

基于 TSMC 永磁方波电机转矩脉动抑制的研究

肖儿良 陈朱杰 莫康 钱双杰

(上海理工大学 电气工程系 上海 200093)

摘要: 针对电机换相时转矩脉动过大的问题,提出一种新颖的基于双级矩阵变换器的永磁方波电动机的拓扑结构,在该拓扑结构上采用电流和转速的双闭环控制,通过检测定子端电压来确定续流时间,改进了续流时期 PWM 调制策略,所提出 PWM 调制策略无论在低速还是高速,都能准确确定电机续流时间,快速抑制转矩脉动,实现对永磁方波电动机的交-交直接控制,该控制策略使得输入功率因数接近 1,同时能够实现能量双向流动。通过 MATLAB 仿真结果表明电机输出电流接近矩形波,换向转矩脉动得到很好的抑制,转速跟踪准确,验证了所提控制策略的正确性和有效性。

关键词: 双级矩阵变换器;永磁方波电动机;双闭环控制;换向转矩脉动

中图分类号: TM 461 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470

Research in torque ripple reduction in permanent magnet square-wave motor based on two stage matrix converter

Xiao Erliang Chen Zhujie Mo Kang Qian Shuangjie

(Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this paper, aim at the problem of the large torque ripple of motor, a novel topology structure of permanent magnet square-wave motor based on two stage matrix converter is proposed, which uses double closed-loop control. By detecting the stator terminal voltage to determine the duration of the PWM modulation strategy, the PWM modulation strategy is proposed, which can be accurately determined at low speed or high speed, The control strategy realizes the direct AC to AC control of the permanent magnet square-wave motor and makes the input power factor close to 1, and the current energy flow is bidirectional. The MATLAB simulation results show that the output current of the motor is close to the rectangular wave, the torque ripple is suppressed, the speed tracking is accurated, and the correctness and effectiveness of the proposed control strategy is verified.

Keywords: two stage matrix converter; permanent magnet square-wave motor; double close-loop control strategy; torque ripple minimization

1 引言

双级矩阵变换器(two stage matrix converter, TSMC)是一种新型交-交变换器,输入输出成阵列式连接,任一输出相可以与任一输入相通过双向开关相连。灵活的拓扑结构与传统交直交变换器相比,没有中间直流环节,具有能量双向流动,功率因数可调,输出谐波低等优点^[1-2]。目前已经成为电力电子领域的热点研究课题之一,在风力发电、变频调速等应用领域有很大的发展潜力。

据测算,电机换相时,转矩会在负载转矩 50% 范围内发生波动^[3]。无刷直流电机(BLDC motor)具有结构简单、控制方便、可靠性高等优点^[4-5]。通过电力电子变换器进行换相,取代传统电刷和换向器,获取了优异的电磁特性^[6]。

由于矩阵变换器为交交直接变换器,中间没有直流环节,其驱动无刷直流电机构成的调速系统与传统的调速系统不同,又称为永磁方波电机。本文结合矩阵变换器和永磁方波电机的优点,扩展其在交流传动领域的应用。

近年来,关于研究永磁方波电机的文章有很多,主要是针对转矩脉动的问题^[7-8]。而矩阵变换器是一个比较新的产品^[9-10],国内外许多学者对矩阵变换器做了很多研究,并且取得了相应的科研成果,目前已经有部分矩阵变换器的产品投入市场使用^[11]。研究了矩阵变换器在变速恒频风力发电系统中的应用,文献[12-13]提出了一种非线性自抗扰控制技术应用于矩阵变换器驱动感应电机,并制作了相应的实验样机。文献[14-15]通过改变拓扑结构提出了一种三相四桥臂的 TSMC,文献[16-17]给出一种矩阵变换

器驱动无刷直流电机实现交交变频调速的控制策略,但是并没有对转矩脉动的抑制做进一步研究。

本文提出一种新的双级矩阵变换器驱动永磁方波电动机的控制策略,同时优化了电机侧续流期间 PWM 调制方式,实现转速的准确跟踪,并且有效的抑制转矩脉动。从而提高永磁方波电动机的控制性能。

