

基于DSP的中频发电机逆变单相工频电源设计

陈桂玉, 黄灿水, 李东旭, 汤宁平
(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 介绍了中频发电机用单相逆变电源的工作原理。设计了一种全数字式、低成本、较高精度的逆变电源, 在双极性正弦脉冲宽度调制 SPWM 控制部分采用数字信号处理器 DSP 来实现硬件电路和软件算法。实验结果表明, 该设计方案能够将中频发电机三相中频电压变换成单相工频电压, 并确保输出电压稳定, 达到良好效果。

关键词: 中频发电机; 逆变器; 数字信号处理器; 正弦脉冲宽度调制; 电压反馈

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-3175(2010)11-0018-03

Invertible Single-Phase Power-Frequency Power Supply Design for Medium Frequency Generator Based on DSP

CHEN Gui-yu, HUANG Can-shui, LI Dong-xu, TANG Ning-ping
(College of Electrical Engineering and Automation, FuZhou University, FuZhou 350108, China)

Abstract: Introduction was made to the working principle of invertible single-phase power supply used for medium frequency generators. A fully digital type, low cost and higher accuracy invertible power supply was designed. For the dual polarity sine pulse width modulation (SPWM) control part, the digital signal processor (DSP) was adopted to realize the hardware circuit and software algorithm. Experimental results show that the design plan can transfer three-phase medium voltages of medium frequency generators into single-phase power-frequency voltages and ensure output voltages stable, to achieve good effect.

Key words: medium frequency generator; inverter; digital signal processor; sine pulse width modulation; voltage feedback

传统的单相交流发电机体积大、重量重, 移动很不方便, 与之相比, 三相中频发电机以其体积小、重量轻、便于携带而备受关注 and 广泛使用。但是, 中频发电机输出的是频率和幅值都与市电不同的三相交流电, 一般用电设备不能直接使用, 需要逆变电源来转换成单相工频正弦交流电。

1 系统主电路结构

逆变电源主电路结构如图1所示。由主电路图可以看出, 系统结构主要分为两部分, 前级为整流部分, 后级为逆变部分。系统通过三相不控整流, 再由电容滤波, 得到的直流侧电压, 经单相桥式正弦脉冲宽度调制SPWM(Sinusoidal Pulse width Modulation)型逆变, 由LC滤波电路滤波, 得到单相交流电; 逆变部分采用闭环控制。

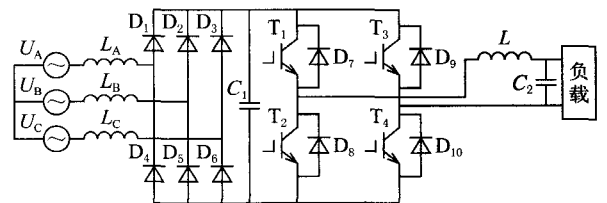


图1 中频发电机用逆变电源主电路图

本设计中逆变电源整流部分的控制采用三相桥式不控整流的方案, 该整流方式可以通过逆变部分电压反馈的闭环控制来确保最终输出的工频电压稳定在所需范围内。逆变部分的控制采用单相双极性SPWM控制, 且针对输出电压进行反馈控制, 它可以克服开环控制的输出波形质量差、总谐波畸变率高等不足, 保证输出电压在所需的电压范围内^[1-2]。

2 逆变部分的控制

三相电源经过不控整流后接到电压型逆变

作者简介: 陈桂玉(1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为新型电机理论与控制技术。

器, 逆变器输出接到工频使用设备上。为满足所需变频调速要求, 逆变器的4个开关必须通过合理的关断来控制, 本文通过DSP实现的双极性SPWM控制就可以满足该要求。

建立SPWM信号的数学模型的方法常用的是采样型SPWM法, 本次方案选用不对称规则采样形式。

如图2所示, U_s 是三角载波峰值, T_c 是三角载波周期, 正弦波与三角波的两个腰各产生一个交点, 既在三角波的顶点对称轴位置采样, 又在三角波的底点对称轴位置采样, 即每个载波周期采样两次。 t_1 、 t_2 是采样时刻, t_{on1} 、 t_{off1} 、 t_{on2} 、 t_{off2} 是SPWM上的“开”、“关”时间, M 为调制度。将SPWM法生成的波形和对应开关时间在同一个图中形象地表示出来, 具体的反映了两者之间的关系。

