

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2015.0010.014

矢量细分的双控制器永磁同步电机 直接转矩控制系统研究

陈 健, 凌有铸

(安徽工程大学 安徽省电气传动与控制重点实验室, 安徽 芜湖 241000)

摘 要:过去的永磁同步电动机采用六边形磁通控制或六区圆形间磁链控制间隔,从而导致转矩脉动过大等缺点;设计了一种基于矢量细分的双控制器永磁同步电机直接转矩控制系统;设计的矢量细分的控制策略是将传统意义上的六电压矢量和六个磁链扇区细分为多个电压矢量和磁链扇区,并制定相应的开关表;通过 Matlab 的仿真结果来证明矢量细分的永磁同步电机直接转矩控制策略的可行性。

关键词:永磁同步电机;直接转矩控制;矢量细分

中图分类号:TP23

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2015)10-0068-05

随着社会经济的发展,能源问题日益突出,节能环保、走可持续发展道路已经成为当前我国经济发展的一项重要战略政策,同时也是一项非常迫切的发展任务。在工业消耗中,电机一直是工业动力消耗的重要源头,因此研究电机的控制技术、提高电机运行效率对节约能源、保护环境、建立节约型社会、发展循环经济有着重要的现实。

目前,我国经济一直保持着快速发展,对电能需求也日益增大。节约能源,使能源在社会生产中得到充分应用显得越发重要。作为最主要的动力设备,电机一年耗电量大概占全国用电量的 50% 以上,占工业用电量的 70% 以上,但国产电机的性能及驱动效率却要比国外先进水平分别低 2%~5% 和 10%~30% 左右。因此,提高电机系统的性能及效率,尤其是电机拖动系统的能源效率具有非常重要的实际意义。

直接转矩控制(DTC)是一种在性能矢量控制之后兴起的交流调速控制策略,已被广泛关注。策略直接在定子坐标系中计算电机的磁链和转矩,采用滞环控制的方法对逆变器开关状态进行最优控制。与矢量控制比较,直接转矩控制具有便于实现全数字化控制、转矩响应速度快、对参数变化鲁棒性强等优点。目前,直接转矩控制方法已经广泛应用在永磁同步电机的控制上。首先讨论了永磁同步电机传统 DTC 方法中的磁链和转矩的增量,在建立定子磁链坐标系下的永磁同步电动机模型的基础上进行了定子磁链坐标系中的磁链和转矩的控制方式,提出了结合矢量细分的改进双控制器直接转矩控制方法。利用在 MATLAB 下仿真建模证明了这种新型双控制器直接转矩控制策略相对比传统的单控制器直接转矩控制策略能高效率优化转速和转矩脉动,提高系统稳定性。

1 传统 DTC 系统

1.1 DTC 的基本原理

通过对永磁同步电机直接转矩控制系统进行公式推导,得出电磁转矩公式:

收稿日期:2015-01-30;修回日期:2015-03-27.

作者简介:陈健(1989-),男,安徽马鞍山人,硕士研究生,从事电机控制研究.

$$T_e = \frac{3n_p}{4L_d L_q} \psi_s [2\psi_f L_q \sin \delta - \psi_s (L_q - L_d) \sin(2\delta)]$$

T_e 为电磁转矩; ψ_s, ψ_f 分别为定转子磁链; L_d, L_q 分别为 d, q 轴电感; δ 为功率角, n_p 为极对数。

分析了永磁同步电动机在同步旋转的坐标系,即 $L_d = L_q$, 并忽略凸极磁阻转矩,由于由永磁铁同步电动机的电磁转矩方程引起,可做如下简化:

$$T_e = \frac{3n_p}{2L_d} |\psi_s| |\psi_f| \sin \delta \tag{1}$$

电磁转矩和转矩角之间的关系:

$$T_e = \frac{3n_p}{2L_d} |\psi_s| |\psi_f| \cos \delta F_T \tag{2}$$

由式(1)可知:PMSM 电磁转矩的大小和 PMSM 定子磁链与转矩角有关,PMSM 定子磁链矢量的幅值和 PMSM 定子磁链大小与转矩角度有关。当 PMSM 定子磁链幅值恒定不变时, PMSM 转矩角在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间,转矩角度变大大也会带着转矩变大,保持定子磁链幅值恒定不变时才可以进行直接转矩的控制应用,因此在讨论 PMSM 直接转矩控制中,应选择以实现定子磁通和转矩控制的大小合适的电压矢量。

