

一种适合 DTC 应用的非线性正交反馈 补偿磁链观测器

贾洪平, 贺益康

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

A New Nonlinear Perpendicular Flux Observer with Compensation Feedback Suitable for DTC Application

JIA Hong-ping, HE Yi-kang

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: A new nonlinear perpendicular flux observer with compensation feedback suitable for DTC application is presented in this paper, which is capable of ensuring flux linkage to be perpendicular to back electromotive force, so the stator flux linkage including its amplitude and phase angle can then be estimated accurately over a wide speed range. Therefore the proposed observer could solve those problems associated with traditional observer such as dc drift, magnetic saturation and inaccurate estimation of stator flux linkage at very low speed operation. Besides, this observer is very simple in structure, neither PI regulator nor nonlinear saturation limiter block included, robust to motor parameters uncertainty, suitable for application where the motor flux is required to vary or not to vary during operation and easy to implement in the industrial application. The experiment was implemented by the DTC controller in a 2 kW PMSM setup via a digital signal processor (DSP). The results indicate that the proposed observer can estimate accurately the stator flux linkage including its amplitude and phase angle when motor running at a very low frequency of 0.7 Hz and at the rating frequency of 100 Hz. The high performance operation for PMSM DTC using proposed flux observer has been achieved with satisfaction in laboratory.

KEY WORDS: Nonlinear perpendicular compensation; Stator flux linkage observer; Permanent magnet synchronous motor; Direct torque control(DTC); Filter

摘要: 提出一种适合永磁同步电机直接转矩控制的非线性正交反馈补偿定子磁链观测器,从确保磁链和反电势正交的角度出发,保证电机在宽运行范围定子磁链观测的准确性,能

有效解决传统磁链观测器存在的直流漂移、磁场饱和及电机极低速运行时磁链观测不准等问题。新型观测器结构简单,无需 PI 调节,没有非线性饱和和限幅环节,对电机参数鲁棒性好,且易于工程实现。针对一台 2 kW 永磁同步电机,采用数字信号处理器 DSP 对所提出的观测器进行了数字化实现。实验表明,该观测器能在宽速度范围内精确地估算电机定子磁链,实现永磁同步电机直接转矩控制系统的高性能控制。

关键词: 非线性正交补偿; 定子磁链观测器; 永磁同步电机; 直接转矩控制; 滤波

1 引言

永磁同步电机直接转矩控制(DTC)是一种电机磁链、转矩的直接自控制方式,能否对定子磁链的幅值、相位准确观测,直接影响直接转矩控制效果和电机运行性能。分析表明:假如磁链位置观测准确但幅值观测不准,会造成其幅值应该增大时反而减小,或者幅值应该减小时反而增大两种异常情况,前者将导致转矩输出能力减弱,后者会导致气隙磁场饱和、定子电流畸变、转矩输出过大,这两种情况都会导致转矩脉动增大、速度波动,影响系统运行稳定性;假如磁链幅值观测准确而相位观测不准,根据电磁转矩为电流矢量和定子磁链矢量叉积的概念,也会导致输出转矩过大或过小,影响系统运行性能。如果相位观测误差大于 $\pm 30^\circ$,则会在错误的扇区里选择电压矢量,最终导致控制失败。

目前,定子磁链观测方法大体有以下几种:①直接计算法^[1-2],该方法简单、动态响应快,但依赖

基金项目: 国家自然科学基金项目(50237030)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50237030).

