

基于 dsPIC33F 单片机的开关磁阻发电控制系统

徐 文, 朱学忠*

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对高转速运行的 12/8 结构开关磁阻发电机, 构建了一种以 dsPIC33F 单片机为主、复杂可编程逻辑器件为辅的控制系统。通过对开关磁阻发电机工作原理和该单片机相关模块的分析及应用, 给出了控制系统的硬件设计和主要模块的软件配置及控制流程。最后由调试得到了核心模块的实验波形。实验结果证明, 该控制系统可以满足开关磁阻电机高速时发电的需求, 整个控制系统设计合理、性能可靠, 容易实现系统控制。

关键词: 开关磁阻发电机; 输入捕捉; 输出比较; 控制系统设计

中图分类号: TM352; TM619

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)01-0079-04

Switched reluctance generator control system based on dsPIC33F

XV Wen, ZHU Xue-zhong

(Automatic Department, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Supplemented by a complex programmable logic device, a dsPIC33F microcontroller-based 12/8 structured switched reluctance generator control system with the focus on the operation under high speed was built. And then, with the analysis and application of operating principles of the switched reluctance generator and relevant modules of the said microcontroller, hardware design of the control system, as well as the software configuration and control flow of major modules were proposed. Finally, experiment waveforms of key module were obtained by debugging. The results indicate that the control system was capable and sufficient to meet the needs of the switched reluctance generator during the power generation at a high speed. The design of the entire control system is reasonable and easy to implement, also performing reliably and stably.

Key words: switched reluctance generator; input capture; output compare; control system design

0 引 言

开关磁阻电机作为调速电动机开发应用已有近 30 年历史了。按可逆性原理, 利用该电机也可将机械能转换成电能输出, 在发电系统中作为发电机工作。开关磁阻发电系统在航空中有较为广泛的应用。在国外, 如美国已把开关磁阻发电系统作为未来多电飞机和全电飞机电源系统的首选方案^[1]。Lockheed Martin 公司研制的联合攻击战斗机 (Joint Strike Fighter) F-35 将成为欧美的新一代的主战机型, 其主电源系统就是采用具有起动/发电双功能的 270 V、80 kW 开关磁阻电机系统。在国内, 南京航空航天大学开关磁阻电机课题组率先对开关磁阻起动/发电系统进行研究, 尤其

是在发电控制策略, 发电品质以及无位置传感器技术控制等方面的研究成果显著, 并且还完成了 3 kW、6 kW 和 7.5 kW 多套原理样机的开发^[2-3]。另外, 西北工业大学也展开了对开关磁阻发电控制系统的研究, 研制了 4 kW、直流 270 V 试验样机^[4]。

对于开关磁阻发电系统来说, 发电机转速越高, 其发电品质越好。但到目前为止, 特别是对高速或超高速下运行的开关磁阻发电控制系统的研究比较少。而在开关磁阻发电控制系统中, 选择一款合适的芯片作为整个系统的控制中枢是至关重要的。本研究主要介绍 dsPIC33FJ256MC710 在高转速开关磁阻发电控制系统中的应用。

收稿日期: 2011-07-20

作者简介: 徐 文 (1986-), 男, 江苏扬州人, 主要从事电机控制、功率变换方面的研究. E-mail: xuwen_man@sina.com

通信联系人: 朱学忠, 男, 副教授, 硕士生导师. E-mail: zxz@nuaa.edu.cn

1 开关磁阻发电系统工作原理和控制方案

开关磁阻发电系统由双凸极磁阻电机、双向功率变换器、转子位置检测器(或非直接位置检测器)和控制器组成。发电控制系统根据电机的位置检测器产生的转子位置信号控制功率开关电路中开关管的通断,改变相电流的生成位置,使电磁转矩为负,使机械能转化为电能。电机为 12/8 结构,转子上无绕组,定子每个齿极上设有一个集中线圈,径向相对的两个线圈形成一对磁极,称为“一相”。这样共组成 6 相,可满足双通道开关磁阻发电系统的需要。本研究以单通道为例,简要阐述其工作原理和控制方法。