1.2 传统 DTC 电压矢量选择的缺陷

传统的直接转矩控制系统的电压矢量有 6 个,分别是 $U1$ 到 $U6$,如图 1 所示。图 1 为传统 DTC 电压矢量扇区分配,这种选择的缺陷在于传统永磁同步电机直接转矩控制策略是将整个平面划分为 6 个扇区 $S1 \sim S6$,先判断当前定子磁链所在扇区位置,通过观测滞环比较器的输出值,可以使用磁链和转矩的控制信号 $\Delta\psi, \Delta T$ 来进行选取相应的电压矢量进行 PMSM 的 DTC 控制。表 1 所示为传统直接转矩控制的电压矢量选择表。控制信号分为 1 和 0,当设定控制信号是 1 时,就表示需要增加被控量;当设定控制信号是 0 时,表示需要减少被控量; $u_1 \sim u_5$ 为可供选择的 5 个基本电压矢量。图中区段 $S1, S2, \dots, S6$ 表示定子磁链所在区段。传统的控制系统包括零矢量的矢量开关表见表 1。

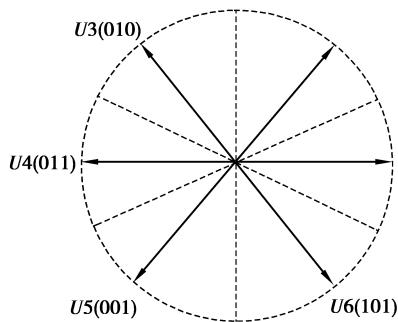


图 1 6 扇区划分图

表 1 传统直接转矩控制电压矢量选择

| F_ψ | F_T | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | U_2 | U_3 | U_4 | U_5 | U_6 | U_1 |
| 1 | 0 | U_7 | U_0 | U_7 | U_0 | U_7 | U_0 |
| | -1 | U_6 | U_1 | U_2 | U_3 | U_4 | U_5 |
| | 1 | U_3 | U_4 | U_5 | U_6 | U_1 | U_2 |
| 0 | 0 | U_0 | U_7 | U_0 | U_7 | U_0 | U_7 |
| | -1 | U_5 | U_6 | U_1 | U_2 | U_3 | U_4 |

如图 1 所示,在定子电阻的影响条件下,电压矢量 u_2 在定子磁链上的实际作用是电压矢量相当为 u'_2 , u'_2 与 u_2 夹角为 θ 。假设定子磁链处于 $S1$ 扇区的 ψ_{s2} 位置,假设想要增加磁链并且增加转矩,由表 1 得出结论应选取电压矢量 u_2 ,但是实际作用的电压矢量是 u'_2 。假设 ψ_{s2} 与 $S1$ 的扇区下分界线的夹角 $\theta_1 = \theta$ 时, u'_2 与 ψ_{s2} 就可以垂直;但 $\theta_1 < \theta$,此时 u'_2 所起到的作用和 u_2 一致的都是减少磁链、增大转矩,这个结果会使电压矢量在选择上出错。以下同理,假设定子磁链位于 $S2$ 扇区的 ψ_{s1} 位置,如果想减少磁链、减少转矩,由表 1 得出结论应选取电压矢量 u_6 ,而当 ψ_{s1} 与 $S2$ 的扇区下分界线的夹角 θ_2 小于 u'_6 和 u_6 间的夹角为 θ 时, u_6 所起到的作用是增大磁链、减少转矩,此时的电压矢量选择也是不正确的。同理可得,在各个扇区得出的结论都是有错误的。