电机参数较多,且基于开环而无补偿,会导致计算结果随电机运行工况变化而不准确;②基于各种观测器的方法^[3-10],估计系统状态时,为使系统全局稳定,在不同的运行速度范围观测器须采取不同增益矩阵。该方法受电机参数影响很大,需要额外设置在线状态观测器来实时估计电机参数,致使系统结构复杂;③基于反电势积分方法^[11-14],这种方法仅依赖电机定子电阻参数,实现非常简单,但是低速性能不好。磁链观测器的设计原则是尽量少用或不用电机本身参数,避免状态观测随运行状态变化。对此,文献[15]提出三种基于反电势积分的磁链观测器改进方案,第一种方案在实际运行中仍然会有磁链直流偏移或者扭曲等问题;第二种方案须特别注意饱和限幅值的设置,且仅能用于恒磁通控制;第三种方案没有考虑直接转矩控制下反电势是非连续跳变信号这个实际情况,因此并不适合DTC运行,而且观测器中还含有PI调节器和非线性饱和模块,增加了调试难度。永磁同步电机直接转矩控制有其自身的特点,其所加空间电压矢量并不连续,是一种离散信号,但其定子电流绕组电感存在而不能突变,定子电阻压降也不会突变,故其反电势也为非连续的离散信号。针对这种特点,本文设计了一种新型的适合永磁同步电机直接转矩控制运行的非线性正交反馈补偿磁链观测器,通过检测反电势和磁链的正交程度来控制补偿程度,进而决定出磁链的反馈值。该观测器算法不含PI调节,无饱和限幅模块,调节快速,易于实现,能适合恒磁通和弱磁运行。实验运行验证了这种新型磁链观测器的正确性和实用性。

2 传统反电势积分器及其改进算法

定子磁链的传统反电势积分算法是

$$y_s = \int_0^t (u_s - Ri_s)dt + y_0 \quad (1)$$

其中, u_s 、 i_s 、 y_0 分别为定子电压矢量、电流矢量、初始磁链矢量,永磁同步电机初始磁链矢量由转子永磁体激励产生。反电势积分算法计算简单、响应快,仅依赖电机定子电阻唯一参数,但缺点非常明显,因为测量噪声和测量误差在一定时间内的积分表现为恒定直流量,引起磁链漂移,致使定子磁链矢量 y_s 运动轨迹不再是以原点为中心的一个圆,此时电机定子电流中含有直流分量,影响电机正常运行。此外,初始磁链矢量设置准确与否也影响磁链观测准确性。

消除纯积分器引起的直流漂移最简单方法是让按式(1)计算出的 y_s 通过一个高通滤波器变为 y_{so} ,如图1所示。

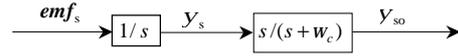


图1 磁链高通滤波

Fig. 1 High-pass filter of flux linkage

图中 emf_s 为检测出的反电势 ($u_s - Ri_s$)。将图1中的积分环节和高通环节合并,得到一个低通环节,如图2所示。图2表明,反电势经过一阶低通滤波后也可得到磁链的观测值。

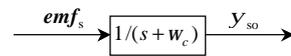


图2 反电势低通滤波

Fig. 2 Low-pass filter of back emf

$$y_{so} = \frac{1}{s + w_c} emf_s \quad (2)$$

其中, $w_c = 1/t$, 为截止频率; t 为时间常数。 t 值选取对定子磁链漂移分量的衰减速度影响很大, t 值越大,直流分量衰减越慢,且对定子磁链的基波幅值衰减和相移影响也很大。

高通滤波器的幅频响应为

$$\begin{cases} |G(jw)| = \frac{tw}{\sqrt{1+(tw)^2}} \\ \angle G(jw) = \frac{\pi}{2} - \arctgwt \end{cases} \quad (3)$$

可以看出,当定子磁链的频率很高时,信号的幅值衰减及相移均很小,系统能够正常运行。但当电机低速运行时,幅值衰减很大,相移也很大,电机磁链幅值、相位观测均不准确,致使DTC系统不能正常运行。解决的办法是低速时进行磁链幅值和相位补偿,低通补偿方式如图3所示。

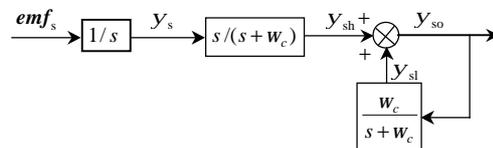


图3 具有低通补偿环节的磁链观测

Fig. 3 Flux observer with low-pass compensation

图3中, y_s 、 y_{sh} 、 y_{sl} 、 y_{so} 分别为实际磁链、高通滤波器输出磁链、低通滤波器输出磁链和实际磁链的观测值。在数字控制中,本周期实际磁链观测值 y_{so} 是实际磁链 y_s 经过高通滤波后的 y_{sh} 值,与上一周期定子磁链观测值 $y_{so(k-1)}$ 经过低通滤波

