

文章编号:1005-0523(2018)01-0109-07

# 基于异步电机矢量控制算法仿真技术的研究及应用

曾桂珍<sup>1</sup>,张广远<sup>2</sup>,曾润忠<sup>3</sup>

(1.华东交通大学机电与车辆工程学院,江西 南昌 330013;2.中车大连电力牵引研发中心有限公司,辽宁 大连 116022;3.华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

**摘要:**针对传统的矢量控制算法开发,由仿真到应用转换过程复杂繁琐、开发效率低等特点,提出分别利用将控制芯片囊括在仿真环里的软件在环仿真和 dsPACE 半实物仿真两种相结合的仿真技术,对矢量控制算法进行仿真和应用研究。该方法省除了传统开发过程中算法仿真的程序移植、应用及硬件平台实物验证过程,实现从仿真到应用的无缝连接,提高算法的开发效率。最后本文给出了矢量控制算法的两种仿真结果,结果表明该方法能够有效的完成对算法开发研究,及算法在硬件平台上的应用。

**关键词:**软件在环仿真;dsPACE 半实物仿真;矢量控制算法

**中图分类号:**TP311

**文献标志码:**A

三相交流异步电动机在工业中有着广泛的应用,其定转子六部分绕组与机械结构之间的复杂耦合,使异步电机的数学模型存在多输入输出变量相互耦合、非线性的特点。目前矢量控制是根据电机数学模型而提出的控制电机最为广泛的一种算法,受电机数学模型的影响,矢量控制算法也存在参数之间相互耦合、非线性的特点。所以提出一种有效的开发方法,在验证算法可行性的同时,还能够提高算法的准确性、缩短开发周期具有重要的现实意义<sup>[1]</sup>。

传统的开发方法一般先对控制算法进行理论设计,然后通过仿真软件验证算法的可行性,最后将经过验证的算法移植到相应的处理器芯片上。这种方法通常因为仿真语言和工程化语言的不同而增加程序的移植过程,同时不能预测实际应用中硬件系统(如内存限制、中断延迟、处理器运算能力等)对算法的影响。

本文针对传统方法过程中存在的缺陷,提出通过软件在环和 dsPACE 半实物仿真两种相结合的方法来实现对控制算法的开发。首先利用 Matlab 和 ccs 的联合开发工具 Matlab Link for CCS Development Tools (CCSLink)将基于 Matlab/simulink 的仿真与 TI 的集成开发环境以及 DSP 芯片结合起来,组成了一个基于软件在环仿真系统。该方法能够摆脱算法对硬件平台的依赖,完成对控制算法、量化和编程错误的预测,高效的对控制算法本身进行仿真研究,提高对控制算法开发和调试周期。同时通过搭建 dsPACE 半实物仿真平台,将计算机仿真技术和应用实物平台相结合,组成一个在线、实时硬件平台来对控制算法进行研究应用,弥补了其他仿真中无法确定内存容量、中断延迟、处理器运算能力的缺陷,更加真实的反应算法在实物平台上的运行状态。

## 1 仿真算法实现原理

基于软件在环仿真技术是利用 Matlab 的 CCSlink 工具包实现 Matlab/Simulink 与 TI 集成开发环境以及

收稿日期:2017-03-31

基金项目:江西省教育科学“十三五”规划 2016 年度课题(16YB065)

作者简介:曾桂珍(1966—),女,副教授,研究方向为机车车辆控制。

DSP 处理器的双向连接, Matlab 可以与 DSP 中的数据进行交换互访。我们利用 Matlab/Simulink 来提供控制算法运行所需要的控制对象, 主电路模型以及分析工具等。而控制算法则在软件开发环境 CCS 中编写, 并在实际的 DSP 控制板上运行。这样就实现了仿真所用的控制算法和实际应用的控制算法达到完全统一, 不仅能完成控制算法的验证与改进、又省略了在开发阶段购买控制对象和分析设备的高昂成本。其中 Matlab/Simulink 与 TI 集成开发环境、DSP 处理器双向通信过程的软件在环结构如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

