

开关磁阻电机角度位置的纯硬件控制

韩守义, 赵德安, 秦云

(江苏大学 电气信息工程学院, 中国 镇江 212013)

摘要: 针对开关磁阻电机 APC 方式, 本文介绍了一种基于 CPLD 的纯硬件控制方式。该系统采用一台 1KW 6/4 结构开关磁阻电机作为机电能量转换装置, 采用 EP1K30TC144-3 型 CPLD (复杂可编程逻辑器件) 和外围电路构成数字控制器。实验结果表明, 本文提出的开关磁阻电机纯硬件控制系统在实践上是可行的, 基于 CPLD 的纯硬件控制器可获得优良的控制效果。

关键词: 开关磁阻电机; APC; CPLD

中图分类号: TM352 文献标识码: A

The Angular Position Control of Switched Reluctance Motor Based on Pure Hardware

Hanshouyi, Zhao de'an, Qinyun

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In this paper, a pure-hardware controlled Switched Reluctance Motor/Generator (SRM/G) drive system is presented for Angle Position Control (APC) mode. A 1KW rated 6/4 SRM is applied as convertor between mechanistic energy and electric energy. The pure-hardware digital controller is implemented by using an EP1K30TC144-3 CPLD (complex programmable logic device) and other circuits. The experimental results show that the system proposed is feasible and its performance is well by using the pure-hardware controller based on CPLD

Key words: Switched Reluctance Motor; APC ;CPLD

引言

开关磁阻电机高速运行时, 相电流周期很短, 电流的建立和续流段占有较大比例, 而且反电势足以抑制电流的上升。因此在高速时, 宜采用单脉冲控制 APC 方式, 此时, 保持关断角 θ_{off} 不变, 而开通角 θ_{on} 可在较宽的范围内进行调节。当 θ_{on} 适当提前时, 电流波形

的高度和宽度均增加。

1. 系统结构

系统结构框图如下图 1 所示：

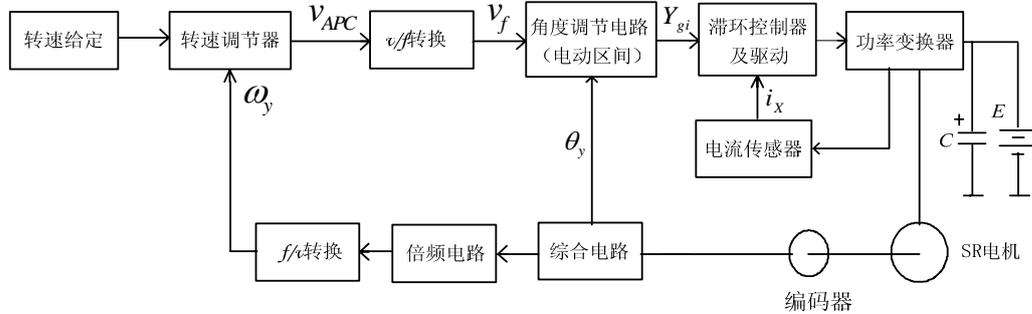


图 1 APC 方式控制结构框图

本文中固定 θ_{off} 为 27° ，给定 θ_{on} 的调节范围为 $-3^\circ \sim 27^\circ$ ，三相绕组 θ_{on} 的调节范围分别与 C2、A2、B2 信号对应（A2、B2、C2 为发电制动状态时的三相驱动信号，可通过 $A_2 = B \cdot \bar{C}$ 、 $B_2 = \bar{A} \cdot C$ 、 $C_2 = A \cdot \bar{B}$ 得到）。转速调节器输出的控制信号经 v/f 变换后，得到控制频率信号 V_f 。通过 CPLD 可构建角度控制电路，输出周期与 $Z (Z = A \cdot C + A \cdot B + B \cdot C)$ 信号一致、占空比 Q 与上述控制信号的频率成正比的周期信号 X 。于是，三相 APC 控制信号可分别通过 $A_3 = C_2 \cdot X$ 、 $B_3 = A_2 \cdot X$ 、 $C_3 = B_2 \cdot X$ 得到。

2. 系统设计

角度调节电路实现效果如图 2 所示：

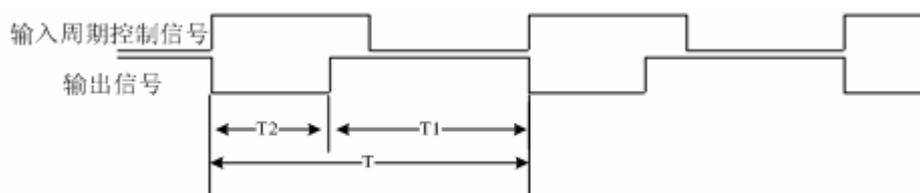


图 2 角度调节电路输入/输出

Q 与输入占空比控制信号频率 f_q 之间的关系：占空比信号频率 f_q 与输出信号占空比 Q 呈正比，即 $Q = T1 \times P / T$ 。输出信号采用计数器控制其起始位置（上升沿），则实际须获取的是 $T2 = T - T1$ 的时间长度，该时间的长短与输入频率呈反比。

