

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.03.011

利用随机零矢量比例调制抑制电动汽车用 逆变器电磁干扰

宋宏彪¹, 郭淑英², 谭淼², 杨洪波², 王征宇², 陈建明²

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;

2. 南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 提出了一种随机零矢量比例调制方法来抑制电动汽车用逆变器电磁干扰。该方法在原有的七段对称法调制的基础上, 随机地改变2个零矢量之间的比例, 从而实现随机调制; 利用 Matlab/Simulink 软件搭建了永磁同步电动机矢量控制仿真模型; 采用某型电动汽车用电机驱动系统对本算法进行了试验分析。仿真试验结果表明: 相对于七段对称法, 随机零矢量比例调制法可减小载波频率处及载波倍次频率处的谐波幅值, 从而减小传导电磁干扰。

关键词: 电动汽车; 电机驱动系统; 逆变器; 传导电磁干扰; 随机零矢量比例

中图分类号: TM301.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)03-0051-05

Application of Random Zero Vector Ratio Modulation to Suppress Electromagnet-IC Interference of the Electric Vehicle Inverter

Song Hongbiao¹, Guo Shuying², Tan Miao², Yang Hongbo², Wang Zhengyu², Chen Jianming²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412001, China)

Abstract: Proposed a random zero vector ratio modulation method to suppress electric vehicle inverter electromagnetic interference. The method based on the original segment symmetrical modulation method randomly changed the ratio between the two zero vectors to realize random modulation; Used the Matlab / Simulink software to build a permanent magnet synchronous motor vector control simulation model; Applied a certain type of electric vehicle motor drive system for the algorithm experimental analysis. Simulation results show that comparing with seven segment symmertry, the random zero vector ratio modulation can reduce harmonic amplitude of carrier frequency and carrier times frequency, thereby reducing conducted EMI.

Keywords: electric vehicles; motor drive system; inverter; conducted EMI; random zero vector ratio

0 引言

由于电动汽车逆变器高度集成的要求, 尤其是

将逆变器的驱动电路板直接叠放在 IGBT (insulated gate bipolar transistor) 器件上之后, 对抑制电磁干扰的要求越来越高^[1]。近年来, 随机调制作为抑制电磁

收稿日期: 2012-11-27

基金项目: 中央企业电动车产业联盟共性技术基金资助项目 (JS-314)

作者简介: 宋宏彪 (1986-), 男, 湖南怀化人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为现代电力电子技术与系统,

E-mail: floatsnow.2007@163.com

干扰 (electro magnetic interference, EMI) 的有效方法而得到广泛的研究。随机调制大致分为: 随机脉冲位置调制、随机开关频率调制、随机开关调制^[2]。其中, 随机脉冲位置调制又分为随机超前滞后调制、随机零矢量电压调制、随机中心位置调制^[3]。

虽然随机调制方法获得了广泛的研究, 但该研究还处于理论阶段, 尚未付诸实际应用, 且进行的相关试验也没有达到电动汽车的应用要求。本文提出利用随机零矢量比例调制法来抑制电动汽车用逆变器电磁干扰。该方法为随机零矢量电压调制的一种实现方法, 通过软件来实现, 不需要增加额外的硬件成本, 为已装车应用的电动汽车逆变器的传导电磁干扰的抑制提供了一种可行的解决方案。利用 Simulink 软件分别对七段对称法空间矢量脉宽调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM) 和随机零矢量比例调制方法进行仿真分析, 然后分别应用于电动汽车逆变器的实际试验。试验结果表明, 零矢量比例调制方法可有效地降低载波频率处及载波倍次频率处的谐波幅值, 从而减小逆变器的传导电磁干扰。

