

基于DSP的混合动力汽车永磁同步电机的矢量控制系统

夏若飞,祝龙记,朱红,陆康

(安徽理工大学电气与信息工程学院,安徽淮南 232001)

[摘要] 为了使混合动力汽车的永磁同步电机获得快速的转速响应和稳定的静态特性,介绍了一种基于数字信号处理器(DSP)的矢量控制方案,将矢量控制方法引入电动汽车的电机控制中,改善了系统的动态性能和静态性能。系统仿真和实验结果表明,这种矢量控制系统动态和静态性能好,可以满足混合动力电动汽车对控制系统的要求,达到了预期的设计目标,使永磁同步电机获得了快速的转速响应和稳定的静态特性。

[关键词] 电动汽车;矢量控制;数字信号处理器(DSP);永磁同步电机

[中图分类号] TP271+.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)08-0079-04

1 前言

由于当今社会所面临的能源和环境双重压力,要求人类必须更加合理的利用能源,减少污染气体的排放,因此开发新能源汽车得到了全世界的关注^[1]。到目前为止,电动汽车根据其能量来源可分为纯电动汽车、氢发动机汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车。常用的电动汽车电机有:永磁同步电机、感应电机和开关磁阻电机^[2]。由于混合动力汽车采用电动力源和发动机双重装置,所以可显著提高续航里程。传统的混合动力汽车启动时转速响应和静态特性不是很好,因此还有待于提高。

相对于开关磁阻电机和感应电机,永磁同步电机的转矩较大,结构简单,低损高效,调速性能较好^[3]。高性能的永磁同步电机控制方法主要有直接转矩控制和矢量控制。直接转矩控制是直接定子静止坐标系下,通过检测到的定子电压和电流,计算与控制电动机的磁链和转矩,获得高动态性能

的转矩^[4]。而矢量控制是将交流电机通过坐标变换等效成直流电机,用直流电机的控制方法来控制交流电机,但是永磁同步电机的控制系统会相对复杂一些。

本文采用双闭环控制混合动力汽车的永磁同步电机,设计整个系统,并且通过实验结果验证了系统的可靠性。

2 控制原理

电动汽车永磁同步电机驱动控制系统结构图如图1所示,主要由电池、三相鼠笼型永磁同步电机、三相电压型PWM逆变器、微处理器和伺服系统构成。采用的30 kW三相四极的3 600 r/min的水冷和风冷永磁同步电机是与312 V的电源匹配的。伺服系统主要包括冷却系统和指示系统^[5]。

按转子磁链定向的矢量控制基本思路是利用坐标变换,通过按转子定向的同步变换正交坐标系,得出等效的直流电动机模型,这样就可以使用

[收稿日期] 2013-10-22

[作者简介] 祝龙记,1964年出生,男,安徽宿松县人,博士,教授,主要研究方向为电力电子与电力传动、控制系统计算机仿真等;

E-mail: ljz@aust.edu.cn

对直流电动机的控制方法来控制磁链和电磁转矩，再反变换到三相坐标系的对应量，实施控制。

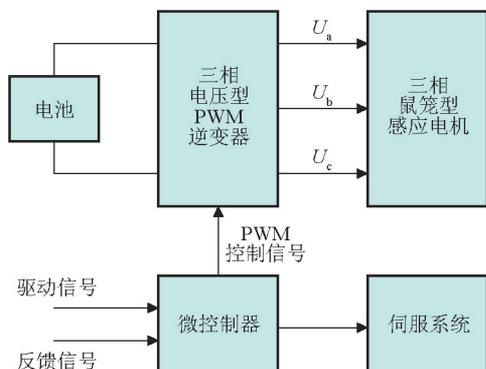


图1 电动汽车永磁同步电机驱动控制系统结构图

Fig. 1 The drive control system structure of permanent magnet synchronous motor

在图2中,ASR为转速调节器,AΨR为转子磁链调节器;ACMR为定子电流励磁构,内环为电流环,外环为转子磁链环或转速环,转子磁链给定 ψ_r^* 与实际转速有关;ACTR为定子电流励磁分量调节器;FBS为转速传感器。对转子磁链和转速而言,均表现为双闭环控制的系统结构^[6]。在额定转速以下时,转子磁链给定 ψ_r^* 保持恒定;在额定转速以上时,转子磁链给定 ψ_r^* 相应减小。将检测到的三相电流施行3/2变换和旋转变换,得到 mt 坐标系中的电流 i_{sm} 和 i_{st} 。采用PI调节软件构成电流闭环控制,电流调节器的输出为电子电压给定值 u_{sm}^* 和 u_{st}^* ,经过反旋转变换得到静止两相坐标系的定子电压给定值

$$\begin{pmatrix} u_M \\ u_T \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + L_s p & -\omega_s L_s & L_m p & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + L_s p & \omega_s L_m & L_m p \\ L_m p & 0 & R_r + L_r p & 0 \\ \omega_{s1} L_m & 0 & \omega_{s1} L_r & R_r \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_M \\ i_T \\ i_m \\ i_t \end{pmatrix} \quad (1)$$