2.1 占空比与输入信号频率之间的关系

首先根据占空比信号的频率确定占空比 Q 。占空比与信号频率成正比，可得：

$$Q = a \times f_q + b$$

根据要求可确定两个频率点所对应的占空比，即 (Q_1, f_{q1}) 和 (Q_2, f_{q2}) ，则可分别得到 a 和 b 的取值。

$$a = (Q_1 - Q_2) / (f_{q1} - f_{q2}), \quad b = Q_1 - (Q_1 - Q_2) \times f_{q1} / (f_{q1} - f_{q2}),$$

$$\text{令: } M' = \frac{Q_1 - Q_2}{f_{q1} - f_{q2}} = \frac{Q_1 - Q_2}{1/T_{q1} - 1/T_{q2}} = \frac{(Q_1 - Q_2) \times N_{q1} \times N_{q2} \times t_1}{N_{q2} - N_{q1}}$$

$$\text{则: } a = M', \quad b = Q_1 - M' \times f_{q1}, \quad Q = M' \times f_{q1} + Q_1 - M' \times f_{q1}$$

$$\text{其中: } f_q = 1/T_q = 1/(N_q \times t_1)$$

$$\text{令 } M = M' \times f_1 = \frac{M'}{t_1} = \frac{(Q_1 - Q_2) \times N_{q1} \times N_{q2}}{N_{q2} - N_{q1}}, \quad C = Q_1 - \frac{M}{N_{q1}}$$

$$\text{则: } Q = \frac{M}{T_q} + Q_1 - \frac{M}{T_{q1}} = \frac{M}{N_q} + C \quad (1)$$

输出信号的高电平时间与输入信号周期之间存在占空比关系， $T_1 = T \times Q / P$ 。分别获取输入信号高电平时间 T 和输出信号高电平应有的时间 T_1 ，而后将两个时间相减得到输出信号低电平时间 T_2 。由于 T_1 的长短与占空比信号频率成正比，因此较容易获得。

$$T_2 = T - T_1 = T - T \times Q / P$$

$$NT_0 / f_0 = T - T \times Q / P, \quad NT_0 = T \times f_0 - T \times f_0 \times Q / P$$

分别采用高频时钟信号和低频时钟信号对周期控制信号高电平时间进行计数，而后相减得到输出信号的高电平时间。上式中第一项 (NT_1) 为高频时钟信号对周期控制信号高电平的计数值，第二项 (NT_2) 为低频时钟信号对周期控制信号高电平时间的计数值。

$$NT_1 = T \times f_0, \quad NT_2 = T \times f_0 \times Q / p$$

其中取： $f_0 = f_1 = f_0$, $f_2 = Q \times f_0 / P$ ，则：

$$T_0 = NT_0 \times f_0, \quad NT_0 = T \times f_0 - T \times f_0 \times Q / P = NT_1 - NT_2$$

可见，系统利用基准时钟 f_0 及其 P/Q 分频信号对周期控制信号的高电平进行计数，而

后相减得到 N_{T0} ，输出高电平的时间长度根据基准时钟计数 N_{T0} 确定。如使此式中 Q 与控制信号频率呈正比，由 (1) 式 $Q = M / Nq + C$ 取 $C=0$ ，则 $Q = M / Nq$ ， $N_{T1} = T \times f_0$ ， $N_{T2} = T \times f_0 \times M / (P \times Nq)$ ， $f_0 = f_1 = f_0$ ， $f_2 = M \times f_0 / (P \times Nq)$