dsPACE 半实物仿真平台是随着计算机科学技术的发展, 利用计算机仿真的高效性以及实物实验的实时性, 来搭建实时的硬件开发平台, 为实现快速准确地系统开发提供了便利的条件<sup>[2]</sup>。dsPACE 半实物仿真平台首先是通过 RTI (Real-Time Interface) 软件实现对实时代码的编译和下载, 它将 dsPACE 仿真系统与 MATLAB/Simulink 模型完美地连接在一起, 通过 RTW 进行扩展, 可使主电路拓扑、控制电机等 Simulink 模型在以实时硬件代码的形式自动下载到 dsPACE 系统中。然后通过对控制算法在软件开发环境 CCS 中编译、链接, 最终下载到所支持的硬件平台当中, 实现仿真所用的控制算法和实际应用的控制算法的完全统一和硬件平台运行。通过硬件平台和 dsPACE 系统的 I/O, 中断配置等硬线信号的连接, 最终由测试环境与综合实验的 ControlDesk 软件、进行参数调整及自动实验的 MLIB/MTRACE 软件等, 完成以图形的形式对实时硬件、变量以及参数进行管理、建立用户虚拟仪表、自动完成实验测试等功能<sup>[4][11]</sup>。

通过 dsPACE 半实物仿真能够有效解决实际系统中所存在的内存限制、中断延迟、处理器运算能力及 I/O 接口等缺点。其中 dsPACE 半实物仿真系统结构图如图 1 所示:

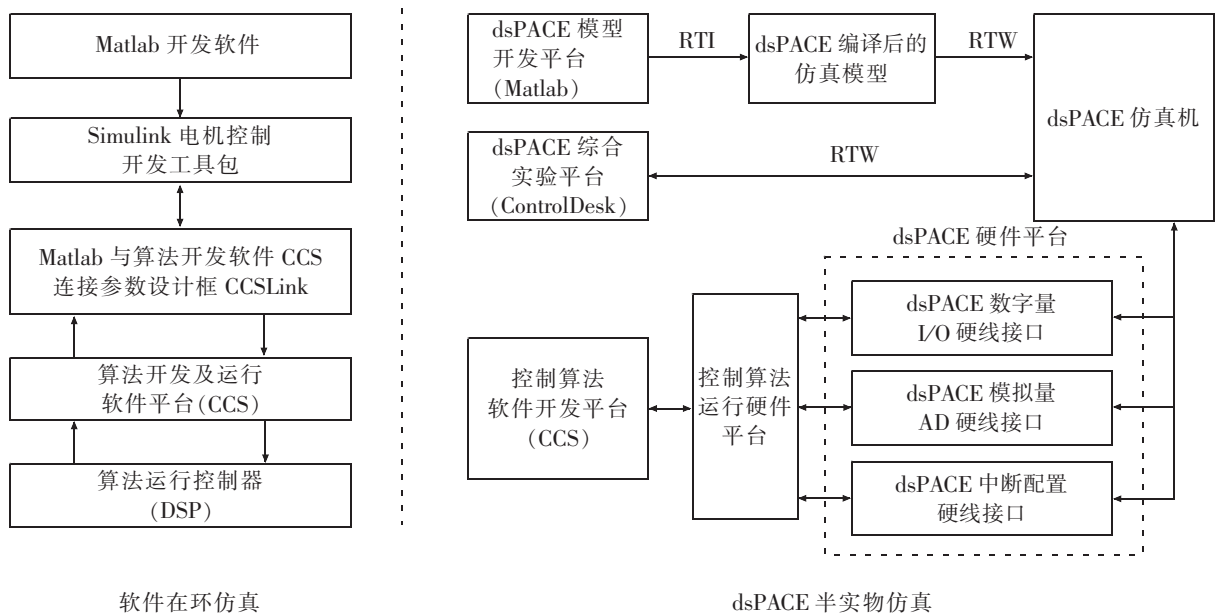


图 1 软件在环和 dsPACE 半实物仿真系统结构图

Fig.1 Software-in-the-loop and dsPACE simulation system structure diagram

## 2 异步电机矢量控制

交流电机矢量控制就是将电机在三相静止坐标系下矢量表达式转换到按照定子磁场、气隙磁场或者转子磁场定向的旋转坐标系下, 使复杂的电机数学模型转换为同直流电机一样较为简单的标量方式进行控制, 从而得到较为满意的动态和静态性能。交流电机数学模型分为三相静止坐标系下的数学模型、两相静止坐标系下的数学模型和两相旋转坐标系下的数学模型三类。其中在矢量控制中, 两相旋转坐标系下的电机模型尤为重要。以下即为两相旋转坐标系下的电机模型:

