

永磁同步电机直接转矩控制电压矢量选择

李耀华,马 建,刘晶郁,余 强

(长安大学 交通新能源开发、应用与汽车节能陕西省重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要:为了解决永磁同步电机直接转矩控制系统电压矢量选择区域确定过于复杂、需要过多参数的问题,分析了定子磁链幅值、转矩角和转矩的控制规律,给出了一种简便的确定电压矢量选择区域的方法,提出了基于空间矢量调制策略实现的电压矢量选择策略,并对 Honda Civic 06My Hybrid 混合动力电动汽车用内置式永磁同步电机进行了仿真和物理试验。试验结果表明:电压矢量确定方法简单可行,参数依赖性小;与开关表相比,电压矢量选择策略可有效减小电流和转矩脉动,并使得逆变器开关频率恒定。

关键词:汽车工程;永磁同步电机;直接转矩控制;电压矢量;空间矢量调制

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

Voltage vector selection for direct torque control system of permanent magnet synchronous motor

LI Yao-hua, MA Jian, LIU Jing-yu, YU Qiang

(Traffic New Energy Development, Application and Energy Saving of Automobile, Key Laboratory
of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to solve the problems that it needs many parameters and is very complicated to determine voltage vector selection area for direct torque control (DTC) system of permanent magnet synchronous motor (PMSM), control principles of the amplitude of stator flux, torque angle and torque were analyzed and a simplified way to determine voltage vector selection area was proposed. And voltage vector selection strategy was suggested based on the technology of space vector modulation (SVM). Simulation and experiment for an interior PMSM used in Honda Civic 06My hybrid electrical vehicle were conducted. The results show that the way to determine voltage vector selection area is simple and feasible and doesn't need many parameters. Compared with switching table, voltage vector selection strategy can decrease current and torque ripples and fix the switching frequency of inverter. 1 tab, 19 figs, 22 refs.

Key words: automobile engineering; permanent magnet synchronous motor; direct torque control; voltage vector; space vector modulation

0 引言

永磁同步电机直接转矩控制技术具有动态响应好、结构简单、易于实现、鲁棒性强、无需连续转子信息和旋转坐标变换等优良特性,成为电动汽车用永磁同步电机驱动技术的研究热点^[1-10]。但研究表明,永磁同步电机直接转矩控制技术也存在转矩脉动较大的问题^[11-12]。

为了解决永磁同步电机直接转矩控制系统转矩脉动较大的问题,学者们提出了多种解决方案。文献[13-14]提出了使用参考定子磁链生成器和空间矢量调制技术来合成所施加的电压矢量,但这种控制方法改变了直接转矩控制的结构,需要增加一个额外的 PI 调节器,破坏了直接转矩控制的结构简单、易于实现的优点;文献[15-16]将多电平技术引入到永磁同步电机直接转矩控制系统,但这增加了系统硬件成本和控制难度;文献[17-18]将滑膜变结构控制技术与直接转矩控制技术相结合,但同样带来了控制复杂、难于保障实时性的问题。这些改进手段都无法保持直接转矩控制原有的结构简单、易于实现的优点,不适于实际工程应用。

永磁同步电机直接转矩控制本质上是一种滞环控制。电压矢量选择策略作为滞环控制规律,对控制效果起着极其关键的作用。研究表明:永磁同步电机直接转矩控制开关表不能始终满足转矩控制要求,是不合理转矩脉动产生的根源^[19-20]。文献[21]研究了施加电压矢量对表面式永磁同步电机直接转矩控制系统的作用,得出了优化的电压矢量选择策略。试验结果表明:优化电压矢量选择策略是抑制永磁同步电机直接转矩控制系统转矩脉动有效可行的方法。

电压矢量选择区域是电压选择策略的基础。基于电压矢量对永磁同步电机直接转矩控制系统的定子磁链幅值、转矩角和转矩的作用,可以得出电压矢量选择区域,但确定电压矢量选择区域非常复杂,并不适用于电动汽车的实际应用。为此,本文给出了永磁同步电机直接转矩控制系统电压矢量选择区域的简单确定方法,提出了一种根据定子磁链位置和转矩角信息来确定电压矢量相角和采用空间矢量调制合成施加电压矢量的电压矢量选择策略,并对 Honda Civic 06My Hybrid 混合动力电动汽车用内置式永磁同步电机进行仿真和物理试验验证。仿真和物理试验结果表明:相比较于开关表控制,电压矢量选择策略可有效减小电流和转矩脉动,电流谐波含量更小,且开关频率恒定。

