位置信号到采样器,经过采样就形成了换相过程中电流幅值相等时刻角度信号。标准角度生成器是当前换相周期反电动势幅值交点位置信号,采样器输出信号与标准角度生成器输出的信号差值就是电流幅值交点落后(或超前)反电动交点的角度,换相角度生成器根据信号差值判断下一个周期是提前还是滞后导通。

[0061] 如图3所示,本发明方法具体按照以下步骤进行:

[0062] 步骤1,实时检测电机三相相电流,在换相过程中,当开通相和关断相电流相交,即

电流瞬时值相等时,异或逻辑模块会输出一个边沿触发信号;在一个 $360^\circ$ 电角度的周期内,电机换相6次,进而产生6个边沿触发信号。

[0063] 步骤2,用霍尔位置传感器检测电机转子位置,并通过角度计算模块算出在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 内连续变化的电机电角度 $\theta$ 。

[0064] 步骤3,在异或逻辑处理模块输出边沿触发信号的每一个边沿跳变时刻,触发对电机转子电角度 $\theta$ 的采样,得到电流相交时刻对应的转子电角度值 $\theta_I$ 。

[0065] 步骤5:标准角度更新模块在每个换相过程开始阶段,对标准角度 $\theta_E$ 进行更新,标准角度为 $0^\circ(360^\circ)$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $240^\circ$ 和 $300^\circ$ ,该标准角度给出换相的两相反电动势交点相对应电角度位置。

[0066] 步骤6:反电动势交点对应的角度值 $\theta_E$ 与电流相交时刻对应的转子电角度值 $\theta_I$ 做差,计算得到提前角度值,在下一换相周期时以该角度进行提前导通控制。

[0067] 具体实施过程中,经过换相提前后反电动势和电流波形可能出现三种情况,如图4、图5和图6所示。

[0068] 图4所示为,电流变化时刻已经得到提前,但是提前角度过小,电流波形落后反电动势的角度较标准角度控制时变小,但电流的交点仍然滞后反电动势交点,实际换相角度落后于期望的角度,需要继续增加提前角度。此时,提前角度计算模块中,反电动势交点对应的角度值 $\theta_E$ 与电流相交时刻对应的转子电角度值 $\theta_I$ 做差,计算结果为负值,将进一步增大提前角度,下一个换相周期电流的交点将更趋近于反电动势交点。

[0069] 图5所示为超幅提前控制的情况,此时电流相交时刻已经提前到反电动势交点之前,提前角度过大,需要减小提前角度。此时,提前角度计算模块中,反电动势交点对应的角度值 $\theta_E$ 与电流相交时刻对应的转子电角度值 $\theta_I$ 做差,计算结果为正值,提前导通角将变小,下一个换相周期会减小提前换相角度,使电流的交点更趋近于反电动势交点。

[0070] 图6显示了提前换相后反电动势和电流波形的第三种情况,电机趋于一个稳态之后,电机的提前导通角也趋于一个稳态值,电流交点与反电动势交点差距可以忽略,电机提前换相角也趋于固定值。

[0071] 通过上述换相过程分析可知本发明一种简易的无刷直流电机提前控制方法,且具有降低换相转矩波动的有益效果。同时,本发明可以和PWM调制策略一起使用,达到更加的转矩波动抑制效果。



