

永磁同步电机 FOC与 DTC控制策略原理和仿真的比较

郝晓弘 魏祥林*

(兰州理工大学电信学院, 兰州 730050)

摘 要 磁场定向控制 (FOC)和直接转矩控制 (DTC)作为交流电动机的两种高性能控制策略,在实际中得到了广泛的应用。从永磁同步电机的数学模型出发,对两种控制策略进行了理论分析与推导,证明了两者的共同理论基础,只是由于在两种控制策略的具体实现方法上,DTC中定子绕组上得到的是离散的电压空间矢量,造成了两者控制性能上的巨大差异。最后将两种策略应用于永磁同步电机 (PMSM)的控制,Simulink建模与仿真的结果证明了两者的控制性能上的差异。

关键词 磁场定向控制 直接转矩控制 永磁同步电机
中图分类号 TM341 **文献标志码** A

20世纪 70年代,德国西门子公司 F Blaschke等提出的“感应电机磁场定向的控制原理”和美国 P C Cusman与 A A Clark申请的专利“感应电机定子电压的坐标变换控制”奠定了矢量控制的基础。其主要思想就是通过坐标变换将异步电动机等效为一台直流电动机,从而像直流电动机那样进行快速地转矩和磁链控制,因此矢量控制也被称为解耦控制或磁场定向控制 (Field-Oriented Control)^[1]。

1985年,德国学者 M Depenbrock首次提出了直接转矩控制 (Direct Torque Control)理论,随后日本学者 I Takahashi也提出了类似的控制方案。与矢量控制不同,直接转矩控制摒弃了解耦的思想,取消了坐标变换,将电动机的磁链和转矩的给定值与实际值进行比较,根据比较结果选择作用到电动机上的不同的电压空间矢量,从而实现磁链和转矩的直接控制^[1]。

磁场定向控制 (FOC)与直接转矩控制 (DTC)

作为当前交流电动机的两种高性能的控制策略,最初仅用于异步电动机的控制,近几年现已经被扩展到同步电动机、永磁同步电动机的控制上。

众多文献^[1-6]多集中在对这两种控制策略的独立研究上,而缺少对两者的比较研究。本文在在对两种策略进行理论分析的基础上,证明了它们之间存在共同的理论基础和内在联系,并找到了两者性能存在差异的本质原因。然后将两者分别应用于永磁同步电机 (PMSM)的控制,建立了各自的 Simulink仿真模型,仿真结果证明了两者的控制性能上的明显差异。

1 永磁同步电机的数学模型

假设永磁同步电机具有正弦形反电动势,磁路线性且不考虑磁路饱和,忽略电机中的涡流损耗和磁滞损耗^[2]。

取转子永磁体基波励磁磁场轴线为 d 轴, q 轴逆时针方向超前 d 轴 90° 电角度,建立 $d-q$ 转子坐标系, $d-q$ 轴系随同转子以角频率 ω_r 同步旋转。同理以定子 A相绕组的轴线为 D轴建立定子 D-Q坐标系。

