

绕线式异步电机电流斩波调速系统的设计

夏梦芝, 黄运生, 陈 学

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 本文以绝缘栅极型功率管作斩波管, 采用电流斩波的方式, 设计了一个绕线式异步电机的电流转速双闭环控制系统。文章阐述了该方案的调速原理, 介绍了调速系统的双闭环结构, 着重研究了该系统的硬件设计。仿真实验证明, 该系统的静态精度和动态性能均得到明显改善。

关键词: 绕线式异步电机; 电流斩波; 绝缘栅极型功率管

中图分类号: TM921 文献标识码: B 文章编号: 1003-7241(2010)02-0089-05

The Design for the Current Chopper Control System of Wound-Rotor Induction Motors

XIA Meng-zhi, HUANG Yun-sheng, CHEN Xue

(Information Science and Engineering school, Central South University, Changsha 410083 China)

Abstract: Based on a novel IGBT chopper topology, a double-closed loop control system of current and rotational speed for wound-rotor induction motors is presented in this paper, in which the technique of current chopper is used. The paper describes the elements of the speed adjusting in this scheme, and introduces the double-loop topology. The investigation of the hardware system is emphasized. The experiment results indicate that both the static and dynamic performance are improved significantly.

Key words: wound-rotor induction motor; current chopper; IGBT

1 引言

绕线式异步电动机, 相对于笼型异步电动机而言, 具有起动电流小, 起动转矩大的特点。一般应用在大功率重载起动的情况下, 或者功率虽然不大, 但要求频繁起动、制动和反转的场合。该电机的控制方式一般有两种: 转子串电阻调速和串级调速^{[1][2]}。

尽管串级调速具有效率高等显著优点, 但因其调速范围不宽和一次性投资大等不足之处而使应用范围受到了一定的限制。而利用继电器切换转子电阻从而实现电机起动或调速的方法, 能够有效限制起动电流、提供较大的起动转矩并且电路原理简单、初期投资少。但是这种调速方法的低速特性静差度较大, 能量损耗大, 调速范围受到限制。尤其是该方法难以实现闭环控制, 动态性

能和抗干扰能力较差。为此, 本文采用C8051F310单片机为核心, IGBT作为斩波管, 采用转子电流斩波的方式, 利用转子电势过零检测的方法获得电机转速, 构建转速电流双闭环调速系统。其设备简单, 能耗小, 实现了无级调速, 具有较强的抗干扰能力。

2 转子电流斩波调速原理

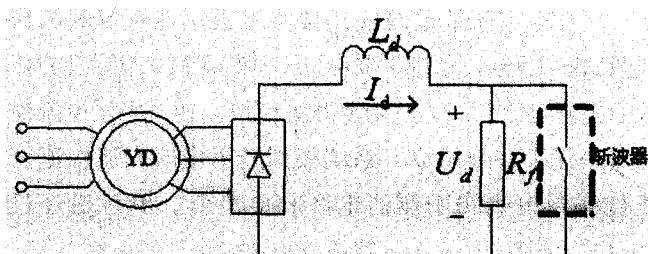


图1 调速原理图

图1是其调速原理图^[3]。三相异步电机转子回路电势经过整流模块被整流成直流，为了减小斩波器中所用IGBT在开通时对转子回路电流产生的冲击，串接一个平波电抗器 L_d 。通过控制斩波器在一个周期内的导通时间比 σ ，平滑的改变接入转子回路的等效电阻 R^* 的大小，从而达到调速的目的。经分析可得 $R^* = (1 - \sigma) R_f$ 。其中， R_f 为外接的斩波电阻^[2]。

3 PWM调节算法

系统根据给定速度及电流反馈、速度反馈计算得到PWM波的占空比^[4]。系统将速度设定值 V_i 和转速反馈得到的实际速度值 V_g 进行比较得到速度差 ΔV ，将速度差 ΔV 换算成占空比差 $\Delta \rho$ ，并用PID调节算法重新修正PWM波的占空比 ρ ，最后通过IGBT控制电路改变对IGBT的通断控制从而改变转子电流以调节速度，如图2所示。由于脉冲宽度的改变即控制转子电流的大小，因此在速度增加过程中为防止电流突然变化很大损坏元器件，在调速过程中脉宽的调节是由初值逐步变化的，变化的最后值为设定的运行速度。

