

电动车开关磁阻电机驱动和保护控制策略研究^{*}

邵雨楠¹, 蔡 骏¹, 向 程¹, 刘泽远², 李远禄¹

(1. 南京信息工程大学 自动化学院, 江苏 南京 210044;

2. 南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 传统开关磁阻电机 (SRM) 起动时采用电流斩波控制 (CCC), 中高速阶段采用角度位置控制 (APC) 对转速进行调节。但在电动车领域的 SRM 驱动控制中, 通常采用基于脉宽调制 (PWM) 控制的方式来实现电机的开环调速。在传统 SRM 控制方式的基础上, 提出了一种动态斩波的起动方式以及一种 PWM 控制与 APC 控制相结合的中高速运行的综合控制策略, 可确保电机在不同负载下平稳起动、瞬间提速和稳定运行。与此同时, 对控制器保护环节中最为关键的过流保护和堵转保护进行了设计, 提升了整个驱动系统的可靠性。为了验证所提驱动控制策略和保护方法的可行性, 在以 STM32F103 处理器为控制核心的控制器和 1 台 12/8 结构电动车 SRM 上进行了系统的试验。试验结果表明在该控制算法下, 电机能够快速起动和稳定运行, 且能检测到故障并及时保护, 证明了该算法的正确性。

关键词: 开关磁阻电机; 电动车; 起动控制; 故障检测和保护

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)03-0076-07

Research of the Driving Control and Protection Strategies for EV Switched Reluctance Motor^{*}

SHAO Yunan¹, CAI Jun¹, XIANG Cheng¹, LIU Zeyuan², LI Yuanlu¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Traditionally, the current chopping control (CCC) was applied for starting control and the angle position control (APC) was applied in medium-high speed operation state for the switched reluctance motor (SRM). However, in electric vehicle (EV) application field, SRM was usually controlled with traditional pulse width modulation (PWM) control strategy. A dynamic CCC based starting scheme and a hybrid PWM and APC control strategy based medium-high speed operation control scheme were developed, which could ensure smooth starting operation, instantaneous speedup and stable operation under different load cases. Meanwhile, the most important controller protection parts such as the over-current protection and motor stalling protection were also optimized, and thus the system reliability would be highly improved. To verify the validity of the control strategies and the protection methods, experiments were implemented with a 12/8 structure SRM and the STM32F103 microchip based power controller. The results showed that the motor could start up quickly and smoothly, and the current fault and stalling fault could be diagnosed immediately with the proposed methods.

Key words: switched reluctance motor; electric vehicle; start control; fault detection and protection

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51607095); 南京信息工程大学高层次人才科研启动基金项目 (20152017)

作者简介: 邵雨楠 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为开关磁阻电机控制。

蔡 骏 (1982—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机驱动技术和能量管理技术。

向 程 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为开关磁阻电机控制。

0 引言

随着环境问题的加剧,能源日益紧张,电动车逐渐成为各国汽车发展的方向。开关磁阻电机(SRM)结构简单、调速性能好且成本低,满足电动车轻量化、高性价比的要求。电机各相之间相互独立,容错能力强,具有安全性好的特点^[1]。SRM 可控参数很多,因而控制方法灵活,可通过优化控制方法满足电动车用 SRM 的控制要求。文献[2-3]提出一种转速闭环和平均转矩闭环的控制策略,提高了电动车在重载条件下的转速和电机出力,但在控制中引入了磁链计算和闭环控制,使得控制算法复杂,难于实现。文献[4]提出一种启动时硬件电流斩波控制(CCC)的方式,即在软件上设置电流斩波限并以电压形式输出到电流斩波电路,再通过运算放大器和比较器判断电流是否过流,然后将斩波逻辑信号输入到控制器中判断是否需要斩波。该方法只需要在程序中设置斩波限,消除了软件电流采样误差,提高了斩波频率,减小了控制器的资源占用,但其增加了整个驱动系统的成本和电路的复杂性。文献[5]提出一种模糊控制闭环调节转速的方法,根据给定转速计算查表得到脉宽调制(PWM)占空比,可实现电机频繁稳定的加减速,但需要试验建立模糊规则库,前期调试相对复杂。文献[6-7]直接采用 PI 方式进行转速、电流双闭环控制,提高电机在大负载下的转速和电机出力,调节参数过多,同样增加了算法的复杂性。文献[8]介绍角度位置控制(APC)具体实施的方式,实现了电机的开通关断角的调节,但无法直接用于电动车用 SRM 的控

