

永磁无刷直流电动机的控制技术研究综述

林明耀 陈华锋 白玉庆

(东南大学 电气工程学院 江苏 南京 210096)

摘 要: 介绍了永磁无刷直流电动机的无位置传感器控制方法, 分析了工作的基本原理、优缺点等, 并对它们的特性作了比较。最后, 对无刷直流电动机的转矩脉动抑制方法作了探讨。

关键词: 无刷直流电动机; 无位置传感器控制; 转矩脉动

中图分类号: TM3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2012)06-0001-03

Study on Control Technique of Permanent Magnet Brushless DC Motor

LIN Ming-yao, CHEN Hua-feng, BAI Yu-qing

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: This paper introduces several position sensorless control methods for permanent magnet brushless DC motor, and describes their fundamental principles, advantages and disadvantages. All the position sensorless control strategies are compared. Finally, the torque ripple reduction method is investigated.

Key words: brushless DC motor; sensorless control; torque ripple

0 引言

永磁无刷直流电动机由电动机主体和驱动器组成, 是一种典型的机电一体化产品, 与他励式直流电动机相比, 具有体积小、效率高、结构简单、用铜量少等优点, 是小功率直流电动机的主要类型。随着电机技术、电力电子技术、数字控制技术、控制理论及传感器技术的发展与应用, 无刷直流电动机的一般控制技术已日趋成熟, 因此在计算机、航天、军事、汽车、工业和现代家用电器中得到越来越广泛的应用^[1]。

本文首先介绍了无刷直流电动机的基本结构, 然后对无位置控制做了分析, 比较了它们的优缺点, 最后对转矩脉动抑制进行了探讨。

1 无刷直流电动机的基本结构

无刷直流电动机控制系统包括电动机本体、位置检测器、逆变器和控制器, 构成了自同步电动机系统, 如图1所示。位置传感器检测转子磁极的位置信号, 控制器对转子位置信号进行逻辑处理并产生相应的开关信号, 开关信号以一定的顺序触发逆变器中的功率开关管, 从而将电源功率以一定的逻辑关系分配给电动机定子各相绕组, 使电动机产生持续不断的转矩。

1) 电动机本体

无刷直流电动机的本体由定子和转子组成。定子为

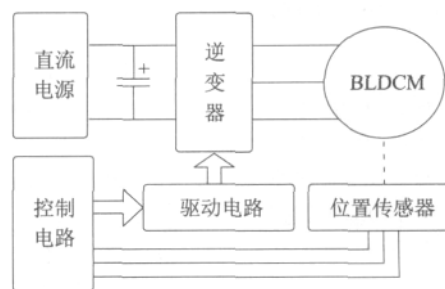


图1 典型无刷直流电动机控制系统

电枢、转子为永磁体, 在保证在气隙中产生足够强度磁通, 机械结构稳固可靠, 并满足工作环境的要求等条件下, 构成电动机本体^[2]。定子由铁芯、电枢绕组等组成, 其电枢绕组制成多相(一般以三相电动机较为常见), 均匀绕制于沿着内部圆周轴向开的槽中。转子由永磁体、导磁体和支撑零件三部分构成。永磁体是产生磁场的核心, 常采用的永磁材料有铝镍钴合金、铁氧体、稀土等。

2) 位置传感器

位置传感器在无刷直流电动机中起着两个作用。一是检测转子磁极位置的作用, 为逻辑开关电路提供准确的换相信息, 以确定功率开关器件的导通顺序。二是为确定电子换相电路中功率器件占空比提供信息。

位置传感器种类较多, 且各具特点。目前应用的位置传感器主要有磁敏式、电磁式、光电式等。霍尔位置传感器为磁敏式位置传感器的一种, 其体积小, 使用方便且价

作者简介: 林明耀(1959 -), 男, 江苏无锡人, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事高效永磁电动机及其控制技术、新能源汽车驱动技术、风力和太阳能光伏发电技术等方向的教学和研究工作, 主持和参与国家“863”高技术计划、国家自然科学基金(重点)基金、省部级研究项目近20项, 完成企业合作项目20余项, 在永磁电动机设计和无位置传感器控制、电动汽车驱动和控制、风力和太阳能光伏发电技术等领域取得多项理论和应用效果。获得省部级科技进步二等奖2项, 在国内外核心期刊和重要国际学术会议发表相关学术论文100多篇, 申请和获得授权发明专利15项。