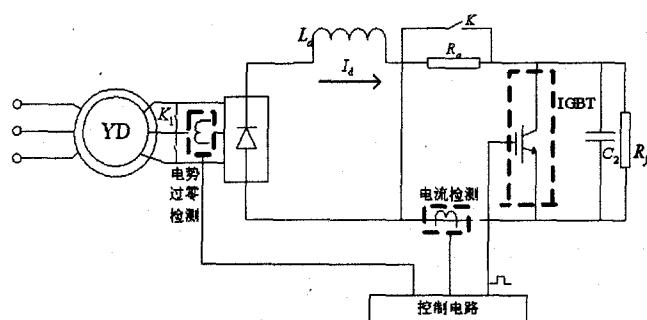


图2 脉宽控制图

4 系统硬件设计

4.1 绕线式异步电机调速系统的结构介绍

基于电流斩波的绕线式异步电机调速系统的结构框图如图3所示，系统主要由以C8051F310单片机为核心的控制电路、IGBT功率开关模块、转子电压电流检测模块三大部分构成。系统根据转子电压电流检测模块检测到电机转子侧的电压和电流值，单片机经过PWM调节算法，输出一路占空比宽度可调的PWM波，经过驱动电路控制功率开关模块IGBT的通断，从而实

现电机的软启动，以及对电机的速度调节。

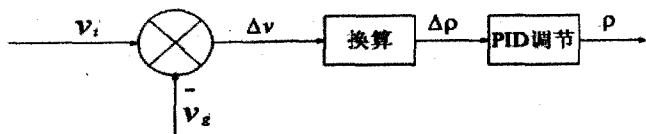


图3 系统结构框图

如图3所示，为了抑制起动电流对电机和主电路的冲击，防止起动瞬间短路，同时增大启动转矩，须在转子回路中串接一个起动电阻 R_a ，电机起动完毕后利用继电器 K 切除该电阻^{[5][6]}。当电机稳定运行在额定转速且无需调速的情况下时，继电器 K 闭合，切除斩波调速系统，使系统的转差功率减小，大大提高了工作效率。

为了吸收IGBT关断时的尖峰电压，在电阻 R_f 旁边并联一个电容 C_2 ，该电容采用无感电容以减小线路电感。IGBT导通时，电容上的电荷通过电阻 R_f 进行放电，抑制开通时的电流过冲，减小了开通损耗^[7]。

通过对转子绕组中感应电势的过零检测可以得到转子电势的频率，经过换算从而获得电机的转速。该系统具有电流反馈和转速反馈的双闭环控制方式，有效地限制了转子电流，提高了静态调速精度并获得较好的动态性能。电流内环有效地限制电机的最大电流，起到保护IGBT及电动机的作用；速度外环实现了无静差调速，使系统的机械特性变硬^[8]。

4.2 控制电路

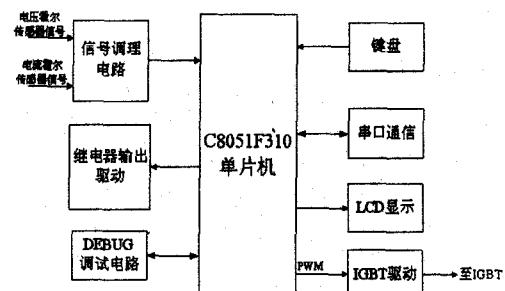


图4 控制电路结构框图

控制电路主要由C8051F310芯片、5V-3.3V电源转换模块、4*4键盘扫描、液晶显示、继电器输出、采样电压电流信号调理电路、通用异步接收发送器UART以及DEBUG调试接口等组成，结构框图如图4所示。该系列单片机允许用户根据自己的特定应用选择通用端口I/O和所需数字资源的组合，片内的Silicon

Labs 2 线(C2)接口调试电路支持全速的在系统调试,大大地提高了设计效率。此外,单片机内部的可编程计数器阵列(PCA0)模块可配置为专用的 PWM 波发生器,通过改变专用寄存器 PCA0CPH0 的值,能够实时调节脉冲的宽度。

在该调速系统中，电机的给定速度、启动时间等参数由该控制电路的键盘设定，电压检测模块采样电机转子的实时电动势，经过一定的换算成速度值反馈给单片机，单片机根据给定转速与实际转速，经过一定的控制算法得到单片机输出的 P W M 波的占空比，进而改变 IGBT 的导通比 σ 以达到调速的目的。

C8051F310 单片机的 ADC0 子系统集成了两个 25 通道模拟多路选择器和一个 200 kps 的 10 位逐次逼近寄存器型 ADC，ADC0 可以工作在单端方式或差分方式。为配置为单端方式，在此选择电压信号输入管脚(P0.6) 为正端输入，GND 作为负端输入，为提高转换精度，输入电压范围必须控制在 0~2.5V 之间。

