

doi:10.16652/j.issn.1004-373x.2016.07.035

无刷直流电机调速系统转矩脉动抑制方法研究

李有凯, 蒋玲

(南京林业大学 信息科学与技术学院, 江苏 南京 210037)

摘要:通过对无刷直流电机开通期间的相电流和关断期间的相电流分析,经过实际计算得到电磁转矩的表达式,得到相应的电磁转矩脉动曲线。基于电流预测方法通过将预测模型分为模型建立、反馈调整和性能优化3步,通过控制换相电流保持在稳定的状态,从而实现对转矩脉动的抑制。通过仿真和实际实验表明,该无刷直流电机调速系统在实际运行中具有转矩脉动小、响应速度快等优点。

关键词:无刷直流电机; 电流预测; 转矩脉动; 换相电流

中图分类号: TN911-34; TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2016)07-0142-03

Research on torque ripple suppression method for BLDCM speed control system

LI Youkai, JIANG Ling

(College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The phase current of BLDCM during the opening period and shutdown period is analyzed. The electromagnetic torque expression is obtained by actual calculation, and then the corresponding electromagnetic torque ripple curve is obtained. The prediction model is divided into model establishment, feedback tuning and performance optimization with current prediction method. The phase commutation current is controlled in a stable state to suppress the torque ripple. The simulation and practical experiment results show that the BLDCM speed control system has the advantages of small torque ripple, fast response speed, etc.

Keywords: BLDCM; current prediction; torque ripple; phase commutation current

0 引言

无刷直流电机(BLDCM)由于具有输出转矩大、噪声低、效率高和稳定性好等优点被广泛应用在各种工业控制场合上。然而对于一些控制精度指标要求较高的场合,常常用转矩脉动作为衡量一个系统控制性能的好坏的重要标准。无刷直流电机作为工业生产中重要的动力来源,其调速性能与稳定性的好坏将直接影响到工业上能否安全、稳定和高效的生产^[1]。

本文总结了以往无刷直流电机调速系统的优点与缺点,以控制非导通相的相电流作为基础,对无刷直流电机在换相期间非换相电流对转矩脉动产生的影响进行分析。通过仿真和实际实验表明,将定子电流预测控制方法应用在转矩脉动抑制的无刷直流电机调速系统具有转矩脉动低和稳定性好等优点^[2-3]。

1 无刷直流电机数学模型

假定实验所用无刷直流电机为三相对称,无刷直流电机的等效模型及驱动电路如图1所示,定子换相时刻只与转子的位置有关。

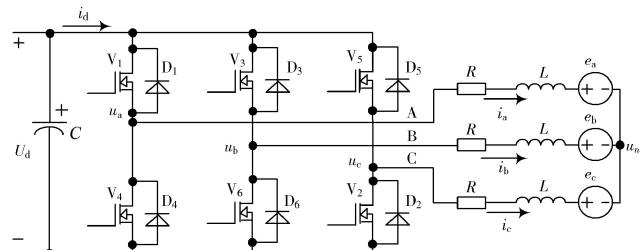


图1 无刷直流电机模型等效电路图

图1所示的 R 和 L 为等效定子电阻和定子电感, $D_1 \sim D_6$ 为逆变回路的三相全桥, U_d 为驱动系统的直流电压输入, e_a, e_b, e_c 分别为三相感应电动势, u_n 为星型连接的中性点^[4-5]。电机的电压方程表达式如下:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_n \\ u_n \\ u_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期:2015-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(31200541,31170668);
江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

2 基于电流预测控制的无刷直流电机转矩脉动抑制

基于电流预测控制算法的三个基本特征包括电流预测模型、反馈校正以及滚动优化,通过该算法对无刷直流电机的定子电流进行实时预测和控制^[6-8]。

2.1 电流预测模型的建立

假定 VT₁ 和 VT₆ 开通,即 a 相和 b 相导通,此时若以 a 相为例,可知 a 相的传递函数为:

$$G(s) = i_a / (u_a - e_a) = 1 / (Ls + R) \quad (2)$$

计算机对数据进行处理时只会对采样点附近的数据进行实时更新,通常情况下只会维持该数据不变,可增加一个数据保持器维持其数据的恒定,其传递函数为:

$$G(z) = z \left(\frac{1 - e^{-sT}}{s} \cdot \frac{1}{Ls + R} \right) = \frac{b}{z - a} \quad (3)$$