开关磁阻发电机工作状态电流波形如图 1 所示。图 1 中, θ 角定义为该相转子齿槽轴线与定子齿极轴线之间的夹角。当转子槽轴线重合时,该相电感最小(定义为 $\theta=0^\circ$),当转子齿极轴线与相应定子齿极轴线重合(定义 $\theta=\theta_m$)时,该相电感最大。根据电磁场基本理论,伴随磁场的存在,电机转子的电磁转矩同时存在,可以表示为:

$$T_{em} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (1)$$

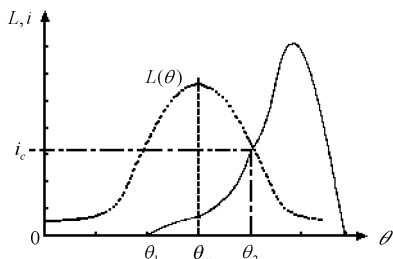


图 1 开关磁阻发电机工作状态电流波形

若在电感下降区形成电流,产生负转矩,即电机吸收机械能,并可能把它转换成电能输出,故此时开关磁阻电机为发电机工作。

开关磁阻电机控制参数较多,控制灵活,这也是开关磁阻电机的优点之一。对于开关磁阻发电系统有 3 种常用的控制方案:脉宽调制控制、角度位置控制和电流斩波控制。本研究设计的控制系统运用的是角度位置控制方案。根据图 1 中相电流波形可知, θ_1 和 θ_2 分别为开通角和关断角,即主开关管开通和关断时对应的转子位置角度,对其进行调节可影响发电的励磁过程及相电流。通常开通角 θ_1 在 θ_m 之前即在电感上升区,关断角 θ_2 在 θ_m 之后即在电感下降区,开通角提前、关断角推后都可以增加励磁时间、增大励磁电流 i_c ,从而加大励磁强度。角度控制的优点是电机转矩调节范围大、运行效率高,缺点是不太适用于低速。转速降低时,旋转电动势减小,使电流峰值增大,必须进行限流,因此角度位置控制一般用于转速较高的应用场合。

2 控制系统硬件设计

开关磁阻发电控制系统的硬件部分主要包括控制芯片单元、电流电压检测电路、斩波电路、位置信号输入电路等。作为该系统的核心控制单元, dsPIC33FJ256MC710 的 CPU 为改进型哈佛结构。有 16 位宽数据总线,支持优化的乘除法运算,闪存程序存储器最大有 256 KB。另外,还包括定时器、输入捕捉、比较输出、模/数转换等功能模块。

控制电路硬件结构如图 2 所示。单片机输入信号主要有:开关磁阻电机的三相位置信号,由输入捕捉模块完成;功率变换器母线电压电流及各相电流通过采样电路得到的信号,由 A/D 模块进行转换。输出信号主要有:根据三相位置信号经单片机计算处理后的开关延迟脉冲,该功能由输出比较模块完成;内部的串行外设接口用来设定软件斩波限,传输给外部 DAC 芯片。