4.3 IGBT驱动模块

驱动模块的核心部分采用的芯片 6N137, 它是一款用于单通道的高速光耦合器。其中由控制器(MCU—C8051F330)产生 PWM 的信号及数字地 GND 信号输出给 6N137。其外围电路如图 5 所示。

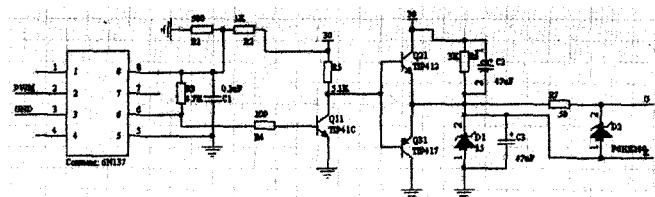


图5 IGBT驱动电路

当 6N137 的输出端 V_o 输出为低电平时, 达林顿管 Q11 关断, 集电极输出为高电平, 此时推挽电路上管 (Q21) 导通, 下管 (Q31) 截止, IGBT 栅极电压 (G) 为 30V, 由于稳压管 D1 的作用, 发射极 (E) 电压维持在 15V, 此时, V_{CE} 为 15V, IGBT 开通。当 6N137 的输出端 V_o 输出为高电平时, 达林顿管 Q11 导通, 集电极输出为低电平, 此时推挽电路上管 (Q21) 截止, 下管 (Q31) 导通, G 为 0V, 此时, V_{CE} 为 -15V, IGBT 关断。以上就是 IGBT 的开通关断过程。

驱动电路输出端的 NPN 和 PNP 组成的推挽式输出电路，目的是为了提高输出电流能力，匹配 IGBT 驱动。

4.4 电机转速电流检测模块

图 2 所示的两个霍尔传感器分别检测到转子绕组的电动势和电流值。由电机学知，异步电机正常工作时，转子绕组中感应电势的频率为^[8]

$$f_2 = \frac{(n_1 - n)p}{60} \quad (1)$$

其中, n 为实际转速, n_1 为同步转速, p 为电机极对数。根据式(1)得到实际转速 n 为

$$n = n_1 - \frac{60 f_2}{p} \quad (2)$$

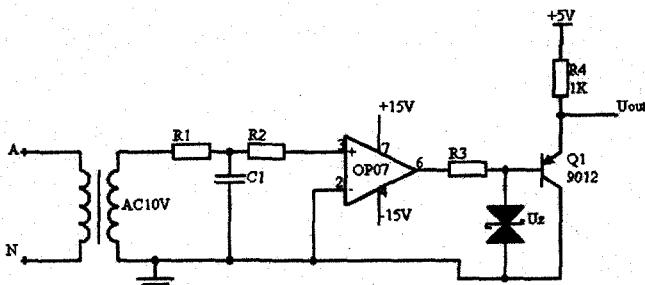


图 6 电势过零检测电路

为了检测转子感应电势的频率 f_2 ，设计了如图 6 所示的电势过零检测电路。

转子的感应电势经过电压互感器转换成 10V 左右的电压。为了有效地消减电动势中的高次谐波，在互感器副边并联 0.01uf 的滤波电容，该电容选择为高频特性的坦串容，并尽量靠近互感器的副边。

OP07 是一个通用集成运算放大电路, 将反相输入端 2 脚接地, 以构成一个过零比较器, 该比较器的阈值电压为 0V。当 3 脚的输入电压从低逐渐升高经过零时, 输出电压将从低电平跳变到高电平, 相反, 则输出电压从高电平跳变为低电平。输出的高电平 U_{OH} 与低电平 U_{OL} 分别接近于 OP07 的直流供电电源 $\pm 15V$ 。另外, 为了与 C8051F310 单片机 IO 管脚的耐压值相匹配, 在比较器的输出端采用了 5V 的双向稳压管对电压进行限幅^[9]。

图 7 分别为转子感应电势 E_2 、过零检测电路输出电压 U_{out} 的波形图。

为了捕捉 U_{out} 每个周期内高电平的跳变，将该信号送至单片机的 CEX1，该管脚为可编程计数器阵列 (PCA0) 的 I/O 线，可以配置为独立工作的六种工作方式，在此设置为上升沿触发的捕捉方式。当 CEX1 引脚上出现低电平向高电平的跳变时，PCA 捕捉到当前定时器的