1) 电压方程。经过 Clark 和 Park 变换,我们得到交流电机在两相旋转坐标系下的数学模型,其电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s+L_s p & -w_s L_s & L_m p & -w_s L_m \\ w_s L_s & R_s+L_s p & -w_s L_m & L_m p \\ L_m p & -w_s L_m & R_r+L_r p & -w_s L_r \\ L_m w_{sl} & L_m p & L_r+w_{sl} & R_r+L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $u_{sd}, u_{sq}, u_{rd}, u_{rq}$  分别为两相旋转坐标系下电机定,转子等效电压; $i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$  分别为两相旋转坐标下电机定,转子等效电流; $w_s, w_{sl}$  分别为电机定子旋转角速度和转差角速度。

### 2) 磁链方程

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}, \varphi_{rq}$  分别为两相旋转坐标系下电机定,转子磁链。

### 3) 转矩方程

$$T_e = n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (3)$$

经过坐标变换得到异步电机在两相旋转坐标系下的电压控制方程为

$$u_d = (R_s + L_s p - \frac{L_m}{T_r p + 1} - \frac{L_m p^2}{R_r}) i_d + w (\frac{L_m^2}{L_r} - L_s) i_q \quad (4)$$

$$u_q = w (L_s - \frac{L_m}{T_r p + 1} - \frac{L_m p}{R_r}) i_d + (R_s + L_s p - \frac{L_m^2 p}{L_r}) i_q \quad (5)$$

式中: $u_d, u_q, i_d, i_q$  分别为电机定子电压和定子电流在同步旋转坐标系上的分量; $R_s$  为定子电阻; $R_r$  为转子电阻; $L_s$  为定子电感; $L_r$  为转子电感; $L_m$  为互感; $w$  为同步角频率; $p$  为微分算子。

矢量控制基本原理主要是由逆变器输出的交流电机三相定子电流  $i_A, i_B, i_C$  通过 Clark 变换,将电流信号从三相静止坐标系变换到两相静止坐标系下;然后电流信号再由 Park 变换,从而分别得到电机的励磁电流分量  $i_d$  和转矩电流分量  $i_q$ 。我们选取转子磁链定向方式作为磁场旋转的起始方向,将给定电流信号的励磁和转矩分量通过控制器与反馈计算出的励磁、转矩分量进行对比<sup>[10]</sup>。最终通过 Clark 与 Park 的反变换以及置环控制来控制逆变器的输出量,以达到交流电机矢量控制的目的。

基于转子磁场定向的间接矢量控制采用转速闭环、磁链开环的控制方式,结构简单、使转子反馈值受到电机参数  $T_r$  和  $L_m$  变化的影响降到最低,系统可靠性良好。间接矢量控制在进行两相旋转坐标系 Park 变换时,用  $M$  轴来表示与转子磁场总矢量  $\psi_r$  方向一致的  $d$  轴,用  $T$  轴来表示与总矢量  $\psi_r$  相垂直的  $q$  轴。从而得到了基于转子磁场定向的两相旋转  $M-T$  坐标系。间接矢量控制的工作原理是首先由速度传感器采集的速度信号计算而得到转子角速度  $w$ ,而后与给定值  $w^*$  做差,将得到的偏差值进行 PI 处理,其结果作为转矩电流分量参考值  $i_{sq}^*$ ;励磁电流分量参考值  $i_{sd}^*$  则由转速磁通表及控制方程给出。随后由电流传感器采集的逆变电路输出电流  $i_A, i_B$ ,经过 DSP 处理器的 A/D 转换芯片转换得到三相输出电流值,再由 Clark 和 Park 变换得到两相旋转坐标系下电流环的反馈值  $i_{sd}, i_{sq}$ ,并将电流参考值与反馈值做差,得到的偏差值再分别经由 PI 调节器处理,得到  $M-T$  坐标系下相电压转矩与励磁分量  $U_{sd}^*$  和  $U_{sq}^*$ 。此外,转差角速度参考值  $w_{sl}^*$  可以由电流的转矩和励磁分量计算得到,并与转子角速度  $w$  相加得到参考角速度  $w_1^*$ ,再由积分运算得到转子磁场角度参考值  $\theta^*$ 。最后由  $U_{sd}^*, U_{sq}^*$  和  $\theta^*$  通过 Park 和 Clark 反变换得到交流电机的电压矢量  $u_A, u_B, u_C$ 。SVPWM 调制模块则会依据这些相电压矢量来控制逆变桥中脉冲的输出<sup>[5-6]</sup>。其原理框图 2 如下所示:

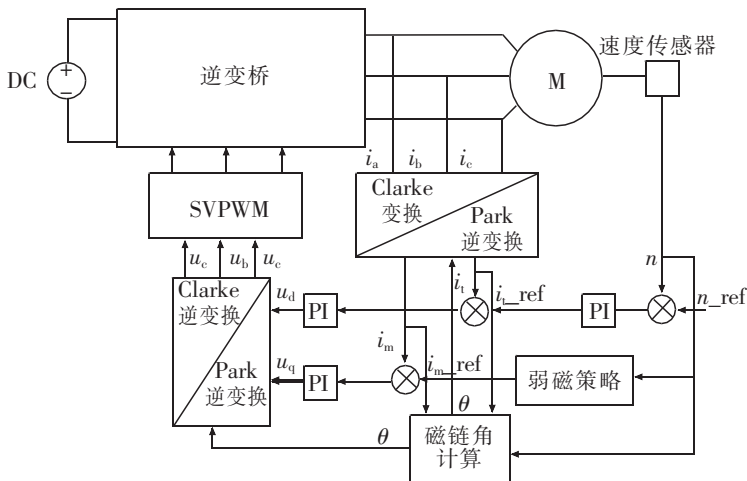


图 2 矢量控制系统框图

Fig.2 Vector control system structure diagram

3 软件在环仿真结果及分析

为了提高算法开发效率,完成对控制算法、量化和编程错误的预测。首先我们利用 matlab/simulink 与软件开发环境 CCS 相结合进行软件在环仿真。其中异步电机参数如下: $R_s=0.036\ 17\ \Omega, L_{ls}=0.330\ 9\ H, R_r=0.020\ 32\ \Omega, L_{lr}=0.456\ 5\ H, L_m=9.671\ 9\ H, J=0.189\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,电机额定功率为  $P_n=120\ \text{kW}$ ,额定频率  $f_n=48.2\ \text{Hz}$ ,额定线电压  $U_n=510\ \text{V}$ ,逆变器直流电源为  $750\ \text{V}$ 。

图 3 分别给出了软件在环仿真中的输出转矩和磁链波形。从图中可以看出,转矩波形在整个系统中响应速度很快。在  $0.2\ \text{s}$  前就达到了转矩目标值,转矩稳定输出为  $820\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。定子磁链输出轨迹为完整的磁链圆,磁链值约为  $1.2\ \text{Wb}$ 。