1 随机零矢量比例调制法原理介绍

由文献[4]可知, 当扇区号 $N=4$ 时, 七段对称法的脉冲波形如图 1 所示。设 T_1, T_2 为有效电压矢量的作用时间, T_0 为零矢量的作用时间, T_s 为开关周期。定义 $T_a = (T_s - T_1 - T_2)/4, T_b = T_1/2 + T_a, T_c = T_2/2 + T_b$ 。根据不同的扇区, 由 T_a, T_b 和 T_c 得出逆变器的每一相脉冲上升沿的作用时刻分别为 T_{CMP1}, T_{CMP2} 和 T_{CMP3} , 其数值对应于上升沿时刻和载波进行比较的数值。其中, T_{TIPR} 为载波开关周期数值的一半^[5-6]。

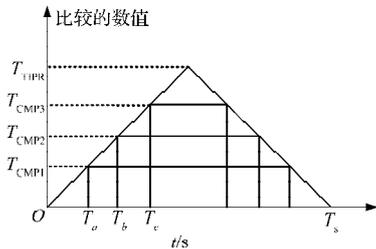


图1 逆变器三相桥臂的作用时刻

Fig. 1 The effect moment of three-phase inverter bridge arm

在整个 T_s 周期中, 除去 T_1, T_2 , 剩下的就是零矢量 T_0 的作用时间。由于决定输出电压的仅是基本矢量的作用时间, 而与基本矢量的作用时刻无关, 因此, 在七段对称方法的基础上, 采取随机分配零矢量 $V(000)$ 与 $V(111)$ 的作用时间, 可改变基本矢量的作用时刻, 因此, 这样可在一定范围内随机地改变脉冲的作用时刻, 从而实现随机调制。对于图 1 的三相桥臂的作用时刻, 将 T_a 乘上随机因子 k (k 为随机数, $k \in (-1, 1)$), 然后再

与 $T_0/4$ 相加, 产生新的 T'_a , 即令 $T'_a = T_a + k * (T_0/4)$, 同理 $T'_b = T_b + k * (T_0/4), T'_c = T_c + k * (T_0/4)$ 。变换后的脉宽波形如图 2 所示。从图 2 可以看出, $V(000)$ 与 $V(111)$ 的作用时间不再相等。虽然 3 个脉冲的作用时刻不同了, 但是 $T'_b - T'_a = T_b - T_a, T'_c - T'_b = T_c - T_b$, 即有效矢量的作用时间 T_1 和 T_2 的大小不变。根据伏秒平衡法则, 等效出的合成电压矢量也不变。在随机化的过程中, 每个载波周期中的 $V(000)$ 与 $V(111)$ 的作用时间总和不变, 但各自在零矢量总的时间中的比例随机变化, 使得三相桥臂的作用时刻发生改变。这种随机改变脉冲的作用时刻, 可以影响到输出线电压和相电流的频谱, 将载波频率及其倍次频率处的谐波幅值向两边展开, 使得该处的幅值减小较多, 从而减小传导电磁干扰。

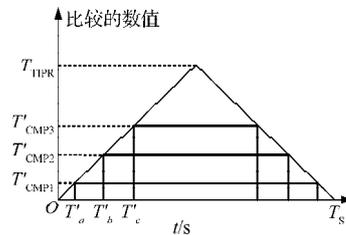


图2 随机零矢量比例分配后的三相桥臂的作用时刻

Fig. 2 The effect moment of three-phase inverter bridge arm after random zero vector proportional distribution