1 永磁同步电机直接转矩控制

在定子磁链参考坐标系下,永磁同步电机转矩方程如式(1)所示,电压矢量对永磁同步电机直接转矩控制系统的控制变量——定子磁链幅值、转矩角和转矩的作用如式(2)~式(4)所示^[22]。

$$\begin{cases} T_e = \frac{3P\widehat{\Psi}_s}{2L_d}\psi_i[\sin(\delta) - k\sin(\delta)\cos(\delta)] \\ k = \frac{L_q - L_d}{L_d\psi_i}\widehat{\Psi}_s \end{cases} \quad (1)$$

$$f = q\cos(\alpha), q = \widehat{V}_s \Delta t / \widehat{\Psi}_s \quad (2)$$

$$\Delta\delta = \arcsin(q)\sin(\alpha) \quad (3)$$

$$\begin{cases} M = q \sqrt{(1 - k\cos(\delta))^2 + (k\sin(\delta))^2} \sin(\alpha + \delta - \lambda) \\ \lambda = \arcsin\left[\frac{k\sin(\delta)}{\sqrt{(1 - k\cos(\delta))^2 + (k\sin(\delta))^2}}\right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_e 为电磁转矩; P 为电机极对数; $\widehat{\Psi}_s$ 为定子磁链幅值; ψ_i 为永磁体磁链; L_d 为 d 轴定子电感; L_q 为 q 轴定子电感; δ 为转矩角; Δt 为系统采样时间; α 为施加电压矢量与定子磁链夹角; f 为电压矢量对定子磁链幅值的作用; $\Delta\delta$ 为电压矢量对转矩角的作用; M 为电压矢量对转矩的作用; \widehat{V}_s 为合成电压矢量幅值。

当 f 、 $\Delta\delta$ 和 M 为正,表示电压矢量增加定子磁链幅值、转矩角和转矩;当 f 、 $\Delta\delta$ 和 M 为负,表示电压矢量减小定子磁链幅值、转矩角和转矩。

由此可得永磁同步电机直接转矩控制系统定子磁链幅值、转矩角和转矩的控制规律。

(1)当施加电压矢量与定子磁链夹角为 $(-90^\circ, 90^\circ)$ 时,电压矢量增加定子磁链幅值;当施加电压矢量与定子磁链夹角为 $(90^\circ, 270^\circ)$ 之间时,电压矢量减小定子磁链幅值。

(2)当施加电压矢量与定子磁链夹角位于 $(0^\circ, 180^\circ)$ 之间时,电压矢量增加转矩角;当施加电压矢量与定子磁链夹角位于 $(180^\circ, 360^\circ)$ 之间时,电压矢量减小转矩角。

(3)当施加电压矢量与定子磁链夹角位于 $(\lambda - \delta, 180^\circ + \lambda - \delta)$ 之间时,电压矢量增加转矩;当施加电压矢量与定子磁链夹角位于 $(180^\circ + \lambda - \delta, 360^\circ + \lambda - \delta)$ 之间时,电压矢量减小转矩。

由定子磁链幅值、转矩角和转矩的控制规律可得定子磁链旋转坐标系下,永磁同步电机直接转矩控制系统 \mathbf{V}_{11} 的选择区域为 $(\alpha_1, 90^\circ)$, \mathbf{V}_{01} 的选择区域为 $(90^\circ, \alpha_2)$, \mathbf{V}_{00} 的选择区域为 $(\alpha_3, 270^\circ)$, \mathbf{V}_{10} 的选择区域为 $(270^\circ, \alpha_4)$ 。

其中,

$$\begin{cases} \alpha_1 = \max(0^\circ, \lambda - \delta) \\ \alpha_2 = \min(180^\circ, 180^\circ + \lambda - \delta) \\ \alpha_3 = \max(180^\circ, 180^\circ + \lambda - \delta) \\ \alpha_4 = \min(360^\circ, 360^\circ + \lambda - \delta) \end{cases} \quad (5)$$

由此可得,永磁同步电机直接转矩控制系统电压矢量选择区域确定步骤为:①由电机参数确定 k 值;②由转矩、定子磁链幅值和电机参数,反解式(1)确定转矩角 δ 信息;③由式(4)和 δ 确定角度 $(\delta - \lambda)$;④根据磁链和转矩比较器输出以及定子磁链位置信息 θ_s ,由式(5)确定 $\alpha_1 - \alpha_4$,最终确定电压矢量选择区域。

由以上可知,永磁同步电机直接转矩控制系统电压矢量选择区域确定非常复杂,并不适于电动汽车工程实际应用。因此,下文提出一种简单的永磁同步电机直接转矩控制系统电压矢量选择区域确定方法。

2 电压矢量选择区域简化确定方法

当转矩角小于 90° 时,当 $0 < k < 1$, $(90^\circ - \delta) - \alpha_1$ 随 δ 变化,如图 1 所示。

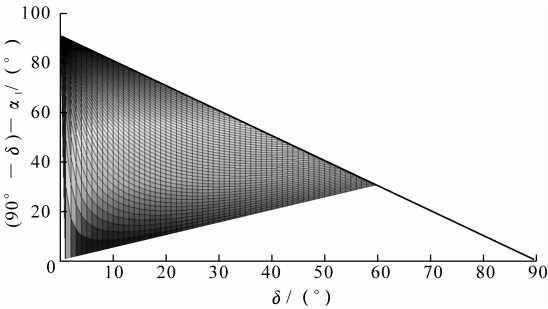


图 1 $(90^\circ - \delta) - \alpha_1$ 随 δ 的变化
Fig. 1 $(90^\circ - \delta) - \alpha_1$ versus δ

