

## 无换向器电机全程时域仿真模型

杜海江<sup>1,2</sup>, 石新春<sup>3</sup>(1. 中科院电工研究所, 北京 100080; 2. 华北电力大学网管中心, 河北 保定 071003;  
3. 华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

## Whole Process Time-domain Simulation Model of Commutatorless Motor

DU Hai-jiang<sup>1,2</sup>, SHI Xin-chun<sup>3</sup>(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy Science, Beijing 100080, China;  
2. Network Center, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;  
3. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**摘要:** 无换向器电机是一套复杂的机电一体化装置,为了确定主回路、控制回路的结构和参数设计,需要建立接近于实际系统的仿真模型。结合 Matlab 仿真软件提供的电力系统工具箱与编程功能,利用双闭环调节器构成调速系统,并用有限状态机方法设计控制软件算法,建立了无换向器电机全程时域仿真模型。利用该模型分析了无换向器电机的起动过程、调速性能以及平波电抗器选型。仿真与实际波形分析验证了仿真模型的正确性。

**关键词:** 无换向器电机; 时域仿真; 平波电抗器; 有限状态机

**中图分类号:** TM32

**文献标识码:** A

**Abstract:** Commutatorless motor is a complex mechano-electronics device. In order to confirm the structure of main circuit and control circuit and design parameters of components, it is necessary to set up the simulation model approaches of the practical system. Combining power system toolbox and programming function which are provided by Matlab, and using double closed-loop regulator to form the speed adjusting system, and adopting finite state machine method to design control software algorithm, whole process time-domain simulation model of commutatorless motor is set up. With this model, starting process of the motor, ASD performance of the motor and the parameters of smoothing reactor are analyzed. Waveforms of the simulation and the experiment are analyzed to verify correctness of the simulation model.

**Key words:** commutatorless motor; time-domain simulation; DC filter; finite state machine

## 1 引言

无换向器电机中线性与非线性环节、连续工作

与离散工作元件共存,结构复杂,在建立仿真模型时,若将全部元件都用数学方程描述,并用数值方法求解,非常困难。为了设计控制系统调节器参数,文[1-4]建立了无换向器电机的线性传递函数模型。为了分析某些局部性能,文[5-7]建立了简化的仿真模型。由于高压无换向器电机是一套复杂的机电一体化装置,而线性模型和局部模型作了大量简化,需要设计更详细的仿真模型;为了实现转子电气位置检测,必须研究电机起动过程端电压的变化规律。总之,建立更接近实际系统的仿真模型十分必要。笔者以 Matlab 软件提供的一套电力系统工具箱为基础,建立无换向器电机主回路模型,并利用 Matlab 语言编制控制软件,将两者结合,建立了接近于实际系统的仿真模型,称之为全程时域仿真模型。

## 2 仿真模型建立过程

无换向器电机可以分为电机、功率变换回路、执行与传感机构和控制回路4个部分,仿真模型也据此分为若干模块。

## 2.1 电机

Matlab 提供的同步电动机模块是基于电动机例的 Park 方程,可以接受有名值参数,转子参数全部归算至定子侧,进行计算时模块内部转换为标么值,并提供参数测量模块,可以直接连接其它电力系统模块。电机 Park 方程为:

$$V_d = R_a i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega \psi_q \quad (1)$$

$$V_q = R_a i_q + \frac{d}{dt} \psi_q - \omega \psi_d \quad (2)$$

收稿日期:2005-08-27

作者简介:杜海江(1971-),男,副教授,在站博士后,主要研究方向包括同步电动机调速系统、计算机电话集成技术应用、管理信息系统开发及其他软件开发工作。

$$V_f' = R_f' i_f' + \frac{d}{dt} \psi_f' \quad (3)$$

$$V_D' = R_D' i_D' + \frac{d}{dt} \psi_D' \quad (4)$$

$$V_Q' = R_Q' i_Q' + \frac{d}{dt} \psi_Q' \quad (5)$$

$$\psi_d = L_d i_d + L_{mq} (i_f' - i_D') \quad (6)$$

$$\psi_q = L_q i_q + L_{mq} i_Q' \quad (7)$$

$$\psi_f' = L_f' i_f' + L_{mq} (i_d + i_D') \quad (8)$$

$$\psi_D' = L_D' i_D' + L_{mq} (i_d + i_f') \quad (9)$$

$$\psi_Q' = L_Q' i_Q' + L_{mq} i_q \quad (10)$$

机械运动方程和转矩方程为:

$$\frac{1}{p} J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L \quad (11)$$

$$T_e = p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (12)$$

式中参数含义可参考 Matlab 手册。

利用 Matlab 提供的同步电机模块和测量模块, 建立电机模型见图 1,  $P_m$  表示负载。转子位置 Pos 以 A 相绕组为  $0^\circ$ , 转过  $360^\circ$  电角度后重新从  $0^\circ$  开始。