2 控制策略

图 1 是双级矩阵变换器驱动永磁方波电机的拓扑结构,它由输入滤波器、整流级和逆变级组成。整流级和逆变级都采用双向开关管,双级矩阵变换器调制分为整流级调制和逆变级调制两部分。

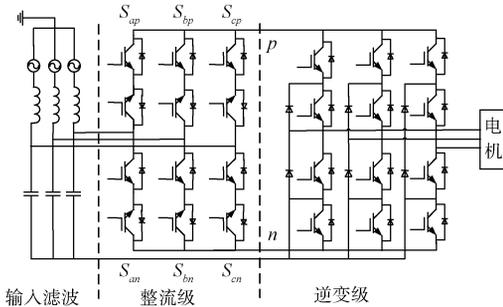


图 1 双级矩阵变换器驱动永磁方波电机拓扑结构

2.1 整流级控制策略

假定输入三相电源电压为:

$$\begin{cases} u_a = U_m \cos(\omega_i t) \\ u_b = U_m \cos(\omega_i t - 2\pi/3) \\ u_c = U_m \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_i 为输入角频率; U_m 为输入电压幅值。

整流级采用无零矢量空间矢量调制,根据三相输入相电压的状态,将其按周期分成 6 个区间,对应电流空间中的 6 个扇区,如图 2 所示。图中 S_{on} 表示导通开关, S_{mod} 表示调制开关, V_{dc} 表示中间直流电压。

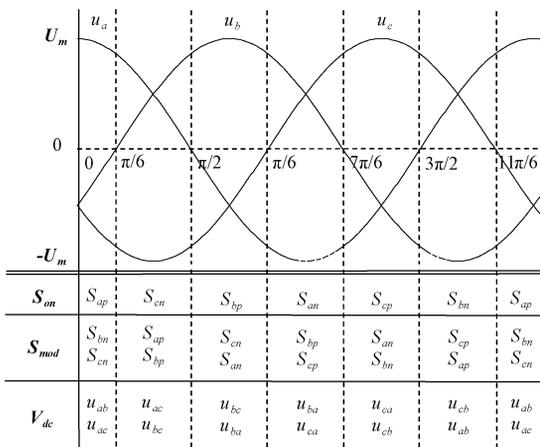


图 2 整流级开关状态

以 $0 \sim \pi/6$ 区间为例说明电流矢量合成情况,设中间直流侧平均电流为 \bar{i} ,输入电流可以用占空比表示为:

$$\begin{cases} \bar{i}_a = (d_{ab} + d_{ac}) \cdot \bar{i} \\ \bar{i}_b = -d_{ab} \cdot \bar{i} \\ \bar{i}_c = -d_{ac} \cdot \bar{i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $d_{ab} + d_{ac} = 1$, d_{ab} 和 d_{ac} 分别为线电压 u_{ab} 和 u_{ac} 对应占空比。

为了在不同的负载条件下输出功率因数为 1,占空比 d_{ab} 和 d_{ac} 应该满足如下条件:

$$\begin{cases} d_{ab} = -\frac{\bar{i}_b}{\bar{i}_a} = -\frac{u_b}{u_a} \\ d_{ac} = -\frac{\bar{i}_c}{\bar{i}_a} = -\frac{u_c}{u_a} \end{cases} \quad (3)$$

一个 PWM 周期 T_s 内的局部平均直流电压为:

$$\bar{u}_{dc} = d_{ab}u_{ab} + d_{ac}u_{ac} = \frac{3U_m}{2|\cos\theta_a|} \quad (4)$$

