

无位置传感器直流无刷电机软件起动

许鹏, 曹建波, 曹秉刚

(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安, 710049)

摘 要: 为了解决无位置传感器直流无刷电机在起动时基于反电动势的位置检测方法无法提取出位置信息的问题, 分析了无位置传感器直流无刷电机的起动方法, 针对电动车这一特殊的应用场合进行了相应的改进, 电动车在起动时有负载且负载情况复杂, 对传统的三段式起动法进行改进, 设计了无需附加任何起动控制电路的起动控制策略, 由软件程序控制电机正常起动, 其控制步骤为两次定位、分段加速、调压切换的三段式起动方案。实验结果研究表明此起动控制方法有良好的起动性能, 在电动车不同的负载情况下具有很好的控制效果。

关键词: 电动车; 直流无刷电机; 无位置传感器; 起动

中图分类号: TP 271.4 文献标志码: A 文章编号: 1007-449X(2009)05-0734-05

Software starting for brushless DC motor without position sensor

XU Peng, CAO Jian-bo, CAO Bing-gang

School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: In order to solve the problem that the position detection method cannot extract the position information base on back electromotive force when the brushless DC motor (BLDCM) without position sensor starts, it analyzed the starting method of the BLDCM. Aiming to which has complex load the special application occasion of electric vehicle (EV), it improved the traditional three-phase way, and designed a control strategy dispensing without any starting control circuit, which was depending on the software program to control BLDCM starting. The control process consist of the two-times-location, segment acceleration and voltage regulation switchover. The experimental results indicate that this starting control method has good starting performance and good control effect when the EV has different loads.

Key words: electric vehicle; brushless direct current motor; position sensorless; starting

0 引言

永磁直流无刷电机 (brushless DC motor, BLDCM) 利用电子换相代替了机械换相, 既具有交流电机的结构简单、运行可靠和维护方便等一系列优点, 又具备直流电机的运行效率高、无励磁损耗及调速

性能好、起动转矩较大等特点, 在电动车领域有着广泛的应用^[1-2]。BLDCM 采用无位置传感器控制, 可以缩小电机体积, 提高系统抗干扰能力。精确的无位置传感器控制还能避免位置传感器可靠性差、安装精确度不足带来的换相转矩脉动。因此, 近年来一直是研究的热点^[3]。

收稿日期: 2009-03-04

基金项目: 创新基金项目 (06C262116100555); 陕西省自然科学基金 (SJ08E218); 教育部留学回国人员基金 (2008-890); 西安市科技计划项目 (CY05012)

作者简介: 许鹏 (1976—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电动汽车控制;

曹建波 (1981—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电动车复合电源系统研究;

曹秉刚 (1953—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电动汽车系统与控制。

直流无刷电机起动时需要知道转子磁极相对于定子绕组的位置,以便正确导通电枢绕组使电机按照要求的方向旋转。采用反电动势过零法检测转子位置时,由于永磁直流无刷电机在静止或低速时反电动势为零或很小,各种基于反电动势的位置检测方法无法提取出位置信息,反电动势法已经不适用,电机不能自起动,需要采用特殊的起动方法。另外,电机的起动过程受其负载转矩、外加电压、加速曲线及转动惯量等诸多因素影响。因此零起动问题成为直流无刷电机无位置传感器控制的难点之一。本文分析了无位置传感器的直流无刷电机的起动方法,并进行了比较,针对电动车这一特殊的应用场合进行了改进。文中电机为三相 6 状态,电机的绕组为 Y 形连接,120 电角度,采用两两导通调制方式。

1 起动方法分析

目前,无位置传感器直流无刷电机的起动方法主要有:三段式起动法、预定位起动法、升频升压同步起动法、短时检测脉冲转子定位起动法等^[4]。

1.1 三段式起动法

所谓的三段式起动法,即首先对转子进行定位,然后采用外同步的方式,使电机逐步加速至预定速度,当可以稳定得到反电动势过零点信号时,切换到自同步方式运行。其具体过程如下:

1) 转子预定位。由控制器自身来决定转子的位置,当电机任意两相绕组通电后,产生一个合成磁场,转子会向合成磁场的轴线方向旋转,直到转子磁极与这个合成磁场轴线重合。

2) 外同步加速。转子定位完成以后对电机加速,使电机达到一定转速,产生足够大的反电动势才能准确的检测其过零点^{[5][16]}。

3) 外同步加速到自同步的切换。当电机的转速达到可以稳定检测反电动势过零点时,按照控制策略切换到自同步状态。但是切换必须满足一定的条件,否则切换过程中电机运行不平稳,甚至转速急剧下降,反电动势信号重新变得太弱而无法检测,最终导致起动失败^[7]。目前,如何能稳定的进行切换仍是无位置传感器直流无刷电机起动控制中的热点和难点之一。

1.2 预定位起动法

预定位起动法实现过程如下:首先为预定位,与三段式转子预定位相似;其次为起动阶段,按照所需的转向依次改变逆变器功率器件的触发组合状态,同时用“端电压法”检测各触发组合状态所对应的开路相的反电动势过零点,并通过提高 PWM 占空

比逐渐提高电机的外施电压^[8]。各触发组合状态的持续时间最大值保持不变,设为 T_0 。与自控式状态一样,用计数器计时,换流时刻固定在 $T_0/2$ 处,换流后对开路相的感应电动势过零点进行检测。只要检测到开路相的反电动势过零点,或计数器到达 T_0 时还没检测到开路相的反电动势过零点,计数器就重新复位,到 $T_0/2$ 后再换流,这样依次进行。最后,若连续 N 次检测到开路相的反电动势过零点,就切换到自控式状态。

1.3 升频升压同步起动法

升频升压同步起动法的电路框图如图 1 所示。电路通过电流后,加在电容 C 上的电压 U_c 便缓慢上升, U_c 加在压控振荡器输入端,压控振荡器的输出经分频后作为时钟信号加到环形分配器上,环形分配器的输出信号转换成换相信号加在功率放大电路上,控制绕组的导通。同时, U_c 加到 PWM 电路的输入端作为调制信号,使 PWM 信号占空比随 U_c 变化,控制绕组导通的脉冲宽度,也即为控制加在绕组上的电压。这样随着 U_c 的上升,加在绕组上的电压与频率也逐渐上升,以升频升压方式驱动电机运行。另外,将 U_c 与设定的阈值进行比较,当 U_c 达到一定数值后,即电机转速达到一定数值后,经逻辑电路将电机切换到直流无刷电机运行状态,完成起动过程^[9]。

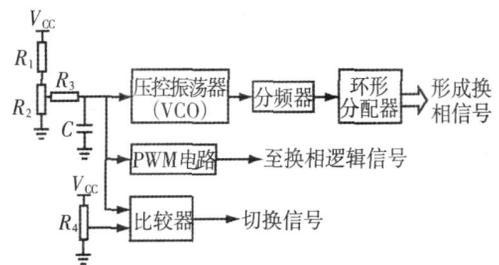


图 1 升频升压同步起动法原理

Fig 1 Principle diagram of raising frequency raising voltage synchronous starting method

1.4 短时检测脉冲转子定位起动法

短时检测脉冲转子定位起动法的原理为:永磁体转子对带铁心的定子线圈具有增磁或去磁作用,使线圈电感减小或增大;转子的位置不同,线圈电感的大小也不同。对定子绕组施加固定脉宽的检测脉冲后,不同的检测峰值脉冲电流对应不同的铁心电感,通过成对比较铁心线圈电感的大小逆推回去,就可检测出转子的位置,从而实现转子的定位^[10]。通过转子位置代码表,得出转子位置及随后加速时将需要的通电相序。当加速脉冲结束后,再一次发出 6 个检测脉冲确定转子的位置,然后再确定将要通

电的相序并进行加速。不断重复检测—加速—检测—加速过程,直到电机转速高到可以用反电动势法检测转子位置时为止,此时再把电机切换到直流无刷电动机运行状态,从而完成电机的起动过程。

2 起动方法选择与改进

为实现电机的顺利起动,往往需要附加起动控制电路,增加了系统的成本,而且使系统变得更复杂。设计的起动控制策略则无需附加任何起动控制电路,由软件程序控制电机正常起动。

为了节约成本并增强系统的可靠性,经过分析比较,采用三段式软件起动方式。由于电动车的特殊情况,即起动时有负载,且负载情况复杂。因此本文对三段式软件起动法做了改进。

定位阶段,先由程序控制给任意两相定子绕组通电而另一相相关断,则电机定子合成磁势轴线在空间上有一定方向,把转子磁极拖到与其重合的位置,经过一段时间即可确定转子的初始位置,即一次定位。为降低干扰和避免定子磁势方向与转子磁势方向为 180 时电机无法准确定位的问题,采取了二次定位法,即先给两相绕组通电,之后旋转 60 电角度再换两相绕组通电。