制。文献[9-10]提出采用 PWM 和 CCC 相结合的方式启动电机,能够实现电动车用 SRM 快速启动,但其忽略了电机低速时较大的转矩脉动。文献[11-14]介绍了传统电动车用 SRM 的故障检测和保护方案,重点介绍了堵转保护和过流保护,分别根据转速和电流判断电机是否堵转和过流,但堵转时转速过低,无法精确计算转速,且只通过软件设置相应过流保护措施,检测和保护的反应时间过长。

本文针对 1 台 12/8 结构 SRM,对其启动和高速运行的控制策略进行分析,提出动态斩波的启动方式,即根据转把给定的占空比和转子位置区间分段设置电流斩波限,启动后采取 CCC、APC 和 PWM 3 种模式相结合的综合控制方式,实现了电动车在不同负载下的平稳启动,优化了中高速阶段电机的调速控制,降低了算法的复杂度和驱动系统成本。同时,考虑到运行时可能出现的故障,增加了电动车常用的故障保护方案,并对比较重要的过流保护和堵转保护的方式进行了改进,避免了转速计算误差对故障保护的干扰,提高了过流保护的及时性。试验结果验证了控制方法的正确性和检测保护方案的及时可靠,进一步提升了电动车 SRM 驱动系统的综合性能。

1 电动车 SRM 驱动系统

1.1 电动车 SRM 驱动控制系统组成

电动车 SRM 驱动系统如图 1 所示,主要由电池、控制器和 SRM 组成。控制器是整个驱动系统的核心,实现电机启动、正反转、转把加速和故障检测及保护报警功能。

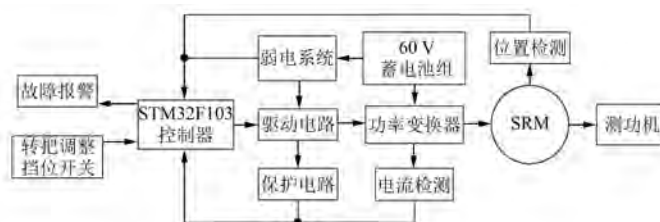


图 1 电动车 SRM 驱动系统结构框图

电池负责对整个控制系统供电,一方面由弱电系统将蓄电池组 60 V 直流电转换成 15、5、3.3 V 分别为驱动电路和控制芯片供电;另一方面,通过功率变换器直接给电机供电。

处理器 STM32F103^[15]作为控制系统的核心,负责位置信号、电流信号和转把输入信号的采集处理,同时实现驱动信号的输出以及故障报警等功能。

1.2 功率变换器电路

考虑到电动车控制器的成本,本系统采用非隔离不对称半桥结构功率变换器,即功率变换部分与调理电路未采用隔离模块进行隔离处理,降低了整个驱动系统的成本,同时使控制电路设计更加简单。

不对称半桥结构功率变换器如图 2 所示。 $V1$ 、 $V2$ 分别为同一桥臂的上下 2 个开关管, $VD1$ 、 $VD2$ 为 2 个续流二极管, 康铜丝 R 放在下开关管和续流二极管之间检测该相电流。