格低廉。在无刷直流电动机控制系统中一般采用霍尔位置传感器作为转子位置检测装置。

3) 电子开关线路

电子开关线路由功率逻辑开关与位置信号处理单元构成。主要功能是根据位置信号, 实现把直流电按照一定的逻辑关系分配给各相绕组, 在气隙中形成步进旋转磁场, 带动转子旋转输出转矩。

2 无刷直流电动机的无位置控制方法

有位置传感器 BLDCM 的位置信号直接由位置传感器读取, 控制简单、方便, 但是外置式位置传感器在一些高温、高腐蚀、灰尘多、湿度大等恶劣环境下不能适用。此外, 需要在电动机定子槽内安装位置传感器, 使电动机设计复杂化, 增加了电动机的体积, 而且位置传感器需要 5 根引线, 给电动机整机安装带来不便, 增加了故障发生率, 降低了工作可靠性, 这给其应用带来了许多不利的影响。因此, 如何实现无刷直流电动机的无位置传感器控制一直是近一二十年来的研究热点^[3]。

2.1 反电动势过零检测法

BLDCM 在“两相导通星形三相六状态”工作方式时, 反电动势波形和电流波形如图 2 所示。由图可见, A 相反电动势过零点延迟 30° 电角度则对应 C 相上桥臂到 A 相上桥臂的换相点。反电动势过零检测法则是根据这个原理产生的, 在检测到反电动势过零点后, 根据换相点滞后过零点 30° 电角度, 设置对应的延迟时间, 当延迟时间到达后, 电动机换相进入下一个工作状态^[4]。其中, 感应电势是由反电动势和电枢反应电势合成, 因为无刷直流电动机的气隙一般较大, 电枢反应电势远小于反电动势, 因此一般将悬空相所检测出来的相电压作为反电动势。考虑到成本及制造工艺, 绝大多数无刷直流电动机中性点并不引出, 因此, 反电动势过零点需要通过检测端电压的方法间接获得。

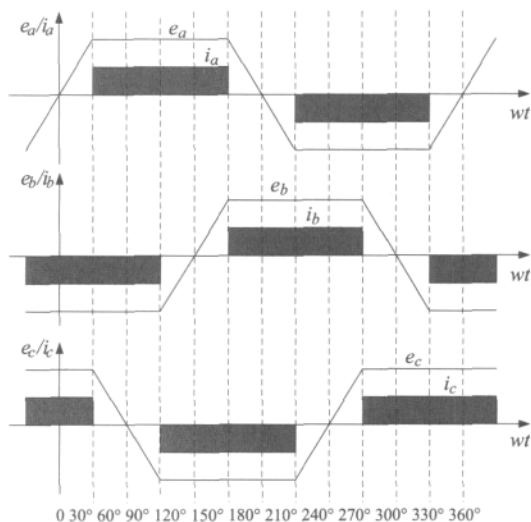


图 2 BLDCM 反电动势和电流波形图

检测反电动势过零点的方法分为两种: 端电压法和相

电压法^[5]。端电压法不用电阻网络构建虚拟中性点, 将端电压与直流电源中点电压进行比较, 而获得反电动势过零点。相电压法通过采用电阻网络构建虚拟中性点, 将端电压与虚拟中性点电压进行比较, 而获得反电动势过零点。使用反电动势方法时检测电路存在阻容滤波环节, 导致了检测信号相位的滞后, 因此在换相控制中, 必须对其加以修正。

直流无刷电动机的反电动势换相控制的最大优点是省去了三个位置传感器, 使得直流无刷电动机的结构变得十分简单, 这对于安装位置传感器十分困难的微型直流无刷电动机尤为重要。其主要缺点是反电动势在低速时很难被精确测量, 因此不太适合于要求经常快速启动或超低速运行的直流无刷电动机^[6]; 此外, 续流二极管导通引起的电压脉冲可能覆盖反电动势信号, 尤其是在高速、重载、或者绕组电气时间常数很大等情况下, 续流二极管导通角度很大, 可能使得反电动势法无法检测。

2.2 反电动势积分法

假设反电动势在过零点附近呈线性, 且与电动机转速无关, 在过零时刻对悬空相反电动势积分, 然后将积分结果与阈值电压进行比较, 当达到阈值时, 即为换相时刻^[7-8]。和反电动势过零点检测方法相比, 该方法不需要深度滤波, 如果将锁相环技术应用到基于反电动势积分的转子位置检测方案中, 则可避免误触发, 且不需要参考电压, 不受电动机参数的影响^[9]。这种方法的优点是对于开关噪声不敏感, 积分门限可以根据转速信号自动调节, 并且可以实现必要的超前或滞后换相; 缺点是电压比较器对毛刺、干扰很敏感, 由于误差积累在电动机低速运行时存在的问题。