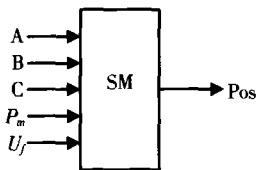
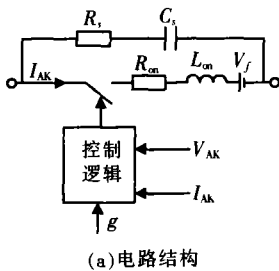


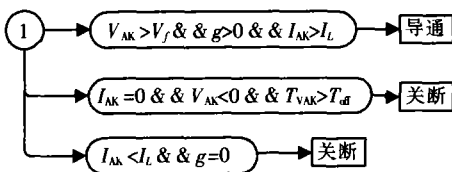
图 1 同步电机模型

## 2.2 功率变换回路

功率回路包括整流桥、平波电抗器和逆变桥, 有时为了加快断流, 在平波电抗器两侧反并联一晶闸管。这里使用的晶闸管模型见图 2。



(a) 电路结构



(b) 控制逻辑

图 2 晶闸管模型

将进线电抗、整流桥、平波电抗器、逆变桥组合成一个模块, 构成功率回路, 见图 3。  $P_1, P_2$  为整流桥和逆变桥的 12 路触发脉冲。励磁回路采用三相全控整流桥提供电源, 恒定励磁。

## 2.3 执行与传感机构

执行回路主要包括触发脉冲的发送, 由控制回路直接送到功率回路的  $P_1, P_2$  端口。

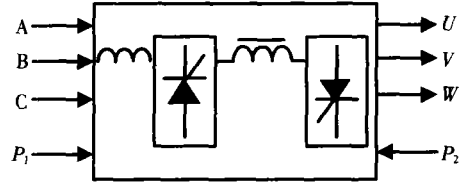
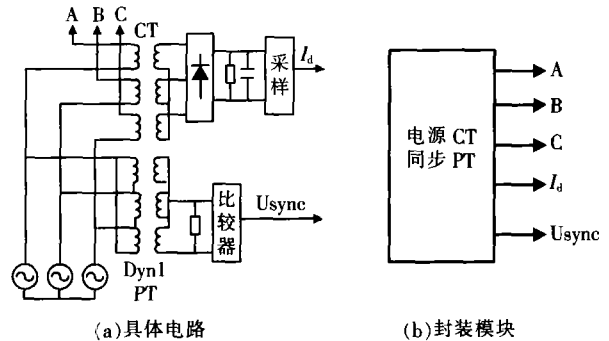


图 3 功率回路

传感机构包括直流电流、同步信号和转子位置的测量回路。电源、直流电流与同步信号测量回路见图 4。



(a) 具体电路

(b) 封装模块

图 4 电源、电流与同步信号测量回路

转子位置检测回路利用电机模块输出的转子电角度 Pos 推算转子所在分区, 输出 Pos\_No 表示分区编号。转速由控制回路根据位置编号的变化速度推算。在设计装置时, 转子位置检测作为一块独立电路, 仿真时也作为单独模块, 见图 5。

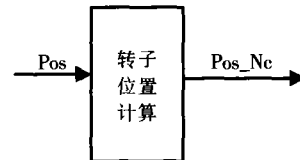


图 5 转子位置计算回路

## 2.4 控制回路及控制算法

仿真时控制回路由 PC 机进行计算, 串行运行, 只有一个时标, 所以算法以查询方式工作。本文用有限状态机描述软件流程, 软件用 Matlab 语言实现。在实际装置中将用 C 语言实现, 并将对响应时间要求严格的模块用中断完成。

### 2.4.1 整流桥移相控制

自然换相点是对移相角实施控制的参考点, 图 4 输出的  $U_{sync}$  信号正向过零点是  $U_{AB}$  的自然换相点, 称为外同步信号, 以此为基准, 可以利用软件推算出其它 5 个自然换相点, 称为内同步信号。移相角由双闭环数字 PI 调节器计算。