2.2 系统结构设计

由以上分析可以得到角度位置控制器框图如图 3 所示：

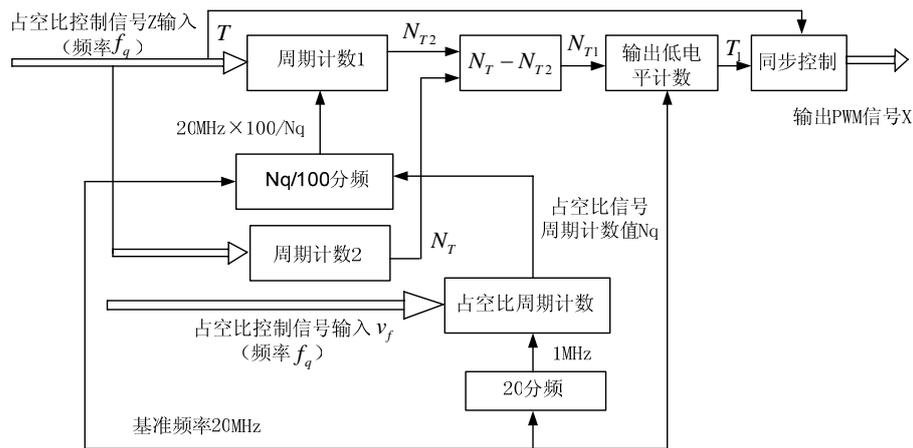


图 3 角度控制电路

参数设计：

基准时钟： $f_0=20\text{MHz}$ ，

占空比信号计数时钟： $f=f_0/20=1\text{MHz}$

占空比满度： $P=100$

则 $M=10000$ ， $C=0$ ， $f_1 = f_0 = f_0 = 20\text{MHz}$ ， $f_2 = 10000 \times f_0 / (100 \times Nq) = 100 \times f_0 / Nq$

3. 仿真结果

用 MAX+PLUS II 开发软件得到的角度控制电路仿真数据如表 1 所示。

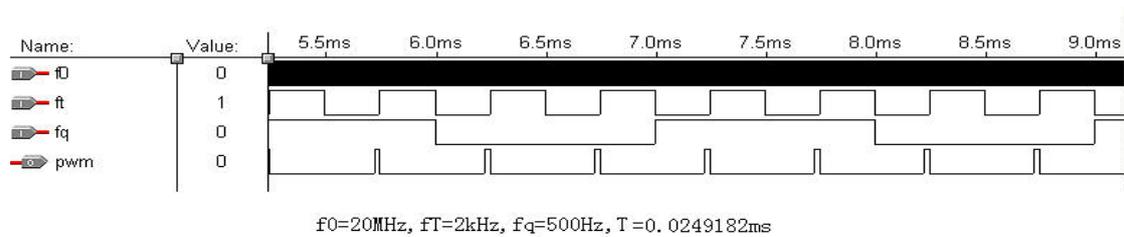
表 1 角度控制电路仿真数据

周期控制 信号频率	占空比控制 信号频率	占空比 理论值	高电平时间 理论值	高电平时间 实验值	误差	仿真
f_t (Hz)	f_q (Hz)	$q(\%)$	$t_1(\text{ms})$	$T_1(\text{ms})$	$\sigma(\%)$	
2000	500	5	0.025	0.0249182	0.3282741	1

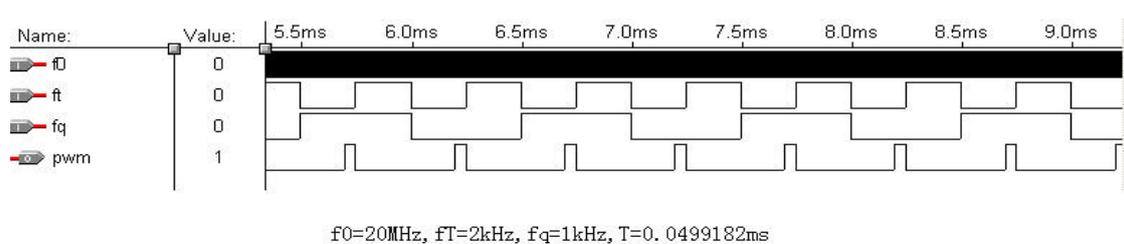
2000	1000	10	0.05	0.0499182	0.1638681	2
2000	4000	40	0.2	0.1999182	0.0409167	3
2000	9090.9091	90.909	0.454545455	0.4544682	0.016999	4