永磁同步电机的空间矢量图如图 1所示。图 1

2008年3月5日收到

第一作者简介:郝晓弘(1960—),教授,博士生导师,研究方向:控制理论与应用、现代电气传动理论与技术、现场总线控制网络。

*通信作者简介:魏祥林(1978—),硕士研究生,研究方向:电机控制。E-mail:weixl2008@126.com

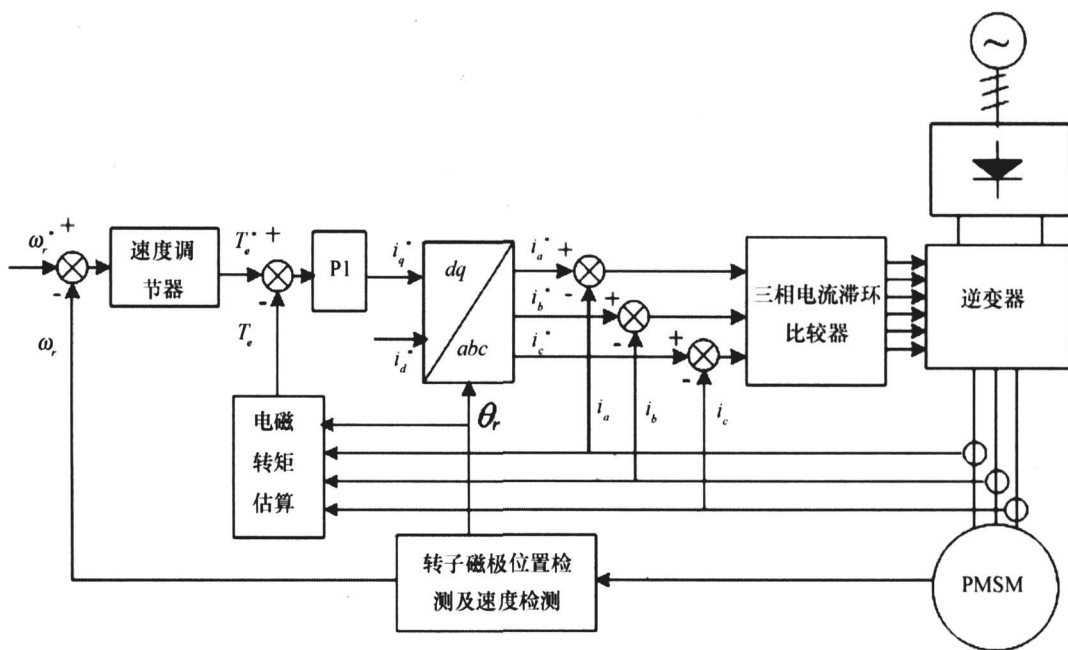


图 2 PMSM磁场定向控制系统的结构图

可见,通过给定子绕组施加不同的电压空间矢量,就可以控制定子磁链 $\vec{\psi}_s$,即可以很方便地控制定子磁链的幅值 $|\vec{\psi}_s|$ 和负载角 δ_m 。PMSM直接转矩控制系统的结构图如图3所示。

定子电压空间矢量,进而控制逆变器中功率器件的开关状态,实现对定子磁链和电磁转矩的独立控制。

对于面装式PMSM忽略凸极效应,认为 $I_d = I_q = I_s$,则转矩表达式(9)变为:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{I_s} |\vec{\psi}_s| \psi_f \sin \delta_m \quad (12)$$

2.3 FOC和DTC的内在联系

前面的分析表明,FOC和DTC这两种控制策略的实现方法和系统结构完全不同,但是可以证明它们有共同的理论基础。

分析图1可得:

$$\psi_d = |\vec{\psi}_s| \cos \delta_m \quad (13)$$

$$\psi_q = |\vec{\psi}_s| \sin \delta_m \quad (14)$$

将式(13)和式(14)分别代入式(3)和式(4)得:

$$i_d = \frac{|\vec{\psi}_s| \cos \delta_m - \psi_f}{I_d} \quad (15)$$

$$i_q = \frac{|\vec{\psi}_s| \sin \delta_m}{I_q} \quad (16)$$

再将式(15)和式(16)代入FOC的转矩表达式(5)得:

$$T_e = \frac{3}{4} \frac{P}{I_d I_q} [2 \psi_f I_q \sin \delta_m + (I_d - I_q) |\vec{\psi}_s| \sin 2 \delta_m]$$

