

文章编号: 1005—0523(2003)04—0059—03

无刷直流电机三次谐波位置检测法

胡文华, 宋平岗

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:介绍了一种无刷直流电机无位置传感器转子位置检测方法——反电动势三次谐波检测法, 从理论上推导如何从电机中获取反电动势三次谐波信号并将其转化为转子位置信号。

关 键 词:无刷直流电机; 三次谐波检测法

中图分类号: TM345

文献标识码: A

1 三次谐波检测法的提出

在无刷直流电机的无位置传感器的检测方法中, 端电压检测法是研究得最早, 也最成熟的一种检测方法. 其基本思想是测量断开相(也叫不通电相)的相电压, 这个相电压就是电机的反电动势. 这种检测方法需要一个衰减率极大的低通滤波器, 以便滤除高频谐波干扰和产生相位延迟, 以保证电机的定子电流矢量与转子磁通正交. 但这种方法有一个问题, 那就是反电动势大小与电机的转速成正比, 当电机处于低速时, 由于反电动势幅值很小, 再经过衰减率极大的低通滤波器后, 信号太弱无法正确地检测出其过零点. 而且由低通滤波器所产生的相位延迟也是速度的函数, 这样就无法保证电机在整个运行转速范围内定子电流矢量都能很好地与转子磁通正交, 其结果是电机转速的变化将会对每安培转矩数以及电机的效率有着不利的影响. 因此, 寻找一种能使无刷直流电机在较大的转速范围内保持最大每安培转矩数及最大效率的检测方法, 将是一件很有意义的事情. 反电动势三次谐波检测法就是在这种情况下提出来的.

2 转子磁通位置和电流通断控制

三次谐波检测法适用于 Y 连接、三相对称、气隙磁密为梯形波的永磁无刷电机. 在梯形波的气隙磁密中, 除了基波分量外, 主要还包括三次谐波分量, 如图 1 所示. 其中 e_a 为电机 a 相绕组反电动势波形, u_3 为反电动势三次谐波分量波形, λ_3 为转子磁通的三次谐波分量波形, λ_r 为转子磁通波形, i_a 、 i_b 、 i_c 为定子绕组三相电流波形.

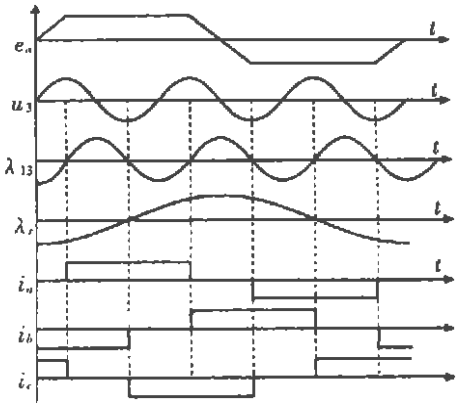


图 1 反电动势及各相电流波形

由图 1 可知, 转子磁通的三次谐波分量的每次过零时刻正好对应一次电流换相(即三相六拍中的一拍), 所以只要知道某一过零点对应三相六拍中

收稿日期: 2003—01—16

中国知网 <https://www.cnki.net> 胡文华, 宋平岗, 华东交通大学助教.

的哪一拍,那么,这些过零点就可以用来控制逆变器的换相.做到这一点也不难,检测 a 相相电压,只要知道 a 相电压正向过零时刻,那么其后的转子磁通三次谐波分量 6 个过零点分别对应六拍,这样就可以正确控制逆变器的换相.

然而,转子磁通三次谐波分量是很难直接检测出来的,但从图 1 可以知道,反电动势三次谐波与转子磁通三次谐波是同频的,只是相位相差 90° ,因此只要采用适当的电路进行 90° 移相就可以将反电动势三次谐波信号转化成一个与转子磁通三次谐波同频同相的位置信号,进而用来控制逆变器的换相.