由图 1 可知,当转矩角小于 90° 时, $(90^\circ - \delta) > \alpha_1$ 恒成立,这意味着 $(90^\circ - \delta, 90^\circ) \subseteq (\alpha_1, 90^\circ)$ 恒成立。因此, $(90^\circ - \delta, 90^\circ)$ 必定是 V_{11} 的电压矢量选择区域。

当转矩角小于 90° 时,当 $0 < k < 1$, $\alpha_2 - (180^\circ - \delta)$ 随 δ 变化,如图 2 所示。

由图 2 可知,当转矩角小于 90° 时, $\alpha_2 - (180^\circ - \delta)$ 恒成立,这意味着 $(90^\circ, 180^\circ - \delta) \subseteq (90^\circ, \alpha_2)$ 恒成立。因此, $(90^\circ, 180^\circ - \delta)$ 必定是 V_{01} 的电压矢量选择区域。

同理可得, $(270^\circ - \delta, 270^\circ)$ 必定是 V_{00} 的电压矢量选择区域, $(270^\circ, 360^\circ - \delta)$ 必定是 V_{10} 的电压矢量选择区域。

综上可得,当转矩角小于 90° 时,永磁同步电机

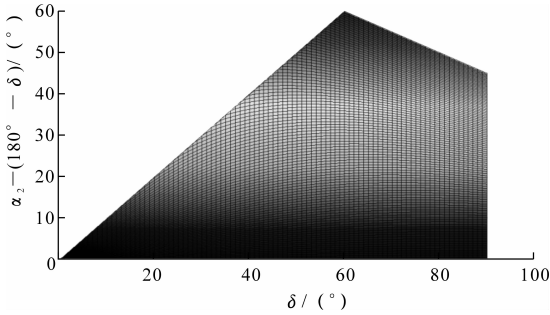


图 2 $\alpha_2 - (180^\circ - \delta)$ 随 δ 的变化
Fig. 2 $\alpha_2 - (180^\circ - \delta)$ versus δ

直接转矩控制系统电压矢量选择区域可以简化为: V_{11} 的选择区域为 $(90^\circ - \delta, 90^\circ)$, V_{01} 的选择区域为 $(90^\circ, 180^\circ - \delta)$, V_{00} 的选择区域为 $(270^\circ - \delta, 270^\circ)$, V_{10} 的选择区域为 $(270^\circ, 360^\circ - \delta)$ 。因此,仅需知道定子磁链位置和转矩角信息即可确定电压矢量选择区域,无需复杂计算,易于实现。

3 电压矢量选择策略

理论上,永磁同步电机直接转矩控制系统可以使用相角,在电压矢量选择区域内的任何一个电压矢量来满足定子磁链和转矩的控制要求。这里给出一种电压矢量选择策略,如式(6)所示。

$$\begin{cases} \angle V_{11} = \text{mod}(90^\circ + \delta_s - \frac{\delta}{2}, 360^\circ) \\ \angle V_{01} = \text{mod}(\delta_s + 90^\circ + \frac{90^\circ - \delta}{2}, 360^\circ) \\ \angle V_{00} = \text{mod}(\angle V_{11} + 180^\circ, 360^\circ) \\ \angle V_{10} = \text{mod}(\angle V_{01} + 180^\circ, 360^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\angle V_{11}$ 、 $\angle V_{01}$ 、 $\angle V_{00}$ 、 $\angle V_{10}$ 分别为电压矢量 V_{11} 、 V_{01} 、 V_{00} 、 V_{10} 的相角; δ_s 为定子磁链角位置。

由式(6)得到的电压矢量相角为任意值,电压源逆变器提供的 6 个非零电压矢量无法满足要求,需要采用空间矢量调制技术来合成所需的电压矢量。

为了提高直流母线电压利用率,合成电压矢量的幅值恒定,为逆变器 6 个非零电压矢量形成的六边形内切圆的半径,如下页图 3 和式(7)所示。其中 U_{dc} 为直流母线电压。

$$\hat{V}_s = \frac{\sqrt{3}}{3} U_{dc} \quad (7)$$

式中: \hat{V}_s 为合成电压矢量幅值; U_{dc} 为直流母线电压; V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 、 V_6 为逆变器输出电压矢量。