图3中,静止的空间矢量 i_s 可以分解为沿 M 轴的励磁电流和沿 T 轴的转矩电流。永磁同步电机的磁链方程见式(2)

$$\begin{pmatrix} \psi_M \\ \psi_T \\ \psi_m \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_M \\ i_T \\ i_m \\ i_t \end{pmatrix} \quad (2)$$

在式(1)、式(2)中, R_s 是单位静止电阻; R_r 是单位旋

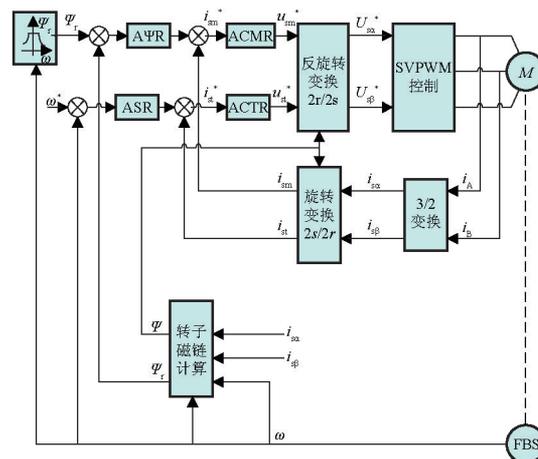


图2 定子电流励磁分量和转矩分量闭环控制的矢量控制系统结构图^[7]

Fig. 2 The closed-loop control structure of stator current excitation and torque component of the vector control system^[7]

U_{sa}^* 和 $U_{s\beta}^*$,再经过SVPWM控制逆变器输出三相电压。

3 数学模型

尽管永磁同步电机结构很简单,但由于其数据的数量庞大而且是非线性的,而且存在耦合关系,所以它的数学模型很复杂。如图3所示, A, B, C 三相静止坐标系可以转换成 α, β 两相静止坐标系,而且 a 轴和 α 轴同向。若用 M 轴表示转子磁链 ψ_r^* ,则可以把 α, β 两相静止坐标系转换成 M, T 两相旋转坐标系。在同步旋转坐标系(M, T)中,三相鼠笼型永磁同步电机的电压方程可以用式(1)表示

转电阻; L_s 是单位静止电感; L_r 是单位旋转电感; L_m 是单位互感; p 为积分算子; u_M, u_T 分别为 M 轴和 T 轴的静止电压; i_m, i_t 分别为 M 轴和 T 轴的旋转电流; i_M, i_T 分别为 M 轴和 T 轴的静止电流; ω_s 为同步频率; ω_r 为旋转频率; $\omega_{s1} = \omega_s - \omega_r$,为相对频率; ψ_M 是 M 轴的静止磁链; ψ_T 是 T 轴的静止磁链; ψ_m 是 M 轴的旋转磁链。

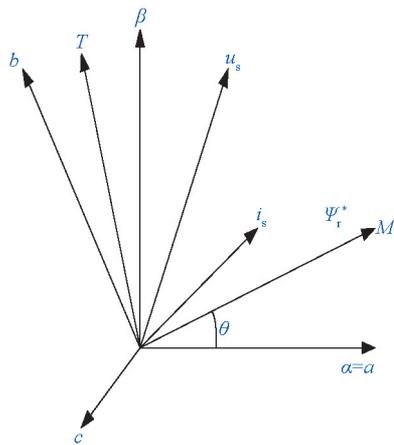


图3 电流和电压与旋转坐标系 M, T 以及静止坐标系 a, b, c 的关系

Fig. 3 The relationship among current and voltage, the rotating coordinate system M, T and stationary coordinate system a, b, c

从式(1)、(2)中,可以推断出旋转磁链 ψ 和转矩 T_e 的公式

$$\psi_r = \frac{L_m}{1 + T_r p} i_M \quad (3)$$

$$T_e = p \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_T \quad (4)$$

式(3)、式(4)中 $T_r = L_r / R_r$ 为转子时间常数, p 为极对数。

由式(3)、式(4)可推得

$$T_e = p \frac{L_m}{L_r} \psi_r = \frac{L_m}{1 + T_r p} i_M i_T \quad (5)$$

可见,转矩 T_e 取决于静止电流 i_M 和 i_T 。

4 仿真研究

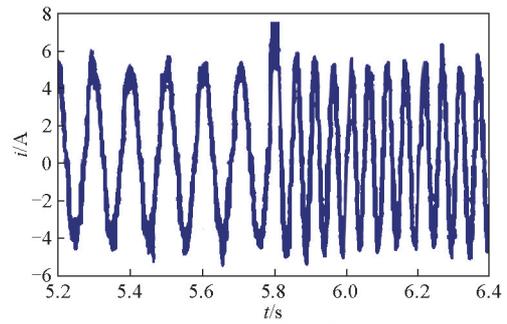
为了验证在该矢量控制系统的控制下,永磁同步电机的性能,在MATLAB的环境下仿真,并做进一步的分析。