3 反电动势三次谐波信号的获取

电机定子绕组三相瞬时电压方程如式(1)所示,

$$\begin{cases} u_{as}=r_s i_{as}+L_s \frac{di_{as}}{dt}+e_{as} \\ u_{bs}=r_s i_{bs}+L_s \frac{di_{bs}}{dt}+e_{bs} \\ u_{cs}=r_s i_{cs}+L_s \frac{di_{cs}}{dt}+e_{cs} \end{cases} \quad (1)$$

其中 r_s 为相电阻, L_s 为相电感, e_{as} 、 e_{bs} 、 e_{cs} 分别为三相绕组开路相电压,也就是反电动势电压,它是转子磁通以及定子绕组参数的函数^[1].用富氏级数表示三相反电动势电压,并将式(1)相加,定子绕组三相电压的叠加将消除所有正序和负序分量,只剩下零序分量.由于在星形连接的三相绕组中没有三次谐波电流回路,不会产生三次谐波电流,所以三相端电压相加可得式(2)^[2]

$$u_{as}+u_{bs}+u_{cs}=u_3+u_{highfreq}.$$

(2)

这也就是说,三相端电压之和为三次谐波分量及 3 的奇数倍高次谐波分量(也是零序分量)的叠加,由于高次谐波分量的幅值很小(约占三次谐波分量的十分之一左右),所以起决定作用的是三次谐波信号.

至此,我们知道,只要将三相端电压叠加就可以获得三次谐波信号.

图 2 为用于驱动无刷直流电机的三相逆变器电路.由三个阻值相同的电阻构成星形电阻网络接到电机三相绕组的引出线上,其中点标记为 n .还有两个电阻 R_{dc} 串联后并接在直流母线上,其中点标记为 h .另外电机三相绕组的中性线标记为 s .由图 2

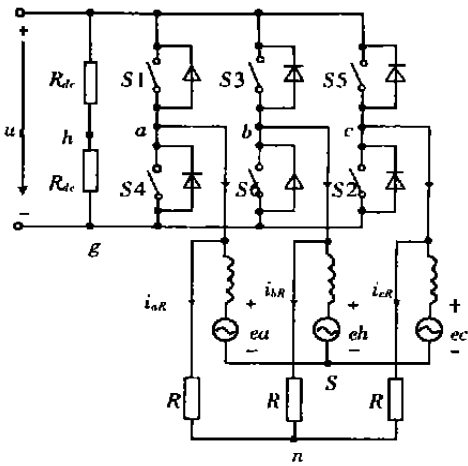


图 2 逆变器电路

有如下电压方程.

$$\begin{cases} u_{as}+(-u_{ns})+u_{na}=0 \\ u_{bs}+(-u_{ns})+u_{nb}=0 \\ u_{cs}+(-u_{ns})+u_{nc}=0 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)相加得,

$$(u_{as}+u_{bs}+u_{cs})-3u_{ns}+(u_{na}+u_{nb}+u_{nc})=0$$

(4)

由于流经星形电阻网络的三个电流的矢量和为零,又知道星形电阻网络由三个阻值相同的电阻组成,所以式(4)中的最后一项为零,将式(2)代入式(4),可得

$$u_{ns}=\frac{1}{3}(u_3+u_{highfreq})$$

(5)

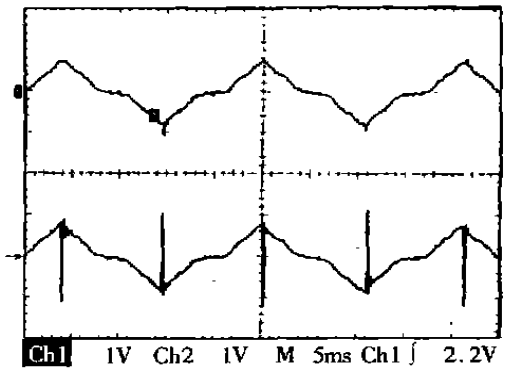


图 3 反电动势三次谐波信号实验波形

从式(5)可知,三次谐波信号可从电阻网络中点和电机中性线之间获得,并不需要专门的电路.唯一的要求是电机要有中性线,这一额外的连线尽管在大部分应用中都不难获得,但多少会带来额外的成本和安装上的不便.幸运的是,我们经过简单的分析与推导发现^[2],直流母线中点与人工电阻网络中点之间的电压 u_{nh} 与式(5)相同,只是在换相瞬间会引入一同频的交流分量,其幅值为直流母线电

压的 $1/6$, 从而使三次谐波信号在波峰波谷处呈 V 形槽口状. 限于篇幅, 相关推导过程省略. 图 3 为 u_{ms} 和 u_{nh} 的实验波形图.

