

空间矢量控制的三相四桥臂逆变器建模与硬件实现

程蒙江川¹, 陈长兴¹, 耿道田¹, 陈强¹, 陈婷²

(1. 空军工程大学理学院, 西安, 710051; 2. 西安邮电大学, 西安, 710000)

摘要 在三相负载不平衡时, 传统逆变器无法控制三相输出电压达到平衡状态, 因此运用三相四桥臂结构控制零序电压和电流来应对不平衡负载。通过对三相输出电压进行解耦, 并增加了电压和电流的双环控制, 使得空间矢量调制(SVM)对逆变器控制的稳定性增强, 提高了动态响应特性, 运用 Matlab/Simulink 进行建模仿真, 分模块搭建了仿真模型, 仿真达到了预期应对不对称负载和负载突变的效果, 并结合仿真模型算法部分编写了 DSP 程序, 实验观察 SVPWM 波形, 验证了算法的合理性和有效性。

关键词 三相四桥臂逆变器; 空间矢量调制; 数字信号处理器编程

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.019

中图分类号 TN4 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)02-0086-05

Modeling and Hardware Realization of 3-phase 4-leg Inverter Based on SVM

CHENG Meng-jiang-chuan¹, CHEN Chang-xing¹, GENG Dao-tian¹, CHEN Qiang¹, CHEN Ting²

(1. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710000, China)

Abstract: When the loads in three phases are unbalanced, the traditional inverter can not make the output voltages balanced. So a 3-phase 4-leg structure is used for controlling the zero-phase voltage and current to reply the unbalanced loads. In this paper, by decoupling the 3-phase output voltage and adding in the double loop control of voltage and current, the space vector modulation to the inverter control stability is enhanced and the dynamic response characteristic is improved. And then, Matlab/Simulink is applied to modeling and simulating, and the simulation model is set up which make the simulation achieve a desired effect. According to the algorithm, DSP is programmed and by observing SVPWM waveform, reasonability and availability of the algorithm are verified.

Key words: 3-Phase 4-leg Inverter; space vector modulation; DSP programming

在工业生产和生活中经常遇到不平衡负载的情况, 因此逆变电源往往要具备带不平衡负载的能力, 即在负载不平衡时逆变器仍可以输出稳定的三相平衡正弦电压。为了实现这样的功能, 逆变器主要拓扑结构有: Δ/Y 变压器的逆变电源^[1]、中点形成变

压器(NFT)的逆变电源^[2]、直流输入电压的中点作为中性点的逆变电源、三相四桥臂逆变电压。其中三相四桥臂的拓扑结构使变换器具有直流电压利用率高, 变换器体积重量小, 控制灵活等特点。三相四桥臂逆变器的控制策略有 PWM 控制、滞环电流控

收稿日期: 2014-11-03

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JM8344)

作者简介: 程蒙江川(1991-), 男, 陕西咸阳人, 硕士生, 主要从事开关磁阻电机故障诊断研究. E-mail: 505935287@qq.com

引用格式: 程蒙江川, 陈长兴, 耿道田, 等. 空间矢量控制的三相四桥臂逆变器建模与硬件实现[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2015, 16(2): 86-90. CHENG Mengjiangchuan, CHEN Changxing, GENG Daotian, et al. Modeling and Hardware Realization of 3-phase 4-leg Inverter Based on SVM[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(2): 86-90.

制、空间矢量控制等,空间矢量控制技术具有较高的电压利用率^[3],且通过对零矢量的合理控制可以降低谐波含量或降低开关损耗,因此是一种较好的控制方法^[4]。文献[5]在三相四桥臂的拓扑结构上运用了 PWM 调制,使得系统具有带不平衡负载的能力,但其直流电压利用率较低;文献[6]将空间矢量调制与三相四桥臂结合,提高了直流电压利用率,但是系统的稳定性与动态响应不佳;本文即采用空间矢量控制的三相四桥臂拓扑结构,同时引入了双环控制与解耦策略,提高了系统稳定性与动态响应速度,并且降低了三相电压之间的相互影响。