2.3 续流二极管法

续流二极管法又称“第三相导通法”, 是通过检测反并联在逆变器开关管两端的续流二极管的开通状态来确定电动机的转子位置, 一般应用于二二导通模式的无刷直流电动机控制系统中。此法要求逆变器必须工作在上下功率开关管轮流处于 PWM 斩波控制的方式下, 使电动机绕组的续流电流沿着特定的回路流通, 悬空相反电动势过零时, 将有电流流过与悬空相功率开关管反并联的续流二极管。因此, 绕组反电动势过零点可以通过检测悬空相逆变桥续流二极管电流来确定, 进而得到电动机正常运行所需的 6 个关键位置。

因续流二极管的导通压降很小, 该方法在一定程度上能够拓宽电动机的低速调速范围。但其本质上还是反电动势法, 因此该方法不仅具有反电动势过零检测法的缺点, 还由于增加了电流检测装置, 增加了成本, 提高了硬件电路复杂度, 且该方法的转子位置误差受到反电动势系数、反电动势波形等因素的影响较大, 所以该方法未能受到广泛应用^[10]。

2.4 反电动势三次谐波法

反电动势三次谐波法^[11]依赖于定子中性点处 3 次谐波电压波形的检测。理想的无刷直流电动机绕组的反电动

势为梯形波, 经过 Fourier 级数分解, 可以发现除了基波分量以外, 还含有较大的三次谐波分量。三次谐波分量的一个周期对应基波分量的 120° 电角度, 其相邻两次过零点间隔 60° 电角度, 正好与电动机相邻两次换相的时间间隔相同, 只是相位相差 90° 电角度。因此, 将反电动势的三次谐波分量移相 90° 电角度后, 得到的信号就可以作为转子位置信号, 其每一个过零点均对应着一个电流的换相点。

反电动势三次谐波的检测有两种方法: 一是在星形连接的绕组三端并联一组星形连接的电阻, 两个中性点之间的电压即为三次谐波。当电动机的中性点没有引出线或不便引出时, 可采用另一种方法——通过星形连接电阻的中性点与直流侧中点之间电压来获取三次谐波分量, 不过它需要滤波器来消除高频分量。滤波器的引入, 会使信号产生一定的相移。

用反电动势三次谐波法检测转子位置理论上与续流二极管的导通状态无关, 能够在较高速下检测转子位置, 可以在宽转速范围内达到很好的性能。但这种反电势三次谐波检测法只适用于绕组电感不变、三相参数对称、磁场三次谐波分量较大的电动机。

2.5 速度无关磁链函数法

速度无关磁链函数法是从一个全新的物理概念提出的转子位置检测方法, 这个物理概念是基于速度无关磁链函数形成的, 它能在转子转速近似为零一直到高速时都能对转子位置进行检测, 并给出换相时刻^[12]。

该磁链函数推导的最终形式为两个线反电势相除:

$$G(\theta)_{bc/ab} = \frac{H(\theta)_{bc}}{H(\theta)_{ab}} = \frac{\frac{1}{w \cdot k_e} \left[(V_b - V_c) - R(i_b - i_c) - L \left(\frac{di_b}{dt} - \frac{di_c}{dt} \right) \right]}{\frac{1}{w \cdot k_e} \left[(V_a - V_b) - R(i_a - i_b) - L \left(\frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \right) \right]} = \frac{(V_b - V_c) - R(i_b - i_c) - L \left(\frac{di_b}{dt} - \frac{di_c}{dt} \right)}{(V_a - V_b) - R(i_a - i_b) - L \left(\frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \right)} = \frac{e_{bc}}{e_{ab}} \quad (1)$$