以所需电压矢量位于 V_1 和 V_2 之间为例,空间矢量调制技术如下页图 4 所示。其中 γ 为合成电压矢量与 V_1 的夹角。

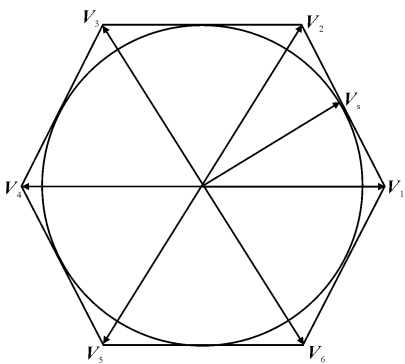


图 3 合成电压矢量幅值

Fig. 3 Amplitude of synthetical voltage vector

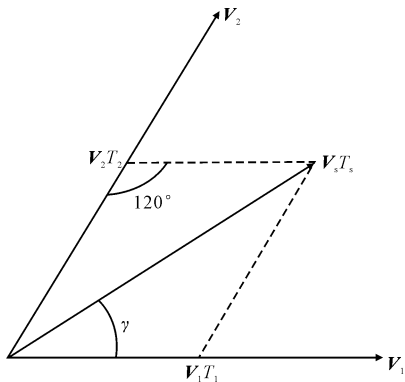


图 4 空间矢量调制

Fig. 4 Space vector modulation

由图 4 和正弦定理可得

$$\frac{2U_{dc}T_2}{3\sin(\gamma)} = \frac{2U_{dc}T_1}{3\sin(60^\circ - \gamma)} = \frac{\sqrt{3}U_{dc}T_s}{3\sin(120^\circ)} \quad (8)$$

式中: T_1 、 T_2 分别为电压矢量 \mathbf{V}_1 、 \mathbf{V}_2 的作用时间; T_s 为采样时间。

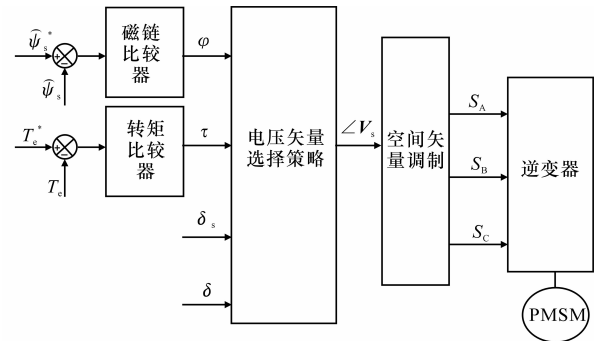
由式(8)可知,在一个采样时间 T_s 内,电压矢量 \mathbf{V}_1 、 \mathbf{V}_2 和 \mathbf{V}_0 的作用时间如式(9)所示。

$$\begin{cases} T_1 = \sin(60^\circ - \gamma) T_s \\ T_2 = \sin(\gamma T_s) \\ T_0 = T_s - T_1 - T_2 \end{cases} \quad (9)$$

由此可得,基于电压矢量选择策略控制的永磁同步电机直接转矩控制系统如图 5 所示。

4 仿真实验

给出永磁同步电机直接转矩控制系统在开关表和电压矢量选择策略控制下的仿真结果。仿真电机采用 Honda Civic 06My Hybrid 混合动力电动汽车用内置式永磁同步电机。定子的参考幅值为 0.06 Wb,参考转矩为 44.02 N·m,对应转矩角 75°。定子磁链幅值滞环宽度为 0.002 Wb,转矩滞环宽度为 0.02 N·m。永磁同步电机直接转矩控制系统开关见表 1。



注: φ 为磁链比较器的输出信号; τ 为转矩比较器的输出信号; S_A 、 S_B 、 S_C 为逆变器三相开关信号; $\angle \mathbf{V}_s$ 为合成电压矢量相角。

图 5 基于电压矢量选择策略永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制

Fig. 5 PMSM DTC system based on voltage vector selection

表 1 永磁同步电机直接转矩控制系统开关表

Tab. 1 Switching table of PMSM DTC system

φ	τ	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	1	\mathbf{V}_2	\mathbf{V}_3	\mathbf{V}_4	\mathbf{V}_5	\mathbf{V}_6	\mathbf{V}_1
1	0	\mathbf{V}_6	\mathbf{V}_1	\mathbf{V}_2	\mathbf{V}_3	\mathbf{V}_4	\mathbf{V}_5
0	1	\mathbf{V}_3	\mathbf{V}_4	\mathbf{V}_5	\mathbf{V}_6	\mathbf{V}_1	\mathbf{V}_2
0	0	\mathbf{V}_5	\mathbf{V}_6	\mathbf{V}_1	\mathbf{V}_2	\mathbf{V}_3	\mathbf{V}_4