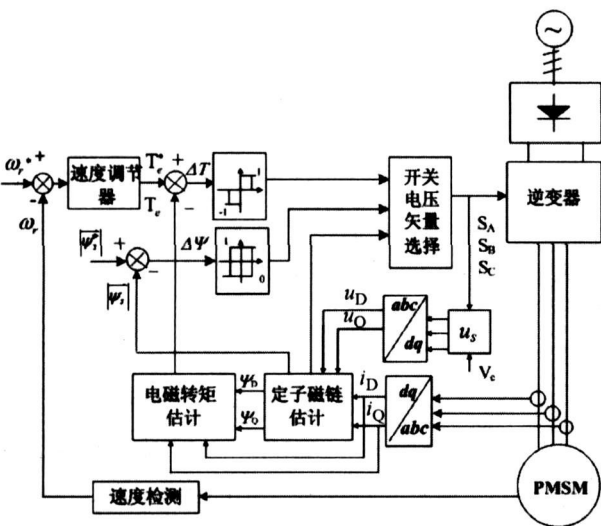


图 3 PMSM直接转矩控制系统的结构图

直接转矩控制的思想是:将通过观测得到的转矩和磁链的实际值分别与转矩和磁链的参考值作滞环比较,根据比较结果再结合实际定子磁链所在空间扇区,从一个离线计算的开关表中选择合理的

此式即为 DTC的转矩表达式(9)。

此推导过程证明:FOC和 DTC两种控制策略都是从共同的 PMSM数学模型出发,具有共同的理论基础。

由图 1还可得:

$$\dot{i}_d = |\vec{i}| \cos\beta \quad (17)$$

$$\dot{i}_q = |\vec{i}| \sin\beta \quad (18)$$

将式(17)和式(18)代入 FOC的转矩表达式(5)得:

$$T_e = \frac{3}{2} \left[\psi_f |\vec{i}| \sin\beta - \frac{1}{2} (L_q - L_d) |\vec{i}|^2 \sin 2\beta \right] \quad (19)$$

(19)式说明, PMSM的 FOC正是通过对定子电流矢量的直轴分量 \dot{i}_d 和交轴分量 \dot{i}_q 的控制实现了对定子电流矢量幅值 $|\vec{i}|$ 和相位 β 的控制,进而实现对电磁转矩的控制。

比较式(9)和式(19)可以看出,两者虽有非常相似的形式,但前者是以定子磁链矢量 $\vec{\psi}_s$ 和负载角 δ_m 表征电磁转矩的,而后者是利用定子电流矢量 \vec{i} 和转矩角 β 表征电磁转矩的。

实际上由式(15)和式(16)可知,当定子磁链矢量的幅值 $|\vec{\psi}_s|$ 或负载角 δ_m 发生时,定子电流矢量的直轴分量 \dot{i}_d 和交轴分量 \dot{i}_q 也相应地发生变化。也就是说,当定子磁链 $\vec{\psi}_s$ 在转子坐标系中变化时,一定伴随着定子电流矢量 \vec{i} 的幅值和相位的改变,也就是控制定子磁链 $\vec{\psi}_s$ 的实质是在间接地控制定子电流矢量 \vec{i} 。

由式子(13)和(14)可得:

$$|\vec{\psi}_s| = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2} = \sqrt{(L_d \dot{i}_d + \psi_f)^2 + (L_d \dot{i}_q)^2} \quad (20)$$

$$\delta_m = \arctan \frac{\dot{i}_q}{\dot{i}_d} \quad (21)$$

综合式(17)、式(18)、式(20)和式(21)共同说明:当定子电流矢量 \vec{i} 的幅值和相位的改变必然引起定子磁链 $\vec{\psi}_s$ 的幅值和负载角的变化。也就是说 FOC系统通过定子电流对转矩进行控制,实际上相当于 DTC系统中改变定子磁链实现了转矩控制。

上面的分析证明,FOC和 DTC从理论上是相通的,具有共同的数学模型和理论基础。如果在 DTC中按式子(9)使定子磁链能够连续变化,则 DTC与 FOC的控制性能是一样的。而实际的 DTC系统中,对定子磁链的控制是通过选择有限的几个离散电压空间矢量来实现的,这样就难以保证对转矩的精确控制。

在 FOC中,正是由于能够保证定子电流矢量的准确和连续变化,因此定子磁链可以做到连续控制,因此对转矩的控制是一种连续精确的控制。但是在 FOC中,为了控制定子电流矢量要进行定子电流的坐标变换,这就增加了 FOC实现的复杂性;同时要实现磁场定向,这也给 FOC的实现带来了困难;FOC中转矩调节器的时间常数使得 FOC系统速度响应较 DTC系统慢^[6]。

