

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.08.025

改进的三相感应电机直接转矩控制建模与仿真^{*}

谢 莉¹, 蒋 伟¹, 周斌欣², 吴 松¹

(1. 扬州大学 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 扬州大得机电科技有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘要:针对传统直接转矩控制中,磁链溢出和转矩脉动大等问题,对三相感应电机直接转矩控制进行了研究,提出了基于电压空间矢量 PWM 的新型控制方法。首先,根据转速的变化量产生电磁转矩的目标,然后根据定子磁链的变化量计算出电压矢量的大小,利用转矩的变化量确定电压矢量的方向,再经过电压矢量 PWM 逆变得到电机的三相输入电压,完成整体控制。该方法克服了传统方法的缺点,对磁链的控制完全定量,较好地实现了磁链轨迹圆形控制,最后利用 Matlab/Simulink 软件搭建了系统仿真模型,验证了该方法的有效性。研究结果表明,磁链幅值保持恒定,转矩脉动小,系统响应速度快,暂态时间短,能够有效地模拟真实系统,充分证明了其优越性和有效性。

关键词:三相感应电机;直接转矩控制;磁链;转矩

中图分类号:TH39;TM343

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)08-1132-04

Modeling and simulation of improved induction motor direct torque control

XIE Li¹, JIANG Wei¹, ZHOU Bin-xin², WU Song¹

(1. School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

2. Dade technology mechanical and Electrical Technology company, Yangzhou 225000, China)

Abstract: Aiming at the problem of flux overflow and torque ripple spill in the traditional direct torque control, the three-phase induction motor direct torque control was studied. New control method based on voltage space vector PWM was proposed. First of all, the target electromagnetic torque was generated by the amount of change of speed. Then, the magnitude of the voltage vector was calculated according to the amount of change of stator flux. The direction of the voltage vector was determined using the amount of change of torque. The three-phase input voltage was gained through the voltage vector PWM inverter to complete the overall control. The method overcame the shortcomings in traditional methods. The stator flux was controlled quantitatively, and the better circular flux trajectory control was achieved. At last, a system model was built based on Matlab/Simulink software. The results indicate that the system has stable flux magnitude, low torque ripple, fast response speed, short transient time, and can simulate the real system ideally and effectively.

Key words: induction motor; direct torque control; flux; torque

0 引 言

随着现代电力电子、微电子技术和控制理论的发展,交流电机调速性能日益完善,足以和直流调速相媲美,被广泛应用于工农业生产、交通、国防和日常生活中^[1-4]。

直接转矩控制直接将定子磁链和转矩作为控制变

量,无需进行磁场定向、矢量变换和电流控制,因此更为简捷和快速^[5-7]。目前,它已成为各种交流调速方法中研究最多、应用前景最广的交流调速方法之一^[8]。

直接转矩控制技术最早由德国鲁尔大学教授 M. Depenbrock 提出。后来的学者针对直接转矩控制方法提出了很多改进^[9-10]。

收稿日期:2015-04-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207135);江苏省自然科学基金资助项目(BK2012266);扬州大学研究生培养创新工程基金资助项目(CX1416)

作者简介:谢 莉(1991-),女,江苏泰兴人,主要从事电机控制方面的研究。E-mail:xieliwyx@163.com

通信联系人:蒋 伟,男,副教授,硕士生导师。E-mail:jiangwei@yzu.edu.cn

本研究利用 Matlab/Simulink 平台构造改进的三相感应电机直接转矩控制系统,并给出仿真结果。

1 改进的直接转矩控制原理

在定子三相轴系中,定子磁链和转子磁链矢量可表示为:

$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (1)$$

$$\psi_r = L_m i_s + L_r i_r$$

电磁转矩可表示为:

$$t_e = p \psi_s \times i_s \quad (2)$$

式中: ψ_s —定子磁链矢量, ψ_r —转子磁链矢量, i_s —定子电流矢量, i_r —转子电流矢量, L_m —励磁电感, L_s —定子电感, L_r —转子电感, p —极对数。

