

基于 TMS320LF 2407 的新型
直接转矩控制系统

雷 丹¹,袁爱进²,陈汝义²

(1. 大连交通大学 软件学院,辽宁 大连 116028;
2. 大连交通大学 电气信息学院,辽宁 大连 116028)

摘要:提出一种应用于直接转矩控制(DTC)系统的定子电阻压降补偿方法,可消除低速区间定子电阻上的压降。DTC 包括转矩和磁链的控制环节、最佳开关矢量表和电动机模型 3 个基本环节。分析了定子坐标系下交流电动机模型及带有压降补偿器的磁链观测器,论述了定子压降补偿的实现,由 Matlab 软件包中的 Simulink 实现仿真;采用 TMS320LF2407 作控制器,在 0.37 kW 鼠笼式电动机上做实验后,结果证明所提方法的有效性。

关键词:直接转矩控制;数字信号处理器;补偿器

中图分类号: TM 301.2 文献标识码: B 文章编号: 1006-6047(2006)08-0053-03

半导体功率器件与微处理器的发展,促进了高性能控制技术在交流传动系统中的应用。当前高性能交流传动控制主要有 2 种:矢量控制(FOC)和直接转矩控制(DTC)。虽然 DTC 理论提出已近 20 年了,但最近几年才应用于工业领域^[1-3]。

DTC 以其结构简单、易于实现的特点,受到了传动领域的普遍关注。而且 DTC 还有不需要转子位置传感器的优点。由于无速度传感器可以提高系统可靠性,降低成本,所以很多专家都把目光投向了无速度传感器技术和高性能传动技术^[4-5]。

DTC 技术需要以定子电阻计算定子磁链,在高速运行时可精确计算定子磁链;而在低速时定子电阻上的压降磁链计算会不准确^[6-7]。本文将介绍一种消除定子电阻压降的方法,以改善低速区间的磁链计算。将压降补偿器应用于 DTC 系统中,并在仿真和实验中得到了分析和验证。

1 DTC 简介

DTC 结构图如图 1 所示。DTC 包括 3 个基本环节:转矩和磁链的控制环节、最佳开关矢量表和电动机模型。

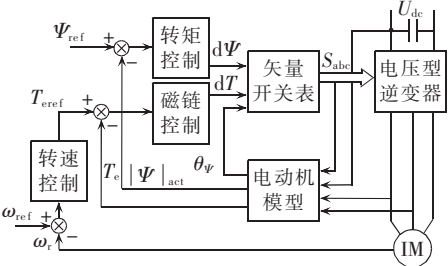


图 1 电压源逆变器驱动 DTC 系统
Fig.1 DTC system driven by voltage-source converter

机模型。电动机模型利用定子相电流和直流母线电压计算出转矩、定子磁链和轴上输出转速^[8-9]。磁滞环节将得到的转矩和磁链与参考值分别作比较产生控制信号。开关矢量表如表 1 所示,根据磁链轨迹的空间位置确定最佳开关矢量。

在表 1 中,dΨ=1 和 dΨ=0 分别表示定子磁链需要增大或者减小。同理 dT=1 表示电机转矩需要增大,而 dT=0 和 dT=-1 表示转矩需要缓慢减小和快速减小。速度控制用 PI 控制器,同时转矩参考值也由 PI 速度控制器得到。

表 1 定子电压开关表
Tab.1 Switching table for stator voltage

dΨ	dT	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆
1	1	U ₂ (110)	U ₃ (010)	U ₄ (011)	U ₅ (001)	U ₆ (101)	U ₁ (100)
	0	U ₇ (111)	U ₀ (000)	U ₇ (111)	U ₀ (000)	U ₇ (111)	U ₀ (000)
	-1	U ₆ (101)	U ₁ (100)	U ₂ (110)	U ₃ (010)	U ₄ (011)	U ₅ (001)
0	1	U ₃ (010)	U ₄ (011)	U ₅ (001)	U ₆ (101)	U ₁ (100)	U ₂ (110)
	0	U ₀ (000)	U ₇ (111)	U ₀ (000)	U ₇ (111)	U ₀ (000)	U ₇ (111)
	-1	U ₅ (001)	U ₆ (101)	U ₁ (100)	U ₂ (110)	U ₃ (010)	U ₄ (011)