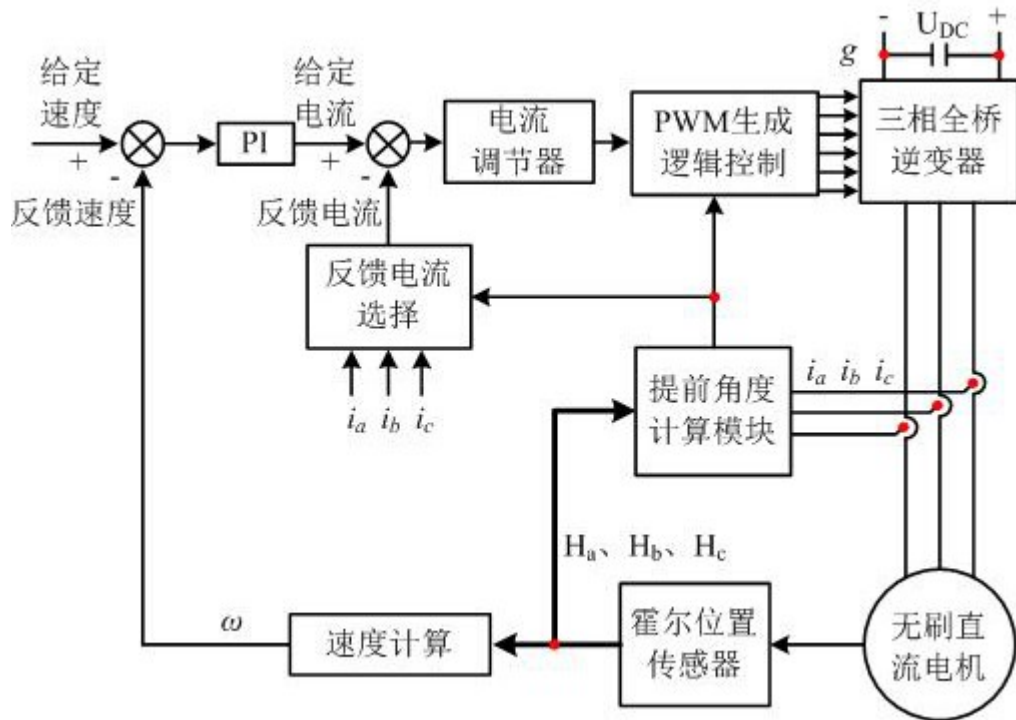


图1

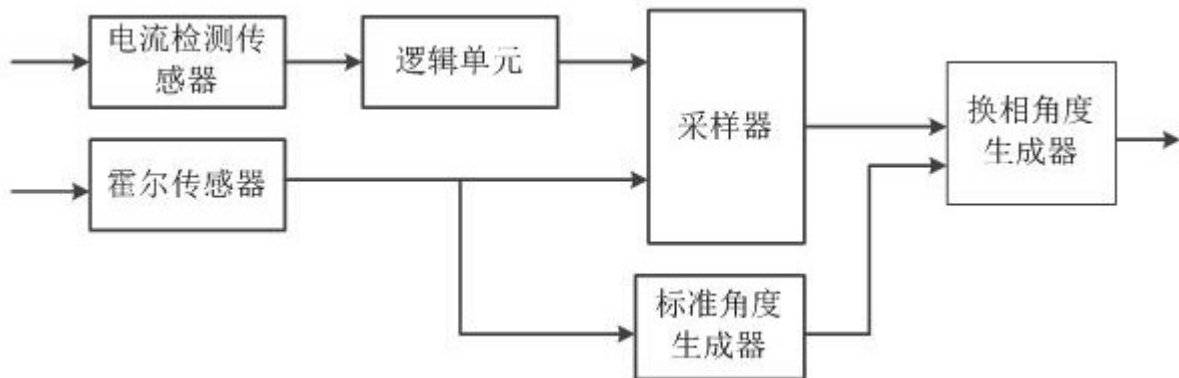


图2

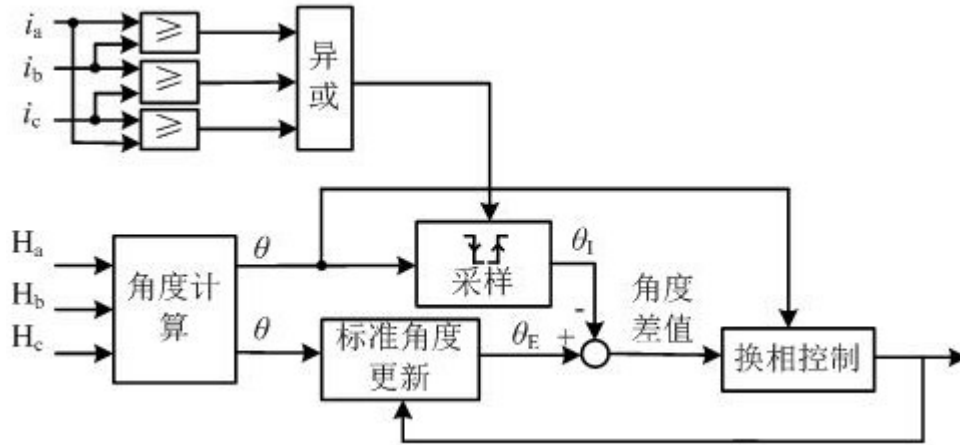


图3