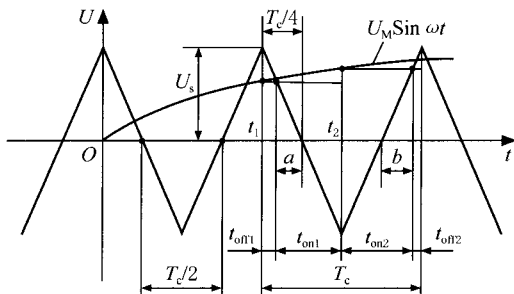


图2 不对称规则采样法生成SPWM波

由图2可得:

$$\begin{cases} t_{on1} = \frac{T_c}{4} [1 + M \sin(\omega t_1)] \\ t_{on2} = \frac{T_c}{4} [1 + M \sin(\omega t_2)] \end{cases} \quad (1)$$

由于每个载波周期采样2次, 设载波比 $N = f_c / f = 1/T_c f$, $t_1 = kT_c/2$, k 为偶数; $t_2 = kT_c/2$, k 为奇数, 则:

$$\begin{cases} \omega_1 = 2\pi f t_1 = \frac{\pi k}{N} & (k=0, 2, \dots, 2N-2) \\ \omega_2 = 2\pi f t_2 = \frac{\pi k}{N} & (k=1, 3, \dots, 2N-1) \end{cases} \quad (2)$$

把公式(2)代入公式(1)可得:

$$\begin{cases} t_{on1} = \frac{T_c}{2} [1 + M \sin(k \frac{\pi}{N})] & (k=0, 2, \dots, 2N-2) \\ t_{on2} = \frac{T_c}{2} [1 + M \sin(k \frac{\pi}{N})] & (k=1, 3, \dots, 2N-1) \end{cases} \quad (3)$$

所以生成的SPWM波脉宽为 $t_{on} = t_{on1} + t_{on2}$, 虽然该模型比较复杂, 但是生成的阶梯波更加接近于正弦波, 使得谐波分量的幅值更小^[3 5]。

3 软件设计

软件设计中程序框图如图3所示。

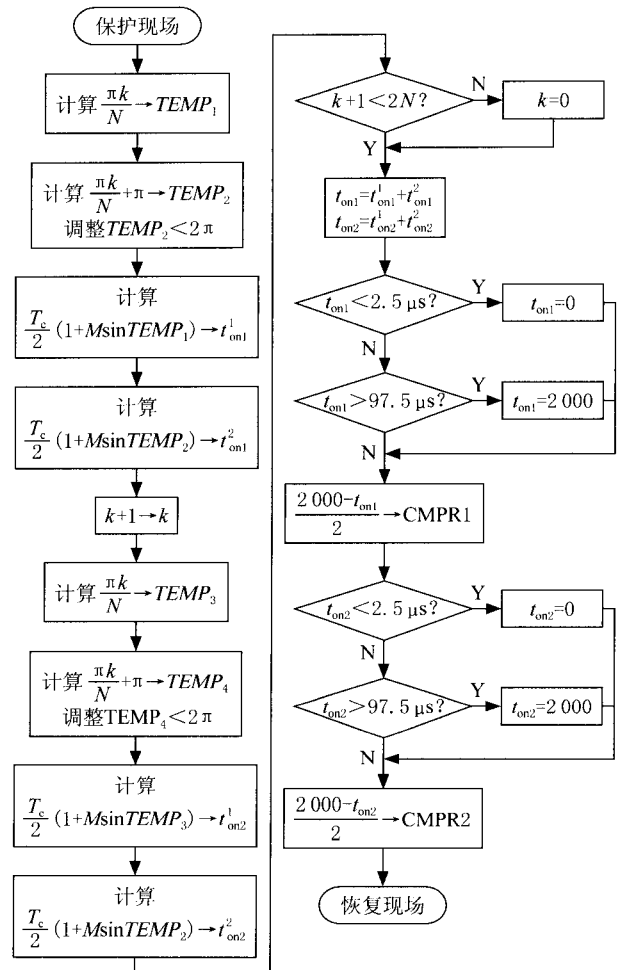


图3 定时器下溢中断子程序框图

实验中采用了TI公司的TMS320LF2407A的DSP, 有两个专门用于电动机控制的事件管理器EV, 每个都包含有8个16位的PWM输出通道以及可以防止上下桥臂直通的可编程死区功能。程序中, 设定载波频率为10 kHz。DSP晶振15 MHz, 内部1.33倍频, 时钟频率设定为20 MHz, 计数周期为50 ns。设定调制波频率为50 Hz。死区时间设为1.6 μs, 最小删除脉宽为2.5 μs。定时器采用连续增减计数方式。利用下溢中断每个载波周期都产生一次中断, 在每次中断都根据公式(3)分别计算出下一个载波周期的比较值。