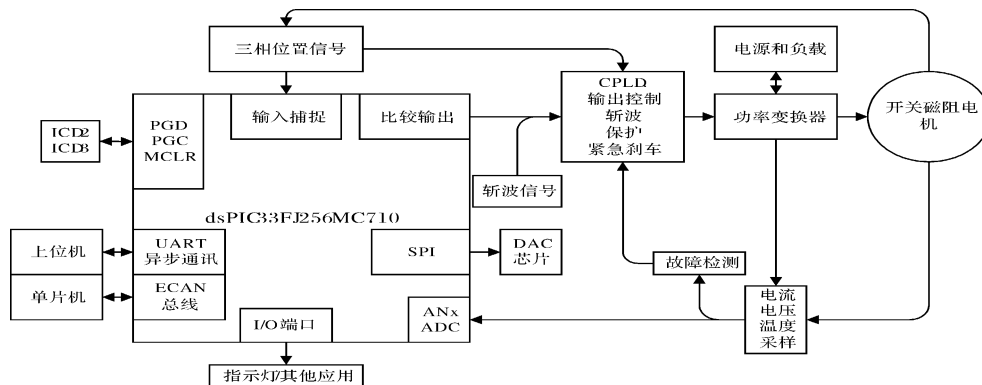


图 2 控制电路结构框图

另外,PGD/PGC 是编程以及调试引脚;通用异步收发器同上位机进行 485 通讯;增强型控制器局域网

用于和其他单片机通讯,而故障检测电路主要用于判断和产生过流、过压等故障信号,直接传送给 CPLD,

起到保护作用。同时,本研究设置单片机的一些 I/O 端口用来控制外围电路的 LED 指示灯或其他应用。

控制系统选用的 CPLD 型号为 EPM3128ATC100-10,是 ALTERA 公司推出的一款低功耗、高性能 MAX3000A 系列芯片。100 个引脚的封装中有 80 个可编程 I/O 端口。CPLD 的程序是采用 ALTERA 公司集成开发环境 QuartusII 8.1 中的 VHDL 硬件描述语言与原理图设计相结合的方式由顶至底地实现。

CPLD 的功能主要是将三相位置信号、单片机延时脉冲信号、斩波信号以及故障保护信号进行组合逻辑综合后形成三相不对称半桥六管的控制信号。在控制电机发电的同时,也起到了保护整个系统安全的作用。

在开关磁阻电机起动过程中,因为转速低、三相位置信号的周期长、频率低,Timer2 定时器不断溢出,单片机不能产生延时脉冲。那么这种情况下,就采用位置信号直接输出的控制方式。当转速较高时,再应用单片机控制输出的延时脉冲。

在控制系统电路中,若相电流大于设定的斩波限,则产生电流斩波信号。该信号输入到 CPLD 中的斩波延时模块,会产生有一段固定延时时间的斩波延时信号,再输入到三相综合输出模块处理。

故障信号处理模块会响应母线过流过压,三相过流和紧急停车等故障。只要有故障产生,该模块会将信号传送给综合输出模块,立即关断输出。另外,三相信号的综合输出模块是 CPLD 的核心部分,该模块将输出选择信号、斩波延时信号、故障信号、斩波方式信号等进行逻辑综合,控制输出脉冲的同时,也对功率管和电机起到了重要的保护作用^[5]。

3 控制系统软件设计

该控制系统的软件部分主要包括时基管理、位置信号捕捉、延时脉冲输出、通讯以及转速计算和数字调节器等功能模块。下面主要介绍输入捕捉和输出比较模块的软件实现。

开关磁阻发电机的角度位置控制对实时性要求较高,特别是在高速运转时。而 dsPIC33F 系列单片机的输入捕捉和输出比较模块能较好地完成开关磁阻发电机高速时的控制。该款单片机有 8 个输入捕捉引脚和 8 个输出比较引脚,可满足 12/8 结构开关磁阻发电机的需要^[6-10]。

dsPIC33F 系列单片机的输入捕捉模块用于在输入引脚上有事件发生时,捕捉来自两个可选时基之一的定时器值。输入捕捉功能在需要进行频率(周期)和脉冲测量的应用中很有用。

输出比较模块是将定时器的值与一个或两个比较寄存器的值(取决于所选的工作模式)作比较。当定

时器值与比较寄存器值匹配时,输出引脚的状态发生改变。输出比较模块通过在发生比较匹配事件时改变输出引脚的状态,产生单个输出脉冲或连续输出脉冲。

由开关磁阻发电机角度位置控制原理可知,发电系统主要通过控制开关角,即延时脉冲来进行发电控制。该控制系统以 Timer2 为输入捕捉的时基,工作模式设置为捕捉位置信号的上升沿时 Timer2 计数寄存器的值,并在每个捕捉后自动产生中断。本研究将比较输出模块设置为延时连续脉冲模式,该模式会在每个定时器周期提供一个输出脉冲。开始时比较输出引脚为低电平,定时器值与输出比较(OCxR)寄存器进行比较,在比较匹配时引脚被驱动为高电平。当定时器值与辅助输出比较(OCxRS)寄存器进行比较,在比较匹配时引脚被驱动为低电平,这样就产生了一个延时脉冲。而在开关磁阻发电机的角度位置控制中,需要根据位置信号的上升沿或下降沿,经过计算,产生一个以该跳变沿为基准的开通延时角和关断延时角,即得到一个延时脉冲来进行开关磁阻发电机的发电控制。所以该款单片机能满足开关磁阻发电控制系统的需求。

