

# 基于双闭环数字控制的组合式 六相逆变器仿真研究

杜贵平, 董必锋

华南理工大学电力学院, 广州 510641

**摘要:** 为提高六相电压源逆变器的带不平衡负载能力, 保持系统的稳定性, 通过分析组合式逆变拓扑结构, 结合双闭环控制策略, 搭建了六相逆变系统。通过仿真表明, 与传统的电压矢量调制方式相比, 该方法计算量少, 相同开关频率下采样点多, 谐波含量低, 带不平衡负载能力强。

**关键词:** 组合式逆变拓扑, 六相电压源逆变器, 双闭环控制

## Simulation study of combined six phase inverter based on double closed loop digital control

DU GUIPING, DONG BIFENG

School of Electric Power, South China University of Technology, GuangZhou 510641

**Abstract:** In order to improve the unbalanced load capacity of six phase voltage source inverter, and maintain system stability through the analysis of the combined inverter topology. A six phase inverter system combined with double closed loop control strategy is established. The simulation results show that the method has less calculation amount and low harmonic content than the conventional voltage vector modulation method in the same switching frequency.

**Keywords:** Combined inverter topology, Six phase voltage source inverter, Double closed loop control

### 1 引言

随着电力电子器件的发展, 在三相电机的基础上, 发展出多相感应电机, 使用低压功率器件来驱动大功率电机成为现实, 避免了由功率器件串联带来的静、动态不均压问题。与三相电机相比, 多相感应电机在系统整体可靠性上有明显优势, 当多相感应电机或其驱动逆变器的一相或几相出现故障时, 不会影响传动系统的启动与运行。且由于转矩脉动频率增加使得脉动幅值缩小, 使系统静、动态特性得以改善, 转子电流得以优化, 谐波损耗降低。特别是在对可靠性要求较苛刻的系统, 如军事、船舶、电车等推进系统中, 六相感应电机作为其中最常用的一种, 得到了广泛应用, 吸引了越来越多的学者对其进行研究。本文根据六相电机的特性, 设计了一种为六相感应电机提供驱

动的逆变电源系统。

### 2 系统结构设计及拓扑

传统的六相逆变器是将两个三相全桥逆变器并联, 构成六桥臂结构, 控制方法上文献[1]采用基于邻近最大两矢量的六相 SVPWM 算法, 文献[3]采用一种基于 24 扇区的矢量空间解耦 SVPWM 算法, 文献[4]采用一种基于邻近最大四矢量的 SVPWM 算法。这些结构相对简单, 但控制算法复杂, 计算量大, 对 DSP 硬件芯片的要求极高。受 DSP 工作频率的限制, 一个周期内的采样点减小, 中频时会更明显, 从而导致输出谐波含量增加, 难以达到高精度的要求。解决计算能力问题的方法有: 一是提高 DSP 的计算能力, 但目前受硬件的影响很难达到; 二是通过拓

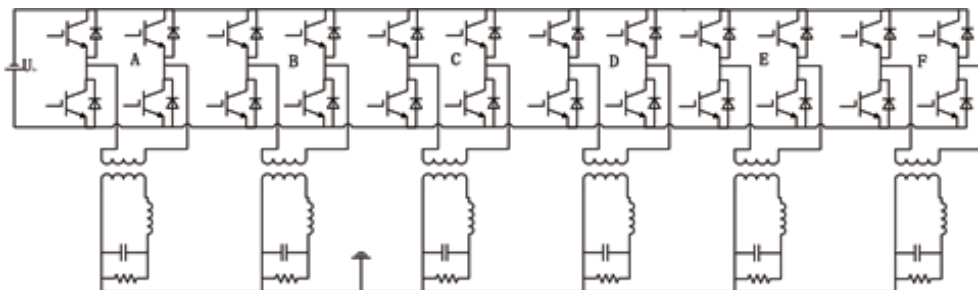


图 1 组合式六相逆变拓扑结构

扑结构，改变控制策略，减少计算量。为此，在组合式三相逆变的基础上，设计了组合式六相逆变拓扑，如图 1 所示。系统由六个相对独立的单相全桥逆变组成，后接一个高频隔离变压器使六相能共地线。