值并将其装入到对应模块的捕捉 / 比较寄存器，并且产生一个中断请求。当发生下一次电平跳变时，再次捕捉定时器的值，并将前后两次相关寄存器的值进行比较，由此可以精确地计算出二者的时间差 $T = t_1 - t_2$ ，故转子感应电势的频率为

$$f_2 = \frac{1}{T} \quad (3)$$

根据式(2)与式(3)，得到实际转速

$$n = n_1 - \frac{60 p}{T} \quad (4)$$

以及根据式(4)的换算，经霍尔传感器检测到的转子感应电势的值转换成实际转速，作为速度环的反馈信号送入控制电路。

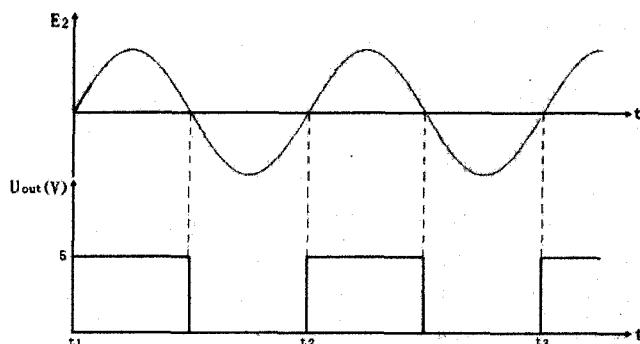


图7 E_2 、 U_{out} 电压波形图

同时，霍尔电流传感器与转子回路整流之后的电流相耦合，该传感器的测出值为 $0\sim 1V$ 的电压量，经运放放大至 $0\sim 2.5V$ ，该信号做为 C8051F310 的 P1.1 口输入，进行 A/D 转换，该值即为电流环的反馈信号。

5 仿真实验

系统的的研究对象为一个 SDF-5 型小功率绕线式异步电动机，其额定功率 PN 为 $2.2kW$ ，定转速为 $1475r/min$ ，定子绕组电阻 r_1 为 0.75Ω ，转子绕组电阻 r_2 为 1.32Ω ，定子电抗 x_1 为 0.78Ω ，转子电抗 x_2 为 8.39Ω ，绕组的匝数比为 1.388，电机的轴转动惯量 J 为 $0.123N\cdot m^2$ ，电流环采样周期为 0.003 秒，速度环采样周期为 0.01 秒，以阶跃信号作为信号源。

图 8 为起动过程电流和转速仿真图，给定信号为 $1400r/min$ 。图 9 是系统抗扰动仿真图^{[11][12]}。速度给定为 $570r/min$ ，在第 4 秒时给一个 $5A$ 的扰动电流信号给系统电流环，从仿真波形可以看出，在 $0\sim 1$ 秒内电机加

速启动，当在第 4 秒的时候给扰动信号时，速度平滑下降，但是下降量不大，说明了系统闭环调速中电流环具有良好的跟随性能，使系统具备了比较好的抗电网干扰性能。



图8 起动过程电流和转速仿真图

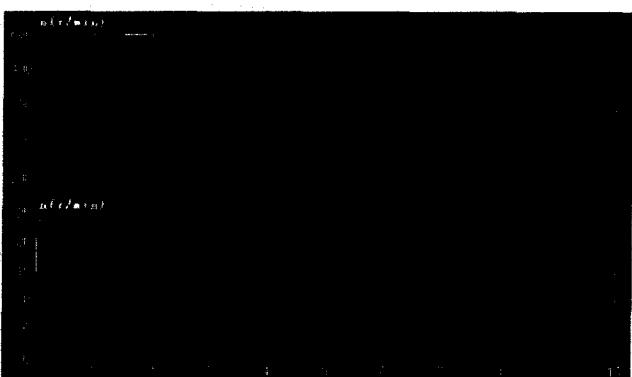


图9 系统抗扰动仿真图

6 结束语

本文提出的采用 IGBT 作斩波管的绕线式异步电机斩波调速系统，具有良好的静动态特性，工作可靠，调节方便。通过设计转速电流双闭环控制系统，可以在电机允许过载能力限制下的恒流起动，使转速能够很快地跟随给定变化，稳定运行时可实现无静差。当电机过载或者堵转时，起动自动保护，故障消失，系统自动恢复正常。

参考文献：

- [1] 胡崇岳.现代交流调速技术[M].北京:机械工业出版社, 1998, 9.
- [2] 王聪译.现代电力电子学与交流传动[M].北京:机械工业出版社, 2005, 6.