注: φ 、 τ 见图 5 所示; $\theta_1 \sim \theta_6$ 为定子磁链扇区位置信号。

4.1 开关表控制

开关表控制下的定子磁链圆如图 6 所示;开关表控制下的转矩如图 7 所示。

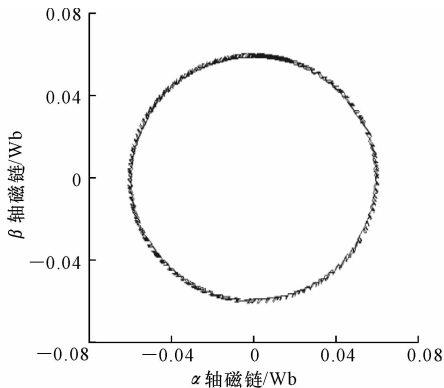


图 6 开关表控制下的定子磁链圆

Fig. 6 Stator flux circle under control of switching table

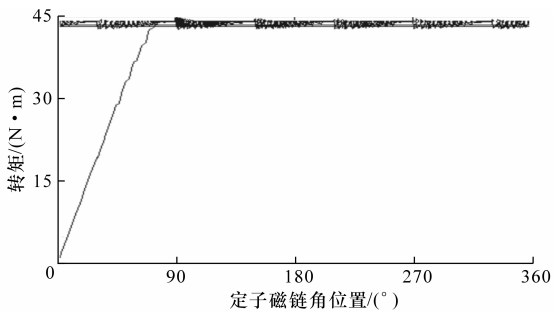


图 7 开关表控制下的转矩

Fig. 7 Torque under control of switching table

4.2 开关表控制

电压矢量选择策略控制下的定子磁链圆和转矩,分别如图 8、图 9 所示。仿真结果表明,开关表可始终满足定子磁链控制要求,但当转矩角较大时,开关表选择的电压矢量无法满足转矩控制要求,从而引发不合理转矩脉动。电压矢量控制策略可消除因开关表引起的不合理转矩脉动,控制效果良好。

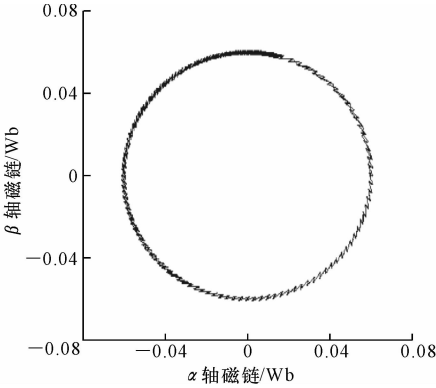


图 8 电压矢量选择策略控制下的定子磁链圆

Fig. 8 Stator flux circle under control of voltage vector selection

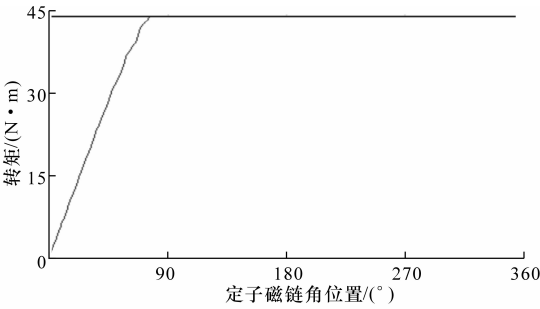


图 9 电压矢量选择策略控制下的转矩

Fig. 9 Torque under control of voltage vector selection

5 试验验证

给出开关表和电压矢量选择策略控制下永磁同步电机直接转矩控制系统的试验结果。试验电机采用 Honda Civic 06MY Hybrid 混合动力电动汽车用内置式永磁同步电机。直接转矩控制开关表控制和电压矢量选择策略控制均采用 DSP TMS320F2812 实现。参考转速为 100 r/min,参考定子磁链幅值为 0.06 Wb,磁链和转矩滞环控制宽度分别为 0.002 Wb 和 0.002 N·m。

5.1 开关表控制

永磁同步电机直接转矩控制系统采用开关表控制的试验波形如图 10~图 12 和下页图 13~图 14 所示。其中,图 10、图 12、图 13 为示波器波形。

5.2 电压矢量选择策略控制

永磁同步电机直接转矩控制系统采用电压矢量

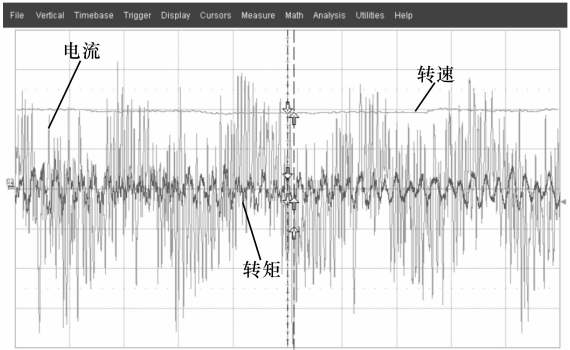
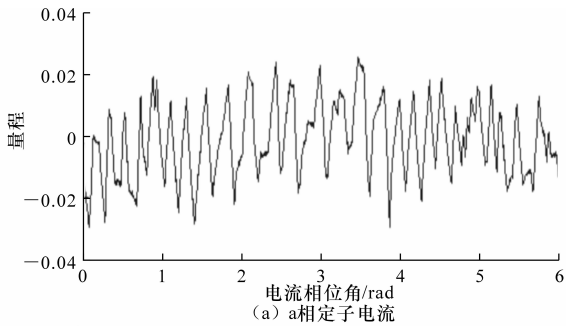


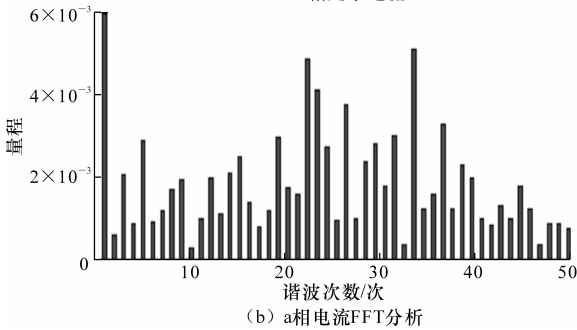
图 10 空载时 a 相定子电流(5A/格)、转速

(50 r·min⁻¹/格)和负载转矩(10 N·m/格)