2 仿真实现

通过 Matlab/Simulink^[7-9] 软件搭建永磁同步电动机矢量控制仿真模型, 如图 3 所示。

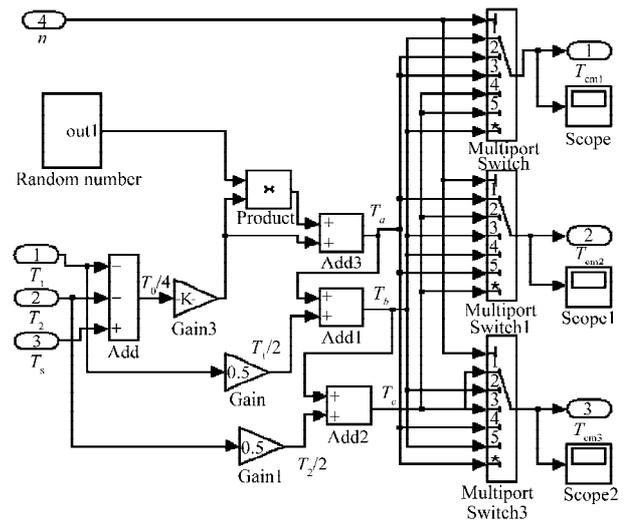


图3 仿真模型图

Fig. 3 Simulation model

该矢量控制仿真模型会产生一个随机因子 k , k 在调制波的每一个单一的周期 T_s 中是不变的, 而对于调制波的不同调制周期, k 所对应的值能随机地变化。将 $T'_a = T_a + k * (T_0/4), T'_b = T_b + k * (T_0/4), T'_c = T_c + k * (T_0/4)$

作为新的比较值,加入到七段对称法 SVPWM 中。

3 仿真及试验结果分析

3.1 仿真分析

采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略来控制永磁同步电动机,开关周期设为 $100 \mu\text{s}$,即载波频率为 10 kHz 。在模型中加入电压解耦模块,采用基于相补偿的死区补偿方法^[4],设定死区时间为 $5 \mu\text{s}$,死区中没有考虑逆变器器件的开通和关断延时。永磁同步电机的参数为: $R=2.875 \Omega$, $L_d=L_q=8.5 \text{ mH}$, $\Psi_f=0.175 \text{ Wb}$, $J=0.0008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $P=4$ 。仿真时间设为 0.22 s ,当仿真时间到 0.05 s 时,加负载 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。分别利用七段对称法和随机零矢量比例调制法对模型进行仿真,对于每一个仿真结果,取 0.15 s 时刻开始后的一个周期,进行 FFT 变换。经 FFT 变换后输出的频谱图的横坐标设为频率,其最大值设为 100 kHz ,纵坐标设为各频率处幅值占基波的百分比。

采用七段对称法的输入电机的线电压及频谱见图 4。采用随机零矢量比例调制的输入电机的线电压及频谱见图 5。

由图 4 b 可知,由于开关频率为 10 kHz ,因此,在 $10, 20, 30 \text{ kHz}$ 等载波及其倍次频率处存在尖峰幅值,这些尖峰幅值会对外产生传导电磁干扰。

对比图 4 b 和图 5 b 可知,通过随机零矢量比例调制后,载波频率及其倍次频率处的幅值向两边散开,尤其是在 $30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 \text{ kHz}$ 处,其幅值明显减小。尖峰幅值的减小就可以减小对外的传导电磁干扰。

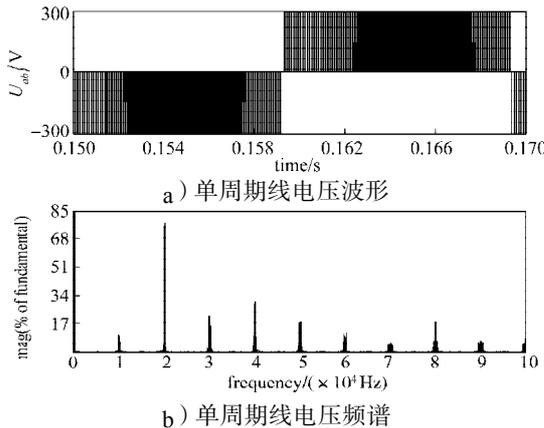
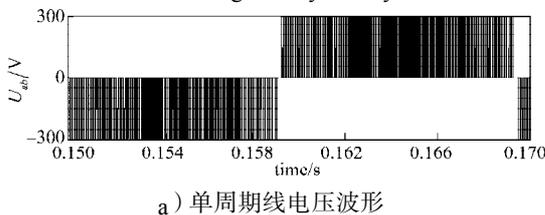
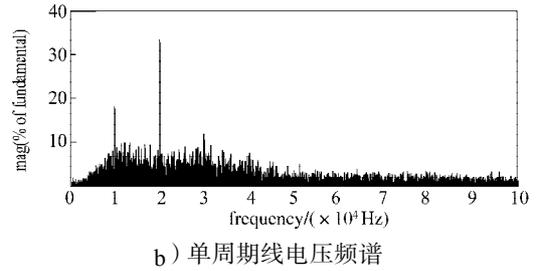