### 2.4.2 逆变桥控制

逆变桥可以有 6 种有效桥臂导通组合 (T45, T56, T61, T12, T23, T34), 形成 6 个不同空间位置的定子合成磁势 (+A-C, +B-C, +B-A, +C-A, +C-B, +A-B)。无换向器电动机低速时采用强迫换流法, 在需要断流时使整流桥工作于逆变状态 ( $\alpha=150^\circ$ ), 此时使换流超前角  $\gamma=0^\circ$ ; 高速 (如大于 6%) 时采用自

然换流法,并使换流超前角  $\gamma=60^\circ$ 。由于采用转子实际位置控制换相,换流超前角为空载换流超前角。

### 2.4.3 控制算法的有限状态机描述

无论仿真还是实际装置,理论分析是否正确需要准确的算法来验证,有限状态机是描述控制系统软件算法的有效工具<sup>[8]</sup>。无换向器电机的控制算法见图6。

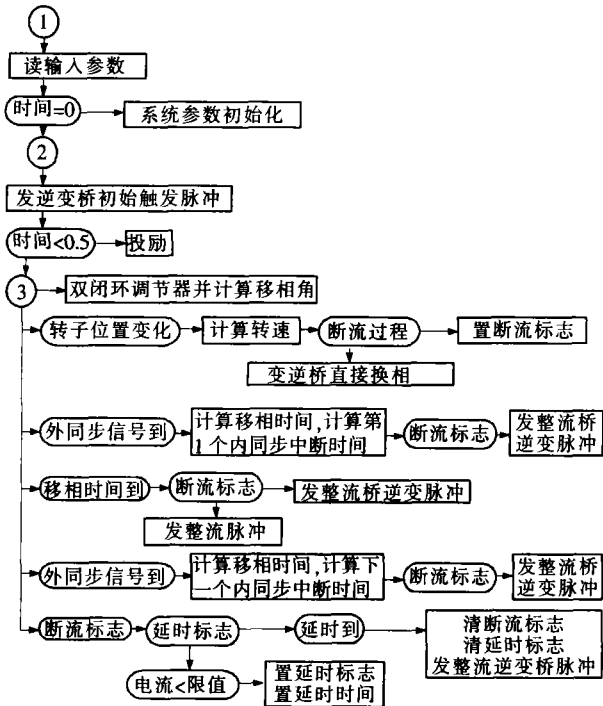


图6 无换向器电机控制算法的有限状态机描述

## 3 仿真模型结构

把第2节建立的各个模块连接在一起,构成无换向器电机全程时域仿真模型,见图7。

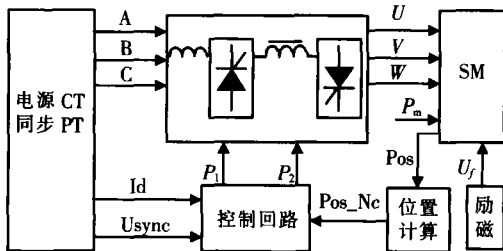


图7 无换向器电机仿真模型结构图

## 4 平波电抗器选型及向负载换流切换的转速阈值确定

文[3]通过对平波电抗器与电流电压波形及断流运行过程的关系进行分析,提出平波电抗器参数可取  $L_d/L_s=3$ 。笔者提出一种简单的选型方法,物理意义直观,与上述方法计算的结果接近。

在高压无换向器电机中,若设置续流晶闸管,增加成本,安装不便,并且只在起动阶段使用,若在保证顺利起动的前提下,通过对起动阶段有关参数的合理设计,可以省去续流晶闸管。

起动阶段,整流桥移相角  $\alpha$  一般不小于  $60^\circ$ ,并令断流时  $\alpha=150^\circ$ ,选择平波电抗器的一个原则是在达到逆变电压峰值前,回路电流降至零。

算例:由  $U_m=L\frac{di}{dt}$ ,设  $L_d=10\text{ mH}$ ,  $U_m=1000\sqrt{2}$ ,  $t=5\text{ ms}$ ,  $i=0.7I_N=0.7\times 259$ ,得:  $L=39\text{ mH}$ ,取整为  $30\text{ mH}$ 。