1 基于 abc 坐标系空间矢量算法原理

如图 1 所示是三相四桥臂的拓扑结构,空间矢量算法是基于这个拓扑结构,定义开关函数 s_{ij} ($i = a, b, c, d$), f 代表 4 个桥臂, $j = p, n$ 代表上下管。当 s_{ij} 取 1 表示功率管导通,取 0 表示关断,即可得到电压矢量。

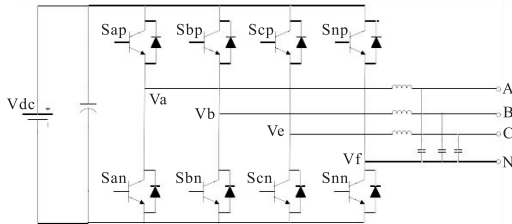


图 1 三相四桥臂拓扑结构图

Fig.1 Topological structure of four-Leg voltage inverters

$$\mathbf{V}_{abc} = \begin{bmatrix} V_a - V_f \\ V_b - V_f \\ V_c - V_f \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} s_{ap} - s_{fp} \\ s_{bp} - s_{fp} \\ s_{cp} - s_{fp} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于上下功率管不能同时导通以免短路,所以 4 个桥臂共有 16 种开关状态,见表 1。为了运算方便,我们把空间矢量单位长度定为直流电压 V_{dc} ,结合表 1,把 16 种开关状态表示在 abc 坐标下就可以得到 adc 坐标系下的矢量图^[7]。

16 个固定的空间矢量来合成任意参考电压。12 面体可以在空间上分成 24 个四面体,每个四面体由 3 个非零矢量和 2 个零矢量构成,只要确立了参考矢量落在哪个四面体中就可以用相应的空间矢量来合成^[8]。

合成参考电压,需要定义指针函数:

$$RP = 1 + \sum_{i=1}^6 2^{(i-1)} C_i \quad (2)$$

式中: C_i 由 V_{af} 、 V_{bf} 和 V_{cf} 确定,只能为 0 或 1。则 RP 取值范围是 1 ~ 64,实际只采用其中 24 个不同的值正好对应了 24 个四面体,每个四面体,由 3 个

非零矢量($\mathbf{V}_{d1}, \mathbf{V}_{d2}, \mathbf{V}_{d3}$)和 2 个零矢量(\mathbf{V}_{d0})组成。根据 RP 就可以确定出参考矢量在哪个四面体中,从而确定出用哪 3 个非零矢量配合零矢量来合成参考矢量。

表 1 开关状态对应空间矢量

Tab.1 Switch state corresponds to the space vector

序号	s_{fp}	s_{ap}	s_{bp}	s_{cp}	V_{af}	V_{bf}	V_{cf}	矢量
1	0	0	0	0	0	0	0	\mathbf{V}_1
2	0	0	0	1	0	0	1	\mathbf{V}_2
3	0	0	1	0	0	1	0	\mathbf{V}_3
4	0	0	1	1	0	1	1	\mathbf{V}_4
5	0	1	0	0	1	0	0	\mathbf{V}_5
6	0	1	0	1	1	0	1	\mathbf{V}_6
7	0	1	1	0	1	1	0	\mathbf{V}_7
8	0	1	1	1	1	1	1	\mathbf{V}_8
9	1	0	0	0	-1	-1	-1	\mathbf{V}_9
10	1	0	0	1	-1	-1	0	\mathbf{V}_{10}
11	1	0	1	0	-1	0	-1	\mathbf{V}_{11}
12	1	0	1	1	-1	0	0	\mathbf{V}_{12}
13	1	1	0	0	0	-1	-1	\mathbf{V}_{13}
14	1	1	0	1	0	-1	0	\mathbf{V}_{14}
15	1	1	1	0	0	0	-1	\mathbf{V}_{15}
16	1	1	1	1	0	0	0	\mathbf{V}_{16}