加速阶段分为两部分,初期是一段升频升压过程,由控制芯片产生 PWM 波形控制逆变器,使逆变器的换相频率从小到大慢慢的增加,而且给电机定子的电压开始很小并逐步增加,把直流无刷电机作为永磁同步电机实现变频起动,之后有一段时间的恒频恒压稳定过程,使速度达到一个稳定值,这样可以得到反电动势的位置信号。整个加速过程约持续 0.3 s 的时间。加速期间程序不进行反电动势的过零检测,换相不受反电动势检测信号的控制,换相时间间隔由软件延时控制。

切换阶段在加速的同时,将 PWM 波形的参数送入比较器进行比较,当 PWM 的占空比达到一定数值,也就是电压足够大,并且检测电机转速达到一定速度以后,即可以获得足够大的反电动势,此时就可以适时地将电机切换到利用反电动势检测信号控制换相的运行状态。起动时,应该施加稍高的电压;当到达切换速度时,应调整电压,使经滤波产生的过零信号的相位滞后与理论值差值最小,避免切换失败。外同步信号与转子位置信号之间的相位鉴别可以较容易地由控制芯片来实现,使用捕获单元来捕获转子位置的跳变,通过比较计算捕获的时间来判断外同步信号与自同步信号之间的相位差。当外同步信号与自同步信号相

位差满足切换条件时,电机的驱动信号由外同步信号切换为位置检测信号,最终实现自同步运行完成电机的起动。控制无位置传感器直流无刷电机起动的软件流程图如图 2 所示。

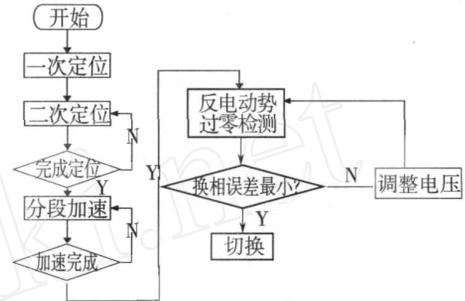


图 2 无位置传感器直流无刷电机软件起动控制流程

Fig. 2 Flow chart of the position sensorless BLDCM software starting control

在所设计的系统中,先导通 A、B 两相,C 相关断,程序控制这一过程持续一段时间后,再导通 A、C 两相,B 相关断,再持续一段时间以保证能够确定转子的初始位置,之后,按电机正转换相逻辑 BC BA CA CB AB AC 的换相顺序给绕组升频升压供电一个换相周期,再恒频恒压稳定几个周期,这样就可以保证电机起动后转向确定,避免造成反转,开环换相过程结束后进行调压切换到自控运行方式,至此完成电机的起动过程。

上述起动策略中的开环换相过程的换相时间间隔应该选择得当,否则状态切换后会造成电机不能正常起动,其值可以参考电机最小反电动势周期值进行选取。根据调试经验,其值为电机最小反电动势周期值的一半时,电机可以顺利起动。另外,在切换时,由开环起动的 PWM 值转换到闭环控制的 PWM 值,要进行适当的柔和处理,以避免电机的抖动,降低电动车的起动噪音和改善起动的平稳性。

无位置传感器直流无刷电机起动控制软件中主要部分是电机的调速部分,需控制电机完成起动和正常运行,切换时,通过软件调整运行电压,使切换时刻最佳。当切换完成后,电机的运行与有位置传感器直流无刷电机相似。

3 实验结果分析

以一台大连恒田永磁电机有限公司,型号为 BS6-1900 电动车专用永磁直流无刷电机为实验对象,其额定电压为 72 V,额定功率为 6 kW,峰值功率为 10 kW,额定转速为 1 900 r/min,额定相电流平均值为 166 A,峰值相电流平均值为 280 A,最高转速为 3 500 r/min,额定转矩为 30 N·m,过载转矩为

50 N · m。加载实验过程中利用四川诚邦测功机平台进行加载实验。实验中,由测试平台自动记录电机的电压信号、电流信号以及位置方波信号。电流测试中,LEM 电流传感器信号采用 100 的电阻分压送入芯片,测试电压与实际电流比例为 1 15。图 3 所示为控制系统加载实验平台框图。