图4 七段对称法的线电压波形及频谱
Fig. 4 Line voltage waveform and spectrum for seven segment symmetry



a) 单周期线电压波形



b) 单周期线电压频谱

图5 随机零矢量比例调制法的线电压波形及频谱

Fig. 5 Line voltage waveform and frequency spectrum for random zero vector ratio modulation

采用七段对称法的输入电机的相电流波形及频谱见图 6。采用随机零矢量比例调制的输入电机的相电流波形及频谱见图 7。

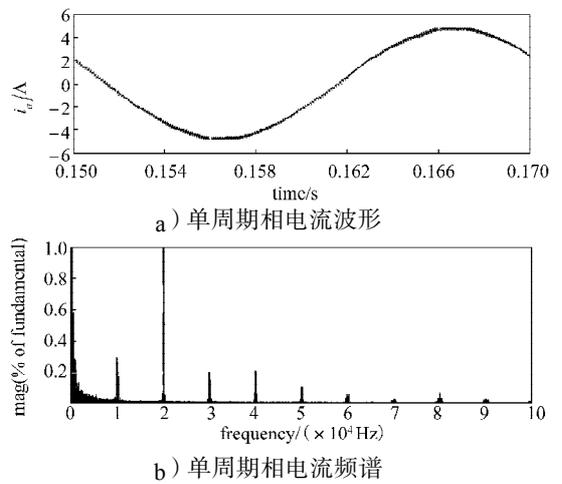


图6 七段对称法的相电流波形及频谱

Fig. 6 Phase current waveform and spectrum for seven segment symmetry

由图 6b 可知,由于电机的相电流类似于正弦波,因此,其载波频率及其倍次频率处的谐波幅值与基波幅值的比例很小,但是在这些频率点上仍然存在一些尖峰幅值。

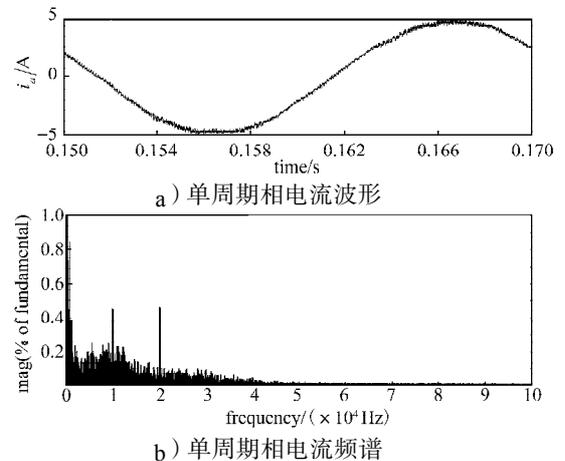


图7 随机零矢量比例调制法的相电流波形及频谱

Fig. 7 Phase current waveform and spectrum for random zero vector ratio modulation

对比图6b和图7b可知,相对于七段对称法,随机零矢量比例调制法的相电流在载波频率及其倍次频率处的幅值向两边散开,尤其是在20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 kHz处,其幅值明显减小。因此,通过随机零矢量比例调制,可较好地抑制了相电流在载波频率及其倍次频率处的幅值。