传统直接转矩控制由滞环比较器的输出信号来确定磁链和转矩的变化量,根据两者的变化量及磁链所在扇区直接选择两个相邻电压矢量。该方法仅仅是一个定性的分析,并未作定量计算,在运行过程中容易出现超出现象,且频率不固定,实际生产中不易实现。本研究针对其缺点进行了改进,计算出了确定的电压矢量及其所在扇区,将其分解为该扇区两个相邻矢量,并准确计算出两个矢量的作用时间,不会出现溢出现象。

控制原理如图 1 所示。

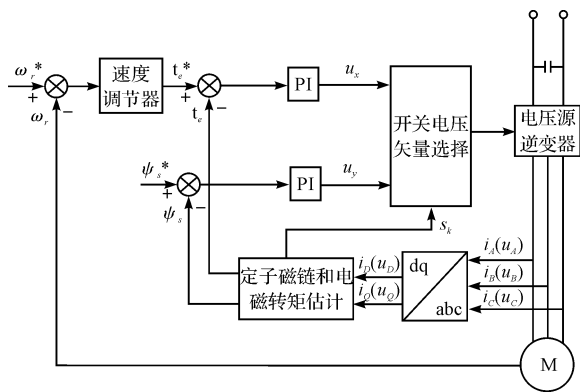


图1 直接转矩控制系统原理图

本研究利用测得的电流和电压矢量辨识定子磁链和转矩,与磁链和转矩给定值相比较后,将其差值分别输入两个 PI 控制器,分别产生电压矢量的两个分量 u_x 、 u_y ,将两个矢量分量合成后得到电压矢量的幅值和角度,进而控制磁链和转矩。

2 系统仿真模型

本研究根据改进的直接转矩控制理论和系统原理图,利用 Matlab/Simulink2010b 构建了仿真模型。

2.1 dq 变换

为满足 ABC 轴系定子三相电流 i_A 、 i_B 和 i_C 产生的

磁动势与两相定子电流 i_D 和 i_Q 产生的磁动势相等,可得

$$\begin{pmatrix} i_D \\ i_Q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.2 定子磁链和电磁转矩估计模型

定子磁链估计采用电压-电流模型,本研究通过其 dq 分量来估计其幅值和相位:

$$\psi_D = \int (u_D - R_s i_s) dt \quad (4)$$

$$\psi_Q = \int (u_Q - R_s i_Q) dt$$

式中: u_D 、 u_Q 、 i_D 、 i_Q — dq 轴系的坐标变化而得; R_s —定子绕组电阻阻值。

则定子磁链可表示为:

$$|\psi_s| = \sqrt{\psi_D^2 + \psi_Q^2} \quad (5)$$

$$\rho_s = \arccos \frac{\psi_D}{|\psi_s|} \quad (6)$$

由式(2)可以得到电磁转矩的估计值,即有:

$$t_e = p \psi_s \times i_s = p (\psi_D i_Q - \psi_Q i_D) \quad (7)$$

式中: ψ_D 、 ψ_Q —估计值; i_D 、 i_Q —实测值; ρ_s —定子磁链的角度。

2.3 定子磁链和电磁转矩调节器

本研究将估算得到的定子磁链和转矩与对应的给定值相比较,将其差值输入两个 PI 控制器,分别产生电压矢量的两个分量 u_x 、 u_y ,定子磁链调节器如图 2 所示。

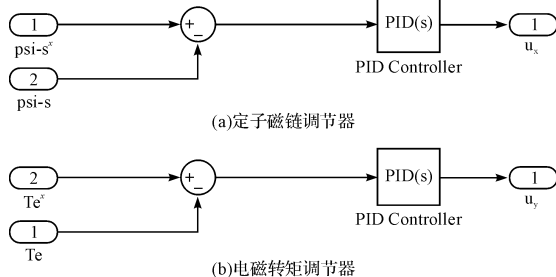


图2 定子磁链、电磁转矩调节器

2.4 电压矢量选择

本研究将磁链调节器和电磁转矩调节器产生的电压矢量分量 u_x 和 u_y 进行合成,得到 u_{xy} 的大小和方向,再将 u_{xy} 分解到所在扇区的相邻两个分量 u_{sk} 、 u_{sk+1} 。各扇区电压矢量分解图如图 3 所示。