在图3中所示的相关周期中断的程序流程图中: $TEMP_1 \sim TEMP_4$ 为中间变量, 随采样点 k 对应的值的变化而变化; $CMPR1$ 、 $CMPR2$ 为DSP比较寄存器, 用于装入比较值; t_{on1}^1 、 t_{on2}^1 为采用不对称规则法 t_1 、 t_2

采样时刻的顶点采样时间, t_{on1}^2 、 t_{on2}^2 则为对应 t_1 、 t_2 采样时刻的底点采样时间。

4 电压环设计

本系统实验装置中采用电压环反馈, 由于对系统动态性能要求不是很高, 采用了平均值电压反馈法。

4.1 电压平均值反馈原理

所谓电压平均值反馈控制是以输出正弦波整流后的波形平均值作为反馈控制量, 来实现对逆变器的控制。这种控制策略的特点是简单, 即将输出电压整流平均值与电路给定值相减以获得输出电压的误差, 再对其进行比例积分调节后, 给出相应的电压调制系数后与标准正弦波相乘, 从而得到所需的调制波进而产生PWM波形。

4.2 防积分饱和PI调节器

实验装置中逆变器输出的电压采用数字PI调节器, 即采用DSP对电机进行控制, PI调节器中的积分环节虽然可以消除静态误差, 提高控制精度, 但是同时也会使得PI运算的积分积累较大, 造成系统振荡, 调节时间延长, 所以, 为了消除积分饱和带来的不利影响, 采用防积分饱和PI调节器。

具体算法如下:

$$U = R_{k-1} + K_p e_k \quad (4)$$

$$U_k = \begin{cases} u_{max} & U \geq u_{max} \\ u_{min} & U \leq u_{min} \\ U & u_{min} \leq U \leq u_{max} \end{cases} \quad (5)$$

$$R_k = R_{k-1} + K_I e_k + K_C (U_k - U) \quad (6)$$

公式(4)、(5)、(6)中: U_k 为第 k 次采样时刻的输出值; e_k 为第 k 次采样时刻输入的偏差值; K_I 为积分系数, $K_I = K_p T / T_1$; K_C 为积分饱和修正系数, $K_C = K_I / K_p = T / T_1$ 。

本实验中采用在遇到8的倍数采集一点的方式, 共采集了50个瞬时值。为提高精度, 防止有些点因谐波干扰等产生失真, 50个点中去掉最高点和最低点再取平均值, 按照周期中断程序流程图, 如图4所示进行相关逻辑比较, 计算出调制度实际值 U_k , 进而求出 M 值, 根据公式(3)可以算出SPWM波脉宽, 从而可以控制逆变器4个开关的开和关^[6]。

在DSP中加入电压反馈控制后, 周期中断程序流程图如图4所示。其中, 周期值为DSP周期寄存器

中存储的周期值; t_{min} 为生成的SPWM波脉宽设定的最小允许值。

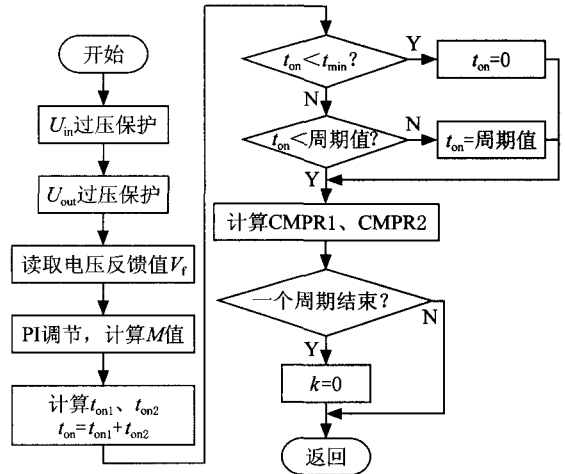


图4 定时器下溢周期中断程序流程图

5 实验和结论

本实验结果是在中频发电机后加逆变电源, 采用电压环反馈控制后运行相应的DSP程序得出的。实验中所用的中频发电机技术参数如下: 输出三相交流电频率为500~600 Hz, 空载电压为250~300 V, 额定功率为1 kW。本设计通过逆变电源转变成幅值为230 V, 频率为50 Hz的单相交流电。最终输出电压波形和电流波形分别如图5 a)和b)所示。从实验结果可以看出, 尽管调节整流的直流侧输出电压大于设定值, M 取值都会随着整流直流侧输入电压的变化经电压反馈后相应改变(初始 M 值设定为0.85), 使逆变器输出一系列电压正弦波形, 输出频率为50 Hz, 并且电压值保持在230 V, 电流约为4.35 A。