3.2 试验波形分析

将七段对称法和随机零矢量比例调制法运用在某型电动汽车电机驱动系统中进行试验。该电机的额定功率为100 kW,使用线性同余方法在DSP上产生随机因子^[5],逆变器的开关频率设为4 kHz。试验中,通过泰克示波器(Tektronix DPO 4032)和罗氏电流线圈来测量逆变器输出的线电压和相电流。对于测量出的线电压和相电流波形,使用示波器的FFT功能对波形进行分析,将频谱图的纵坐标设为线性均方根,横坐标设为频率,滤波窗口使用汉宁(hanning)窗。

电机驱动系统在2000 r/min, 300 N·m的运行工况下,七段对称法调制的线电压波形频谱如图8所示。随机零矢量比例调制的线电压波形频谱如图9所示。在图8和图9中,纵坐标每格表示的线性均方根为50 mV,横坐标的每格表示的频率为5 kHz。

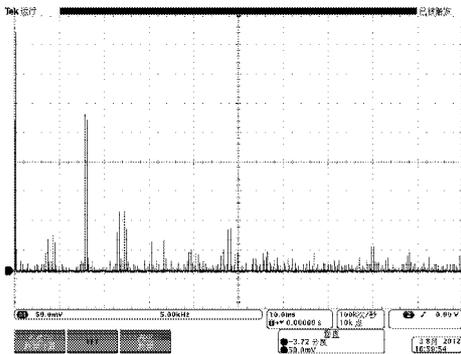


图8 七段对称法线电压的频谱

Fig. 8 Line voltage spectrum for seven segment symmetry

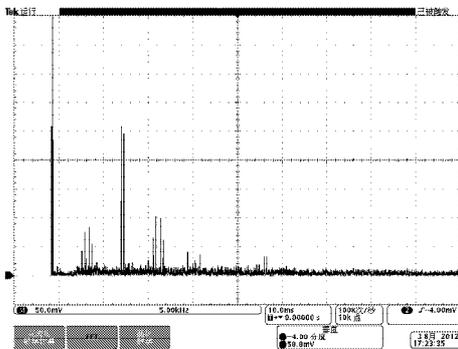


图9 随机零矢量比例调制法线电压的频谱

Fig. 9 Line voltage spectrum for random zero vector ratio modulation

从图8和图9的频谱波形可以看出,七段对称法

在4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 kHz等载波频率及其倍次频率处,存在较大的尖峰幅值,而随机零矢量比例调制法在相应的载波及其倍次频率处的谐波幅值减小,尤其在8, 12, 16, 20 kHz及以上的载波及其倍次频率处,幅值减小得比较明显。这说明,随机零矢量比例调制法可以将线电压在载波及其倍次频率处的幅值向两边扩散,其谐波幅值减小。

七段对称法调制的相电流波形频谱如图10所示。图中,纵坐标每格表示的线性均方根为500 μV,横坐标每格表示的频率为2.5 kHz。随机零矢量比例调制的相电流波形频谱如图11所示。图中,纵坐标每格表示的线性均方根为500 μV,横坐标每格表示的频率为5 kHz。