以第一扇区为例,如图 3(a)所示,根据正弦定理可知:

$$\frac{|u_{xy}|}{\sin 120^\circ} = \frac{u_m}{\sin(180^\circ - 120^\circ - \theta)} = \frac{u_n}{\sin \theta} \quad (8)$$

式中: u_m —向量 u_{s1} 的长度, u_n —向量 u_{s2} 的长度。

进而可得:

$$u_m = \frac{|u_{xy}|}{\sin 120^\circ} \cdot \sin(60^\circ - \theta) \quad (9)$$

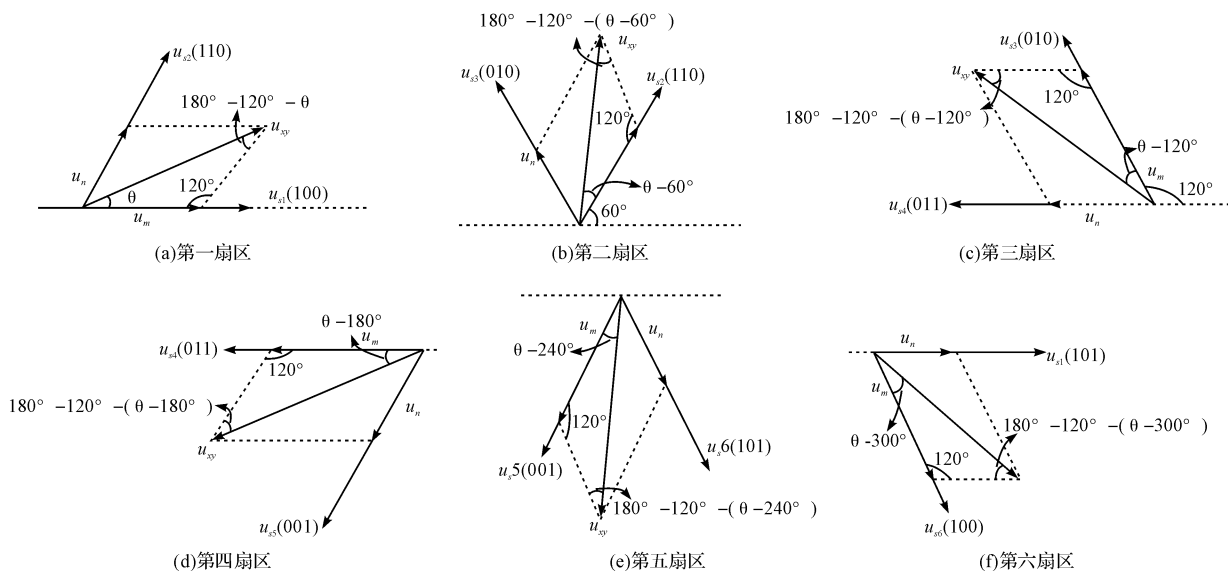


图 3 各扇区电压矢量分解图

$$u_n = \frac{|u_{xy}|}{\sin 120^\circ} \cdot \sin \theta \quad (10)$$

$$t_1 = \frac{u_m}{|u_{xy}|}, t_2 = \frac{u_n}{|u_{xy}|}, t_0 = T - t_1 - t_2 \quad (11)$$

式中: T —PWM 周期, t_1 —向量 u_{s1} 的作用时间, t_2 —向量 u_{s2} 的作用时间, t_0 —零矢量的作用时间。

根据各电压矢量分量可以合成三相电压:

$$\begin{cases} u_A = t_1 \cdot U_{dc} + t_2 \cdot U_{dc} + t_0 \cdot 0 \\ u_B = 0 \cdot U_{dc} + t_2 \cdot U_{dc} + t_0 \cdot 0 \\ u_C = 0 \cdot U_{dc} + 0 \cdot U_{dc} + t_0 \cdot 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: U_A, U_B, U_C —逆变器输出 A、B、C 三相电压; U_{dc} —电压源逆变器的直流输入。