Fig. 10 a-phase stator current(5 A/div), motor speed (50 r·min⁻¹/div) and load torque (10 N·m/div) at empty load



(a) a 相定子电流



(b) a 相电流 FFT 分析

图 11 空载时 a 相定子电流 FFT 分析结果

Fig. 11 FFT of a-phase stator current at empty load

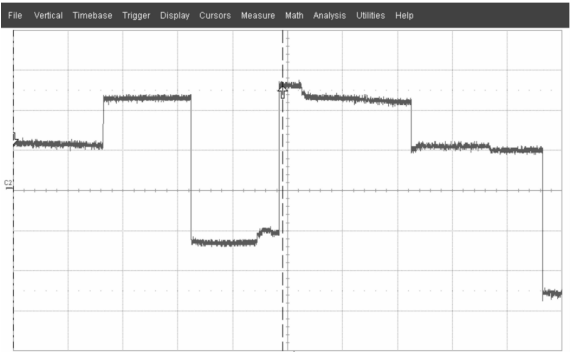


图 12 空载时 a 相定子电压(40 V/格)

Fig. 12 a-phase stator voltage (40 V/div) at empty load

选择策略控制的试验波形如下页图 15~图 19 所示。其中,图 15、图 17、图 18 为示波器波形。

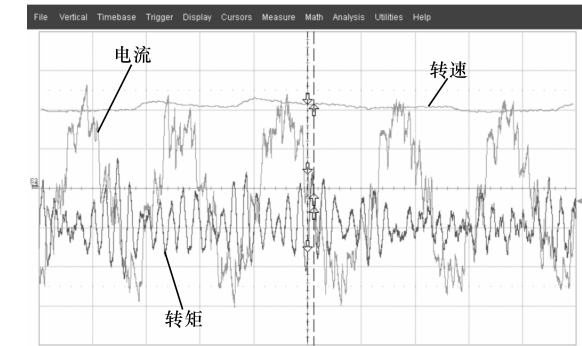


图 13 加载后 a 相定子电流(20 A/格)、转速
(50 r·min⁻¹/格)和负载转矩(10 N·m/格)
Fig. 13 a-phase stator current(20 A/div), motor speed
(50 r·min⁻¹/div) and load torque (10 N·m/div) at load

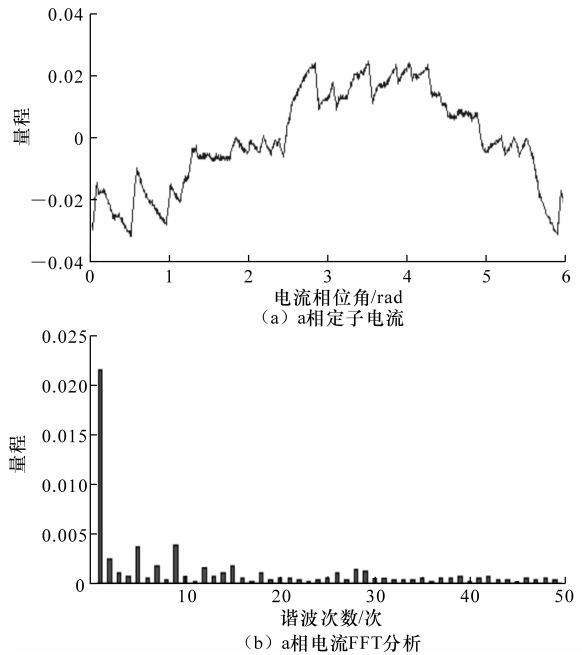


图 14 加载后 a 相定子电流 FFT 分析结果
Fig. 14 FFT of a-phase stator current at load

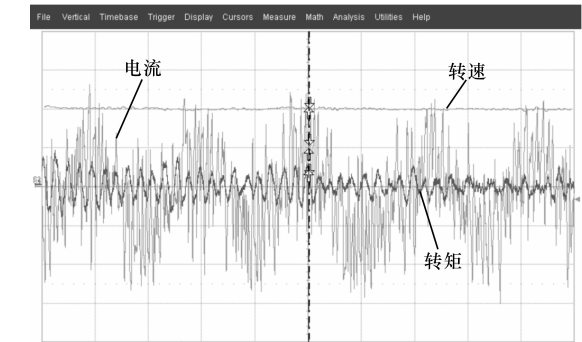


图 15 空载时 a 相定子电流(5 A/格)、转速
(50 r·min⁻¹/格)和负载转矩(10 N·m/格)
Fig. 15 a-phase stator current(5 A/div), motor speed
50 r·min⁻¹/div and load torque (10 N·m/div) at empty load