计算空间矢量作用时间,非零矢量的作用时间为: $\mathbf{d} = \mathbf{M}_d^{-1} \mathbf{V}_{ref}$, 式中:

$$\mathbf{V}_{ref} = \begin{bmatrix} V_{af} \\ V_{bf} \\ V_{cf} \end{bmatrix} \quad (3) \quad \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} V_{d1a} & V_{d2a} & V_{d3a} \\ V_{d1b} & V_{d2b} & V_{d3b} \\ V_{d1c} & V_{d2c} & V_{d3c} \end{bmatrix} \quad (5)$$

零矢量的作用时间是 $d_4 = 1 - d_1 - d_2 - d_3$,只要确定了 RP,就可以根据给定的参考电压,直接得到用来合成的空间矢量及作用时间,计算都是简单运算^[9-10]。然后对这些开关矢量合理安排开关顺序,就可以使每次开关状态改变时只有一相桥臂状态发生变化,其他三相维持不变,从而有效地减小功率管开关频率,减小开关电流应力^[11]。常规控制方法是一个调制周期采用 2 个零矢量,所有的开关矢量对称分布,每个零矢量作用一半的时间,这样波形质量最好^[12-13]。

2 解耦策略与 PI 双环控制

PI 双环控制既是电流环与电压环,增加 PI 控制环路可在负载突变时及时调整电压输出到参考

值,加强系统稳定性^[14]。为了数字信号处理过程计算简化,系统核心控制策略 SVM (Space Vector Modulation)是在 abc 坐标下进行的,但该坐标下的电压电流信号变量较多,不易应用 PI 控制^[15],因此要将采集的电流与电压进行坐标变换,变换至 $dq0$ 坐标系下,以便进行 PI 控制。同时,第四桥臂上串入电感,以消除该桥臂产生的谐波对三相电压影响,但是该电感的引入使得三相电压控制产生了耦合效应,所以要进行解耦才能有效控制输出电压。

首先进行坐标变换, abc 到 $dq0$ 坐标变换见式

(6), $dq0$ 到 abc 坐标变换见式(7), T_1 见式(8)。

$$[X_d \ X_q \ X_0]^T = T_1 [X_a \ X_b \ X_c]^T \quad (6)$$

$$[X_a \ X_b \ X_c]^T = T_1^{-1} [X_d \ X_q \ X_0]^T \quad (7)$$

$$T_1 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

坐标变换后可以看到三相四桥臂逆变系统被划分为 2 部分,一部分为相互耦合的 d 轴通道和 q 轴通道;另一部分为与 d 轴通道和 q 轴通道彻底解耦的 0 轴通道。为了得到优良的控制效果和调节器设计方法,适当加入新的控制结构消除两者间的耦合。电流解耦,在电流 q 通道取值乘以 $-\omega L/V_g$ 作用在参考电流 d 通道 PI 调节后的结果上;电流 d 通道取值乘以 $\omega L/V_g$ 作用在参考电流 q 通道 PI 调节后的结果上。电压解耦,在电压 q 通道取值乘以 $-\omega C/V_g$ 作用在参考电压 d 通道 PI 调节后的结果上;电压 d 通道取值乘以 $\omega L/V_g$ 作用在参考电压 q 通道 PI 调节后的结果上。解耦后见式(9)、(10)。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \mathbf{V}_g \mathbf{G} \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \\ d_0 \end{bmatrix} - \mathbf{G} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\mathbf{C}} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{Ld} \\ I_{Lq} \\ I_{L0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

3 建模与仿真

根据在 abc 坐标系下的空间矢量算法,在 Matlab/simulink 中搭建仿真模型,整体结构见图 2。

通过式(11)计算 V_{af} 、 V_{bf} 、 V_{cf} ,再经过 SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation)模块计算出控制信号,SVPWM 内部结构见图 3。由图 3 可以看出该模块是通过计算 RP 值,见图 4,再进行