由于在电子电阻的影响下,传统的 DTC 在扇区分界线附近的电压矢量选择上会出现错误,会增加磁链幅值,但选择的电压矢量却会减小磁链幅值,这将导致结果是一系列的不稳定,带来转矩脉动。

2 矢量细分的直接转矩控制系统

2.1 矢量细分和电压矢量选择表的改进

为了达到改善直接转矩控制的目的,通过改变改变扇区的数量将其增加至 12 个(图 2),可以增加可用的电压矢量。采取的可行的方法是通过三相两相混合传导模式的方法来增加可用电压矢量(表 2)。

表 2 12 扇区电压矢量选择表

| F_ψ | δ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------|----------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|
| 1 | 1 | U3 | U4 | U5 | U6 | U7 | U8 | U9 | U10 | U11 | U12 | U1 | U2 |
| | 0 | U11 | U12 | U1 | U2 | U3 | U4 | U5 | U6 | U7 | U8 | U9 | U10 |
| 0 | 1 | U5 | U6 | U7 | U8 | U9 | U10 | U11 | U12 | U1 | U2 | U3 | U4 |
| | 0 | U9 | U10 | U11 | U12 | U1 | U2 | U3 | U4 | U5 | U6 | U7 | U8 |

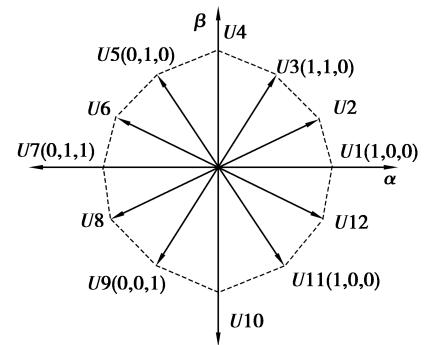


图 2 12 扇区划分图

2.2 矢量细分 DTC 的转矩控制性能

切向分量 u_{sn} 与定子磁链 ψ_s 及其旋转速度 w_s 的关系可以表示为

$$\frac{du_{sn}}{dt} = \frac{dw_s}{dt} \cdot |\psi_s| \quad (3)$$

DTC 的电磁转矩方程如式(1)所示,对式(1)进行求导:

$$\frac{dT_e}{dt} = (n_p \frac{1}{L_s} |\psi_r| |\psi_s| \cos \delta_{sr}) \cdot \frac{d}{dt} \delta_{sr} \quad (4)$$

得出转矩 T_e 随着负载角 δ_{sr} 的变化关系为

$$\Delta T_e = (n_p \frac{1}{L_s} |\psi_r| |\psi_s| \cos \delta_{sr}) \cdot \Delta \delta_{sr} \quad (5)$$

由式(3)变换得出:

$$w_s = |u_s| \cdot \sin \theta_{u\psi} \cdot \frac{1}{|\psi_s|} \quad (6)$$

其中 u_s 是电压矢量, ψ_s 是磁链矢量, $\theta_{u\psi}$ 是 u_s 和 ψ_s 的夹角,由于 PMSM 的机械时间常数大于其电气的时间常数,所以在 u_s 作用的这段时间内,假设转子速度没有改变,即定子磁链转动的角度可以决定负载角^[4]。可结合式(3)得:

$$\Delta \delta_{sr} = \frac{1}{|\psi_s|} \cdot |u_s| \cdot \sin \theta_{u\psi} \cdot \Delta t \quad (7)$$

3 系统组成

基于矢量细分的直接转矩调速控制系统框图 3 所示, FPGA 和 DSP 通信协议如图 4 所示, PGA 与 DSP

的通信协议是通过 XINTF 接口来进行的,DSP 通过 PWM 调制波周期性通过定时器中断读取来自 FPGA 转速计数值和电流采样值,并且执行速度环矢量控制算法和电流环控制算法,最后,DSP 指令发送电流环控制给 FPGA。FPGA 作为辅助控制器功能以实现取自上而下的模块化设计中,FPGA 需要完成的功能可以分为单独的功能模块,单独地测试和验证,并且最后调用直接在实体。