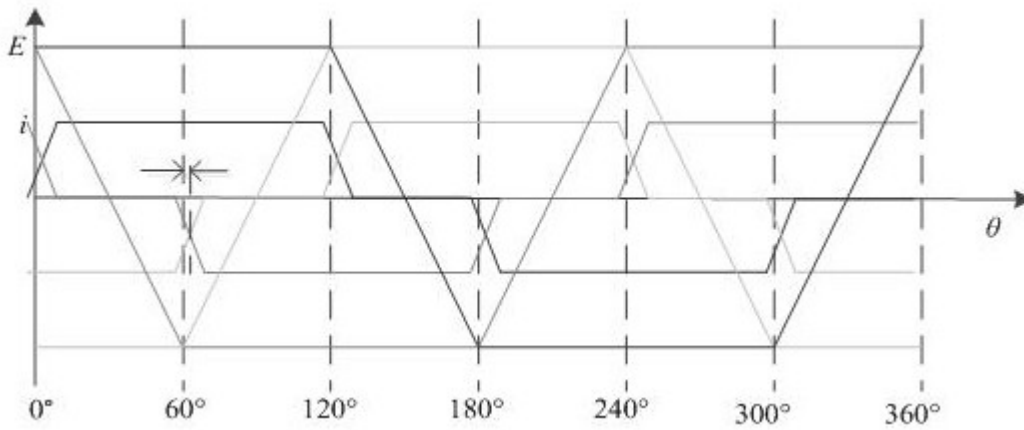


图4

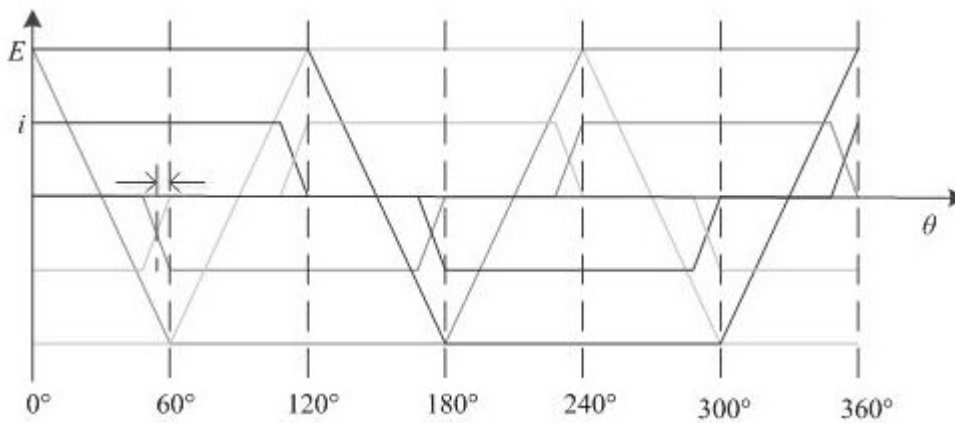


图5

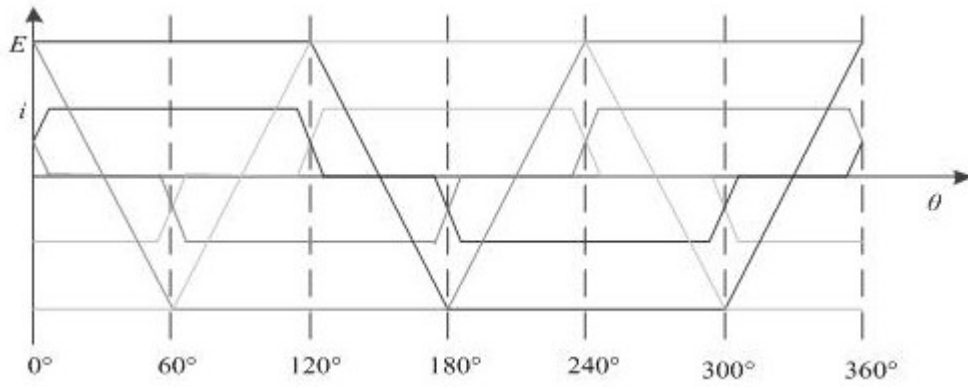


图6