后的 y_{s1} 值之和, 即

$$y_{so} = y_s \frac{s}{w_c + s} + \frac{w_c}{w_c + s} y_{so(k-1)} \quad (4)$$

式(4)中仅当 $y_{so(k-1)} \approx y_{so}$ 时, 才有 $y_{so} = y_s$, 即磁链观测值为磁链实际值, 此时磁链观测准确。但在 DTC 控制中, 为了实现转矩的快速响应, 相邻两控制周期里选用的空间电压矢量相位差别很大, 以使定子磁链实现快速运动, 迅速改变转矩角, 所以在永磁同步电机直接转矩数字控制中, 并非任意两个相邻控制周期均有 $y_{so(k-1)} \approx y_{so}$, 因而无法保证 $y_{so} = y_s$ 。为了解决纯积分器、一阶低通滤波器和具有低通补偿环节的磁链观测不准问题, 必须提出一种适合永磁同步电机 DTC 应用的新型磁链观测器来确保磁链观测的准确性。

3 基于非线性正交反馈补偿的磁链观测器

适合永磁同步电机 DTC 应用的新型非线性正交反馈补偿磁链观测器算法可以表示为

$$y_{so} = \frac{emf_s}{s + w_c} + \frac{w_c}{s + w_c} Z \quad (5)$$

其中, Z 为磁链反馈补偿信号。若 Z 为零, 则此时积分器为一阶低通滤波器, 其作用如图 1 所示; 若 Z 为估计的磁链信号, 则式(5)执行纯积分器的功能。因此适当选取磁链补偿信号 Z , 可使新型观测器能够实现比纯积分器和一阶低通滤波器更好的性能。补偿信号 Z 可以表示为

$$Z = s_{com} y_{so} \quad (6)$$

其中, 补偿系数 s_{com} 决定于观测的磁链矢量 y_{so} 和检测出的反电势矢量 emf_s 之间的正交程度, 由下式决定

$$s_{com} = \frac{emf_a \cdot y_{ao} + emf_b \cdot y_{bo}}{|emf_s| \cdot |y_{so}|} \quad (7)$$

其中, emf_a 、 emf_b 和 y_{ao} 、 y_{bo} 分别为检测的反电势矢量和观测的磁链矢量 y_{so} 在两相静止坐标系下的分量。式(7)分子为磁链矢量和反电势矢量 emf_s 之矢量点积, 分母为磁链矢量和反电势矢量幅值乘积, 因此式(7)计算结果为两个矢量之间夹角余弦值。但永磁同步电机 DTC 中, 反电势 emf_a 、 emf_b 为非连续的跳变信号, 因此如果直接采用跳变的反电势 emf_a 、 emf_b 和磁链观测值 y_{ao} 、 y_{bo} 直接矢量点积, 不能得到连续的补偿系数 s_{com} , 故首先需要对反电势进行平滑处理, 这可在

反电势 emf_a 、 emf_b 后添加一惯性环节, 获得连续信号 emf'_a 、 emf'_b 。增加惯性环节会引起反电势相移, 因此磁链观测值 y_{ao} 、 y_{bo} 也必须经过相同惯性环节使输出的磁链 y'_{ao} 、 y'_{bo} 保持与反电势有相同的相移。因此式(7)应改为

$$s_{com} = \frac{emf'_a \cdot y'_{ao} + emf'_b \cdot y'_{bo}}{|emf'_s| \cdot |y'_{so}|} \quad (8)$$