查表,计算出控制信号的占空比。然后将开关控制信号作用在逆变电路的 IGBT 上来控制开关管。最后将逆变输出电压经过滤波作用在负载上,观察波形。

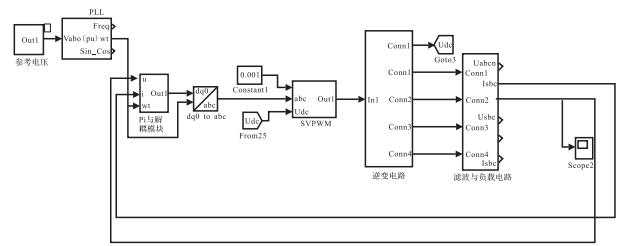


图 2 仿真模型整体图

Fig.2 The simulation model of whole

$$\begin{cases} V_{af} = (1-LC\omega^2)V_M \cos\omega t - \omega L I_A \sin(\omega t) \\ V_{bf} = (1-LC\omega^2)V_M \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) - \omega L I_B \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ V_{cf} = (1-LC\omega^2)V_M \cos(\omega t + \frac{4}{3}\pi) - \omega L I_C \sin(\omega t + \frac{4}{3}\pi) \end{cases} \quad (11)$$

式中: V_M 是额定输出电压的幅值,取 600 V; I_A , I_B , I_C 为负载电流幅值; L 、 C 为滤波电感值和电容值; ω 为输出角频率。

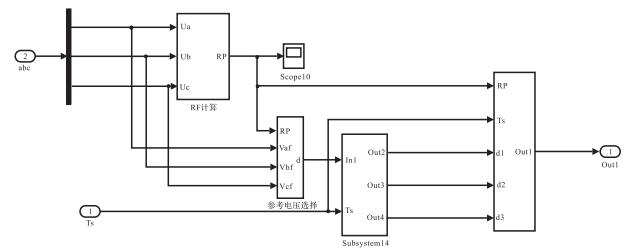


图 3 SVPWM 模块内部结构

Fig.3 The internal structure module of SVPWM

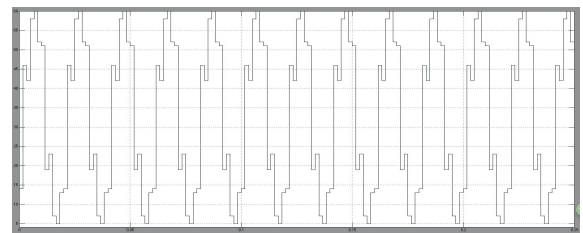


图 4 RP 值波形

Fig.4 Waveform of RP value

仿真具体参数:仿真模式为可变步长 ode45,开关频率为 10 kHz,滤波电容 50 μ F,滤波电感 1 mH,其中电流环 PI 的参数 K_p 是 0.1 K_i 是 20,电压环只用到了 P 调节, K_p 取 0.5。三相负载分别设成不平衡的阻抗负载。具体仿真波形见图 5 负载电流波形是三相不平衡的,而经过空间矢量调制,逆变器输出的电压信号是三相平衡的,见图 6,幅值接近 500 V,说明直流电压利用率较高。图 7 是 SVPWM 模块输出的控制信号,前 3 个桥臂是不规则的等幅不等宽脉冲序列,第四个桥臂是等幅等宽的脉冲序

列,符合 SVM 的控制规律。经多次仿真测试,无论将负载设置成感性还是容性,逆变器输出电压都可以被调制成三相对称的。由于新引入了解耦和双环控制,人为地给输出电压一个扰动,系统在 0.2 s 内又恢复到给定输出,见图 8,可见系统的动态响应特性良好。