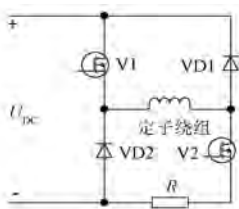


图 2 不对称半桥结构功率变换器

当 $V1$ 、 $V2$ 都导通时, 60 V 电压 (U_{DC}) 为该相绕组通电, 电流从正极经 $V1$ 、定子绕组、 $V2$ 和康铜丝回到负极。当 $V1$ 关断、 $V2$ 导通时, 电流经定子绕组、 $V2$ 、康铜丝和续流二极管 $VD2$ 形成零电压续流。当 $V1$ 、 $V2$ 都关断时, 绕组电流经 $VD1$ 、 $VD2$ 向电容充电, 不再流过康铜丝。

2 控制策略

该系统的主要任务是实现电机的平稳起动和稳定运行。同时, 考虑到电动车运行工况的复杂性, 在运行中可能会遇到各种故障, 控制系统需要一定的故障检测与保护能力, 对故障进行判断并采取相应的保护措施, 避免对整个控制系统造成更大的损坏, 因而在控制系统中加入了必要的故障检测和保护功能。

2.1 新型驱动控制策略

2.1.1 起动控制策略

传统电动车采用 PWM 斩波方式起动电机, 开通关断区间固定为 $0^\circ \sim 22.5^\circ$, 即根据位置信号的高低电平直接驱动电机。通过转把给定 PWM 占空比, 实现速度调节, 同时采用电流斩波方式设置斩波限限制电流大小。如图 3 所示设置电流阈值, 当电流大于上阈值 I_{High} 时关断开关管, 让电流下降到下阈值 I_{Low} 后再开通开关管, 使电流在导通区内稳定在斩波限附近。

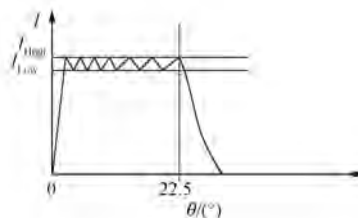


图 3 电流斩波示意图

上述方法忽略了电机在低转速时较大的转矩脉动, 且在电动车实际工况中, 由于汽车起动时其负载可能不同, 起动时的电流斩波限也应该不同。例如汽车处于上坡路段时需要较大的电流斩波限来起动电机; 而在平稳路段, 若斩波限较高, 输出力矩过大, 会使电机起动过快。同时, 在起动时电流斩波限很大会引起较大的转矩脉动。

该系统采用动态斩波的起动方式, 如图 4 所示。在自起动阶段, 根据霍尔信号高低电平将一个电周期划分成 6 个区域, 在每个区域设置不同的电流斩波限。在 $0^\circ \sim 7.5^\circ$ 和 $15^\circ \sim 22.5^\circ$ 区间设置较大斩波限, 使电机起动; 在 $7.5^\circ \sim 15^\circ$ 区间降低电流斩波限, 减小转矩脉动。

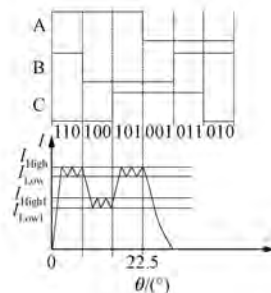


图 4 根据位置信号调节电流斩波限

在导通区改变电流斩波限的同时, 根据转把给定的占空比来设定不同的电流斩波限。如图 5

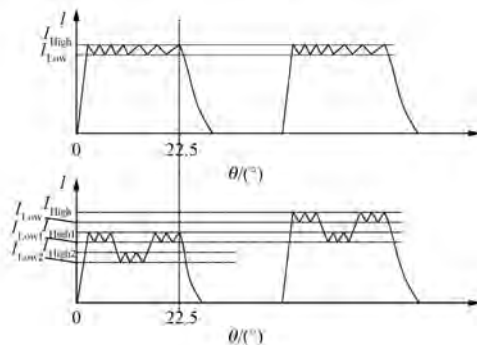


图 5 动态斩波原理图

所示,与固定的电流斩波限相比较,根据转把给定的占空比分段设置电流斩波限。在第一个周期,转把给定的 PWM 占空比较小,斩波限相应取小,当转把给定转空比加大时,提高电流斩波限使电