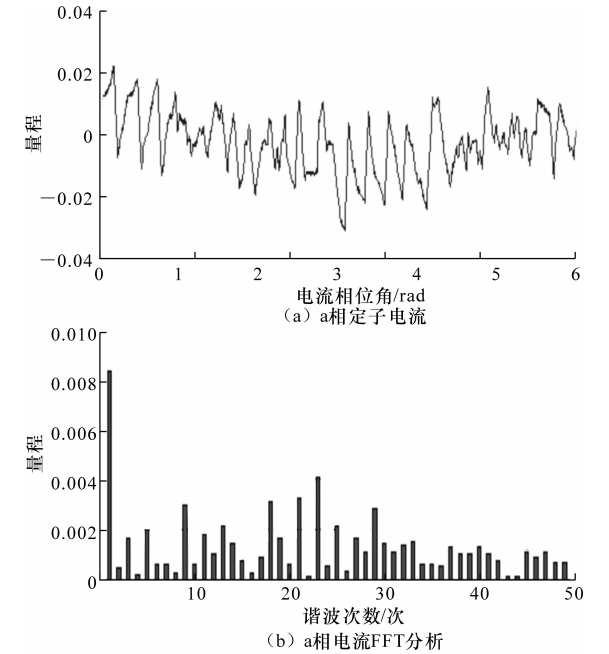


图 16 空载 a 相定子电流 FFT 分析结果
Fig. 16 FFT of a-phase stator current at empty load

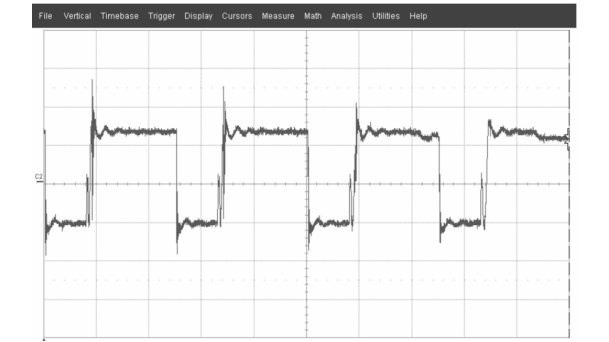


图 17 空载时 a 相定子电压(40 V/格)
Fig. 17 a-phase stator voltage (40 V/div) at empty load

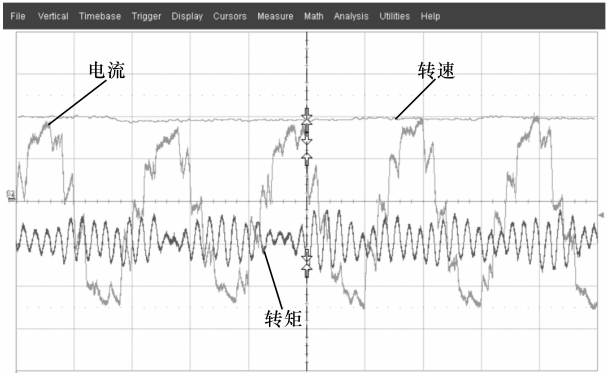


图 18 加载后 a 相定子电流(20 A/格)、转速
(50 r·min⁻¹/格)和负载转矩(10 N·m/格)
Fig. 18 a-phase stator current(20 A/div), motor speed
(50 r·min⁻¹/div) and load torque (10 N·m/div) at load

对比开关表和电压矢量选择策略控制下永磁同步电机直接转矩控制系统的试验结果可知,与开关

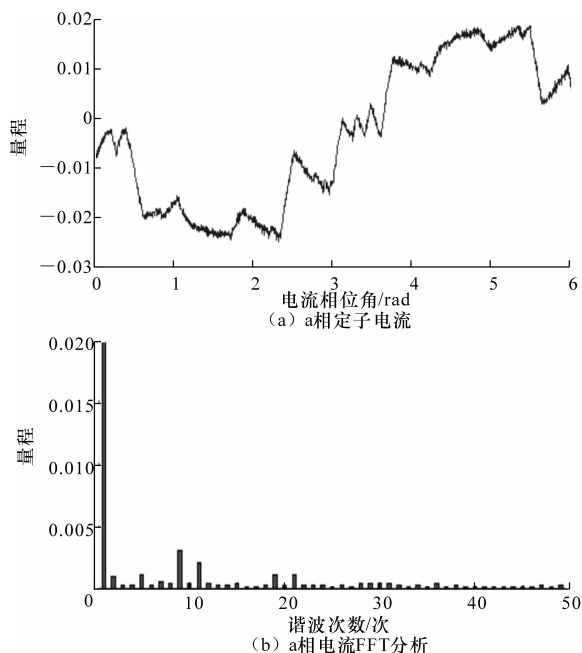


图 19 加载后 a 相定子电流 FFT 分析结果

Fig. 19 FFT of a-phase stator current at load

表控制相比,电压矢量选择策略可有效减小电流和转矩脉动,电流波形更加正弦,谐波含量更小,开关频率恒定。

6 结 语

(1)给出了永磁同步电机直接转矩控制系统电压矢量选择区域的一种简易确定方法,提出了一种根据定子磁链位置和转矩角信息来确定电压矢量相角和采用空间矢量调制合成施加电压矢量的电压矢量选择策略,并对 Honda Civic 06My Hybrid 混合动力电动汽车用内置式永磁同步电机进行仿真和物理试验验证。

(2)仿真和物理试验结果表明,相比较于开关表控制,电压矢量选择策略可有效减小电流和转矩脉动,电流谐波含量更小,且开关频率恒定,是电动汽车用永磁同步电机驱动系统一种理想的控制策略。

参考文献:

References:

[1] Ehsani M, Gao Y M, Emadi A. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车—基本原理、理论和设计[M]. 倪光正, 倪培宏, 熊素铭, 译. 北京: 机械工业出版社, 2010.