2.2 电机侧控制策略

本文结合传统的 PWM 调制提出了一种新颖的电机续流时间确定方法。通过检测端电压幅值和 PWM 电平高低来确定续流时间。续流时间开始于电机刚换相时刻,止于续流电流为零时刻。以扇区 S3 为例,在续流时间段内,遇到 PWM 为低电平时,A 相电流(关断相)将沿同桥臂上的反并联二极管续流,续流一旦形成,后续 PWM 电平的高低对它无影响。续流期内,A 相端电压保持为 0;而续流结束后,A 相端电压将跟随 A 相反电动势幅值的变化而变化。因此,只要判断当 PWM 低电平时,A 相端电压是否为 0 就能确定续流时间,电机处于不同扇区,续流时所判断的相和端电压的幅值不同,如表 1 所示。

表 1 换相周期检测

扇区	续流相与端电压的关系
S1	$U_c = 0$
S2	$U_B = U_d$
S3	$U_A = 0$
S4	$U_c = U_d$
S5	$U_B = 0$
S6	$U_A = U_d$

图 3 为不同扇区内续流时间确定波形图,图 4 以扇区 S3 为例进行了放大处理。续流脉冲 CP 从扇区切换处置位,当检测到 PWM 低电平时,端电压不满足给定电压值就清零,就能唯一确定续流时间,如图 4 中 2 虚线所示。

电机续流时间的公式:

$$t_{CP} = \frac{3L_s I}{U_d + 2E_m} \quad (5)$$

与式(5)相比,该方法不依赖电机参数,因而不受电机工况环境的制约。唯一影响其准确性的是开关管的死区时

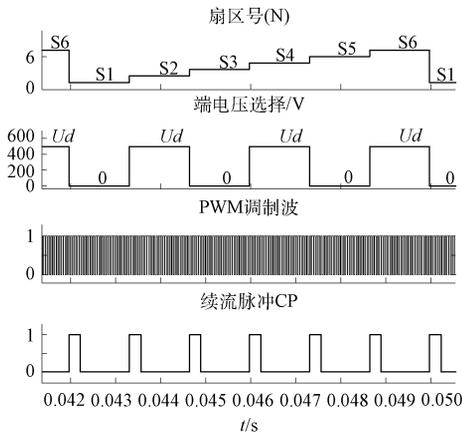


图3 不同扇区开关逻辑图

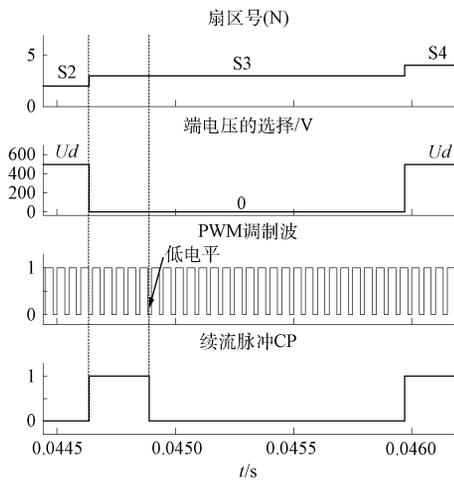


图4 扇区S3开关逻辑放大图

间。现考虑极端情况,若开关管的死区时间为 $3\mu\text{s}$,一个开关周期内,2只管子的通断将存在 $12\mu\text{s}$ 的延迟,且当续流结束时,正好遇到PWM高电平的开始,将再延迟一个高电平时间,一般对于 20kHz 的开关频率,若占空比为 50% ,将再延迟 $25\mu\text{s}$,而无刷直流电机随负载转速不同,续流时间一般为 $500\mu\text{s}$ 数量级,经计算误差为 7.4% ,但实际运行时,误差将远小于这个极端值,保证了该方法的准确性。

3 闭环控制系统结构

矩阵变换器驱动永磁方波电机的双闭环控制原理框图如图5所示,三相交流电经滤波后输入双级矩阵变换器,矩阵变换器输出驱动永磁方波电机系统采用电流、转速双闭环调节。

在电机侧开关管的导通时期和续流时期采用两种不同的PWM的控制策略。续流时期的PWM控制策略,即上文描述的续流控制策略,是针对抑制转矩脉动的控制策略,通过两种模式的切换,不仅能精确跟踪转速,而且有效的抑