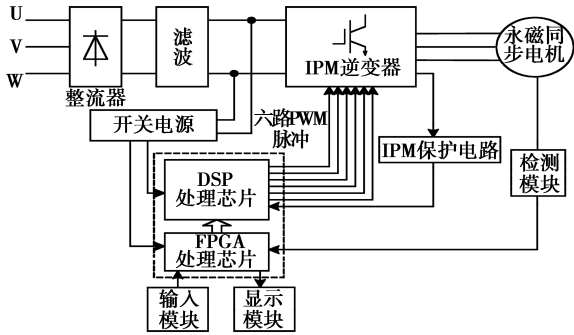


图 3 系统框图

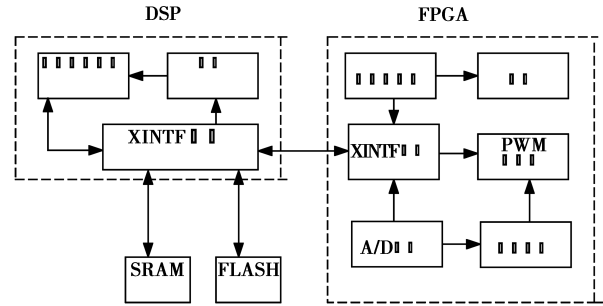


图 4 通讯协议

4 仿真与结果分析

如图 5 所示,为了验证实验结果,在 MATLAB 中建立矢量细分的永磁同步电机直接转矩控制系统仿真模型,图 6 为 Subsystem 模型。图 7 和图 8 是在给定转速时的转速波形和电磁转矩波形,由图 7 可以看出,在仿真开始后稳定上升至给定处达到平衡,转速沿着稳定的下降沿很快回到给定继续保持稳定;由图 8 可以看出,电磁转矩波动在一个非常的数值里进行波动,仿真结果表明电磁转矩波动值在矢量细分的 DTC 系统中得到了优化,说明矢量细分的 DTC 系统不仅保持了传统 DTC 系统的快速和稳定性还具有良好的鲁棒性。