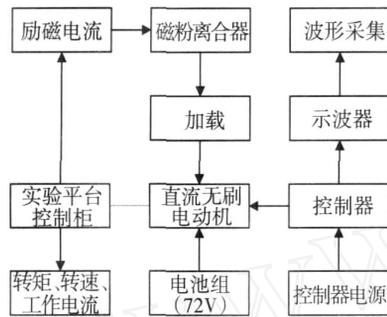


图 3 控制系统加载测试平台
Fig. 3 Block diagram of control system loading test platform

在起动实验中,首先进行了一种特定负载情况的测试,通过示波器观察起动过程的 3 个阶段。起动过程的波形如图 4 所示,图示所测波形是在所加负载转矩为 10 N · m 的情况下,以 25 ms 格的时间横轴,2 V 格的电压纵轴所测。因为在主控制电路中采用单向 AD 信号调理电路,所以所测试的相电流波形都为单向,即反相的电流被截止。在程序处理中,电流取绝对值。由图中可以明显的看出起动的三个阶段:定位、加速、切换。整个起动过程的时间大约是 0.3 s,最大电流值 160 A。定位阶段较易实现,定位后有一定的延时。其中由于负载的缘故,在升频升压的开始阶段之后,有一段以固定的频率和大 PWM 占空比的加速阶段,此阶段保持时间较长,约 0.15 s,以保证电机加速到足够的速度。然后切换到自同步控制,以系统的驱动控制 PWM 占空比指令运行,此切换过程中有略微的电流波动,而且是电流逐渐减小,这是由于调整电压所引起的。图 5 是对应的电机起动时的速度变化情况。

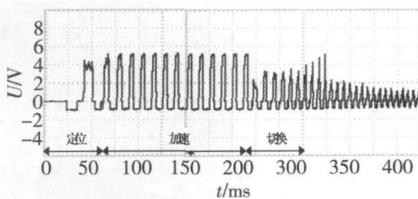


图 4 加 10 N · m 负载情况下电机的起动过程
Fig. 4 Starting process when the motor's with load of 10 N · m

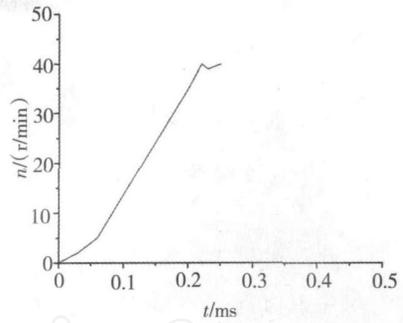
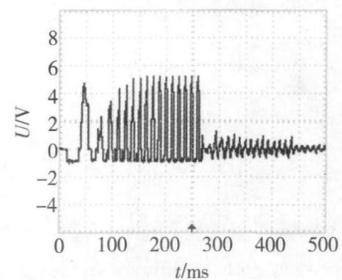
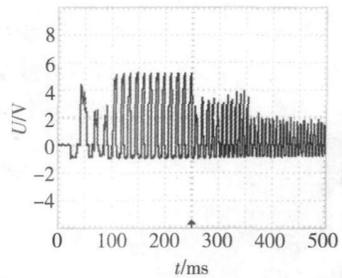


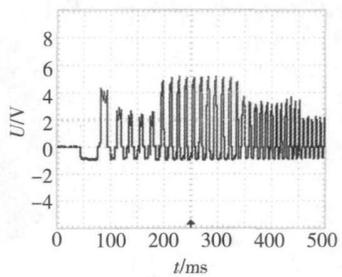
图 5 10 N · m 负载情况下电机起动时的速度变化
Fig. 5 the velocity change when the motor starting with load of 10 N · m



(a) 负载转矩为 0 时



(b) 负载转矩为 20 N · m 时



(c) 负载转矩为 30 N · m 时

图 6 无位置传感器直流无刷电机起动相电流波形
Fig. 6 Phase current oscillogram when the position sensorless BLDCM starting

在验证特定负载成功起动的基础上,又进行了不同负载的起动实验。图 6 为无位置传感器直流无刷电机的实际起动相电流波形,图 6 (a)为空载情况下的起动电流波形,图 6 (b)为 20 N · m 转矩负载情况下的起动电流波形,图 6 (c)为 30 N · m 转矩负载情况下的起动电流波形。3 种情况下,起动过程中电机相电流频率以预定的频率逐渐增加,定位过程和切换过程的时间随负载的不同略有不同,负载