2 定子坐标系下交流电动机模型

交流电机在定子坐标系下的模型如方程(1)所示。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{R_r M}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_r M}{\sigma L_s L_r} & \left(j\omega_r - \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} U_s \quad (1)$$

定子转子磁链作为变量,构成仿真系统的基础。其中,Ψ_s和Ψ_r分别为定子和转子磁链矢量,U_s为定子电压矢量,R_s和R_r为定子和转子电阻,L_s和L_r为定子和转子自感,M为互感,σ=1-M²/L_sL_r为漏感系数,ω_r为转子角速度,定子 dq 电流分量分别由方程(2)和(3)计算得到。

$$i_{ds} = \frac{\Psi_{ds} - \Psi_{md}}{L_s - M} \quad (2)$$

$$i_{qs} = \frac{\Psi_{qs} - \Psi_{mq}}{L_s - M} \quad (3)$$

电磁转矩由定子磁链和电流计算,表达式如方程(4)所示。

$$T_e = \frac{3}{2} P (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad (4)$$

式中 P 是交流电机的极对数。

3 定子压降补偿的实现

DTC 低速应用的主要问题是定子压降 $I_s R_s$ 的影响。为了改善低速时的磁链控制,本文考虑选择最佳开关矢量和如何消除压降的影响。电压矢量和定子电阻压降如图 2 所示。从图 2(a)可看出,在高速区间,定子电压 U_{sh} 幅值大,定子压降相对很小,可以忽略。然而,从图 2(b)可看出,在低速区间 R_s 的压降占终端电压 U_{sl} 很大部分。而且,随着温度的上升 R_s 变化明显,造成磁链观测不准,控制器性能下降。

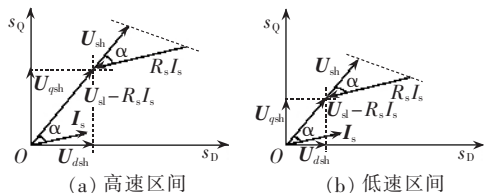


图 2 定子电压空间矢量中压降的影响

Fig.2 Influence of stator voltage-drop on space vector

4 带有压降补偿器的磁链观测器

传统 DTC 定子磁链是由定子电压和电流计算得到的,表示如下:

$$\Psi_s = \int (U_s - R_s I_s) dt \quad (5)$$

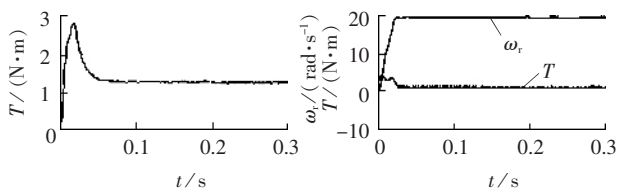
这种方法在高速区间能够得到准确的磁链轨迹。然而如上所述,随着速度降低磁链计算误差会增大。为了补偿低速时压降 $I_s R_s$,在磁链观测器中加入定子电阻压降的测量环节。如图 2 中所示,定子压降矢量是定子电流的函数,所以压降矢量可以由当前定子电流采样计算得到,然后在下一个采样周期作为当前压降的补偿。改进的磁链观测器表示如下:

$$\Psi_s = \int \{U_s(k) - R_s [I_s(k) - I_s(k-1)]\} dt \quad (6)$$

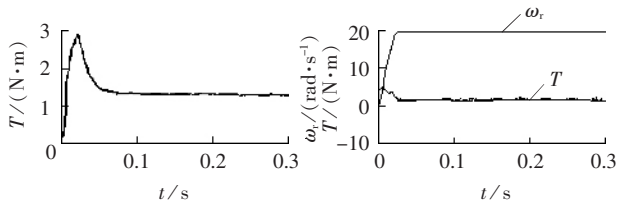
5 仿真结果

由 Matlab 软件包中的 Simulink 实现仿真^[10]。图 3~5 分别对传统 DTC 和提出的补偿策略作比较。电机转矩和转速响应曲线如图 3 所示,可以看出 2 种方法没有明显差别。从图 4(a)可看到所提出算法下的定子磁链是正弦曲线,而在图 4(b)中传统 DTC 定子磁链显然不是正弦波。而且,可以看出,在改进的 DTC 策略中,实际的定子磁链幅值等于给定值 0.8 Wb,而在传统 DTC 中有明显的误差。如图 5(a)中所示,所

