微电网模拟系统

Microgrid simulation system

林俊宏 鄢义洋 杨光

华中科技大学 电子信息与通信学院 材料学院（湖北 武汉 430074 ）

**摘要：**系统采用三相半桥拓扑，以STM32F407ZET6单片机为主从控制器，主控制器在dq坐标下进行控制实现三相稳压输出，从控制器采用主从均流控制实现两台三相逆变器的电流分配，采用三相同步锁相环(SRP-PLL)。逆变器单独工作时，输出交流母线电压为24.01V，频率为49.99Hz，总谐波畸变率为1.63%，系统整体效率为92.33%，负载调整率为0.12%。逆变器并联工作时，系统实现了两台逆变器输出功率比可调，输出线电流折算值误差最大值为0.06A，并联工作负载调整率为0.21%。此外，系统具有友好的人机交互界面及输入欠压及过压保护功能。

**关键词**：三相逆变器 主从均流 三相同步锁相环SPF-PLL

林俊宏（1997~），男，大学本科，研究方向：嵌入式系统

鄢义洋（1997~），男，大学本科，研究方向：高温SiC新型封装

杨光（1998~），女，大学本科，研究方向：通信工程

# 系统方案论证

## 比较与选择

### 主拓扑方案选择

**方案一：三相半桥拓扑。**由三个半桥组成，半桥桥臂输出经LC滤波可实现三相逆变，输出交流电压幅值仅为母线电压的一半，对直流电压利用率不高，但控制策略与电路结构均较简单。

**方案二：三相全桥拓扑。**由三个全桥组成，在相同输入电压条件下，输出交流电压幅值较半桥电路较高。但电路结构与控制策略均较复杂。

综上所述，为了尽可能的减小系统的复杂度，选择方案一。

### 均流控制方案选择

**方案一：主从控制。**主逆变器实现稳压输出，从逆变器实现恒流输出，整体输出实现均流，无法实现独立控制，主逆变器崩溃则整个系统崩溃，但控制策略简单，控制精度高，负载调整率好。

**方案二：双环控制。**系统通过调节外电压环获得各逆变器电流基准值，据此进行PI调节实现均流输出，系统可靠性高，但控制相对复杂。

综上所述，为了实现较好的负载调整率，选择方案一。

## 系统方案描述

系统由主电路、驱动电路、测量电路、辅助电源电路、控制电路与显示电路组成。主电路采用三相半桥电路，实现三相DC/AC变换，测量电路实现了三相电压电流的测量。系统总体方案如图1所示。



图 1 系统总体方案

# 理论分析与计算

## 提高效率的方法

系统主要的效率损耗包括开关管的开关损耗与导通损耗，电容等效串联电阻的损耗以及电感的铜损与铁损等。据此，可选择合适的开关频率，当开关频率增大，可减小滤波器体积，但增加了开关管的开关损耗，折衷考虑，选择开关频率为50kHz；选择开关管时，低导通电阻可减少导通损耗，栅极电容较小可减少驱动损耗，折衷考虑，选择导通电阻与栅极电容适中的开关管；选择等效串联电阻较小的CBB电容作为输出电容，且多个并联，可降低输出电容的等效串联电阻；选择铁氧体材料磁芯，铁氧体材料电阻率较高，可有效降低电感涡流损耗。

## 同时运行模式控制策略

### dq旋转坐标系下的稳压策略

当三相逆变器输出电压幅值为*UM*的对称三相电压时，通过转换矩阵可将输出电压从三相abc静止坐标系变换到两极性同步旋转坐标系下的变量，此时可得：

 (1)

其中，三相静止坐标系到两相旋转坐标系的转换矩阵为：

 (2)

在三相对称稳态时，dq坐标系下的d轴分量数值与输出电压幅值相等，而q轴分量为0。据此，故主控制器在dq坐标系下进行电压单环控制实现输出稳压。

### 基于主从控制的均流策略



图 2 主控制器控制框图

系统采用主从控制策略实现两逆变器并联均流。系统控制主逆变器使其工作于稳压模式，控制从逆变器工作于恒电流模式，实现主从逆变器的输出均流。

从控制器通过PI调节调整两相旋转坐标系下的角频率ω，实现输出电压q轴分量为0实现PLL锁相环。PLL锁相环实现两台逆变器输出电压同步，并依据主逆变器输出电流，给定从逆变器的电流指令，采用PI调节控制从逆变器的输出电流，实现电流分配。主、从控制器控制框图分别如图2和3所示。



图 3 从控制器控制框图

# 电路与程序设计

## 主电路与器件选择

### 开关管选型

系统额定输出线电压*UO*=24V，系统主电路采用三相半桥逆变，最大输出交流幅值为直流母线电压的一半，故直流母线电压至少为38.2V，留取一定的裕量，开关管耐压须大于50V。单逆变器运行时，最大输出电流为2A。故开关管选择Fairchild公司生产的NTD3055，最大漏源电压*VDS*=60V，最大漏极电流*ID*=9A，可满足电压电流应力需求。

### 滤波器参数设计

（1）滤波电感设计。取电感电流纹波为平均电感电流的0.2，为保证电感电流不断流，由伏秒平衡：

 (3)

式中，*VS*是系统稳定时的最大输入电压，其值选择为50V，*VO*为额定输出线电压24V，*T*为开关周期，取10μs。代入参数计算，L=650μH。由于系统主电路为三相半桥逆变结构，故每线电压滤波电感为两个半桥桥臂电感感值之和，故实际选择的三个电感感值为350μH。

（2）滤波电容设计。设计LC滤波器截止频率为开关频率*fs*的10%，可获得较好的滤波效果，根据公式：

 (4)