相对 FOC系统而言,DTC系统对转矩的控制是通过从离线建立的电压空间矢量表里选择合适的逆变器开关电压矢量来直接控制的,不需要坐标变换和磁场定向,转矩调节器采用滞环比较器,使转矩的控制更为直接,提高了系统的快速响应能力,但是这些优点是以牺牲转矩控制精度为代价的^[7]。

3 永磁同步电机 FOC和 DTC的仿真比较

为了比较 FOC和 DTC两种控制策略的控制性能,将这两种策略分别应用于同一台永磁同步电机的控制,在 MATLAB/Simulink环境下给两系统分别建立仿真模型,由仿真结果比较两者控制性能上的差异。

3.1 FOC系统和 DTC系统的仿真模型

为了便于控制性能的比较,两系统中采用具有相同参数的 P速度调节器,施加同样的负载。

永磁同步电机的参数为: $R_s = 2.875 \Omega$, $L_d = 8.5 \text{ mH}$, $L_q = 8.5 \text{ mH}$, $\psi_f = 0.175 \text{ Wb}$, $p = 4$, $J = 0.0008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

图 4和图 5分别为 PMSM的 FOC系统和 DTC系统的 Simulink仿真模型。

明显 DTC系统对转矩信号的响应速度远快于 FOC系统,但是 DTC系统中电磁转矩的脉动较 FOC系统严重,这正是转矩控制器采用滞环比较器的结果。

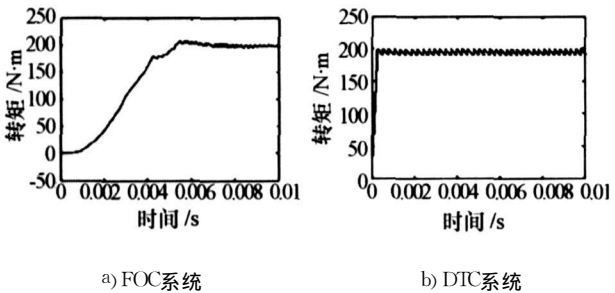


图 7 阶跃转矩信号的响应波形

图 8是两个系统稳态时的定子电流波形,可以看出 FOC系统的定子电流的脉动较 DTC系统小得多,这正是 FOC系统 DTC系统转矩脉动小的原因。

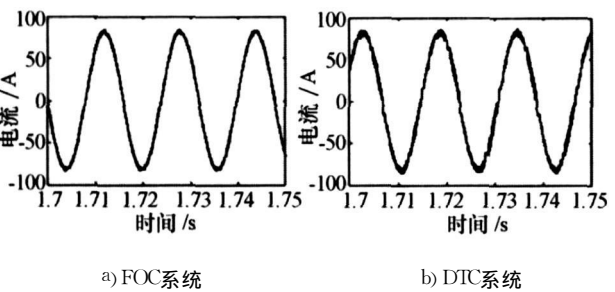


图 8 稳态时的定子电流波形

图 9是两个系统稳态时的定子磁链轨迹,可以看出 DTC系统中定子磁链的脉动较 FOC系统严重,磁链误差被限制在滞环比较器的设定环宽之内。

以上仿真结果与理论分析的结论完全一致。

4 结论

理论分析和仿真结果表明,FOC和 DTC两种控制策略在 PMSM控制中的优劣各有千秋,它们都是

从电机的数学模型出发,具有共同的理论基础,只是实现方法不同而已。

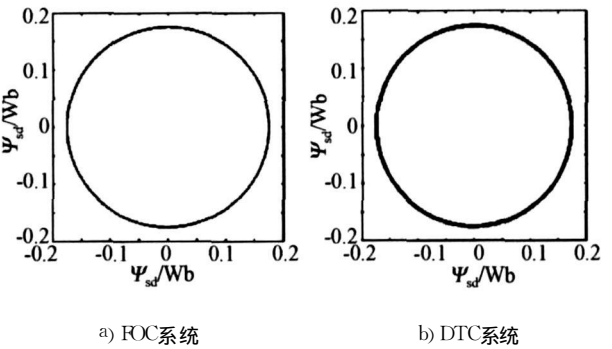


图 9 稳态时的定子磁链轨迹

直接转矩控制的优势在于结构简单、容易实现且具有较快的转矩响应速度,但是转矩和磁链的脉动比较严重。磁场定向控制的优点在于具有很高的转矩和磁链控制精度,但是它需要坐标变换和磁场定向控制,结构复杂,实现起来较为困难。