机快速起动。

2.1.2 中高速运行控制

电机起动后,将 PWM、CCC 和 APC 3 种方式相结合来优化电机控制,控制方式如图 6 所示。

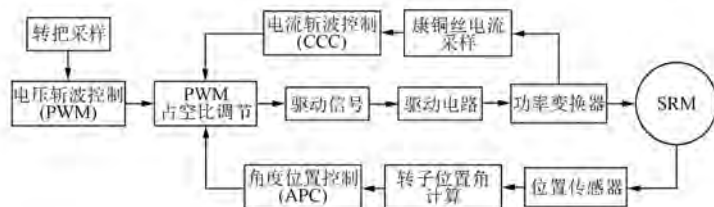


图 6 中高速控制方式示意图

在开通关断角不变的情况下,使开关管工作在 PWM 方式。将 PWM 周期设为固定值,根据转把输入的电压改变 PWM 的占空比,以此来改变绕组两端的平均电压,从而实现对电机转速和输出转矩的控制。

CCC 是在导通区间内,将康铜丝采样的相电流值与设定的电流斩波限相比较,当电流大于斩波限上阈值时关断开关管,等到电流小于斩波限下阈值时再导通开关管,从而使电流在导通区内维持在斩波限附近。

APC 是指在绕组两端电压一定的情况下,根据位置信号计算的位置角度调节开关管的开通关断角,改变绕组两端通电和关断时刻,实现电流波形宽度和电流波形与该相电感曲线相对位置的调节,优化电机的驱动控制。

该系统将 3 种控制方式输出的驱动信号相结合,调节转把给定的 PWM 占空比作为开关管的驱动信号。

为了避免电机因转速波动在临界速度点附近来回切换导通区间,在控制方式切换时采用转速滞环的方式,即转速从低到高切换的临界速度点与转速从高到低切换的临界速度点之间存在一定的滞环区间。

2.2 故障保护策略

该控制系统通过硬件和软件实现了一定的故障检测和保护功能,提高了系统的可靠性。除了传统的电压欠压保护、飞车保护、位置信号故障保护、缺相保护、MOSFET 短路自检和温度保护外,对控制系统中最重要的堵转保护和过流保护方案进行了改进。具体改进方式如下。

2.2.1 堵转保护

堵转是指电机在持续时间内静止、低转速运行或来回抖动。常规的堵转检测方法是判断在预计周期内转速是否持续小于堵转保护转速阈值且电流是否持续大于堵转保护电流阈值。但在堵转时转速很低,此状态下无法根据位置信号精确计算转速,且电流采样的频率和精确度对检测有一定影响。因此提出一种新的检测方法,主要分为静止堵转和抖动堵转两种情况,其原理分别如图 7 和图 8 所示。

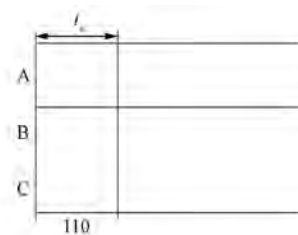


图 7 静止堵转判断原理图



图 8 抖动堵转判断原理图

图 7 中,静止堵转时转子位置不变,电机起动

后在一段时间 t_s 内若持续检测到转子位置为同一状态则认为电机发生堵转故障,进行堵转保护。电机抖动时,如图 8 所示,其转子位置会来回变化,因而无法用上述方法来判断堵转故障。此时可通过检测位置信号顺序来判断,即检测并记录下当前位置信号,并根据此信号估计出电机正常运行时下一周期的位置信号,在下一检测周期中将检测到的位置信号与估计的位置信号相比较,若当前位置信号不变或与估计的位置信号相同,则表示电机运转正常,否则进入堵转保护。