输入捕捉和输出比较时序如图 3 所示。图 3 中,Pin 为开关磁阻发电机某相的位置信号。输入到单片机的一个捕获引脚。 R_1 和 R_2 分别是此位置信号连续的两个上升沿。当有一个上升沿产生,此时的时基值

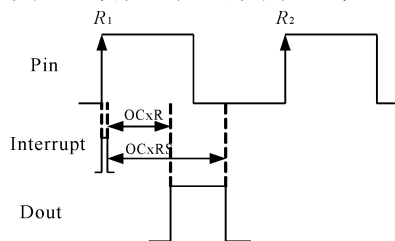


图 3 输入捕捉和输出比较时序

随即会被输入捕捉模块所捕获,自动产生一个输入捕捉中断 Interrupt,并进入中断服务子程序。在中断服务子程序中取一次捕捉缓冲器的值,进行处理。位置信号周期脉冲数为 $T_n = ICxCUR - ICxRE$ 或 $T_n = PR2 - ICxRE + ICxCUR$ 。其中 $ICxCUR$ 为此次捕获值, $ICxRE$ 为上次捕获值, $PR2$ 为 Timer2 周期寄存器值。这样可以得到周期 T_n 。再根据下式可计算出转速:

$$n = \frac{60 \times f_c}{Z_r \times T_n} \quad (2)$$

其中 f_c 为脉冲频率 5 MHz,12/8 结构开关磁阻电机的 Z_r 为 8。

在比较输出子程序中,本研究根据 Timer2 的周期寄存器和延时脉冲通断时刻 T_1, T_2 的大小,来设置比较寄存器 OCxR 和辅助比较寄存器 OCxRS,产生所需要的延时脉冲 D_{out} 。其中 CitaDelay1 和 CitaDelay2 为延时脉冲数。输入捕捉和输出比较的程序流程图如图