参 考 文 献

1 赵争鸣,袁立强,孟 朔,等.通用变频器矢量控制与直接转矩控制特性比较.电工技术学报,2004 19(04): 81- 84

2 王成元,夏加宽,杨俊友,等.电机现代控制技术.北京:机械工业出版社,2006 153- 161

3 梁 艳,李永东.无传感器永磁同步电机矢量控制系统概述.电气传动 2003 12(04): 4- 9

4 田 淳,胡育文.永磁同步电机直接转矩控制系统理论及控制方案的研究.电工技术学报,2002 17(01): 7- 11

5 徐艳平,钟彦儒,于宏全.基于 MATLAB的永磁同步电机直接转矩控制的仿真建模.微电机,2005 38(03): 27- 30

6 Zhong L, Hu W Y. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives. IEEE Trans on Power Electronics 1997 12 (3): 528- 536

7 VaezZadeh S, Jalelija E. Combined vector control and direct torque control method for high performance induction motor drives. Energy Conversion and Management 2007; 48 (12): 3095- 3101

Comparison between FOC and DTC on Theory and Simulation for PMSM

HAO Xiaohong WEI Xianglin*

(Lanzhou University of Technology Lanzhou 730050 P. R. China)

[Abstract] Field-Oriented Control (FOC) and Direct Torque Control (DTC) are widely used as two advanced control strategies for AC motors. Based on the model of PMSM, two strategies are theoretically analyzed and proved that they have common basis. There are sophisticated differences on performance between FOC and DTC because their differences in implement. Then both strategies are respectively applied in a permanent magnet synchronous motor and the models are set up in the Simulink. The result of the simulation indicates their advantages and disadvantages.

[Key words] field-oriented control direct torque control PMSM

(上接第 3462 页)

参 考 文 献

- 1 Chua L Q, Komuro M, Matsumoto T. The double scroll family. *IEEE Trans on Circ Syst*, 1986, 1(33): 1072-1118
- 2 Chua L Q. Chua's circuit: a paradigm for chaos. *World Scientific Series On Nonlinear Science*, 1993
- 3 高金峰, 李广明, 王俊昆. 一个新双涡卷电路倍周期分岔到混沌的计算机模拟. *电路与系统学报*, 2000, 5(4): 66-69
- 4 高金峰, 张洪. 一类分段线性电容的单运放综合及其实现. *电路与系统学报*, 2001, 6(3): 85-89
- 5 高金峰, 马西奎, 罗先觉. 非线性电容双涡卷混沌电路的 Hopf 分岔. *电工技术学报*, 2001, 16(3): 75-79
- 6 李广明, 张洪, 高金峰. 三阶非线性电容电路中的同宿轨道计算及混沌. *汕头大学学报·自然科学版*, 2005, 20(4): 36-42

Certification to a New Chaos Circuit Containing a Nonlinear Capacitor

LI Guangming, ZHANG Hong, GAO Jin-feng

(Dongguan University of Technology Dongguan 523808 P. R. China)

Central University for Nationalities, Beijing 100081 P. R. China; Zhengzhou University, Zhengzhou 450002 P. R. China)

[Abstract] The quantitative nature of a third-order autonomous circuit containing a nonlinear capacitor was discussed. With the concept of topological conjugacy a general concept of linear conjugacy and linear equivalence in piecewise linear vector field are induced. And the third-order autonomous circuit containing a nonlinear capacitor isn't linear conjugacy with Chua's circuit is proved. So the circuit is studied can be classified as a new third-order autonomous circuit in which double scroll chaos would exist.

[Key words] nonlinear capacitor chaos circuit linear conjugacy