2.2.2 过流保护

传统 SRM 电动车控制器的过流保护方法是将采样的相电流与设定的过流阈值相比较,采样电流持续大于过流阈值一段时间后进入过流保护。该方法从检测电流到与过流阈值比较,最后到关断驱动信号需要几个周期的时间,检测和保护时间比较长,而电流过流后往往很快就会损坏控制器,大多数情况下无法及时实现过流保护。因而该系统采样硬件和软件相结合的方式检测电流是否超过阈值。

硬件上,将康铜丝采样的电流经调理后通过比较器与给定的参考电压(即电流过流阈值)比较,当电流超过阈值时,比较器直接输出高电平关闭驱动输出。同时,将此电平信号输入到控制器,通过控制器报警并进入关机状态。程序上,通过 AD 采样三相电流,在 DMA 中断中比较采样电流与电流过流阈值。

3 系统实施方案

本文主要进行控制系统软件设计,根据电动车 SRM 驱动系统的功能要求,配置控制器的寄存器,编写中断函数和主函数。

3.1 系统主程序

主程序流程如图 9 所示,主要包括系统初始化、中断优先级设置、开机自检和驱动信号输出。控制器上电后,首先对系统进行初始化,主要设置如下:定时器的周期和频率、AD 采样转换时间、DMA 中断初始化和通用输入输出(GPIO)口的输入输出方向及工作模式等。

然后设置中断优先级。设置多个中断后,在同一时间可能会产生多个中断请求,因此需设置各个中断响应的先后顺序。在各中断中调用的子

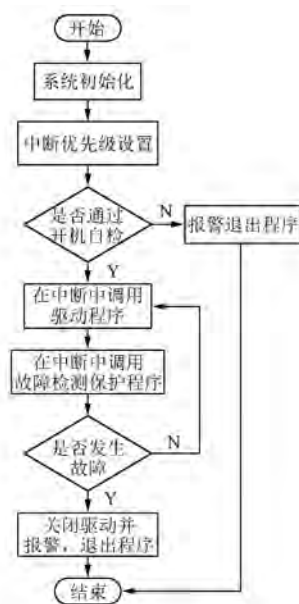


图 9 主程序流程图

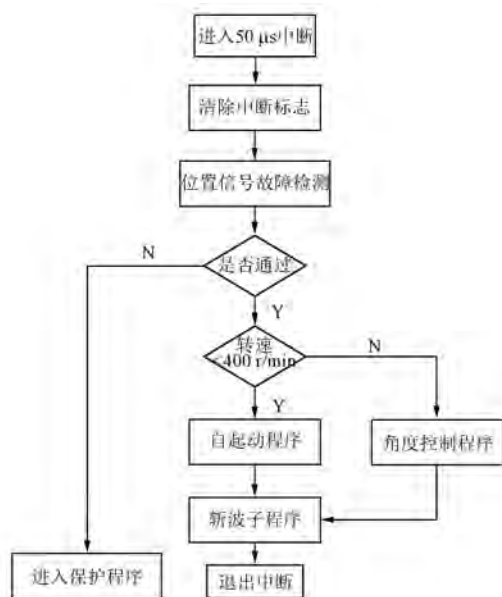
函数其重要性各不相同,因此按照子函数先后运行顺序的要求,设置各个中断的优先级。

之后运行开机自检程序,检测故障标志,判断控制器是否检测到故障。完成开机自检程序后,在 $50\ \mu\text{s}$ 中断中调用驱动程序,开始驱动电机,同时在 $50\ \text{ms}$ 中断中调用故障检测程序,在电机运行过程中实时检测电机是否发生故障。

3.2 驱动程序

因为在电机运行时,转速升高其转子位置变化加快,驱动程序也必须高频运行,所以将位置信号检测、驱动程序和斩波程序放在 $50\ \mu\text{s}$ 中断中。如图 10 所示,进入 $50\ \mu\text{s}$ 中断后,首先清除中断标志,然后检测位置信号,若位置信号发生故障则立刻关闭驱动,将对应的故障标志置 1 并系统复位进入自检程序从而报警关机。若位置信号正确,则运行驱动程序。驱动程序按转速分为自启动程序和角度控制程序。