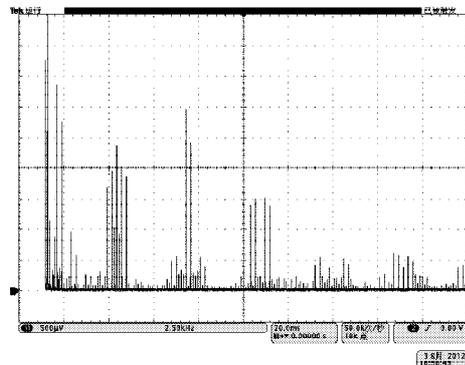


图10 七段对称法相电流的频谱

Fig. 10 Phase current spectrum for seven segment symmetry

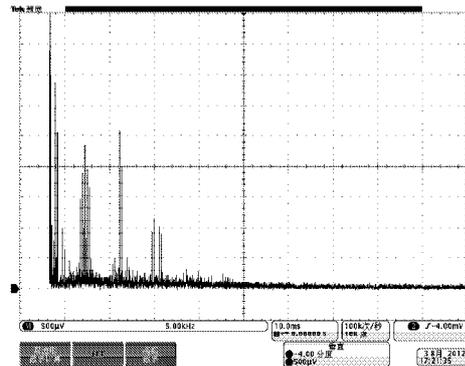


图11 随机零矢量比例调制法的相电流频谱

Fig. 11 Phase current spectrum for random zero vector ratio modulation

从图9和图10可以看出,在载波频率及其倍次处,随机零矢量比例调制法的谐波幅值小于七段对称法相应频率处的幅值,尤其在16 kHz及以上的载波倍次频率处,随机零矢量比例调制的谐波幅值明显减小。

4 结语

本文提出随机零矢量比例调制法来抑制电动汽

车用逆变器电磁干扰。通过仿真实验和试验结果可知,与七段对称法相比,随机零矢量比例调制法可减小载波及其倍次频率处的谐波幅值,且其谐波幅值向两边扩散,使得这些频率处的幅值减小;尖峰幅值的减小,就可以减小对外的传导电磁干扰。随机零矢量比例调制法可以从源头上减少EMI,这对研究电动汽车逆变器的电磁兼容有重要意义,且该方法不用改变逆变器的开关频率,可直接在原有的七段对称法中加随机因子来实现,便于工程实现。

参考文献:

- [1] 徐国凯,赵秀春,苏航. 电动汽车的驱动与控制[M]. 北京:电子工业出版社,2010:139-140.
Xu Guokai, Zhao Xiuchun, Su Hang. Electric Vehicle Drive and Control[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2010: 139-140.
- [2] 马丰民,吴正国,李玉梅. 随机频率PWM逆变器的分析设计[J]. 中国电机工程学报,2008,28(15):67-71.
Ma Fengmin, Wu Zhengguo, Li Yumei. Analysis and Design of the Random Frequency PWM Inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15): 67-71.
- [3] 梁慧. 永磁同步电机频率调制PWM技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
Liang Hui. Frequency Modulate PWM Technology of Permanent Magnet Synchronous Motor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [4] 宋宏彪,郭淑英,蒋时军,等. 利用随机中心位置调制抑制逆变器的电磁干扰[J]. 湖南工业大学学报,2012,26(5):51-55.
Song Hongbiao, Guo Shuying, Jiang Shijun, et al. Suppressing Electromagnetic Interference of the Inverter by Random Center Position Modulation[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(5): 51-55.
- [5] 王文韬. 基于死区补偿的永磁同步电动机矢量控制系统研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2010.
Wang Wentao. Research on Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control System Based on Dead-Time Compensation[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2010.
- [6] Hou Bin, Trzynadlowski A M, Panahi I, et al. Novel Random Pulse Width Modulator with Constant Sampling Frequency Based on the TMS320F240 DSP Controller[C]// The 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON'99 Proceedings. San Jose: IEEE, 1999: 342-347.
- [7] 熊聪颖,吴正国,马丰民. 随机脉宽调制的Simulink仿真研究[J]. 海军工程大学学报,2004,16(3):90-93.
Xiong Congying, Wu Zhengguo, Ma Fengmin. Simulink Investigation of Random PWM[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2004, 16(3): 90-93.
- [8] 贺理,龙永红,滕峻林,等. 基于PWM的机车雨刮控制器的设计[J]. 湖南工业大学学报,2010,24(6):84-88.
He Li, Long Yonghong, Teng Junlin, et al. Design of Locomotive Wiper Controller Based on PWM[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(6): 84-88.
- [9] 谢运祥,卢柱强. 基于MATLAB/Simulink的永磁同步电机直接转矩控制仿真建模[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2004,32(1):19-23.
Xie Yunxiang, Lu Zhuqiang. Simulation and Modeling of Direct Torque Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor Based on MATLAB/Simulink[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2004, 32(1): 19-23.

(责任编辑:邓彬)