式(8)用来对磁链和反电势正交程度进行检测。按此可获得适合 DTC 应用的新型非线性正交反馈补偿磁链观测器结构, 如图 4 所示。

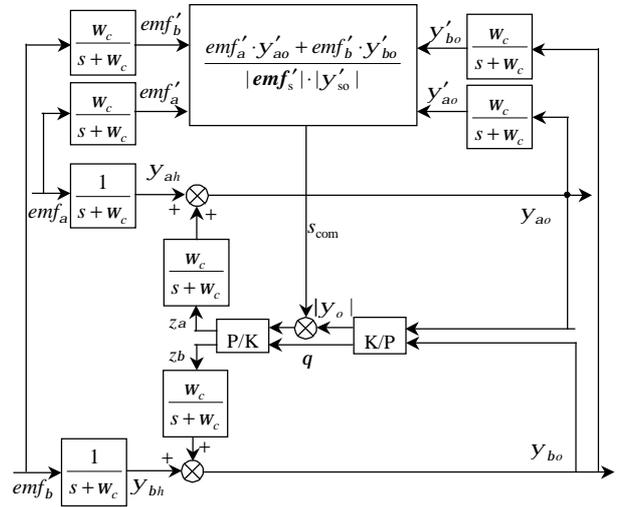


图 4 基于非线性正交反馈补偿磁链观测器
Fig. 4 Nonlinear perpendicular flux observer with compensation feedback

按图 4 结构, 数字控制中上一周期观测的定子磁链 y_{ao} 、 y_{bo} 通过 K/P(笛卡儿坐标系到极坐标系)变换得到磁链幅值 $|y_o|$ 和相位角 q 。补偿系数 s_{com} 和磁链幅值 $|y_o|$ 相乘得到反馈磁链信号 Z 的幅值, 再一次通过极坐标到笛卡儿坐标系的 P/K 逆变换, 可得到磁链补偿信号 z_a 、 z_b 。显然, 磁链反馈补偿大小决定于磁链和反电势的正交程度, 通过两次坐标变换还可保证上一周期观测的定子磁链角 q 在本周期计算中保持不变, 即上一周期观测的磁链角 q 等于笛卡儿坐标系下磁链补偿信号 z_a 、 z_b 的磁链角。

由于磁链是反电势的积分, 若磁链观测准确, 观测的磁链与反电势必正交, 则图 4 中的补偿系数 s_{com} 、磁链反馈补偿信号 z_a 、 z_b 均应为零, 表明此时磁链无需反馈补偿; 若反电势和观测的磁链不正交, 则补偿系数 s_{com} 不为零, z_a 、 z_b 也不为零, 表明磁链需要反馈补偿。这种通过判断磁链与反电

势正交程度来决定磁链补偿的磁链观测器概念清晰,结构简单,无需PI调节,无非线性饱和限幅,易于工程实现,可以用于恒磁通和变磁通运行。

4 实验研究

将这种非线性正交反馈补偿磁链观测器应用于一台永磁同步电机直接转矩控制,实验电机参数如附录所示。图5~图8为系统从极低速到额定转速全速度范围内运行的实验结果。图5为给定转速14r/min、负载转矩5N·m时的定子磁链、电磁转矩、转子转速曲线,此时系统的运行频率仅0.7Hz(额定频率100Hz)。从图5(a)和图5(b)可看出,磁链的正弦度较好,极低速下能够正常运行。图6和图7分别对应转速给定125r/min和1000r/min低、中速运行时的磁链、转矩和转速响应曲线,可以看出,随着转速升高,磁链的正弦性得到改善。图8为额定转速给定2000r/min(对应额定频率100Hz)系统运行时的波形曲线。图9为转矩给定从5N·m到-5N·m再到5N·m跃变时转矩响应和转矩响应的局部放大图。图9(a)表明转矩响应能迅速跟踪转矩给定,图9(b)表明转矩的动态响应时间很短(1.2ms)。可以看出,采用这种新型磁链观测器的永磁同步电机DTC系统不但能在宽广的速度范围内稳定运行,而且保持了DTC转矩响应迅速的优点,表明本文提出的新型磁链观测器适合在永磁同步电机DTC系统中应用。