3 控制策略及参数计算

3.1 双闭环控制策略

在逆变器输出控制策略中，双闭环控制因其控制器设计简单，动态响应速度快、输出电压波形失真小等特点，得到了广泛应用。

由于各相之间无相互干扰，可从单相全桥逆变入手研究。单相全桥逆变电路的主电路如图 2 所示。

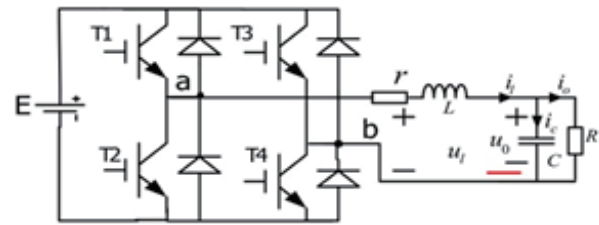


图 2 单相全桥等效电路

其中  $E$ 、 $U_i$ 、 $U_o$  分别是直流母线电压、滤波输入电压和输出电压； $L$ 、 $C$  为滤波电感电容； $r$  为逆变器的等效电阻。

选择电容电压和电感电流作为状态变量其状态方程如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_o \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_L \\ i_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_o \\ i_L \end{bmatrix}$$

双闭环控制原理为：电压调节器  $G_v$  对标准电压信号  $U_r$  与输出电压反馈信号  $U_o$  之间的误差进行 PI 调节，计算

出给定电信信号  $U_{ii}$ ，再使用电流调节器  $G_i$  对给定电信信号  $U_{ii}$  与电容电流反馈信号  $i_o$  之间的误差进行调节，形成控制量  $U_i$ ， $U_i$  逆变器进行控制。系统结构框图如图 3 所示。

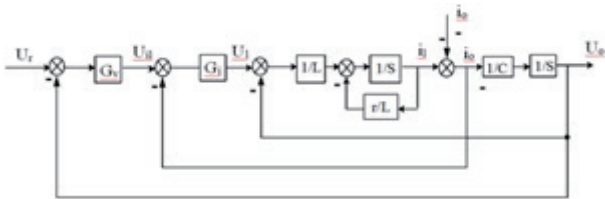


图 3 双闭环控制系统结构框图

3.2 滤波参数计算

在本设计中，组合式系统由六个单相组成，其主电路器件参数可按单相设计，现设单相功率为 1kW，根据 LC 滤波器的设计规则，通常选取 10 倍截止频率为载波频率：  
 $10f_L = f_s$

则有：

$$L = \frac{1}{\omega_s^2 C} = \frac{100}{\omega_s^2 C} \tag{1}$$

$$C = 10 \frac{P}{\omega_s U^2} \tag{2}$$

$P$  为负载额定功率； $\omega_s = 2\pi f_s$  其中  $f_s$  为载波频率 6kHz； $U$  为额定输出电压有效值 60V。由式(1)(2)可以计算出滤波电感为  $L=918\mu H$ ，滤波电容为  $C=76.7\mu F$ 。

3.3 极点配置法计算 PID 参数

本设计采用 PI-P 双环控制方式。电流环增加系统的阻尼系数采用 P 调节器，电压外环维持输出电压恒定采用 PI 调节器，两个调节器共同作用使得整个闭环系统工作稳定。

其闭环特征方程为

$$D(s) = LCs^3 + (r + K_{2P})Cs^2 + (K_{1P}K_{2P} + 1)s + K_{1I}K_{2P}$$

采用极点配置的方法解得

$$K_{2P} = (2 + n)\zeta\omega_n L - r \quad (3)$$

$$K_{1P} = \frac{(1 + 2n\zeta^2)\omega_n LC - 1}{K_{2P}} \quad (4)$$

$$K_{1I} = \frac{n\zeta\omega_n^3 LC}{K_{2P}} \quad (5)$$

根据系统要求, 模型主要参数: 输出滤波电感为  $L=918\mu H$ , 滤波电容为  $C=76.7\mu F$ , 开关频率为  $f_{sw}=6kHz$ , 等效阻尼电阻为  $r=0.1\Omega$ ; 选取期望阻尼比  $\zeta=0.707$ ,  $n=10$ 。由式 (3)(4)(5) 计算可得  $K_{1P}=0.31$ ,  $K_{1I}=0.31$ ,  $K_{2P}=0.31$ 。