断流过程的仿真波形见图8,图中给出了两次断流过程。图(a)为直流电压,图(b)为直流电流。图(c)为移相角,断流时置为  $150^\circ$ ,整流运行时也很大,约  $85^\circ$ 。断流信号出现时刻相对整流输出电压相位是随机的,第1次断流发生在直流电压过零附近,断流时间短,第2次断流发生在整流桥刚换流时刻,断流时间较长,但都能在第1个逆变电压负峰值内完成断流,即断流时间约  $5\text{ ms}$ 。

由断流运行向负载换流切换的转速阈值一般在

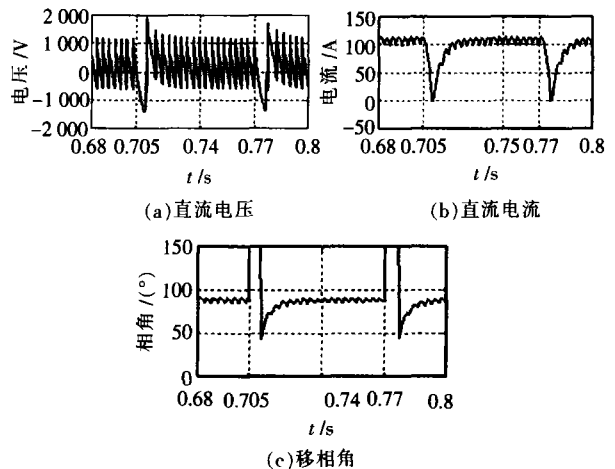


图8 断流过程整流桥相关波形

5%~10%额定转速之间选择。由于不使用续流晶闸管,断流时间比较长,转速越高,断流过程占  $60^\circ$  电角度的比例越大,平均转矩越小。选择换流切换阈值时,可以控制该比例在一定限值,如10%,则此时  $60^\circ$  电角度对应  $50\text{ ms}$ ,即转速为  $6.6\%$  额定转速,取整为  $6\%$  额定转速时切换为负载换流。

## 5 仿真分析与实验验证

运行建立的仿真模型所产生的有关波形见图9。作为比较,图10为一台实际电机运行时测量的有关波形。

图9表示电机在起动时断流运行,转速超过同步速  $6\%$  时,切换为负载换流,最后稳定在给定转速。由于转速低,直流电流波动及励磁电流波动叠加在电机反电势上,使端电压波形发生畸变。

图10是在一台无换向器电机上的测量波形。该电机以数字信号处理器芯片 TMS320LF2407 为主控制器,由于转速无法用示波器测量,所以利用 CC 开发环境存储数据并绘制而成。仿真与实验电机参数相同,  $P_N=400\text{ kW}$ ,  $U_N=1\text{ kV}$ ,  $I_N=259\text{ A}$ ,  $n_N=750\text{ r/min}$ 。