在转速小于 $400\ \text{r/min}$ 时,无法根据位置信号正确计算转子位置角度,因此直接根据位置信号的高低电平来开通关断电机各相。转速在 $400\ \text{r/min}$ 以上时,转子位置角度计算基本稳定可靠,且若再按上述控制方式,则开通区间过大,随转速升高电流进入负转矩区,不利于电机控制。因此切换成角度控制的方式,根据转速调节开通关断角,优化电机的控制。

图 10 50 μ s 中断程序流程图

3.3 故障检测程序

在电机运行中需要实时检测电机是否发生故障,并采取相应保护措施。考虑到保护措施要求和控制器的运行能力,将保护子程序分别放在 50 ms 中断和 DMA 中断中。

50 ms 中断保护程序流程如图 11 所示。此中断内的故障检测和保护程序对实时性要求相对较低,因而中断频率也相对较低。进入中断后,首先清除中断标志,然后依次调用各故障检测子函数;若检测到电机发生故障,则立刻关闭驱动,同时将相应的故障标志位置 1,然后系统复位。系统复

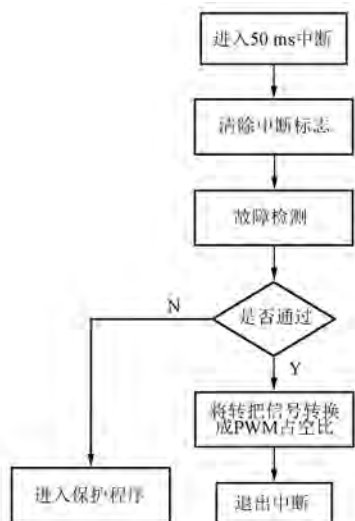


图 11 50 ms 保护中断流程图

位后,通过开机自检程序使控制器报警保护。若系统正常,则将采样到的转把输入信号转换成 PWM 驱动信号的占空比。

过流保护对电流实时检测性要求较高,因此将过流保护程序放到 DMA 中断中,如图 12 所示。

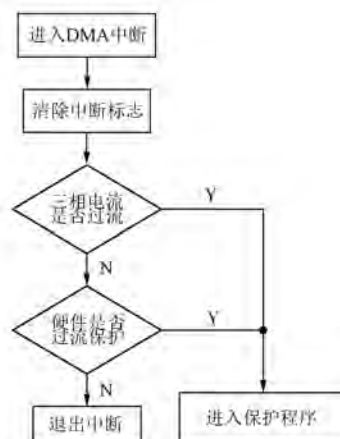


图 12 DMA 中断流程图

每次 DMA 采集满 AD 采样转换后的数字值后产生 DMA 中断,在此中断中将采样的电流值与设定的过流阈值相比较,判断三相电流是否过流。同时判断硬件上的过流保护标志,若三相电流任意一相超过设定的电流阈值或硬件过流保护标志位置 1,则立刻关闭驱动,并将过流标志置 1,最后系统复位,通过自检程序报警提示故障类型。

因为 DMA 中断不占用 CPU 资源,且 DMA 中断频率只与 AD 采样转换时间有关,因而此方法检测频率较高、实时性好。

4 试验验证

为了证明所提驱动策略和故障保护方案的可行性,在 1 台 12/8 结构的 SRM 控制平台上进行试验验证。试验采用 60 V 蓄电池组供电,以 STM32F103 为控制器核心,电机额定功率为 5 kW,额定转速为 3 000 r/min。

如图 13 所示,初始时刻,转把所给的 PWM 驱动信号的占空比较小,同时也限制了电流斩波限的大小,此阶段适用于电机负载较小的起动状态。但负载较大时,电机无法起动,此时加大转把 PWM 占空比,电流斩波限也相应提高,电机快速起动。同时同一导通区间分三段进行斩波,既保证了电机出力,又减小了起动时的转矩脉动。