#### 4 系统仿真

为了验证设计的方案, 用 Matlab/Simulink 建立了组合式六相逆变器的仿真系统如图 4 所示, 主要由 6 个单相逆变模块组成, 每个单相的输出端接入一个高频隔离变压器, 实现六相共地。Subsystem 是各个单相的控制模块, 其内部结构如图 5 所示, 按照双闭环控制策略的原理, 将

标准电压与反馈的滤波电容电压相比较, 其结果进入 PID Controller 进行 PI 计算, 得到标准电流值与反馈的电容电流进行比较, 其结果再进入 PID Controller, 进行 P 计算, 计算结果进入 PWM Generator 生成 SPWM 波, 实现对 IGBT 模块的控制。

主要参数如下: 输入电压为 60V, 电压频率为 50Hz, 直流侧电容为 4.8mF, 隔离变压器的额定功率为  $2.5e^8VA$ , 滤波电感为  $918\mu H$ , 滤波电容为  $76.7\mu F$ , 为检测带不平衡负载的能力, 在一、四相设置  $3.6\Omega$  的纯电阻负载; 二、五相设置突变负载, 运行 0.05s 后由空载转带负载; 三、六相设置为容性负载, 并联一个 1nF 的电容。从仿真结果如图 6 所示, 可以看出, 无论是纯阻性负载、容性负载、突变负载, 输出电压波形在频率和幅值上的稳定性都很好。

图 7、8 为带突变负载输出的波形和 FFT 分析图。从图中可以看出, 当 0.05s 时阻性负载突变, 负载电流出现, 但负载电压调节时间几乎为 0, 且在突变的 20 个周期内, 输出电压的 THD 为 0.13%。说明这种结构有很好的动态响应性能。