Ehsani M, Gao Y M, Emadi A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicle—fundamentals, theory and design[M]. Translated by NI Guang-zheng, NI Pei-hong, XIONG Su-ming. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)

[2] 陈清泉, 孙逢春, 祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京: 新华出版社, 2004.

CHEN Qing-quan, SUN Feng-chun, ZHU Jia-guang. Modern technology of electric vehicle[M]. Beijing: Xinhua Press, 2004. (in Chinese)

[3] Park J W, Koo D H, Kim J M. Improvement of control characteristics of interior permanent-magnet synchronous motor for electrical vehicle[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2001, 37 (6): 1754-1760.

[4] Li Y H. Direct torque control of permanent magnet synchronous machine[M]. Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2010.

[5] 曹秉刚. 中国电动汽车技术新进展[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 114-118.

CAO Bing-gang. Current progress of electric vehicle development in China, [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1): 114-118. (in Chinese)

[6] Zhong L, Rahman M F, Hu W Y, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 1997, 12(2): 528-536.

[7] Rahman M F, Zhong L, et al. A direct torque-controlled interior permanent magnet synchronous motor drive incorporating field weakening[J]. IEEE Transaction on Industrial Application, 1998, 34 (4): 1246-1253.

[8] Zhong L, Rahman M F, Hu W Y, et al. A direct torque controller for permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 637-642.

[9] 汪贵平, 马建, 闫茂德. 永磁直流电动机驱动汽车的数学模型[J]. 中国公路学报, 2011, 24(1): 122-126.

WANG Gui-ping, MA Jian, YAN Mao-de. Study of mathematical model of electric vehicle driven by permanent magnet DC motor[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24 (1): 122-126. (in Chinese)

- [10] 许家群,欧阳明高,唐任远. Direct torque control of permanent magnet synchronous traction motor in electrical vehicle drive[J]. 电工技术学报, 2006, 21(7): 94-98.
- XU Jia-qun, OUYANG Ming-gao, TANG Ren-yuan. Direct torque control of permanent magnet synchronous traction motor in electrical vehicle drive [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(7): 94-98. (in Chinese)
- [11] Rahman M F, Haque M E, Tang L X. Problems associated with the direct torque control of an interior permanent-magnet synchronous motor drive and their remedies[J]. IEEE Transactoins on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 799-809.
- [12] Buja G, Kazmierkowski P. Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-a survey [J]. IEEE Transactons on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 744-757.
- [13] Tang L X, Zhong L, Rahman M F. A novel direct torque controlled interior permanent magnet synchronous machine drive with low ripple in flux and torque and fixed switching frequency[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(3): 346-354.
- [14] Tang L X, Zhong L, Rahman M F. A novel direct torque control for interior permanent-magnet synchronous machine drive with low ripple in torque and flux-a speed-sensorless approach[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2003, 39(2): 1748-1756.
- [15] Kouro S, Bernal R, Miranda H, et al. High-performance torque and flux control for multilevel fed induction motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(6): 2116-2123.
- [16] Martins C, Roboam X, Meynard T A, et al. Switching frequency imposition and ripple reduction in DTC drives by using a multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(2): 286-297.
- [17] Xu Z, Rahman M F. Direct torque and flux regulation of an IPM synchronous motor drive using variable structure control approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(5): 2487-2498.
- [18] Laschu C, Trzynndowski A. Combining the principles of sliding mode, direct torque control, and space vector modulation in a high-performance sensorless AC drives[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2004, 40(2): 170-177.
- [19] 李耀华, 刘卫国. 永磁同步电机直接转矩控制不合理转矩脉动[J]. 电机与控制学报, 2007, 10(2): 148-152.
- LI Yao-hua, LIU Wei-guo. Unreasonable torque ripple of direct torque control in permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2007, 10(2): 148-152. (in Chinese)
- [20] 李耀华, 刘卫国. 永磁同步电机直接转矩控制不合理转矩脉动抑制研究[J]. 西北工业大学学报, 2007, 37(5): 20-23.
- LI Yao-hua, LIU Wei-guo. A method for suppressing unreasonable torque ripple in direct torque control of permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 37(5): 20-23. (in Chinese)
- [21] 李耀华, 刘卫国. 表面式 PMSM 直接转矩控制电压矢量选择策略[J]. 电力电子技术, 2010, 44(9): 47-49.
- LI Yao-hua, LIU Wei-guo. Voltage vector selection strategy for surface PMSM DTC system[J]. Power Electronics, 2010, 44(9): 47-49. (in Chinese)
- [22] 李耀华, 马建. 永磁同步电机直接转矩控制系统电压矢量选择区域[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(1): 95-100.
- LI Yao-hua, MA Jian. Voltage vector selection area of permanent magnet synchronous motor direct torque control system[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(1): 95-100. (in Chinese)