式中: $a = \exp(-RT/L)$; $b = (1 - a)/R$ 。由式(1)可知 a 相 $k+1$ 时刻的预测输出电流为:

$$i_{ap}(k+1) = ai_a(k) + b[u_a(k) - e_a(k)] \quad (4)$$

式中: $i_a(k)$ 为当前输出电流; $u_a(k)$ 为 a 相当前电压; $e_a(k)$ 为 a 相当前反电动势。

2.2 反馈校正

无刷直流电机控制系统在实时运行过程中其电机自身参数和内部预测本身存在一定误差,所以需要实时在线对其参数进行调整。假定 k 时刻无刷直流电机 a 相电流与预测模型输出的实际电流的误差为:

$$e(k) = i_a(k) - i_{am}(k) \quad (5)$$

在实际运行过程中对预测模型进行实时反馈和校正,从而使预测模型更加接近于实际系统模型。校正后的闭环输出为:

$$i_{ap}(k+1) = i_{am}(k+1) - he(k) \quad (6)$$

式中 h 表示误差修正系数。

2.3 滚动优化

采用电流预测控制对无刷直流电机进行实时控制,可使非换相电流保持很大程度的恒定,所以可将控制量与输出预测值之间的误差进行加权,由此得到二次性能指标对电机控制系统进行最优控制,其性能指标的具体表达式为:

$$J = p[i_{ap}(k+1) - i_{ar}(k+1)]^2 + qu_a^2(k) \quad (7)$$

式中: p, q 分别表示电流预测误差系数和控制量加权系数。为保证系统能够具有最优的控制性能,令 $\partial J / \partial u_a(k) = 0$, 此时:

$$u_a(k) = -\{pb[ai_a(k) - be_a(k) + he(k) - i_{ar}(k+1)]\} / (q + pb^2) \quad (8)$$

式中: $u_a(k)$ 表示系统控制量,通过其值的大小即可改变控制开关管 PWM 的占空比。通过 $u_a(k)$ 的实时调整可使得控制量和误差值的二次性能指标达到最小,从而保证控制量与跟踪误差均可保持最优状态,对控制效果进行优化。如图 2 所示为本控制系统的电流预测框图。

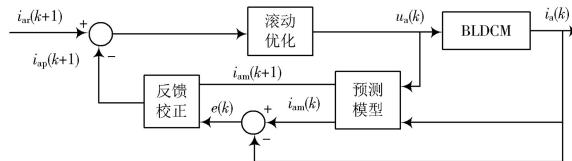


图 2 无刷直流电机电流预测控制框图

根据上述可知,决定电流变化率的因素有反电动势 E 和直流侧供电电压 U_d ,而反电动势和转速成正比,通过实时检测电机的转速,可以得到 E 的实时值。一般情况下,电机的直流供电电压 U_d 常常保持恒定,但是电机运行过程转速的波动会导致 E 的变化,不能保证电机调速期间 U_d 始终与 $4E$ 保持相等,所以电机在换相时产生的转矩脉动会比较大。

3 仿真和实验验证

当调速系统给定转速分别为 1 600 r/min 和 300 r/min 时,采用电流预测控制前后的无刷直流电机转矩仿真波形分别如图 3 和图 4 所示。显然,无刷直流电机处于高速和低速运行区域时,电磁转矩的脉动方向不一样,但采用定子电流预测控制后,电机的转矩脉动获得了很好的抑制。