提出算法的定子磁链轨迹近似圆形,而在图 5(b)中传统 DTC 的定子磁链轨迹为六边形。



(a) 压降补偿法



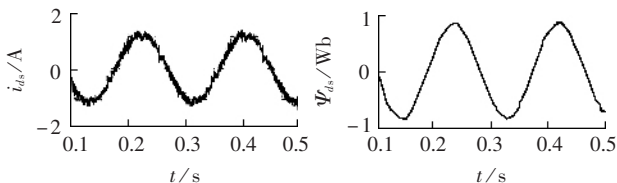
(b) 传统方法

图 3 交流电机的转矩和转速响应

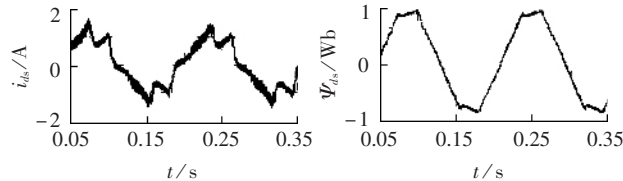
($\omega_{ref} = 20 \text{ rad/s}$, $T_L = 1.2 \text{ N}\cdot\text{m}$)

Fig.3 Response of torque and speed of AC motor

($\omega_{ref} = 20 \text{ rad/s}$, $T_L = 1.2 \text{ N}\cdot\text{m}$)



(a) 压降补偿法

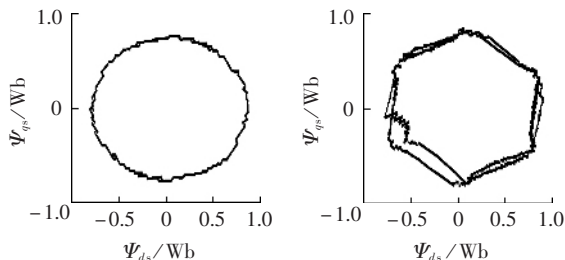


(b) 传统方法

图 4 相电流和 d 轴定子磁链 ($\omega_{ref} = 20 \text{ rad/s}$, $T_L = 1.2 \text{ N}\cdot\text{m}$)

Fig.4 Phase current and d-axis stator flux

($\omega_{ref} = 20 \text{ rad/s}$, $T_L = 1.2 \text{ N}\cdot\text{m}$)



(a) 压降补偿法

(b) 传统方法

图 5 定子磁链轨迹 ($\omega_{ref} = 20 \text{ rad/s}$, $T_L = 1.2 \text{ N}\cdot\text{m}$)

Fig.5 Tracks of stator flux ($\omega_{ref} = 20 \text{ rad/s}$, $T_L = 1.2 \text{ N}\cdot\text{m}$)

6 实验结果

采用 TMS320LF 2407 作为控制器,在 0.37 kW 鼠笼式电动机上作实验。TMS320LF 24x 是 TI 公司专门针对电机、逆变器、机器人、数控机床等控制而设计的。它以 C2XLP 16 bit 定点 DSP CPU 为内核,配置了完善的外围设备,包括事件管理模块(EV)、AD

转换模块(ADC)、串行通信接口模块(SCI)、串行外设接口模块(SPI)、中断管理系统和系统监视模块,其中 EV 含有通用定时器、比较器、PWM 发生器、捕获器。改进的 DTC 策略与传统 DTC 在同样运行条件下作比较。从图 6~8 结果可看出没有明显的区别,本文所提出的方案下电流波形接近正弦波。实验得出的定子磁链轨迹可以看出定子磁链轨迹比传统 DTC 更接近圆形。

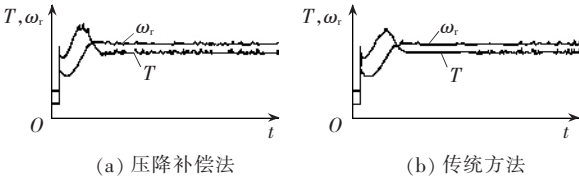


图 6 电机转矩和速度响应 ($\omega_{ref}=20\text{ rad/s}$, $T_L=1.2\text{ N}\cdot\text{m}$)
Fig.6 Response of torque and speed
($\omega_{ref}=20\text{ rad/s}$, $T_L=1.2\text{ N}\cdot\text{m}$)