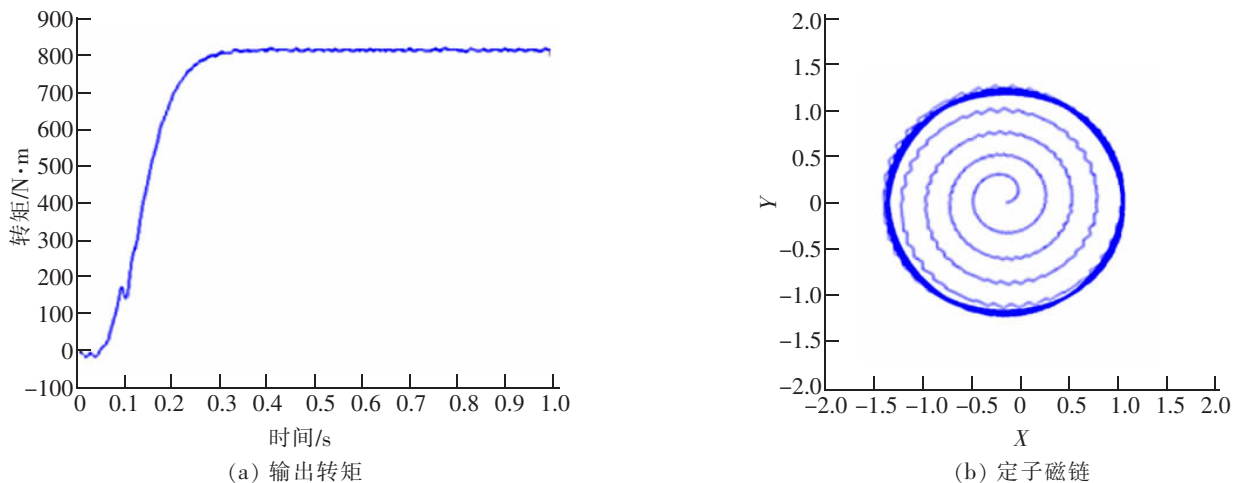


图 3 输出转矩和磁链波形

Fig.3 Output torque and stator flux waveform

图 4 给出了软件在环仿真中电机输出电流和相电压稳定时刻的波形,从图 4 中可以看出电流在  $0.25\ \text{s}$  转矩输出稳定后保持不变,输出有效值约为  $203\ \text{A}$ 。在仿真设定开关频率为  $1\ \text{kHz}$  的情况下,电流波形畸变率小,正弦性良好。通过 Matlab 自带 FFT 分析可知在额定频率下电机输出相电压有效值约为  $285\ \text{V}$ ,THD 谐波含量约为  $45.6\%$ 。

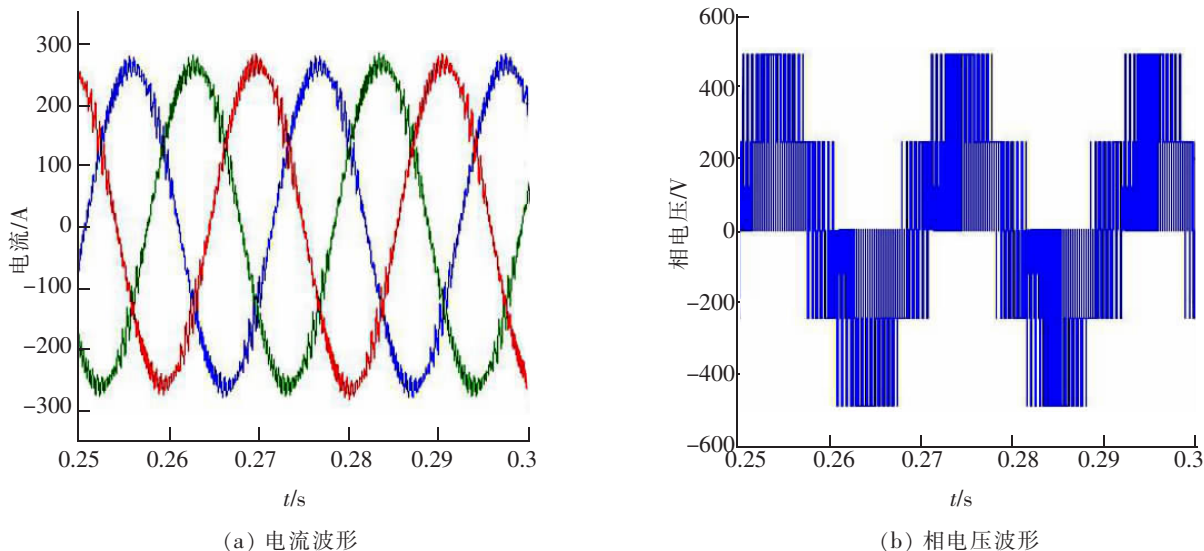


图 4 电机电流仿真波形

Fig.4 Simulation waveform of motor current and phase voltage

通过软件在环仿真结果可以看出该矢量控制算法具有良好的控制性能,其转矩响应快,电压输出谐波量小,电流输出为理想的正弦波,各项输出数据都符合电机特性。软件在环仿真能够有效的对矢量控制算法进行仿真,缩短开发周期。

#### 4 dsSPACE 半实物平台仿真结果及分析

利用上一节相同的矢量控制算法和相同的电机参数,搭建 dsSPACE 半实物仿真平台对控制算法进行仿真,查看由硬件内存、中断延迟、处理器运算能力等条件限制下的仿真结果。来证明异步电机矢量控制在 dsSPACE 半实物仿真平台中的可应用性和准确性。

其中 dsSPACE 半实物矢量算法仿真主要步骤为:

- 1) 将 simulink 中验证的仿真模型下载到 dsSPACE 模块中,并将原本的逻辑条件用模块中的硬线端口所代替,然后对其他一些 I/O 及中断接口进行配置;
- 2) 利用 RTW 和 RTI 将主电路拓扑及电机模型代码下载到 dsSPACE 实时仿真的硬件当中;
- 3) 将控制算法通过 TI 集成开发环境下载到 DSP 处理器当中。将算法运行信号通过 I/O 及中断等硬件接口传输到 dsSPACE 实时仿真硬件平台中;
- 4) 通过 Controldesk 综合实验测试平台对运行数据进行上传和下载,并通过上位机观测实时运行的数据波形<sup>[7-9]</sup>。

通过所对应搭建的 dsSPACE 仿真平台得到在转速稳定在 1 428 rpm 时电机运行的结果。从图 5 可以看出模型中电机转速采样稳定;滤波前电机输出转矩有小范围的波动,滤波后的电机输出转矩约稳定在 850 N·m 左右。

图 6 中给出了在开关频率为 1 kHz 的情况下电机输出电流和相电压波形,从图中可以看出电机输出电流稳定且无震荡,其额定值约为 210 A;相电压输出正弦度良好,软件分析其有效值约为 290 V。

图 7 为电机定、转子磁链轨迹,从图中可以得知,在电机稳定输出时,定转子磁链轨迹为理想的磁链圆,其值约为 1.15 Wb。



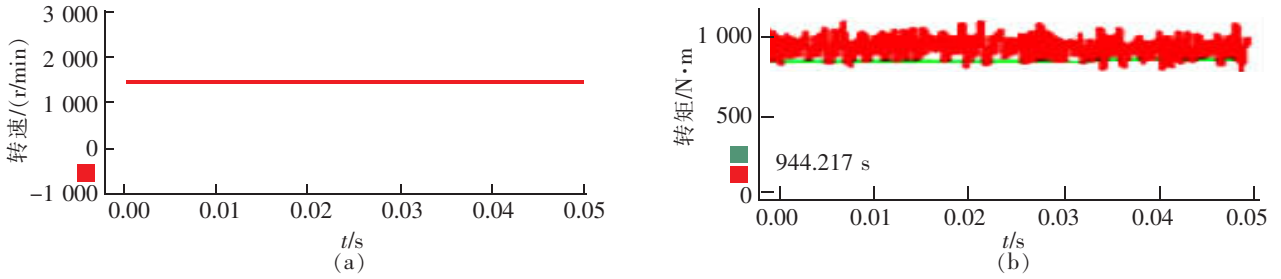


图5 转速和转矩波形

Fig.5 Waveform of speed and torque

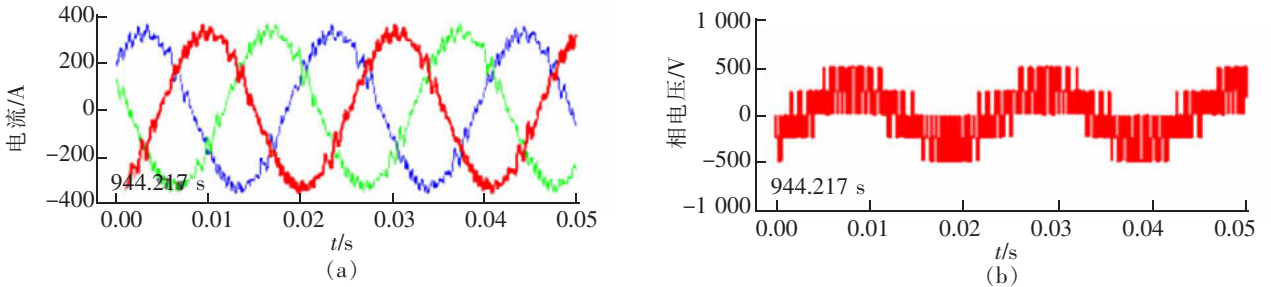


图6 电流和相电压波形

Fig.6 Waveform of current and phase voltage

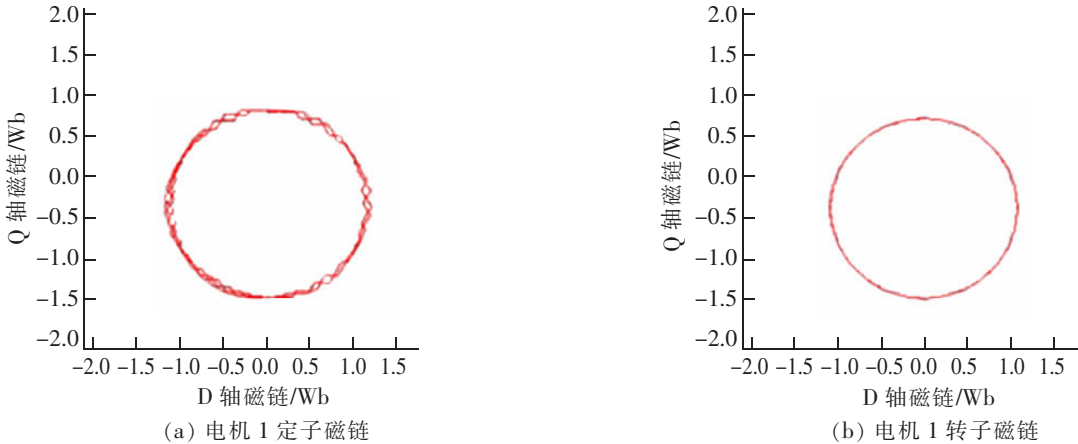


图7 定子与转子磁链波形

Fig.7 Waveform of stator flux and rotor flux

根据以上 dsPACE 仿真波形来看, 该异步电机矢量控制算法在 dsPACE 半实物仿真平台中达到了预期设计的目的。同时半实物仿真结果与基于软件在环仿真的结果在仿真数据和波形上也基本吻合。

## 5 结论

本文通过软件在环仿真技术和 dsPACE 半实物仿真平台有效结合, 将软件在环仿真技术和 dsPACE 半实物仿真技术应用用于异步电机矢量控制系统中, 省略了传统开发过程中算法仿真的程序移植、应用及硬件平台实物验证过程, 实现从仿真到应用的无缝连接, 提高算法的开发效率。最后通过仿真验证算法开发的准确性和可应用性, 具有良好的应用前景。

**参考文献:**

- [1] 王成元,夏加宽,孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2009:13-36.
- [2] 肖兵蔡一波梁瑛琳. 基于 Matlab 和 DSP 的滤波器硬件在环实时仿真[J]. 理论与方法,2007(10):10-13.
- [3] 李真芳. DSP 程序开发 Matlab 调试及直接目标代码生成[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2003:102-158.
- [4] 汪洋,郭丽丽,樊丽萍. 一种基于 Matlab 的 DSP 开发思路的研究[J]. 控制工程,2006:123-126.
- [5] 程启明,程尹曼,王映斐,等. 交流电机控制策略的发展综述[J]. 电力系统保护与控制,2011(9):145-154.
- [6] 吴桢生. 模糊控制在矢量控制系统中的应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [7] 刘永欢. 基于 dSPACE 的异步电机矢量控制策略研究与实现[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [8] 刘其子. 基于 dSPACE 的异步电机无速度传感器矢量控制[D]. 浙江:浙江大学,2014.