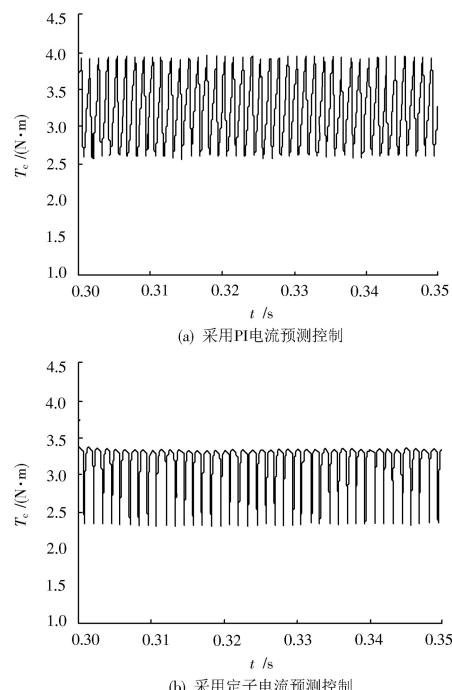


图 3 转速为 1 600 r/min 时电机电磁转矩波形

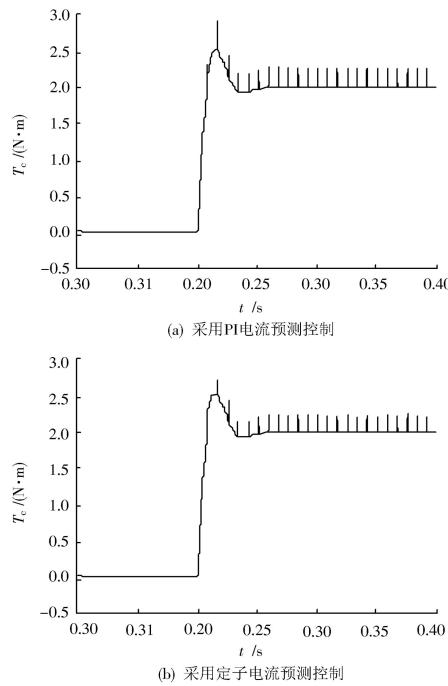


图4 转速为300 r/min并突加2 N·m负载电磁转矩波形

根据实际需求对控制系统进行仿真,系统给定转速为1 600 r/min,采用定子电流预测控制前后的无刷直流电机相电流波形如图5所示。

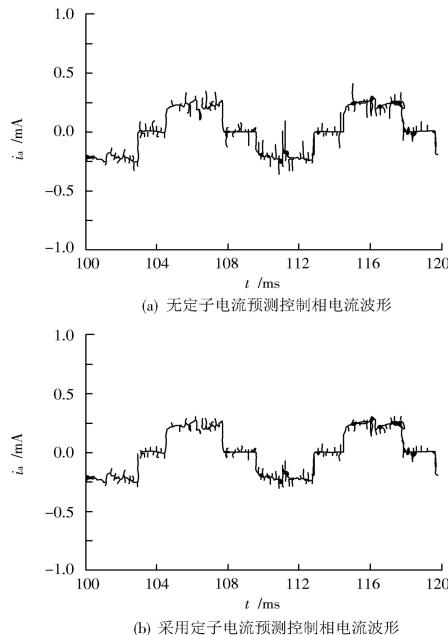


图5 转速为1 800 r/min时相电流输出波形

本仿真和实际实验所用无刷直流电机(BLDCM)的主要参数为:额定功率为160 W,额定电压为24 V,额定转速为3 000 r/min,极对数为4。实际实验和仿真表明,采用定子电流预测控制的无刷直流电机调速系统在很大程度上改善了由于换相而导致的非换相相电流的突变,从而可以很好地减小无刷直流电机的电磁转矩脉动问题。

4 结语

本文对无刷直流电机在换相过程中各相电流做出了非常详细的分析,并通过推导得出电磁转矩和脉动转矩的表达式,从而得出保证非换相相电流的恒定是减小换相转矩脉动的一项重要策略。与此同时,系统通过定子电流预测控制方法很好地对换相过程中产生的转矩脉动进行抑制,并通过仿真和实验验证了该方法的可行性和有效性。

参 考 文 献

- [1] 曹建波,曹秉刚,许鹏,等.无位置传感器无刷直流电机转矩脉动抑制研究[J].电机与控制学报,2008(3):248-253.
- [2] 冯翠萍.永磁无刷直流电机转矩脉动抑制的控制策略研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [3] 顾俊杰.无刷直流电机转矩脉动抑制的研究[D].杭州:浙江理工大学,2014.
- [4] 杨龙.无位置传感器无刷直流电机转矩脉动抑制研究[D].株洲:中南林业科技大学,2014.
- [5] 周美兰,李志,苏革航.无刷直流电机PWM调制方式对非换相期间转矩脉动的影响[J].哈尔滨理工大学学报,2014(6):74-81.
- [6] 夏鲲,朱琳玲,曾彦能,等.基于准Z源网络的永磁无刷直流电机换相转矩脉动抑制方法[J].中国电机工程学报,2015(4):971-978.
- [7] 李珍国,章松发,周生海,等.考虑转矩脉动最小化的无刷直流电机直接转矩控制系统[J].电工技术学报,2014(1):139-146.
- [8] 王大方,卜德明,朱成,等.一种减小无刷直流电机换相转矩脉动的调制方法[J].电工技术学报,2014(5):160-166.
- [9] 袁题训,董升亮,耿丙群,等.无刷直流电机的保护电路[J].现代电子技术,2011,34(24):41-44.
- [10] 雷金莉.无刷直流电机模糊PI控制系统建模与仿真[J].现代电子技术,2012,35(6):161-163.

作者简介:李有凯(1990—),男,江苏南京人,硕士研究生。主要研究方向为无刷直流电机控制。

蒋 玲(1979—),女,湖北天门人,副教授。主要研究方向为微弱信号检测和电子测量技术。