4、图 5 所示。

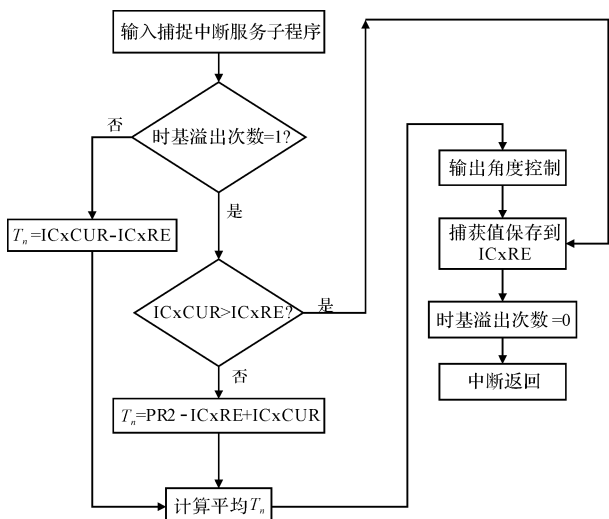


图 4 输入捕捉流程图

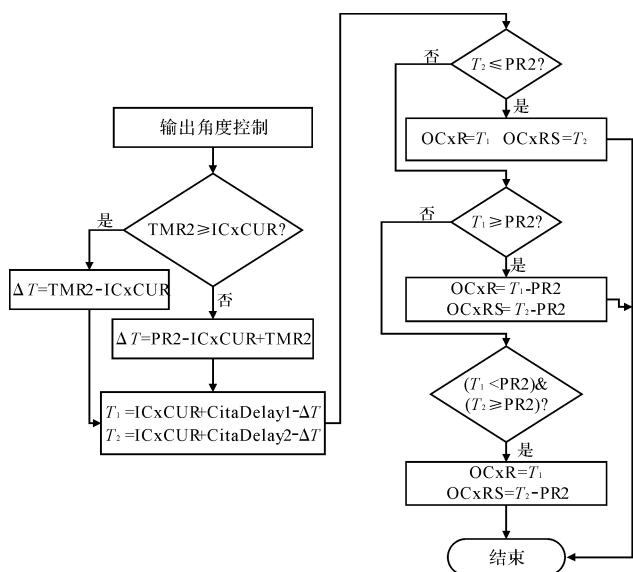


图 5 比较输出流程图

4 实 验

输入捕捉和比较输出功能是 dsPIC33FJ256MC710 单片机实现开关磁阻发电控制的核心模块,下面就针对这两个模块在位置信号频率为 20 kHz 时进行实验。

12/8 结构的开关磁阻电机的位置信号周期为 45°,软件中设定的开通延时角度和关断延时角度分别为 15°和 37°。实验中,电机位置信号频率为 20kHz,这个频率对应的电机转速为 150 000 r/min。实验波形如图 6 所示。纵轴为位置信号和延时脉冲电压的幅值,每格 1 V;横轴为时间,每格 1 ms。图中上方 1 号波形为位置信号波形,下方 2 号波形为延时脉冲波形。由实验波形可知,在 150 000 r/min 转速下,以位置信号的上升沿为 0°基准,能准确地产生开关角分别为 15°和 37°的延时脉冲,由此验证了该控制系统在高转

速下满足开关磁阻发电系统的要求,实时性好,运行可靠。

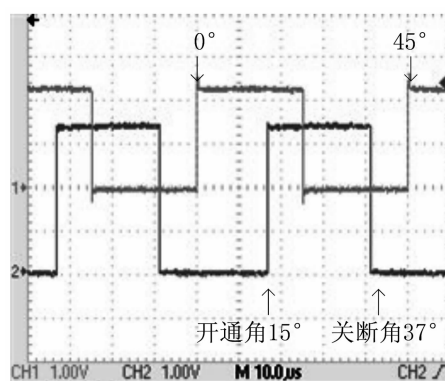


图 6 位置信号为 20 kHz 的实验波形

5 结 束 语

本研究分析了以 dsPIC33FJ256MC710 单片机作为主控芯片的开关磁阻发电控制系统,充分利用了单片机丰富的片内资源和高效的运算处理能力,特别是输入捕捉和输出比较模块,使得其对开关磁阻发电机高速时的控制更容易实现,也更加可靠。研究表明,该控制系统对高速时开关磁阻电机的发电具有一定的实用性和指导意义。

参考文献 (References) :

- [1] RADUM A V. High Power Density Switched Reluctance Motor Drive for Aeroplane Applications[C]//IEEE IAS Annual Meeting, San Diego; [s. n.], 1989:568-573.
- [2] 刘 闯,朱学忠,刘迪吉. 6 kW 开关磁阻起动/发电机系统设计与实现[J]. 南京航空航天大学学报,2000,32(1):1-5.
- [3] 刘闯,朱学忠,李 磊,等. 开关磁阻发电机的脉宽调制控制[J]. 南京航空航天大学学报,2000,32(3):245-250.
- [4] 李声晋,卢 刚,李钟明,等. 4 kW 开关磁阻发电机[J]. 西北工业大学学报,1999,17(2):327-330.
- [5] 蒋冬青. 双通道开关磁阻起动/发电系统研究与实践 [D]. 南京,南京航空航天大学自动化学院,2008:59-60.
- [6] 刘金锟. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [7] 黎昌浪,李声晋,芦刚. PIC18F2331 在无刷直流电动机控制中的应用[J]. 微特电机,2007(12):46-48.
- [8] WANG D, YU K. Functional Design of FPGA in a Brushless DC Motor System based on FPGA and DSP [C]//IEEE Conference on VehiclePower and Propulsion Conference Harbin [s. n.], 2008:1-4.
- [9] JASIO L D. 16 位单片机 C 语言编程:基于 PIC24[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.
- [10] 刘迪吉,张焕春,傅丰礼,等. 开关磁阻调速电动机 [M]. 北京:机械工业出版社,1994.

[编辑:李 辉]