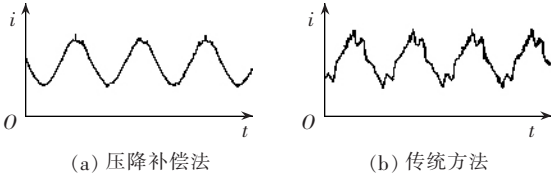


图 7 电机相电流 ($\omega_{ref}=20\text{ rad/s}$, $T_L=1.2\text{ N}\cdot\text{m}$)
Fig.7 Phase current($\omega_{ref}=20\text{ rad/s}$, $T_L=1.2\text{ N}\cdot\text{m}$)

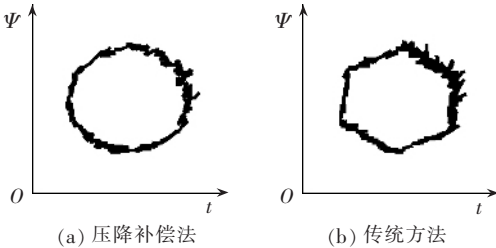


图 8 电机定子磁链轨迹
($\omega_{ref}=20\text{ rad/s}$, $T_L=1.2\text{ N}\cdot\text{m}$, $\Psi_{ref}=0.8\text{ Wb}$)
Fig.8 Tracks of stator flux
($\omega_{ref}=20\text{ rad/s}$, $T_L=1.2\text{ N}\cdot\text{m}$, $\Psi_{ref}=0.8\text{ Wb}$)

7 结论

本文提出了异步电动机直接转矩控制的一种新

型补偿策略。在同样运行条件下与传统 DTC 系统作了比较,仿真和实验结果证明此方法应用于 DTC 能够改善低速下的磁链控制。

参考文献:

[1] 李凤. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
[2] 章云,谢莉萍,熊红艳. DSP 控制器及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
[3] 黄济荣. 电力牵引交流传动与控制[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
[4] BOSE B K, SIMOES M G. Speed sensorless hybrid vector controlled induction motor drive [C]//IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting. Orlando:IEEE,1995:8-12.
[5] XU X,DONKER R D,NOVOMY D W. A stator flux oriented induction machine drive [C]//IEEE Power Electron Specialist Conf.[S.l.];IEEE,1988:870-876.
[6] 桂武鸣,刘子健,冯江华,等. 异步电动机的直接转矩控制[J]. 内燃机车,2002(12):1-5.
GUI Wu-ming, LIU Zi-jian, FENG Jiang-hua, et al. Simulation of the direct torque control system of asynchronous motor [J]. Technology For Electric Locomotives, 2002(12):1-5.
[7] 吴峻,潘孟春,李圣怡. 直接转矩控制系统低速性能的分析与控制[J]. 电气传动,2001(5):13-15.
WU Jun, PAN Meng-chun, LI Sheng-yi. Analysis and control of low speed performance in DTC systems [J]. Electric Drive, 2001(5):13-15.
[8] HU Jun, WU Bin. New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13(5):970-972.
[9] LASCU C, BOLDEA I, BLAABJERG F. A modified direct torque control for induction motor sensorless drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(1):122-130.
[10] 李宜达. 控制系统设计与仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

(责任编辑:汪仅珍)

作者简介:

雷 丹(1980-),女,辽宁沈阳人,硕士,主要从事电力电子及电机控制方面的研究(E-mail:leidan_800414@yeah.net);
袁爱进(1959-),男,贵州习水人,教授,从事现场总线系统与仪器仪表的研究与产品开发;
陈汝义(1964-),男,福建霞浦人,教授,博士,从事交流传动的教学与科研工作。

Improved DTC technique based on TMS320LF2407 DSP

LEI Dan¹, YUAN Ai-jin², CHEN Ru-yi²

(1.College of Software, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2.College of Electrical and Information, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: A stator resistance voltage-drop compensation method is presented to eliminate the stator resistance voltage-drop at low speed in DTC(Direct Torque Controlled) system. Three parts are involved:the hysteresis of torque and flux,the optimal switching vector table and the motor model. The AC motor model under stator coordinates is discussed,as well as the flux observer with voltage-drop compensator is analyzed. The realization of compensation is simulated with Simulink of Matlab. Taking the TMS320LF2407 as the controller,a test is carried out on a 0.37 kW squirrel-cage motor, and results show its effectiveness.

This project is supported by the Natural Science Foundation of Liaoning Doctor Startup(20031062).

Key words: DTC; DSP; compensator