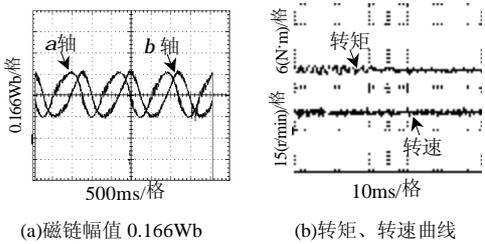


图5 系统磁链、转矩及转速曲线
Fig. 5 Flux linkage, torque and speed response

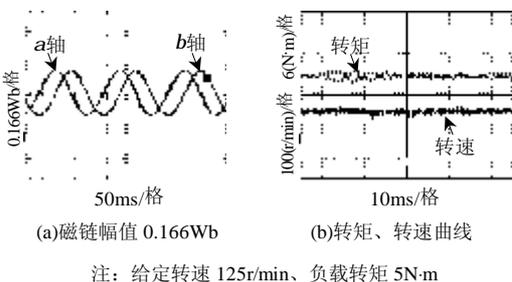


图6 系统磁链、转矩及转速曲线
Fig. 6 Flux linkage, torque and speed response

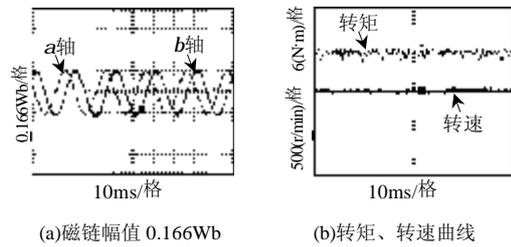


图7 系统磁链、转矩及转速曲线
Fig. 7 Flux linkage, torque and speed response

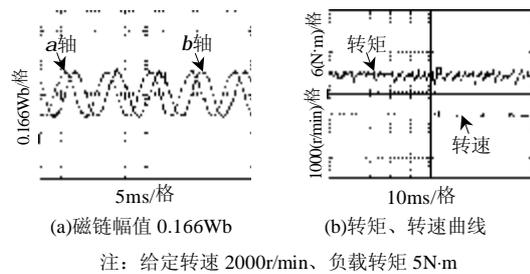


图8 系统磁链、转矩及转速曲线
Fig. 8 Flux linkage, torque and speed response

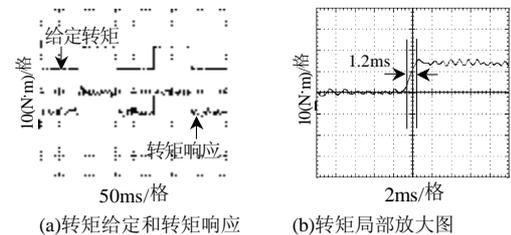


图9 转矩给定从5N·m到-5N·m再到5N·m跃变时
转矩响应和转矩局部放大
Fig. 9 Torque variation from 5N·m to -5N·m and back to
5N·m and the enlarged torque response

5 结论

(1) 为获得永磁同步电机DTC快速的转矩响应,在前后两个数字控制周期里所加的空间电压矢量往往相位差很大,致使永磁同步电机反电势是跳变的非连续信号。传统的定子磁链观测器没有考虑到这一断续的特性,因此用于永磁同步电机DTC的定子磁链观测有相当大误差。

(2) 永磁同步电机DTC系统中,磁链观测的准确性可通过与反电势的正交性来判断。若观测的磁链和反电势不交,则必须进行磁链补偿;若观测的磁链和反电势正交,则无需磁链补偿。但永磁同步电机DTC反电势跳变非连续,必须对其加以平滑使之连续才可和磁链矢量进行矢量点积,进而检测磁链矢量和反电势矢量的正交程度,通过检测正交程度来控制补偿程度,决定磁链的反馈值。

(3) 从确保磁链、反电势正交的角度出发设

计的磁链观测器保证了永磁同步电机 DTC 系统在极低速 0.7Hz 到高速额定频率 100Hz 的转速范围内定子磁链能被精确地估算, 电机运行稳定可靠, 且同样保持了永磁同步电机 DTC 转矩响应快和系统鲁棒性强的优点, 实现了 DTC 直接转矩控制系统的高性能控制。这种观测器概念清晰, 结构简单, 易于实现。