其他扇区计算与此类似, 此处不再赘述。

4 仿真结果及分析

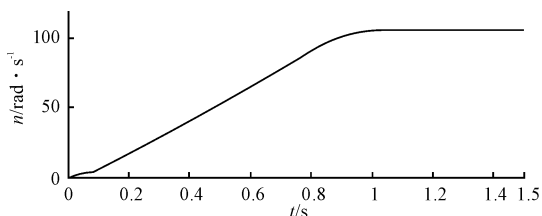
仿真所用交流电机参数:

额定功率 $P_N = 75 \text{ kW}$, 额定电压 $V_N = 400 \text{ V}$, 额定电流 $I_N = 184 \text{ A}$, 额定频率 $f = 50 \text{ Hz}$, 额定转速 $n_N = 1484 \text{ r/min}$, 极对数 $p = 2$, 定子电阻 $R_s = 0.03552 \text{ ohm}$, 转子电阻 $R_r = 0.02092 \text{ ohm}$, 定子漏感 $L_s = 0.000335 \text{ H}$, 转子电感 $L_r = 0.000335 \text{ H}$, 定转子之间互感 $L_m = 0.0151 \text{ H}$, 额定磁链为 1 Wb 。参考速度为 $350 \text{ r/min}^{[11]}$ 。

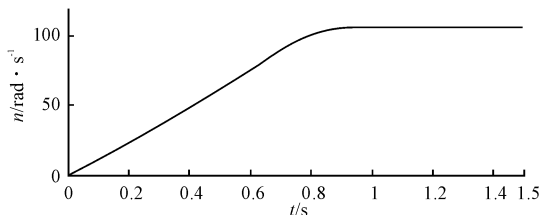
实际仿真中, 磁链给定 0.8 Wb , 转速给定值为 110 rad , 笔者将传统直接转矩控制方法与本研究提出的方法进行对比。

转速曲线如图 4 所示。

由图 4(a)、4(b) 可以看出, 传统方法需要 0.9 s 转速才能达到给定, 而本研究提出的方法只需 0.8 s 即



(a) 传统方法下的转速曲线



(b) 笔者方法下的转速曲线

图 4 转速曲线

可, 响应速度明显较快, 且能保持为 110 rad/s 。

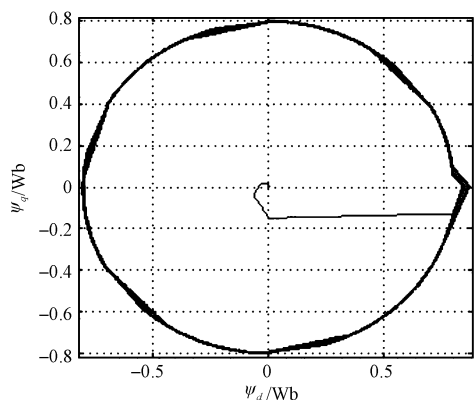
磁链轨迹如图 5 所示。

由图 5(a)、5(b) 可以看出, 本研究提出的方法比传统方法的磁链轨迹更圆, 且没有超出现象。

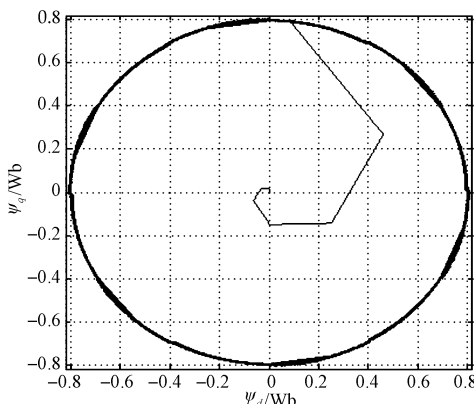
电磁转矩曲线如图 6 所示。

由图 6(a)、6(b) 可以看出, 恒负载 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ 下, 传统控制方法转矩脉动接近 $30 \text{ N} \cdot \text{m}$, 波动较大, 本研究提出的方法响应快, 稳定后转矩保持给定, 基本无波动。