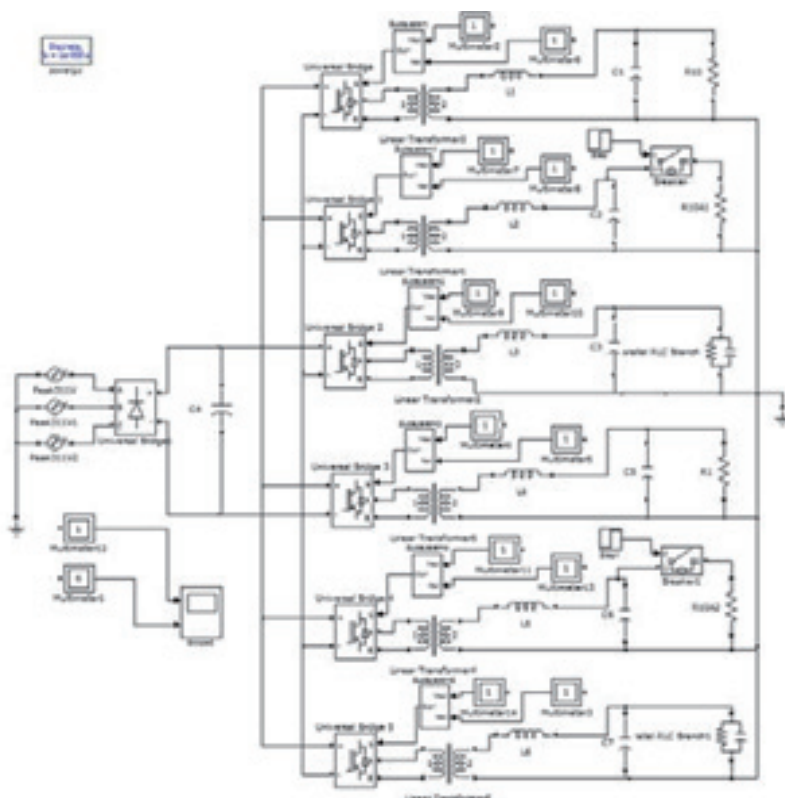


图 4 组合式六相逆变电路仿真框图

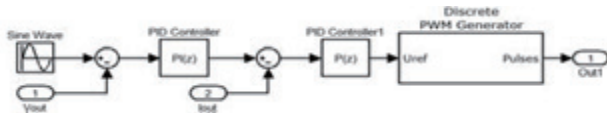


图 5 Subsystem 内部结构仿真图

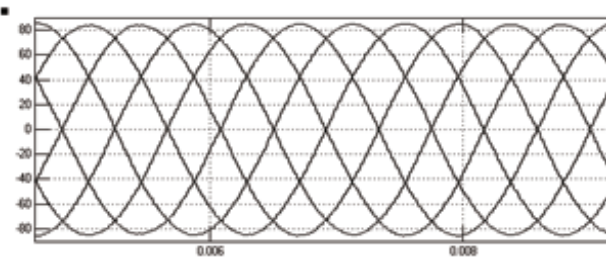


图 6 输出电压波形图

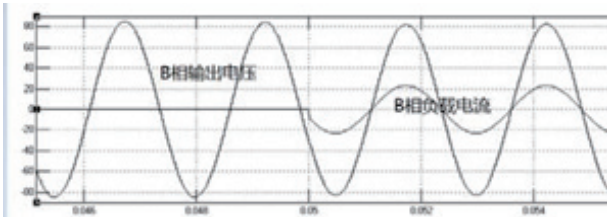


图 7 突变负载的电压电流波形图

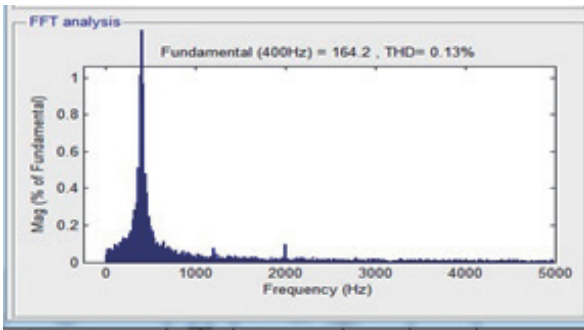


图 8 输出电压的 FFT 分析

5 总结

通过仿真表明，组合式六相逆变拓扑结构在双闭环控制策略下，能够输出稳定的六相电压波形，具有优良的动

静态性能，尽管结构稍显复杂，但算法简单，谐波含量低，带不平衡负载能力强，便于硬件实现。

参考文献

[1] Zhao Yifan, Lipo T A. Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(5): 1100-1109.

[2] 陈敏. 9KVA 组合式三相逆变器的研制. 南京航空航天大学 2002 年

[3] Marouani K, Baghli L, Hadiouche D, et al. A new PWM strategy based on a 24-sector vector space decomposition for a six-phase VSI-fed dual stator induction motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 1910-1920.

[4] 杨金波, 杨贵杰, 李铁才. 六相电压源逆变器 PWM 算法. 电工技术学报 2012. 07

[5] 董钊, 王跃龙, 林琼斌. 单相逆变器新型双闭环控制算法的研. 电气开关 2014. 03

[6] 蔡巍, 张晓峰, 乔鸣忠. 基于 DSP\_FPGA 的多相逆变器控制器设计. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版) 2009. 02

[7] 杨金波, 杨贵杰, 李铁才. 六相电压源逆变器 PWM 算法. 电工技术学报 2012. 07

[8] 付胜杰, 彭侠夫. 六相逆变器空间矢量脉宽调制策略的分析与优化. 哈尔滨工程大学学报 2012. 04

作者简介

杜贵平 (1974), 男, 博士, 研究生导师, 主要从事电力电子技术方面的研究工作, 77517062@qq.com ;

董必锋 (1982), 男, 工学硕士, 研究生, 主要从事电力电子技术方面的研究工作, 48750571@qq.com。