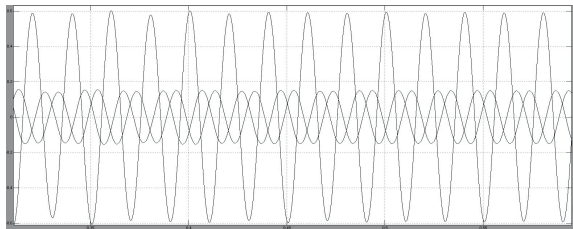


图5 负载电流波形

Fig.5 Waveform of load current

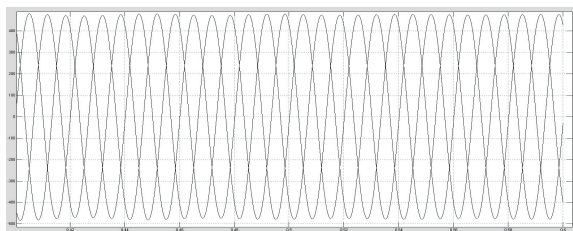


图6 负载电压波形

Fig.6 Waveform of load voltage

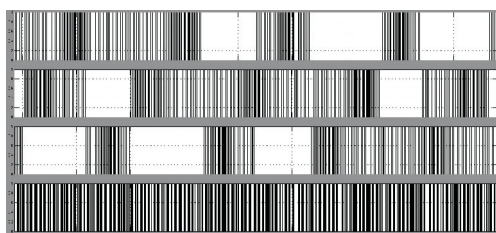


图7 四路控制信号波形

Fig.7 Four-way control signal waveform

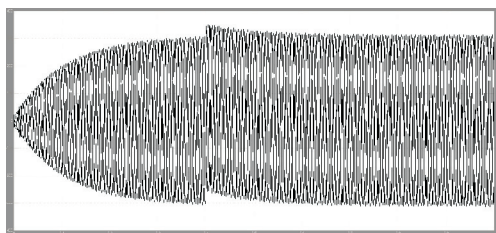


图8 动态响应测试

Fig.8 Dynamic response test

4 DSP 编程实现

仿真成功后,运用 DSP 的事件管理器 Ev1 其中 4 路产生 PWM 波形,可产生 4 路 8 对互补的 PWM 波,并且设置死区时间防止短路。其中的负载电流和电压通过 DSP 内部 AD 进行采集,由于 DSP 中运算过程处理的是数字信号,要将连续信号离散化

采样才能进行计算。程序利用时基计数器 TBCTR 与计数器比较寄存器 CMPA 相等时产生的比较中断,在比较中断程序中进行离散计数和 CMPA 寄存器的更改,更改过程中要运用到影子寄存器。配置计数模式为增减模式,周期为 0.000 1 s,影子寄存器 load 模式采用 TBCTR=0 或时基周期寄存器 TBPRD 时加载。在 CCSv4.1.2 编译成功后下载入开发板的 TMS320F28335 芯片中运行,用示波器观察相应引脚输出波形,见图 9,验证了程序的合理性和有效性。



图9 部分 SVPWM 波在示波器中显示

Fig.9 Part of the SVPWM wave in the oscilloscope display

5 结论

经过仿真的搭建和硬件开发板的实现,证明了空间矢量调制算法可以大幅度提升三相四桥臂逆变器的带不平衡负载的能力,仿真显示出无论负载是阻性、容性还是感性,其输出电压都是三相正弦平衡的,而且有较高的直流电压利用率。在 abc 坐标系下进行算法计算,较 $\alpha\beta$ 坐标系下的计算更简单,提高了在处理器中的运算速度,稳定了输出波形,并且通过解耦策略和坐标系变换实现了电压电流的双环 PI 控制,增强了系统的稳定性。该模型对三相四桥臂逆变器的优化有参考意义,为逆变器的设计提供了依据。

参考文献(References):

- [1] 吴睿,谢少军. 基于 abc 坐标系空间矢量控制的三相四桥臂电压源型逆变器研究[J]. 电工技术学报, 2005,12(12):47-52.
WU Rui, XIE Shaojun. Research on the Four - Leg Voltage Source Inverters Based on Space Vector Modulation in abc Coordinates[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005,12(12):47-52.(in Chinese)
- [2] 余雷,肖蕙蕙,李山. 三相四桥臂逆变电源控制策略[J]. 重庆理工大学学报:自然科学,2013,4(4):72-76.
YU Lei, XIAO Huihui, LI Shan. The Control Strategy for Three-Phase Four-Leg Inverter[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Sci-