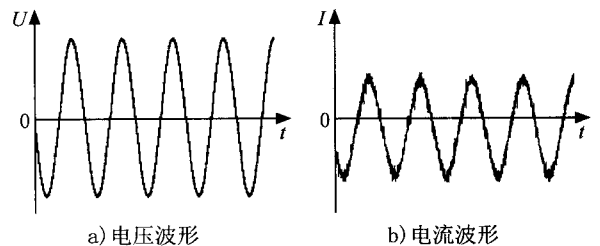


图5 中频发电机加逆变电源输出波形图

6 结语

中频发电机与常用工频发电机相比, 单位体

(下转第24页)

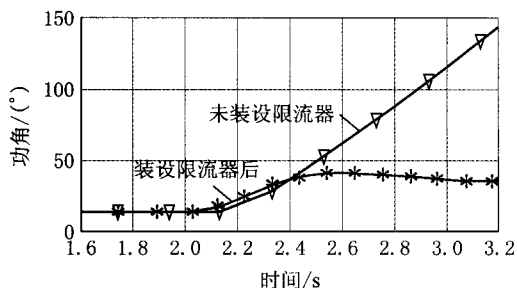


图5 三相短路功角波形图

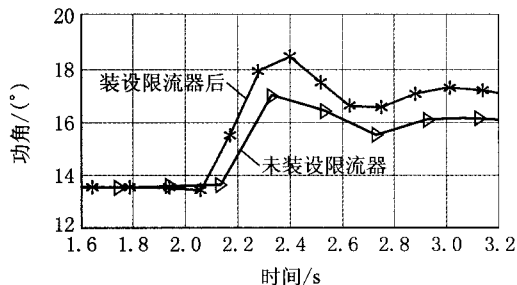


图6 单相接地短路功角波形图

从图5中可以看出：三相短路情况下，由于附加电抗 X_d 为0，所以不接限流器时功角失去稳定，而接入限流器后，发电机和无穷大系统间的转移电抗不为无穷大，因此有效地保持了功角的稳定。对于单相接地故障，如图6所示，故障时由于附加电抗 X_d 不为0，限流器接入与否对发电机功角的影响与系统的实际参数及限流电感的参数有关。

4 结语

本文对带旁路电感的桥式固态限流器的控制策

略做了一个改进，通过仿真验证了该控制策略的正确性，使得在系统发生不对称故障时，非故障相电流不受故障相的影响。随后在单机无穷大系统中研究了桥式固态限流器对发电机功角稳定的影响：即在线路首端发生最严重的三相短路情况下，桥式固态限流器可以有效地抑制发电机功角的失稳，而在其它非对称性故障的情况下，限流器的接入对发电机功角的影响很小。

参考文献

- [1] 费万民, 吕征宇, 吴兆麟, 等. 三相接地系统短路故障限流器及其控制策略[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(8): 33-37.
- [2] 蔡永华, 江道灼, 吴兆麟. 三相桥式固态限流器数学模型及其仿真研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(5): 56-61.
- [3] 赵中原, 吕征宇, 江道灼. 新型固态限流器三相主电路拓扑及控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 42-46.
- [4] 蔡永华, 江道灼, 吴兆麟. 带旁路电感的变压器耦合三相桥式固态限流器的控制策略研究[J]. 继电器, 2003, 31(10): 9-12.
- [5] 张鹏飞, 江道灼, 刘华蕾. 带旁路电感的新型固态限流器试验研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 67-72.
- [6] 郝志杰, 江道灼, 蔡永华. 新型固态故障限流器对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 50-56.

收稿日期: 2010-07-24

(上接第20页)

积内的功率密度较大，在同等功率条件下具有体积小、重量轻、便于携带作业的优点，适用于军用和户外使用。给出了中频发电机用逆变电源来实现的主电路和控制方法，采用不控整流和双极性SPWM脉宽调制原理，通过交-直-交变换来输出单相正弦波，为保证波形稳定还运用了电压环反馈的PI控制策略。在双极性SPWM控制部分采用DSP芯片进行数字化控制。理论分析和实验证明该方案是可行的，其控制方式能满足工频输出要求，并且运行安全可靠。

参考文献

- [1] 王晓明, 王玲. 电动机的DSP控制[M]. 北京: 北京航

空航天大学出版社, 2004.

- [2] 何苏勤, 王忠勇. TMS320C2000系列DSP原理及实用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] 林渭勋. 现代电力电子电路[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- [4] 陶永华. 新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [5] 俞杨威, 金天均, 谢文涛, 吕征宇. 基于PWM逆变器的LC滤波器[J]. 机电工程, 2007, 24(5): 50-52.
- [6] 魏光, 李群湛. 基于DSP的SPWM优化算法研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(32): 184-186.

收稿日期: 2010-07-14