4 检测电路的实现

如前所述, 反电动势三次谐波信号与转子磁通存在 90° 相位差, 并且无论在任何转速及负载情况下, 这个相位差保持不变. 所以检测电路只要将反电动势三次谐波信号移相 90° , 然后进行过零比较, 就可以获得预期的信号波形.

采用如图 4 所示的检测电路, 其中比例器主要是为了降低输入信号的幅值, 因为电机在高速运行的条件下, 输入信号的幅值较大, 超出比较器所能承受的最高电压. 加一级具有低截止频率的低通滤波器的好处在于, 即使信号带有一定量的直流分量, 由于比较器的比较基准是比例器输出信号的直流分量, 检测电路仍然可以正确检测信号的“过零点”, 从而使电机可以正确换相.

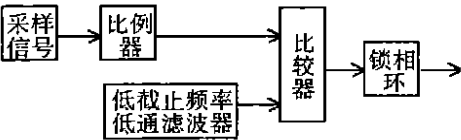


图 4 检测电路原理框图

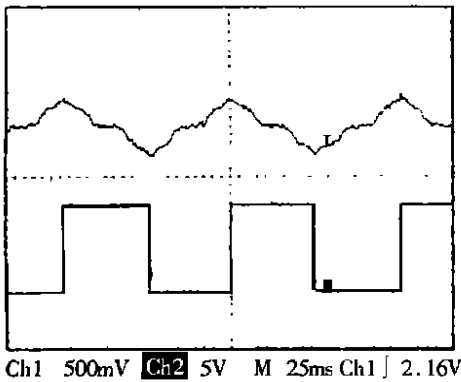


图 5 三次谐波信号及位置信号波形图

图 5、图 6 分别为转速为 103 rpm 和 $2\,531\text{ rpm}$ 时三次谐波信号波形与检测电路输出的位置信号波形图. 从图中可以看出, 检测电路输出的位置信号的跳变正好处在反电动势三次谐波信号的波峰波谷处. 而反电动势三次谐波信号的波峰波谷正好对应转子磁通三次谐波的过零点. 这与前面的分析是相吻合的.

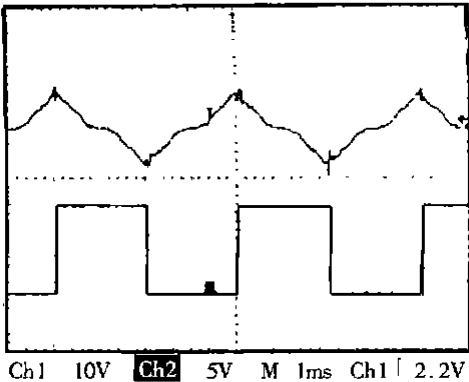


图 6 三次谐波信号及位置信号波形图

5 结 论

研究反电动势三次谐波检测法在无位置传感器无刷直流电机中的实现, 通过对电机三相端电压简单叠加可以获得三次谐波信号. 这种检测方法适用于反电动势为梯形波、电枢绕组为 Y 连接的无刷直流电机. 由于三次谐波检测法可以采用在整个频域范围内都保持恒定的 90° 移相的锁相环电路, 所以它具有检测精度高、输出转矩大、运行效率高等优点.

参考文献:

[1] J. C. Moreira. Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet AC Motors Operating Over a Wide Speed Range [J]. IEEE Trans. Ind. Appl., 1996, 32(6): 1394~1401.
[2] 胡文华. 无位置传感器无刷直流电机微机控制系统的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.

The Third Harmonic Sensing Scheme of Brushless DC Motor

HU Wen-hua, SONG Ping-gang

(School of Electrical and Electronic, East China Jiaotong Univ., Nanchang 330013, China)

Abstract: In this paper, an indirect sensing, or sensorless method for brushless DC motor is introduced. How to develop the third harmonic signal and how to turn it into the signal of rotor flux position are described.

Key words: brushless DC motor; the third harmonic sensing scheme