(下转第 98 页)

Min Governor Speed (RPM) (调速器下限转速) 2800 RPM
 EXTR/ADM CONTROL (抽汽 / 补汽控制)
 Min Extr/Adm Setpt (抽汽 / 补汽最小设定值) 6 Units
 Max Extr/Adm Setpt (抽汽 / 补汽最大设定值) 16 Units
 E/A Speed Enable Setting (抽汽 / 补汽控制投入转速允许值) 2950 RPM
 EXTRACTION STEAM MAP DATA (抽汽工况图)
 Max Power @ Min Extr (最小抽汽时最大功率) 25 Units
 Max HP Flow @ Min Extr (最小抽汽时最大进汽流量) 110 Units
 Min Power @ Max Extr (最大抽汽时最小功率) 14 Units
 Min HP Flow @ Max Extr (最小抽汽时最大进汽流量) 150 Units

在保障机组机械安全的方面,我们通过 Bently 3500 检测到的汽轮机、发电机的轴振动、轴位移、转速等各个参数的变化情况,给出机组运行的稳定性判断,为操

(上接第 92 页)

- [3] 杨兴瑶.电动机调速的原理及系统[M].北京:水利电力出版社,1979.
- [4] 彭清祥,黄运生,陈学.绕线异步电机电流斩波式调速方法的研究[J].自动化技术与应用,2007,26(4):85-87.
- [5] 王成山,黎家玲,晋帆.大功率异步电机转子电阻斩波调阻调速装置中斩波器得参数设计[J].电气自动化,1992,(1):8-15.
- [6] 徐云舫,陈津侯,童福尧等.绕线型感应电动机可控硅控制转子电阻无级调速系统[J].电气自动化,1994,(1):2-4.
- [7] 王兆安,黄俊.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2004,2.
- [8] 陈伯时.电力拖动自动控制系统—运动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [9] 彭鸿才.电机原理及拖动[M].北京:机械工业出版社,1994.

(上接第 95 页)

3 结束语

本文将先进的嵌入式处理器 ARM9 和 GPRS 技术应用到智能家居控制系统中,使系统实现了远程监控、安防报警和远程家电设备控制的功能。经过测试,文中设计的控制系统解决了当前市场上一些家居产品功能简单、协调能力差等问题,同时也提高了家居控制系统的智能化程度、可靠性和抗干扰能力等,该控制系统还可以扩展摄像头实时抓拍功能,并将照片通过 GPRS 模块以彩信的形式传送到用户手机上。因此,本控制系统具有较大的实用价值和广阔的市场前景。智能家居的发展必将大大提高我国家庭信息智能化程度。

作人员提供直观的判定依据。

5 结束语

干熄焦发电控制系统自投运以来,硬件体系安全可靠,IO 通道故障检测准确可靠,各种连锁精确可信,调节平稳,保障了机组的长期安全运行,降低了机组的停机率,取得了很好的经济效益和社会效益。

作者简介:李金凤(1981-),女,助理工程师,主要从事冶金自动化工作。

[10] 罗桂娥,张静秋,罗群.模拟电子技术基础[M].长沙:中南大学出版社,2006,3.

[11] 沈天飞.异步电机转子 IGBT 斩波调速的准动态模型[J].电机与控制学报,2001(3).5(1):20-23.

[12] 祁强,张广溢.异步电动机转子电阻斩波调速系统的特性分析与仿真研究[A].2005 年川渝地区自动化与电控技术学术年会[C].成都:西华大学出版社,2005:20-22.

作者简介:夏梦芝(1986-),女,硕士生,研究方向:控制理论与控制工程。

参考文献:

- [1] 朱华生,冯祥胜.基于 ARM 智能家居控制器设计与实现[J].ARM 开发与应用,2007,23(1):186.
- [2] 林旭东.智能家居系统相关技术及发展趋势[J].科技创新导报,2008,(7):6.
- [3] 李剑雄,张策,杨军.基于 ARM 和 DM9000 的网卡接口设计与实现[J].微计算机信息,2008,24(5):123-124.
- [4] 张鸿恺,伍超.智能家居及其发展研究[J].黑龙江科技信息,2006,(32):266.
- [5] 夏涛,陶洋.基于四大模块的只能家居的研究与设计[J].武汉职业技术学院学报,2007,6(3):54.
- [6] 范学英,张明新.嵌入式系统概述[J].自动化技术与应用,2008,27(2):113-115.

作者简介:闫哲(1962-),男,教授,研究方向:自动化技术、嵌入式系统。