- [9] 张源. 基于 dSPACE 的异步电机新型控制策略研究与应用[D]. 山东:青岛大学,2015.
- [10] 雷叶红,张记华,张春明. 基于 dSPACE/MATLAB/Simulink 平台的实时仿真技术研究[J]. 系统仿真技术,2005(3):131-135.
- [11] 孙红飞,王乐英. dSPACE 电机控制平台的设计与矢量控制实现 [J]. 天津理工大学学报,2011(4):16-19.

## Research and Application of Simulation Technology Based on Vector Control Algorithm of Induction Motor

Zeng Guizhen<sup>1</sup>, Zhang Guangyuan<sup>2</sup>, Zeng Runzhong<sup>3</sup>

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. CRRC Dalian R&D Co., Ltd., Dalian 116022, China; 3. School of Civil Engineering Architecture,

East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In view of the complexity and low efficiency in the process of conversion from simulation to the application by conventional vector control algorithm, this paper studied the simulation and application of vector control algorithm by combining software-in-the-loop simulation which includes control chips in the ring with the dsPACE hardware-in-the-loop simulation. This method omitted the program transplantation and the physical verification process of the application and hardware platform of conventional algorithm simulation, which would realize the seamless connection from the simulation to the application and improve the development efficiency of the algorithm. Finally, this paper presented two kinds of simulation results of the vector control algorithm, showing that the proposed method can effectively complete the research on algorithm development and the application of the algorithm on the hardware platform.

**Key words:** software-in-the-loop simulation; dsPACE hardware-in-the-loop simulation; vector control algorithm