4.1 转速阶跃变化的性能测试

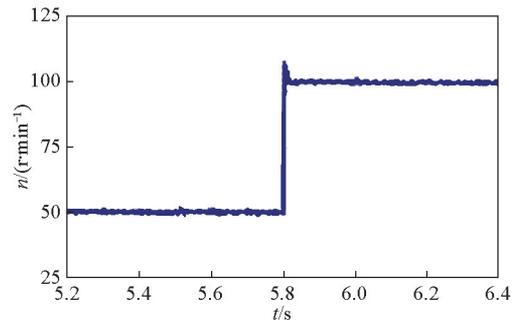
将负载设定为 $4.8 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转速设定在 5.8 s 由 50 r/min 突增到 100 r/min , 测得的相电流波形和转速曲线如图4所示。

4.2 负载阶跃变化的性能测试

将转速设定为 100 r/min , 负载设定在 5.8 s 由空载突增到 $4.8 \text{ N} \cdot \text{m}$, 测得的相电流波形和转速曲线如图5所示。



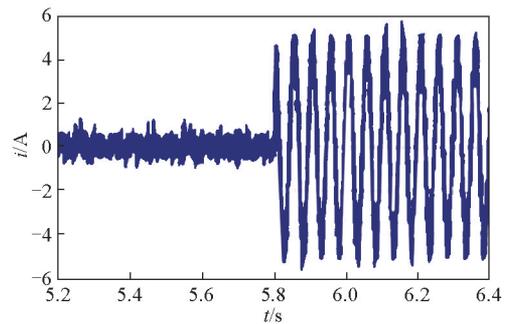
(a) 相电流波形



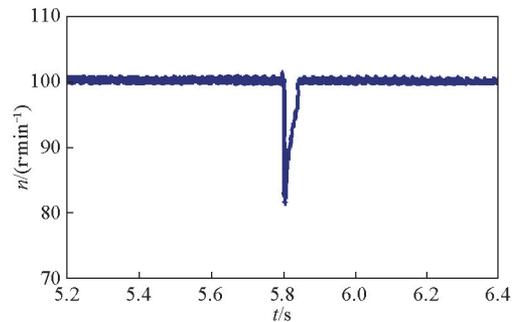
(b) 转速曲线

图4 转速阶跃变化的相电流波形和转速曲线

Fig. 4 Phase current waveforms and speed curve when step changes of rotational speed



(a) 相电流波形



(b) 转速曲线

图5 负载阶跃变化的相电流波形和转速曲线

Fig. 5 Phase current waveforms and speed curve when step changes of load

图4表明,当转速发生突增时,电机的实际转速在0.05 s后就达到新的稳定状态,响应时间很短。电流波形表明在经过0.1 s以后也达到新的稳定,动态过程时间短,而且电流响应速度快,转速和电流的超调量都小。图5则表明,当负载发生突增时,电流波形的变化反映了转矩的变化。而且转速响应波动较小,动态性能较快。以上结果表明,该永磁同步电机的矢量控制系统具有很好的静态和动态性能。

5 结语

本文在传统的混合动力汽车基础上,采用了一种基于DSP的矢量控制方案。通过系统仿真和实验,结果表明系统能平稳的运行,改进的矢量控制系统的转速超调比先前有所减小,响应速度快,可以满足混合动力电动汽车对控制系统的要求,达到

预期的设计目标,使永磁同步电机获得了快速的转速响应和稳定的静态特性。

参考文献

- [1] 陈晓丽. 混合动力汽车电驱动控制系统研究[D]. 上海:上海交通大学,2008(5):1-2.
- [2] 廖永衡,冯晓云,王 珍. 基于定子磁链滑模观测器的异步电机空间矢量调制直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报,2012,(18):106-112.
- [3] 陈正龙. 混合电动汽车能源总成控制器及驱动电机的矢量控制研究[D]. 湖南:湖南大学,2007(3):8-9.
- [4] 陈 勇,张大明,姜丕杰. 电动汽车用异步电机矢量控制系统仿真分析[J]. 系统仿真学报,2007,19(16):3761-3765.
- [5] Enrique L, Carrillo Arroyo. Modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor drive system [D]. UMI: University of Puerto Rico Mayaguez Campus, 2006(5):31-41.
- [6] 聂晓华,肖倩华,刘建国,等. 一种应用于电动汽车的异步电动机矢量控制方法[D]. 南昌:南昌大学学报(工学版),2013.
- [7] 阮 毅,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,2011.

The vector control system of permanent magnet synchronous motor in hybrid vehicles based on DSP

Xia Ruofei, Zhu Longji, Zhu Hong, Lu Kang

(College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

[Abstract] In this paper, for achieving fast speed response and stably static characteristics in permanent magnet synchronous motor, a vector control system based on digital signal processor (DSP) is introduced. The vector control is embedded into the control system, and the mathematical mode and driving principle is given. The simulation and experiment result show this vector control system is highly dynamic, meeting the requirements of control system for hybrid electric vehicles, achieving the desired design goals, making the permanent magnet synchronous motor gets fast speed response and stably static characteristics.

[Key words] electric vehicles; vector control; DSP; permanent magnet synchronous motor