其中 $H(\theta)$ 为与速度有关的磁链函数, $G(\theta)$ 为与速度无关的磁链函数, 两个磁链函数和转子位置均具有一一对应关系。

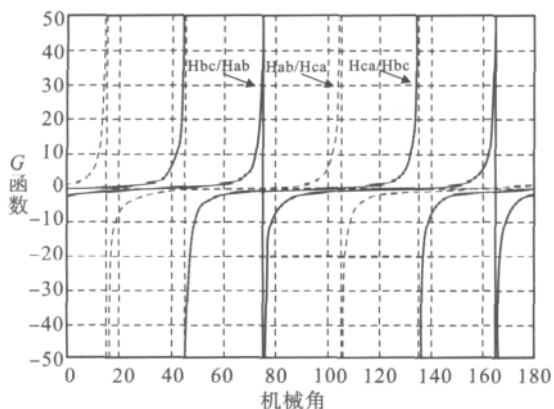


图3 $G(\theta)$ 函数的理论曲线

图3所示为基于式(1)的 $G(\theta)$ 函数曲线 ($G(\theta)_{bc/ab}$, $G(\theta)_{ab/ca}$, $G(\theta)_{ca/bc}$)。可以看出, 换相总发生在 $G(\theta)$ 函数从正无穷到负无穷的跳变时刻, 利用 $G(\theta)$ 函数提供的电动机换相信息, 可以进行无刷直流电动机无位置传感器控制。

仔细分析 $G(\theta)$ 函数的波形, 在每两个换相点之间, 理想的 $G(\theta)$ 函数和转速无关, 且包含连续的转子位置信息。为了使 $G(\theta)$ 函数转子位置检测法计算的换相点更加准确, 只要利用 $G(\theta)$ 函数波形的上半部分即可得到转子位置, 标准的换相点是 $G(\theta)$ 函数的峰值处。 $G(\theta)$ 函数的波形在整个速度范围内是相同的, 理论上与电动机速度无关, 因此这种位置检测法适用于更宽的转速范围, 尤其可以拓展无刷直流电动机无位置传感器控制的低速范围。在实际应用 $G(\theta)$ 函数进行转子位置估算时, 将计算得到的函数值与预先设定的阈值进行比较, 达到阈值即产生相应的换相信号并开始换相, 并可以调节该阈值来实现电动机的超前或滞后换相。

该方法实现的关键在于线间反电动势的获取, 本质上还是基于反电动势转子位置检测, 不适于极低速和静止状态下的位置检测。这种位置检测方法有最大转速的限制, 最大转速取值与电动机极对数、电流采样频率和位置估算分辨率有关。

3 无刷直流电动机转矩脉动抑制

转矩脉动是无刷直流电动机运行中的一项重要性能指标, 相比于永磁同步电动机, 永磁无刷直流电动机转矩脉动较大。这会影响整个系统的控制特性, 并且会产生噪声和振动等问题, 降低了机器的使用寿命和驱动系统的可靠性, 制约了其在高精度、高稳定性场合的应用, 因此, 必须研究无刷直流电动机转矩脉动的抑制。根据产生机理的不同, 永磁无刷直流电动机转矩脉动主要分成齿槽转矩脉动和换相转矩脉动两种^[13]。

3.1 齿槽转矩脉动抑制

这种脉动也称为磁阻转矩脉动, 是由于定子齿槽的存在, 使得在一个磁状态内, 极下磁阻发生变化引起的。目前抑制齿槽转矩的方法主要有斜槽/斜极法、磁性槽楔法、减小槽口宽度法、辅助槽/辅助齿法、分数槽法、变极弧宽度和变磁极位置法等^[14], 当然, 最好的办法是采用无槽式绕组。

3.2 换相转矩脉动抑制

电动机每转过 60° 电角度换相转矩脉动就会出现一次。与齿槽转矩脉动相比, 换相转矩脉动频率较低而幅值较大, 是永磁无刷直流电动机转矩脉动的主要成分。换相转矩脉动产生的原因主要是反电势波形不理想、换相的时刻不适当、电流在绕组电感的作用下变化较慢。对换相转矩脉动的抑制可以采用重叠换相法。

在电动机控制中, 提前导通下一只该导通的开关管 (此时有三只管子导通), 使原来处于弱磁区域的绕组电

(下转第11页)

阶临界转速振幅越小,但是减小速度逐渐变缓。因此,在多支承传动轴系中安装粘弹性减振器,不仅可以提高安全裕度,还能减小临界转速振幅,但是安装减振器的支承处要求轴承的性能更好。

参考文献:

- [1] B. Kang, C. A. Tan. Transverse model Localization in a dual-span rotating shaft [J]. Journal of Sound and Vibration. 1999, 219(1): 133-155.
- [2] 梅庆. 直升机传动轴系的动力学设计 [J]. 机械传动, 2005, 29(5): 19-22.
- [3] 许兆棠, 朱如鹏. 刚性多支点传动轴主共振分析 [J]. 东南大学学报, 2006, 36(1): 71-76.
- [4] 许兆棠, 朱如鹏. 直升机弹性多支点传动轴的主共振分析 [J]. 应用力学学报, 2006, 21(2): 342-348.
- [5] 杨贵通, 张善元. 弹性动力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.