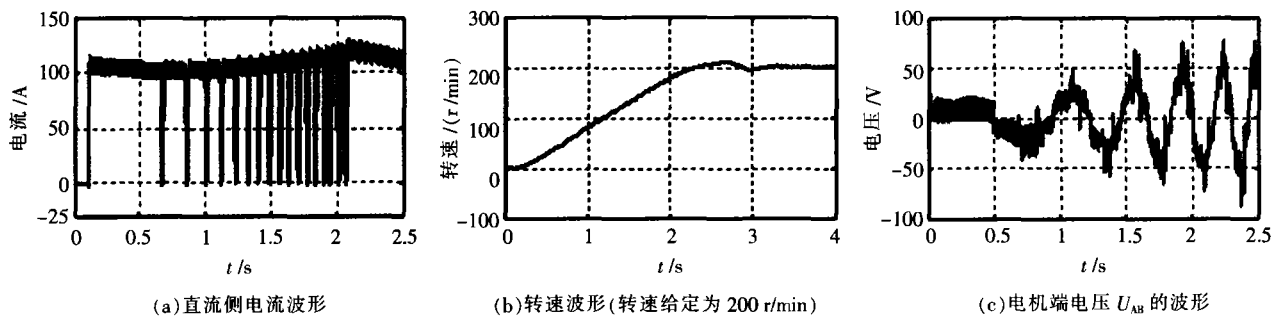


图9 仿真运行过程电机有关波形

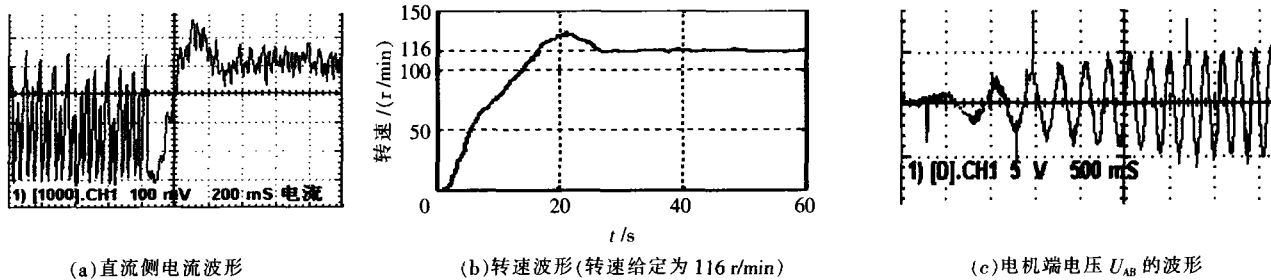


图10 电机实际运行过程测量波形

相同,  $P_N=400\text{ kW}$ ,  $U_N=1\text{ kV}$ ,  $I_N=259\text{ A}$ ,  $n_N=750\text{ r/min}$ 。由于实验时使用  $380\text{ V}$  电源, 电流限流为  $30\text{ A}$ , 所以与仿真转速波形相比, 起动时间较长。

## 6 结语

利用仿真软件提供的电力系统模块和编程功能相结合, 并利用双闭环调节器构成调速系统, 建立了无换向器电机的全程时域仿真模型, 以模拟实际装置所具备的软硬件功能, 为实际装置的研制提供参考。仿真与实际波形分析, 验证了仿真模型的正确性。

## 参考文献:

[1] 肖雅萍, 李发海. 自控式同步电动机调速系统的仿真研究[J].

北京: 清华大学学报(自然科学版), 1991, 31(1): 54-61.

[2] 易继锋, 江祥贤, 侯媛彬, 等. 电气传动自动控制原理与设计[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1997.

[3] 许大中. 晶闸管无换向器电机[M]. 北京: 科学出版社, 1984.

[4] 朱仁初, 万伯任. 电力拖动控制系统设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.

[5] 郭可忠. 用电流型逆变器供电的同步电动机的仿真 [J]. 电工技术学报, 1991(1): 7-15.

[6] 曹立宇, 李发海. 自控式同步电动机的数学模型及稳态运行的分析[J]. 电工技术学报, 1991(3): 1-5.

[7] Nishikata Shoji, Kataoka Teruo. Dynamic Control of a Self-controlled Synchronous Motor Drive System [J]. Trans. on Industry Applications, 1984, 20(3): 598-604.

[8] 杜海江. 高压无换向器电机及其控制技术研究 [D]. 华北电力大学, 2005.

(上接第3页)

解调, 同时为了保证测量的准确性, 对相邻的连续4次的测量值进行平均润滑处理。另外, 在硬件电路设计时, 采取了屏蔽金属外壳与电路板地相连、高频发射、数字地和模拟地一点共地、加去耦电容、减小地环流面积及加放电管等措施, 解决了无线数据传输中的磁场干扰问题。还采取了软件抗干扰措施, 保证了系统的可靠性。此外, 发送装置同时可以作为验电器使用。因此, 设计的金属氧化物避雷器阻性泄漏电流无线检测方法, 具有较高的实际应用价值。

## 参考文献:

[1] 郑健. 氧化锌避雷器泄漏电流在线监测技术综述 [J]. 继电器, 2000, 28(9): 7-9.

[2] 熊国华. MOA 带电测试实践浅谈 [J]. 电磁避雷器, 2001, 16

(3): 31-38.

[3] 王秉钧. 金属氧化物避雷器 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.

[4] 李小建. 氧化锌避雷器阻性电流的精确测量 [J]. 云南电力技术, 2001, 25(4): 19-21.

[5] 张金波, 胡钢, 张学武, 等. 一种实用新型的高压无线核相装置的设计[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(1): 45-46.

[6] 张金波, 胡钢, 张学武. 一种新型的高压无线相位检测仪的设计 [A]. 电工技术前沿问题学术论坛论文集 [C], 北京: 电工技术学报编辑部, 2004.

[7] 黄智伟. 射频集成电路芯片原理与应用电路设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

[8] 刘公致. 一种较精确的相位测量方法 [J]. 杭州电子工业学院学报, 1999, 19(3): 44-50.

[9] 万福君. 单片微机原理系统设计与应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.