参考文献

- [1] Marchesoni M, Segarich P, Soressi E. A simple approach to flux and speed observation in induction motor drives[J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1997, 4(4): 528-535.
- [2] Maidu M, Bose B K. Rotor position estimation scheme of a permanent magnet synchronous machine for high performance variable speed drive[C]. Houston, TX: IEEE IAS annual meeting, 1992.
- [3] Choi Youn-Ok, Lee Kang-Yeon. Performance analysis of the DTC using a closed loop stator flux observer for induction motor in the low speed range[C]. Shenyang: ICEMS 2001, 2001.
- [4] 余涛, 朱守真, 沈善德, 等. 基于扩张状态观测器的电力系统非线性鲁棒谱调控制[J]. 中国电机工程报, 2004, 24(4): 1-5.
Yu Tao, Zhu Shouzhen, Shen Shande, et al. Extended state observer based nonlinear robust coordinated control of power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 1-5.
- [5] 韩忠旭. 增量式函数观测器的概念及其状态反馈控制系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 210-216.
Han Zhongxu. Concept of increment function observer and its application in state feedback control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 210-216.
- [6] Hur N, Hong K, Nam K. A robust adaptive sensorless field-oriented control using a modified stator flux observer[C]. St. Louis, MO: PESC '97 Record, 28th Annual IEEE, 1997.
- [7] 郭卫农, 陈坚. 基于状态观测器的逆变器数字双环控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 64-68.
Guo Weinong, Chen Jian. Study on digital dual-loop control for inverters based on state observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 64-68.
- [8] 张昌凡, 王耀南, 何静. 永磁同步伺服电机的变结构智能控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 13-17.
Zhang Changfan, Wang Yaonan, He Jing. Variable structure intelligent control for PM synchronous servo motor drive[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 13-17.
- [9] 王江, 李韬, 曾启明, 等. 基于观测器的永磁同步电动机微分代数非线性控制[J]. 中国电机工程报, 2005, 25(2): 87-92.
Wang Jiang, Li Tao, Tsang K M, et al. Differential algebraic observer-based nonlinear control of PM synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 87-92.
- [10] 夏长亮, 李正军, 杨荣, 等. 基于自抗扰控制器的无刷直流电机控制系统[J]. 中国电机工程报, 2005, 25(2): 82-86.
Xia Changliang, Li Zhengjun, Yang Rong, et al. Control system of brushless DC motor based on active-disturbance rejection controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 82-86.
- [11] Hu Yuwen, Tian Cun, Gu Yikang. In-depth research on direct torque control of permanent magnet synchronous motor[C]. Seville Spain: IECON 02 Industrial Electronics Society, 2002.
- [12] Li Lianbing, Sun Hexu, Wang Xiaojun. A high-performance direct torque control based on DSP in permanent magnet synchronous motor drive[C]. Shanghai: ICA 2002. Proceedings of the 4th World Congress, 2002.
- [13] Zhong L, Rahman M F, Hu W Y. A direct torque controller for permanent magnet synchronous motor drives[C]. Seville, Spain: IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 637-642.
- [14] Sun Dan, Fang Weizhong, He Yikang. Study on the direct torque control of permanent magnet synchronous motor drives [C]. Shenyang: ICEMS 2001, Proceedings of the Fifth International Conference, 2001.
- [15] Hu Jun, Wu Bin. New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 1998, 13(5): 969-977.

附录

电机参数:

额定电压 $U_N=128\text{V}$; 额定电流 $I_N=15.8\text{A}$; 额定转速 $n_N=2000\text{r/min}$; 交、直轴电感 $L_d = L_q=15.3\text{mH}$; 定子电阻 $R_s=0.56\Omega$; 极对数 $p=3$; 永磁体 $\psi_f=0.1663\text{W}$ 。

收稿日期: 2005-10-28。

作者简介:

贾洪平 (1972-), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 研究方向为电机及其控制;

贺益康 (1941-), 男, 湖南人, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制。

(责任编辑 云爱霞)