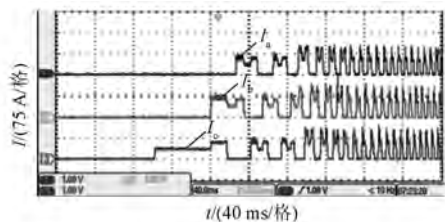


图 13 电机静止起动电流波形

如图 14 所示,电机起动且转速计算精确后进入以 APC 和 PWM 为主、CCC 为辅的控制阶段。可以看出控制策略切换后,导通区间减小,电流随转速快速上升而有所下降,电流未到达斩波限,因此阶段 CCC 只起到避免电流突增的保护作用,主要靠 APC 和 PWM 控制方式进行转速调节。

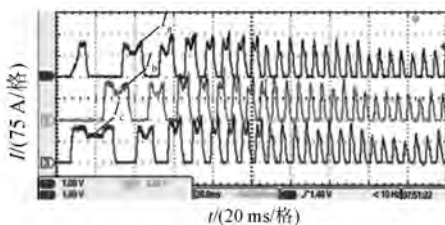


图 14 控制方式切换时的电流波形

如图 15 所示,电流斩波限上阈值为 150 A,过流保护电流阈值为 180 A。电机运行一段时间后,将斩波限提高到 190 A,硬件首先检测到 B 相过流,关闭驱动输出,三相电流立刻为零,然后将过流信号传送到 STM32F103 进行故障报警,进入停机状态。

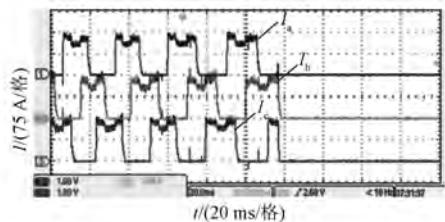


图 15 过流保护瞬间的电流波形

测试堵转保护策略,如图 16 所示,将电流斩波限设为 80 A,负载加到 20 N·m,模拟电机静止堵转状态。

从图 16 可以看出,初始时 B 相电流随转把给定的 PWM 占空比增大而逐渐上升,持续 2 s 后因位置信号未发生变化,进入堵转保护,控制器停止驱动电机,三相电流都归零。

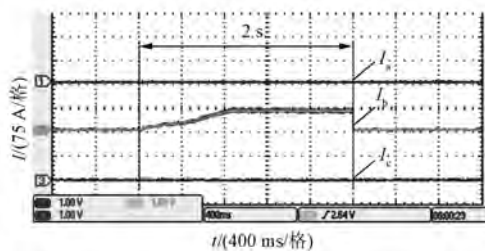


图 16 起动堵转电流波形

5 结 语

本文提出了一种动态斩波的起动方式,以及一种 PWM 控制与 APC 控制相结合的中高速运行的综合控制策略,并对过流保护和堵转保护方法进行了改进,最后进行试验验证。试验结果表明:

(1) 在起动阶段,根据转把所给的占空比动态调节斩波限,实现了电机在任意负载下的快速平稳起动。同时,将导通区分成三段斩波:在第一阶段斩波限较高保证了电机出力;在第二阶段降低斩波限减小了转矩脉动;在第三阶段继续提高斩波限增加电机出力。与传统电机起动控制方式相比,既保证了电机平稳起动,同时减小了转矩脉动。在中高速阶段,将 PWM、CCC 和 APC 3 种方式结合,满足了电动车用 SRM 的转速调节。