社, 1988.

- [6] 胡海岩, 孙久厚, 陈怀海. 机械振动与冲击 [M]. 南京: 南京航空航天大学, 1997.
- [7] Graziano Curti, Francesco A. Raffa, Furio Vatta. An Analytical Approach to the Dynamics of Rotating Shafts [J]. Meccanica. 1992, 27(4): 285-292.
- [8] F. A. Raffa, F. Vatta. The Dynamic Stiffness Method for Linear Rotor-Bearing Systems [J]. Transactions of the ASME. 1996, 118(7): 332-339.
- [9] J. R. Hutchinson. Shear coefficients for Timoshenko beam theory [J]. Journal of Applied Mechanics. 2001, 68: 87-92.
- [10] 张小龙, 何洪庆. 涡轮增压转子的临界转速研究(IV) 分布质量轴的传递矩阵法 [J]. 推进技术, 2000, 21(2): 52-55.

收稿日期: 2012-01-14

(上接第3页)

流转移一部分到处于磁密较高的下一相绕组中,该电流将产生补偿转矩,以减小转矩波动,这种方法叫超前导通控制;也可以采用延时导通控制,即在该关断绕组时而不关断,使其延时通电,同样可以产生补偿转矩,这两种方法的实质都是重叠换相法,可以抑制电流换相过程引起的电磁转矩脉动。

4 结论

本文对无刷直流电动机无位置传感器的控制技术进行了研究,分析比较了各种控制方法的优缺点,然后介绍了无刷直流电动机转矩脉动产生的原因及其抑制方法。随着对这些控制方法和转矩脉动问题的深入解决,稀土永磁直流电动机必将以宽调速、小体积、高效率 and 稳态转速误差小等特点在调速领域显现优势。

参考文献:

- [1] 叶金虎. 无刷直流电动机 [M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [2] 刘文勇. 无刷直流电动机双闭环 PI 控制系统研究 [D]. 南京: 硕士学位论文, 东南大学, 2011.
- [3] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [4] 林明耀, 周谷庆, 刘文勇. 基于直接反电动势法的无刷直流电机准确换新方法 [J]. 东南大学学报, 2010, 40(1): 89-94.
- [5] J. X. Shen, K. J. Tseng. Analyses and Compensation of Rotor Position Detection Error in a Sensorless PM Brushless DC Motor

[C]. International Conference IEMD May 1999 Seattle, WA. 1999: 81-83.

- [6] 贺灿华, 杨向宇. 无刷直流电机无位置传感器的检测方法 [J]. 电机电器技术, 2005, 4(2).
- [7] Becerra R. C, Jahns T. M., Ehsani M. . Four-quadrant sensorless brushless ECM drive [C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1991, Sixth Annual, 1991: 202-209.
- [8] Jahns T. M, Becerra R. C, Ehsani M. Integrated Current Regulation for a Brushless ECM Drive [J]. IEEE Trans on Power Electronics. 1991: 118-126, vol. 6.
- [9] Micro Linear, Application Note43, Using the ML4425 /4426 BLDC Motor Controller [J]. Application Notes of Micro Linear Products, 1996.
- [10] 吕志勇, 江建中. 永磁无刷直流电动机无位置传感器控制综述 [J]. 中小型电机, 2000, 27(4): 33-36.
- [11] J. C. Moreira. Indirect sensing for rotor flux position of permanent magnet ac motors operating in a wide speed range [C]. Industry Applications Society Annual Meeting, Oct. 1994, Denver, CO. 1994: 401-407.
- [12] Tae-Sung Kim. Sensorless Control of the BLDC Motors From Near-Zero to High Speeds [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2004, 19(6): 1635-1645.
- [13] 陈炜. 永磁无刷直流电动机换相转矩脉动抑制技术研究 [D]. 天津: 天津大学博士学位论文, 2006.
- [14] Xia Changliang. Permanent magnet brushless DC motor drives and controls [M]. Singapore: John & Wiley Inc, 2012.

收稿日期: 2012-09-17