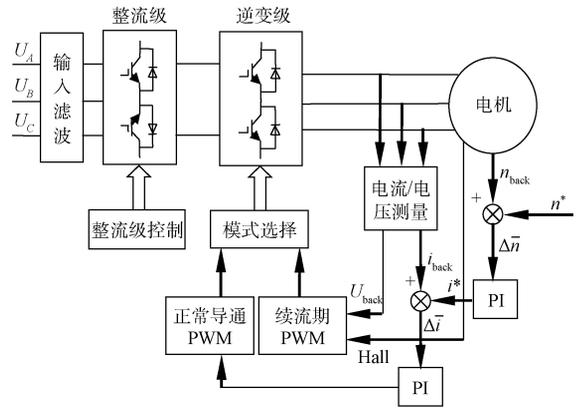


图5 矩阵变换器驱动永磁方波电动机闭环控制原理

制了转矩脉动。

4 结果分析

仿真参数:输入三相线电压 $U=380\text{V}$, $f=50\text{Hz}$,输入滤波电感 $L=500\text{e}-6\text{H}$,滤波电容 $C=30\mu\text{F}$,永磁方波电动机参数: $R=2.87\Omega$, $L=8.5\text{mH}$,转动惯量 $J=0.0008\text{kg}\cdot\text{m}^2$,阻尼系数 $B=0$ 。

如图6(a)给定电动机额定转速 $n=400\text{r/min}$ 的响应波形,图6(b)是给定电动机额定转速 $n=2000\text{r/min}$ 的响应波形,电机经过起动加速运行阶段,经过 0.01s 就进入稳定运行状态,准确跟踪给定。图7为电机运行时的矩阵变换器输入电压和输入电流波形,输入电流正弦性较好,与输入电压近似同相位,输入功率接近1。

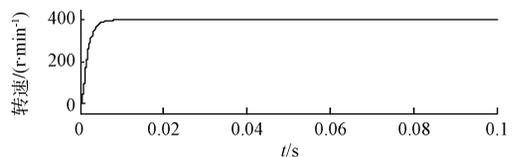
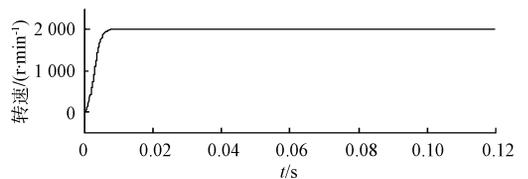
(a) 给定 $n=400\text{r/min}$ 的转速响应波形(b) 给定 $n=2000\text{r/min}$ 的转速响应波形

图6 矩阵变换器驱动永磁方波电机的转速响应曲线

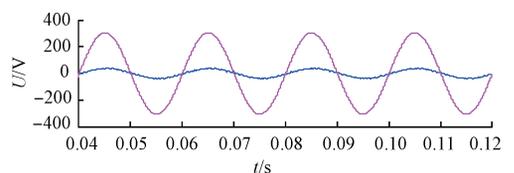


图7 矩阵变换器输入电压电流波形

图 8 和 9 分别为电机在低速和高速时的电流、转矩波形,在 0.07 s 后使用改进的续流时期 PWM 调制策略。图 8(b)中电机转速 400 r/min 条件下,在 0.07 s 前转矩脉动约为 25%,0.07 s 后转矩脉动减少到 9%,电流平顶处较为平坦如图 8(a),转矩脉动抑制效果较好。图 9(b)中电机转速 2 000 r/min 条件下,0.07 s 前转矩脉动约为 28.9%,0.07 s 后转矩脉动减小到 9.5%,电流峰值比较平坦如图 9(a),大大减少了转矩脉动,并接近理想波形。