(2) 在过流保护中,采用硬件过流检测和软件过流保护相结合的方式,通过硬件检测能快速判断电流是否过流,继而进入保护程序。

(3) 在堵转保护中,使用位置信号顺序判断电机是否堵转,实现了预期的堵转保护,避免了根据转速判断时,因转速过低计算不准确而引起的堵转误判的问题。

【参考文献】

- [1] 李海瑞.开关磁阻电机控制系统研发[D].杭州:浙江大学,2015.
- [2] 黄为龙.电动车开关磁阻电机控制器研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.
- [3] 徐国胜.电动车用开关磁阻电机驱动系统研究[D].合肥:合肥工业大学,2012.
- [4] 李涛.电动车用开关磁阻电机控制系统的设计[D].镇江:江苏大学,2010.
- [5] 王建,程鹤,陈昊.基于数字信号控制器的电动车用开关磁阻电机控制系统设计[J].电机与控制应用,2011,38(12): 38. (下转第 94 页)



图6 软件配置界面



图7 网关参数配置

3.2.2 网关配置

远程适配软件无需手动添加网关。在连接到服务器 10 s 之后,已配置正确且运行正常的网关将会自动添加至软件中的网关列表。

网关配置包括虚拟串口配置和网关参数配置两部分。

虚拟串口配置用于在本地创建与远程调试网关通信的虚拟串口,此串口将用于与 PLC 等原有调试软件通信。本例中远程调试网关映射到本地端口 1。

网关参数配置用于远程设置网关的相关参数,包括网关基本信息、网络参数、串口参数、SIM 卡使能等,如图 7 所示。

网关配置完成后即可实现调试网关连接现场 PLC 设备,进行远程调试操作。

4 结 语

本文所开发的低成本远程调试系统构建简单,通用性强,可适用于电机生产线产品种类繁多、工艺复杂的应用需求,实现数据从运维中心到

工业现场设备的双向透传,可以使任意运维中心对任意工业现场的串口设备进行远程调试,并在代理服务器进行集中管理。其中,远程调试网关代替传统的嵌入式智能监控单元,代理服务器代替专用的云服务平台,远程适配软件代替定制的客户端软件或 APP。同时,该远程调试系统可按需使用网络资源,仅在出现故障或需要调试时才建立连接,快速搭建系统。因此,初期投入和后期维护成本均较低,具有很强的经济性和实用性。该系统可广泛应用于传统的工业制造企业,提供一种低成本、简便易行的智能化升级方式。

【参 考 文 献】

- [1] 杨艳,邓月明,杨明杰,等.面向智慧茶厂的物联网网关设计[J].电脑与信息技术,2018(2): 62.
- [2] OASIS. MQTT Version 3.1.1 [EB/OL]. <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.doc>.
- [3] 吕腾超,李由,李阳.基于 S3C2440 的新型工业多协议转换器设计[J].仪表技术与传感器,2017(10): 38.

收稿日期: 2018-10-26

(上接第 82 页)

- [6] 黄清.电动车用开关磁阻电机控制系统的研究[D].赣州:江西理工大学,2015.
- [7] 高鹏.开关磁阻电机制动控制的研究与实现[D].西安:西安科技大学,2017.
- [8] 钟锐,徐宇拓,陆生礼.基于 STM32 的开关磁阻电机角度位置控制系统[J].计算机测量与控制,2012(11): 2916.
- [9] 贾星辰.开关磁阻电机调速控制系统研究与实现[D].西安:西安科技大学,2017.
- [10] 张超.开关磁阻电机调速控制系统的研究与设计[D].济南:齐鲁工业大学,2015.
- [11] 朱叶盛.基于 STM32 的开关磁阻电机驱动系统研

究与实现[D].南京:东南大学,2016.

- [12] 张明灏.开关磁阻电机控制器电流采样及保护设计[D].南京:东南大学,2015.
- [13] 朱曰莹,赵桂范,杨娜.电动汽车用开关磁阻电机驱动系统设计及优化[J].电工技术学报,2014,29(11): 88.
- [14] 钟锐,徐宇拓,鲁雪.基于 STM32 的开关磁阻电机保护算法设计与验证[J].电气传动,2013,43(7): 3.
- [15] 刘火良,杨森.STM32 库函数开发实战指南:基于 STM32F103[M].2 版.北京:机械工业出版社,2017.

收稿日期: 2018-10-11