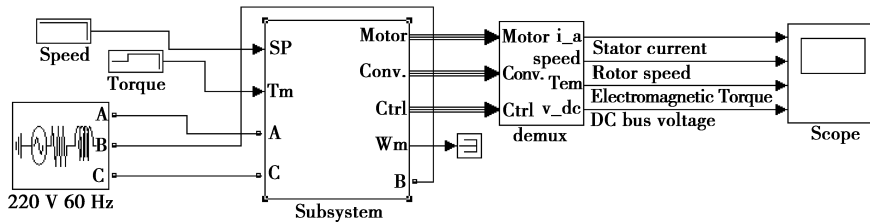


图 5 矢量细分的永磁同步电机直接转矩系统仿真模型

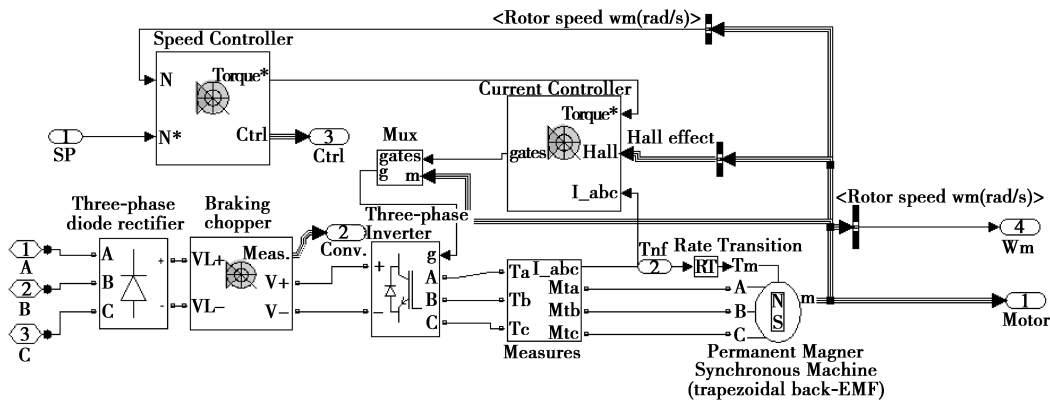


图 6 Subsystem 模型

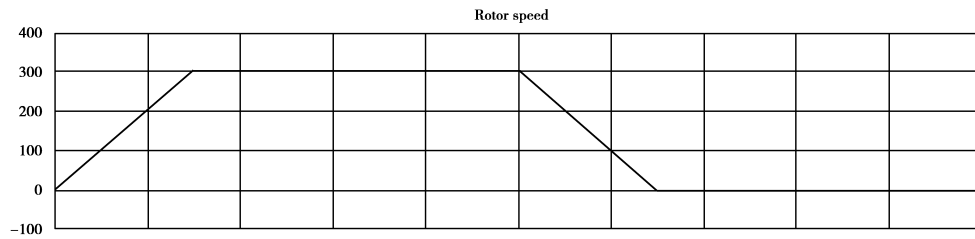


图 7 转速波形

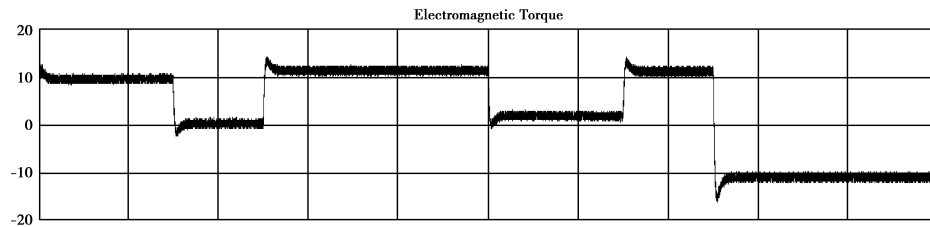


图 8 电磁转矩波形

5 结 论

首先通过图表形式分析了传统六扇区永磁同步电机直接转矩控制系统的缺点,由于有定子电阻的影响,所以电压矢量选择在磁链扇区分界线附近会出现错误;研究了十二矢量细分永磁同步电机直接转矩控制系统的控制性能,并编写了电压矢量选择表。在 MATLAB 中对该控制方法进行建模并仿真,通过 MATLAB 仿真结果可以看出采用矢量细分的控制方法相对于传统的直接转矩控制策略有很多的优点,转子转速和扭矩都有了明显的优化,具有更好的控制性能。

参考文献:

- [1] 阮毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2009
- [2] 钱坤,谢寿生,高梅艳,等.改进的直接转矩控制在异步电动机中的应用[J].中国电机工程学报,2004,24(7):210-214
- [3] 李永东.交流电机的数字控制系统[M].北京:机械工业出版社,2002
- [4] 张崇巍,苑春明,张兴.中点电位平衡的三电平逆变器 SVPWM 简化算法及实现[J].电气传动,2008,38(11):37-41
- [5] 刘和平,严利平,张学锋,等.TMS320FL240x DSP 结构、原理及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005
- [6] 张绍德,李坤,张世峰.基于 RBF 网络非线性系统逆控制的一种设计方案[J].系统仿真学报,2006,18(9):2688-2690

Research on Dual-controller Segment Permanent Magnet Synchronous Motor Direct Torque Control System based on Vectors Subdivision

CHEN Jian, LING You-zhu

(Anhui Key Laboratory of Electric Drive and Control, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: Past permanent magnet synchronous motor using hexagonal flux control or six intervals flux control interval which results in torque ripple and other shortcomings. In this paper, the dual-controller permanent magnet synchronous motor direct torque control system based on vector subdivision is designed. This design of the vector control strategy is to segment the six voltage vector in tradition and is subdivided into six sectors flux multiple voltage vector and flux sector, and appropriate switch table is developed. Matlab simulation results prove that permanent magnet synchronous motor direct torque control strategy based on vector subdivision is feasible.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; direct torque control; vector subdivision