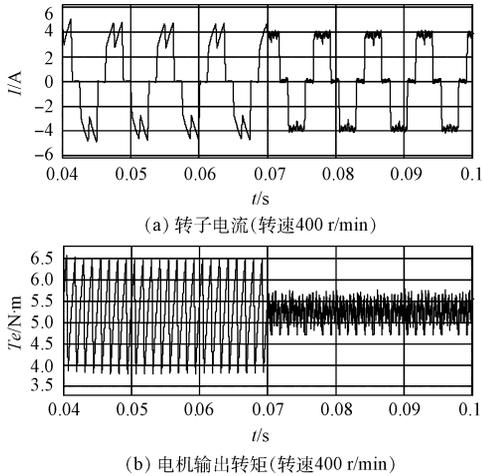


图 8 在 0.007 s 后使用改进的续流策略抑制转矩脉动

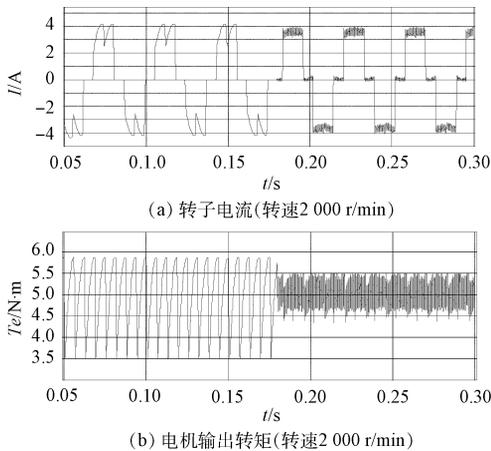


图 8 在 0.007 s 后使用改进的续流策略抑制转矩脉动

5 结 论

本文提出的双级矩阵变换器驱动永磁方波电动机控制策略,能够实现交流直接驱动永磁方波电机,实现输入电流正弦化,并且输入功率因数接近 1。调速性能良好,通过端电压检测确定续流时间的办法,改进了续流时期 PWM 调制策略,相比传统通过电机参数计算获取续流时间的方法,该策略不会受电机参数变化的影响,鲁棒性好,同时该系统采用了电流和转速的双闭环

控制,无论低速还是高速,本文提出的矩阵变换器驱动永磁方波电动机闭环控制都能有效抑制换相转矩脉动,同时还能快速准确的响应转速给定,仿真结果表明系统具有良好的动态、稳态性能。

参 考 文 献

- [1] 邱麟,许烈,李永东. 悬浮电容钳位多电平矩阵变换器拓扑与控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 79-83.
- [2] 齐琛,陈希有. 一种简化换流的双级矩阵变换器混沌载波频率调制技术[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 149-156.
- [3] JUNG S Y, KIM Y J, JAE J, et al. Commutation control for the low-commutation torque ripple in the position sensorless drive of the low-voltage brushless DC motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5983-5994.
- [4] 朱俊杰,栗梅,王湘中,等. 分段式滑模变结构无刷直流电机直接转矩控制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2634-2640.
- [5] 周美兰,高肇明,吴晓刚,等. 五种 PWM 方式对直流无刷电机系统换相转矩脉动的影响[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(7): 15-21.
- [6] 韦鲲,胡长生,张仲超. 一种新的消除无刷直流电机非导通续流的 PWM 调制方式[J]. 中国电机工程学报, 2009, 25(7): 104-108.
- [7] WHEELER P W, CLARE J C, KATSIS D, et al. Design and construction of a 150 KVA matrix converter induction motor drive [C]. Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, IET, 2004: 719-723.
- [8] 王永,关森,张磊. 一种三相四桥臂拓扑结构的新型矩阵变换器[J]. 物理学报, 2010, 59(2): 867-876.
- [9] 姜田贵,周波. 用于驱动无刷直流电机的矩阵变换器闭环调制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 88-95.
- [10] SHI T, GUO Y, SONG P, et al. A new approach of minimizing commutation torque ripple for brushless DC motor based on DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(10): 3483-3490.
- [11] 谭建成. 无刷直流电动机的换相转矩波动分析[J]. 微特电机, 2011, 4(6): 1-6.
- [12] 朱剑波. 无刷直流电机控制系统的仿真与分析[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(12): 25-30.
- [13] LEE M Y, WHEELER P, KLUMPNER C. Space vector modulated multilevel matrix converter [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2010, 57(10): 3385-3394.

(下转第 35 页)