越大,启动时间也就越长,启动也就越困难,加速过程以较大电流运行,最大电流基本相同,为 160 A 左右。由图 6 启动电流波形可以看出,电机启动时电流保持较大启动电流,当速度达到给定值时切换到闭环工作状态,电流逐渐减小,最后达到正常运行电流。

图 7 则是启动过程中示波器时间档调小测得的启动过程微观相电流波形,可以看出每相通电过程中的换相点,电机三相在可控的启动加速换相。

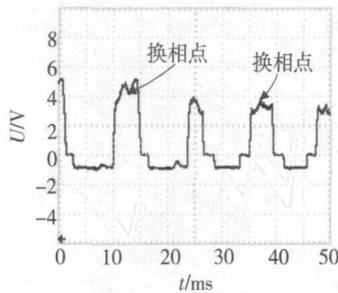


图 7 无位置传感器直流无刷电机启动微观相电流波形

Fig 7 Microscopic phase current oscillogram when the position sensorless BLDCM starting

由以上实验可知使用本文提出的启动方法可以顺利完成电机的启动,实验波形与启动过程理论分析相符合。

4 结 语

针对电动车用无位置传感器直流无刷电机启动难的问题,分析了现有的启动方法,指出了现有方法的不足,根据电动车用直流无刷电机特点,为了节约成本,提高控制的可靠性,设计了两次定位、分段加速、调压切换的三段式软件启动方案,通过控制器软件程序,对电动机启动进行控制。根据电动车启动负载不确定的情况,对不同的负载进行了平台实验,实验结果表明,负载越大,启动时间也就越长,启动也就越困难,该控制器能够在不同负载下可成功启动,改进后的控制系统能成功实现无位置传感器换相控制,可使电动车驾驶更加平稳安全舒适。

参 考 文 献:

- [1] 廖连莹,王仲范,邓亚东,等. 电动汽车永磁无刷直流电机键合图建模与仿真[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(6): 192 - 195.
LIAO Lianying, WANG Zhongfan, DENG Yadong, et al. Simulation of a permanent magnet brushless DC motor for electric vehicle using the bond graph method [J]. *Journal of Wuhan Automotive Polytechnic University*, 2003, 25(6): 192 - 195.
- [2] ZHANG C W, BA I Z F, CAO B G. Study on regenerative braking of electric vehicle [C]//*Proceedings of the 4th International Conference on Power Electronics and Motion Control*, Aug 14 - 16, 2004, Shanghai, China. 2004: 836 - 839.
- [3] 陈炜. 永磁无刷直流电机换相转矩脉动抑制技术研究[D]. 天津: 天津大学电气工程学院, 2006.
- [4] 吴筱辉,程小华,刘杰. 反电势法检测转子位置的直流无刷电机系统启动方法[J]. 中小型电机, 2005, 32(5): 60 - 63.
WU Xiaohui, CHENG Xiaohua, LIU Jie. Starting methods of brushless DC motor using back EMF to monitor rotor position [J]. *S & M Electric Machines* 2005, 32(5): 60 - 63.
- [5] FAH M I B, EMAD I A, SEPE B J. Position sensorless control [J]. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2004, 10(1): 40 - 47.
- [6] DANMODHARAN P, SANDEEP R, VASUDEVAN K. Simple position sensorless starting method for brushless DC motor [J]. *IET Electric Power Applications*, 2008, 2(1): 49 - 55.
- [7] JUNG D H, HA I J. Low-cost sensorless control of brushless DC motors using a frequency-independent phase shifter [J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2000, 15(4): 744 - 752.
- [8] AHMCD R, RA I K, MASA YUKI T. A continually on-line-trained neural network controller for brushless DC motors drives [J]. *IEEE Trans on Industry Application*, 2000, 36(2): 475 - 483.
- [9] SATOSH I O, HROFUNM I A. Approach to position sensorless drive for brushless DC motor [J]. *IEEE Trans on Industry Application*, 1995, 27(1): 928 - 933.
- [10] L M Y H, KOOK Y S, KO Y. A new technique of reducing torque ripples for BLDCM drives [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1997, 44(5): 735 - 739.

(编辑:于智龙)