- ence, 2013, 4(4): 72-76. (in Chinese)
- [3] 吴家梁, 樊波, 刘嘉, 等. 三相 SVPWM 逆变电源输出波形优化控制策略[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, 14(4): 91-94.
WU Jialiang, FAN Bo, LIU Jia, et al. Optimizing Strategy for Three-phase SVPWM Inverter Output Waveform[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2013, 14(4): 91-94. (in Chinese)
- [4] 李君, 曾岳南, 黄蕾, 等. 空间矢量调制三相 PWM 变频器仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012(7): 339-342.
LI Jun, ZENG Yuenan, HUANG Hui, et al. Space Vector Modulation Simulation Research in Three-Phase PWM Converter[J]. The Computer Simulation, 2012(7): 339-342. (in Chinese)
- [5] 杨宏, 阮新波, 严仰光. 四桥臂三相逆变器的 PWM 控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2002, 34(6): 575-578.
YANG Hong, RUAN Xinbo, YAN Yangguang. Four Bridge Arm of Three-Phase Inverter PWM Control[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 34(6): 575-578. (in Chinese)
- [6] 罗耀华, 许铁岩. 一种三相四桥臂空间矢量脉宽调制方法[J]. 电力电子技术, 2013(1): 61-63.
LUO Yaohua, XU Tiejian. A Three Phase four Bridge Arm Space Vector Pulse Width Modulation Method[J]. Power Electronic Technology, 2013(1): 61-63. (in Chinese)
- [7] 阮新波, 严仰光. 四桥臂三相逆变器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2000, 15(1): 61-64.
RUAN Xinbo, YAN Yangguang. Four Bridge Arm of Three-Phase Inverter Control Strategy[J]. Journal of Electrotechnics, 2000, 15(1): 61-64. (in Chinese)
- [8] 杨宏, 阮新波. 采用 SVM 控制的四桥臂三相逆变器[J]. 电气传动, 2003, 36(5): 32-34.
YANG Hong, RUAN Xinbo. Using SVM Control of Three-Phase Inverter four Bridge Arm[J]. Electric Drive, 2003, 36(5): 32-34. (in Chinese)
- [9] Zhao Yu, Yan Yangguang. A Three-Phase Four-Line Soft Switched Inverter for UPS Applications[C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1992: 696-700.
- [10] 陈新, 龚春英. 应用于三相变换器的三维空间矢量调制[J]. 南京航空航天大学学报, 2002, 34(2): 148-153.
CHEN Xin, GONG Chunying. Applied to Three-Phase Converter of Three-Dimensional Space Vector Modulation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 34(2): 148-153. (in Chinese)
- [11] Van H W, Skudelny H C, Stanke G V. Analysis and Realization of a Pulse Width Modulator Based on Voltage Space Vector[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1998, 24(1): 142-150.
- [12] 徐小品, 杨家强, 黄进. 基于 SVPWM 的电机变频调速系统的研究与实现[J]. 机电工程, 2004(1): 34-38.
XU Xiaopin, YANG Jiaqiang, HUANG Jin. The Motor Variable Frequency Speed Regulation System Based on SVPWM Research and Implementation[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2004(1): 34-38. (in Chinese)
- [13] 刘丙友, 凌有铸, 孟一博. SVPWM 算法的关键技术研究及实现[J]. 计算机工程与应用, 2014(2): 222-224.
LIU Bingyou, LING Youzhu, MENG Yibo. Key Technology Research and Implementation of SVPWM Algorithm[J]. Computer Engineering and Application, 2014(2): 222-224. (in Chinese)
- [14] 邵宇, 马海啸. 一种三角波注入的三相四桥臂逆变器控制策略[J]. 电测与仪表, 2014, 10(19): 81-85.
SHAO Yu, MA Haixiao. A Triangle Wave Injection Control Strategy for Three-Phase Four-Leg Inverter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 10(19): 81-85. (in Chinese)
- [15] 张伦健, 卢春艳, 陈利萍. NPC 三电平 Z 源逆变器空间矢量调制方法[J]. 电源技术, 2013(06): 1046-1048.
ZHANG Lunjian, LU Chunyan, CHEN Liping. NPC three-level Z Source Inverter Space Vector Modulation Method[J]. Power supply technology, 2013(06): 1046-1048. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)