仿真结果如图 4 所示：

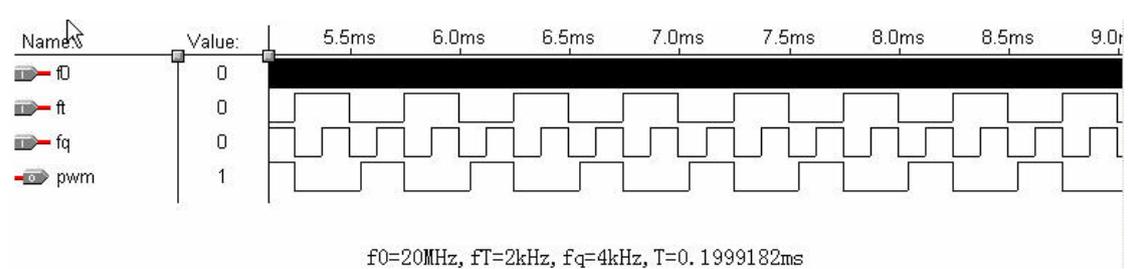
仿真 1



仿真 2



仿真 3



仿真 4

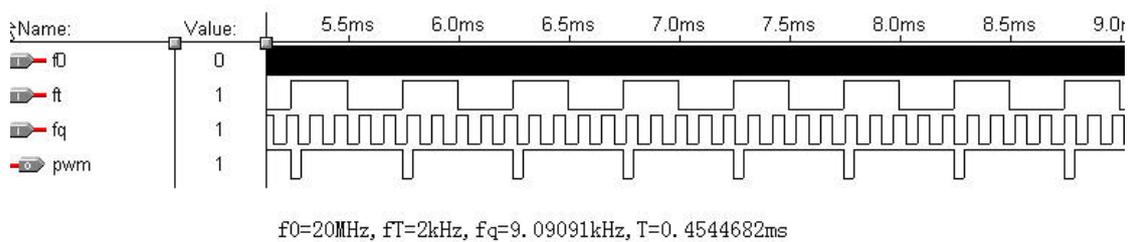


图 4 角度控制电路仿真波形

4. 实验结果

对一台 6/4 结构的 1KW SR 电机进行了实验, 实现了本文所述控制方法。给定 1500r/min 转速, 并在该转速下突加一突减 1NM 负载转矩的 SRM 转速响应曲线及母线电流波形及 1/2 周期导通起动时相电流与相控制信号时序波形见图 5。实验结果表明, 本文提出的开关磁阻电机纯硬件控制系统在实践上是可行的, 基于 CPLD 的纯硬件控制器可获得优良的控制效果。

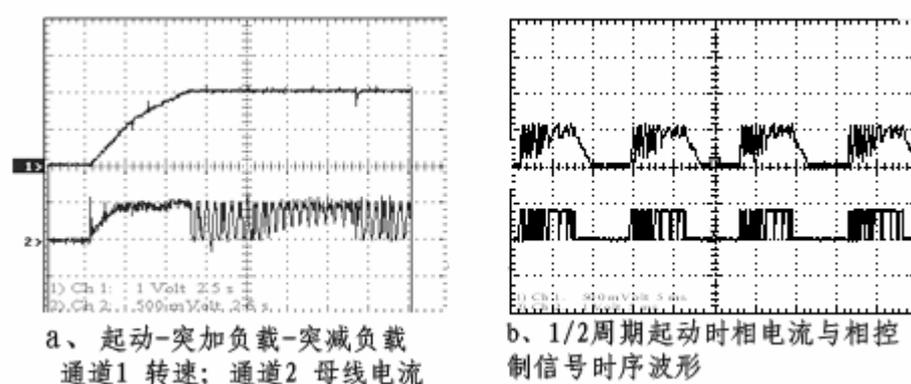


图 5 实验波形图

5. 结束语

基于 CPLD 的开关磁阻电机驱动系统, 控制电路简单可靠, 可以适应复杂的工作环境, 因此可以有效地简化车用开关磁阻电机控制系统的结构并提高它的容错能力和工作可靠性。

6. 参考文献

- [1] 徐志军, 徐光辉. CPLD/FPGA 的开发与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [2] 王建, 白瑞林. 基于 FPGA 的智能控制器设计及测试方法研究[J]. 微计算机信息, 2005, 12-2:128-130.
- [3] Macminn S. R, Jones W. D. A Very Speed Switched Reluctance Starter/Generator for Aircraft Engine Application[C]. Proc . NAECON`89 1989:1758-1764.
- [4] S. R. MacMinn, J. W. Sember. Control of a Switched Reluctance Aircraft Engine Starter-generator over a Very Wide Speed Range . in Proc IECEC' 89, vol. 1, pp631-638.
- [5] E. Richter, C. Ferreira. Performance Evaluation of a 250kW Switched Reluctance Starter Generator. Conf. Record of the 1995 IEEE 30th IAS Annual Meeting.

创新点：利用 CPLD 实现对开关磁阻电机的控制，以有效地简化车用开关磁阻电机控制系统的结构并提高它的容错能力和工作可靠性。

基金项目：江苏省教育厅高新技术产业化项目（JH01-058）

作者简介：韩守义，汉族，男，1982年4月生，江苏大学电气学院电力电子与电力传动在读硕士，研究方向为开关磁阻电机。

邮寄地址：212013 江苏大学879信箱 韩守义收

赵德安，男，汉族，1956年生，教授，江苏大学，博士生导师，江苏大学电气学院院长

Biography: Hanshouyi, male, born in April 14th, 1982, postgraduate of JiangSu University, majored in Switched Reluctance Motor/Generator.