综上, 采用本研究提出的方法, 转速和转矩在很短的时间内达到给定值并保持稳定, 磁链轨迹满足圆形, 且波动小于 $\pm 4\%$ 。由此可见, 采用本研究提出的直接转矩控制方法, 三相感应电机具有响应速度快、暂态时间短、波动小、磁链幅值保持恒定和系统性能受转子参数影响小等优点, 充分证明了其优越性和有效性。但该

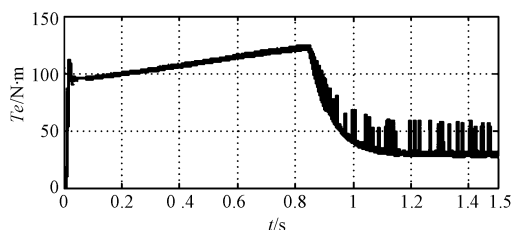


(a)传统方法下的磁链轨迹

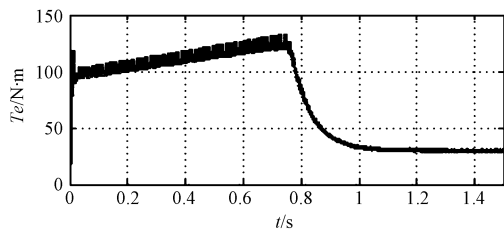


(b)笔者方法下的磁链轨迹

图5 磁链轨迹



(a)传统方法下的电磁转矩曲线



(b)笔者方法下的电磁转矩曲线

图6 电磁转矩曲线

控制方法也有其不足之处,即稳定过程中电磁转矩也有纹波存在,这可以通过调节控制器参数来加以改善。

4 结束语

本研究针对传统直接转矩控制的缺点进行了改进,提出了新型的控制方案,计算出了确定的电压矢量大小和方向,不会出现溢出现象,磁链和转矩脉动小;利用 Matlab/Simulink 构造了改进的三相感应电机直接转矩控制系统模型,并给出了仿真结果。

仿真结果证明,三相感应电机具有响应速度快、暂态时间短,波动小、磁链幅值保持恒定、系统性能受转子参数影响小等优点,该方法能够高速、有效地实现定子磁链定向和转速调节,较好地实现了磁链和转矩控制。

参考文献 (References):

- [1] 朱军丽. 基于模糊控制的交流电机直接转矩控制研究[D]. 沈阳:东北大学信息科学与工程学院,2013.
- [2] 李 玥,解大琴. 三相交流电机直接转矩控制研究[J]. 宝鸡文理学院学报:自然科学版,2013,33(2):45-48.
- [3] 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,2011,39(9):145-154.
- [4] 郭建华. 三相交流电机直接转矩控制研究[J]. 科技风,2014(13):59.
- [5] 王德友,田运涛,熊维兵. 交流电机直接转矩控制策略的分析与比较[J]. 机电技术,2012(5):107-110.
- [6] 李海军,卢云峰. 电动自卸车驱动电机直接转矩控制系统的实现[J]. 长春理工大学学报(高教版),2010,5(2):169-170.
- [7] 王 琳. 矢量控制与直接转矩控制技术[J]. 价值工程,2014(28):64-65.
- [8] 刘昆汶,郭俊宇,赵 鑫. 基于 DTC 技术的交流电机控制方法研究[J]. 机械工程与自动化,2011(3):202-205.
- [9] 张 伟. 直接转矩控制系统的仿真研究[J]. 黑龙江科技信息,2011(17):18.
- [10] 陈 静,张省伟. 交流电机直接转矩控制改进方案[J]. 电子设计工程,2009,5(17):112-114.
- [11] 张 莹. 交流电机变频调速控制的设计[J]. 机械制造与自动化,2013(4):152-155.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

谢 莉,蒋 伟,周斌欣,等. 改进的三相感应电机直接转矩控制建模与仿真[J]. 机电工程,2015,32(8):1132-1135.

XIE Li, JIANG Wei, ZHOU Bin-xin, et al. Modeling and simulation of improved induction motor direct torque control[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(8):1132-1135.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>