代入参数计算*C*≥1.5μF，由于三相半桥逆变结构，每相滤波电容实际选取容值为4.7μF，等效串联电阻小，且高频特性好的CBB电容。

## 控制电路与控制程序

控制电路分为主从控制器两部分。主控制器工作在稳压控制模式，系统使用互感器测量两相线电压，经dq坐标变换与PI调节算法实现输出幅值稳定的对称三相电压。从控制器工作于稳流控制模式，在PLL锁相环获取交流母线电压相位后，通过PI调节算法调节输出电流同频同相并实现两逆变器的均流。主、从控制器的程序流程图分别如图4与图5所示。

 

图 4 主控制器控制流程图 图 5 从控制器控制流程图

## 电压电流测量电路

交流电压测量电路使用TVA1421-01型互感器测量AB、BC交流相电压，由于控制器仅能采集0~3.3V的电压，故需要对互感器输出信号增加直流偏置，实际电路如图6所示，使用TL431基准电源产生2.5V基准电源，经电阻分压获得1.6V基准电压接在+VREF。根据互感器的应用手册，互感器原边输入电流需要小于6mA，根据互感器原边输入电压24V，故设计电阻R1=4.7kΩ，设计输出电阻RL=150Ω。

交流电流测量电路如图7所示，使用ACS712-05B霍尔传感器芯片，最大可测量电流5A，由于本题最大线电流为2A，电流峰值为2.83A，可满足题设要求，且抗干扰能力强，测量精度高，VIOUT引脚信号为一直流偏置为0.5倍VCC的交流信号，将该信号传输至ADC引脚。由于电压电流存在相位问题，在实际制作电路时需注意电压电流相位关系。FILTER引脚接入1nF（数据手册推荐取值）瓷片电容与芯片内部集成电阻形成RC低通滤波器，减小高频噪声对信号的影响，但若该电容取值过大，虽然提高了抗干扰能力，但引入了额外的相移，且该传感器芯片在实际交流测量时也会存在相移问题，故对相位要求有一定要求的场合如功率因数测量时，不推荐该方案。

 

图 6 交流电压测量电路 图 7 交流电流测量电路

## 驱动电路设计

由于系统采用主电路采用三相半桥拓扑，故使用半桥驱动电路即可，驱动电路使用了IR2110半桥驱动电路，实际电路如图8所示。图中电容为半桥自举电容，其取值与MOSFET的输入电容有关，耐压需要超过VCC引脚上的电压，一般选择MLCC，其高频性能较好，二极管为US1M，反向耐压值为1000V的肖特基二极管，由于自举电路的工作特点，其反向耐压值一般需要超过半桥直流母线电压+V\_DC，且为快恢复二极管。



图 8 半桥驱动电路

# 测试方案与测试结果

## 测试方案及测试条件

### 测试方案

（1）启动逆变器1，调节输入电压为50V，调节负载，使负载线电流*I在直流O*为2A，使用钳形功率计测量各线电压有效值、频率与交流母线电压谐波畸变率。万用表测量输入电压电流以及三相输出线电压与相电流，并计算系统效率。

（2）调节负载，使负载线电流在0~2A范围内变化，计算负载调整率。

（3）启动逆变器2，调节负载使负载线电流*IO*为3A，测量逆变器1与逆变器2的线电流，并测量负载线电压频率。

（4）调节负载使负载线电流*IO*在1~3A范围内变化，测量逆变器1与逆变器2的线电流，计算绝对误差与负载调整率。

（5）设定两台逆变器的功率比，测量逆变器1与逆变器2的线电流，计算绝对误差。

### 测试仪器

数字存储示波器Tektronix TDS1002；数字万用表U3402A；钳形功率计Hioki3169-21

## 测试结果及其完整性

### 输出线电压与THD测试

测试条件：启动逆变器1，调节输入电压为50V，调节负载使负载线电流*IO*为2A，使用钳形功率计测量输出线电压有效值、频率与谐波畸变率。

表 1 逆变器1输出测试

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量位置 | AB线 | BC线 | AC线 | 平均值 |
| 输出线电压/V | 24.02 | 24.00 | 24.01 | 24.01 |
| 输出线电压频率/Hz | 49.99 | 50.00 | 50.01 | 50.00 |
| 输出线电流/A | 2.03 | 2.05 | 2.04 | 2.04 |
| THD | 0.58% | 0.69% | 0.61% | 0.63% |

### 逆变器效率测试

测试条件：调节负载使负载线电流*IO*为2A，使用万用表测量输入电压电流并测量三相线电压电流，计算逆变器1效率。

表 2 逆变器1效率测试

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 输入电压*UIN*/V | 50.32 | 输入电流*IIN*/A | 1.83 | 效率 |
| 输出AB线电压*UAB*/V | 24.02 | 输出电流*IA*/A | 2.03 |  |
| 输出BC线电压*VBC*/V | 24.00 | 输出电流*IB*/A | 2.05 |
| 输出AC线电压*UAC*/V | 24.01 | 输出电流*IC*/A | 2.04 |

### 负载调整率测试

测试条件：调节负载电流在0~2A内变化,测量输出电压计算负载调整率。

表 3 逆变器1负载调整率测试

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 负载电流*IO*/A | 0 | 2.03 | 负载调整率 |
| 输出电压*UO*/V | 23.98 | 24.01 | 0.12% |

### 并联输出测试

测试条件：启动逆变器2，调整负载电流Io=3A，使用万用表测量逆变器1与逆变器2电流，并测量负载电流与输出电压频率。

表 4 并联输出测试

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 逆变器1输出电流/A | 逆变器2输出电流­/A | 负载电流/A | 输出电压频率/Hz |
| 1.53 | 1.47 | 3.01 | 49.98 |

逆变器1和逆变器2能同时向负载输出功率，输出电压频率满足题设要求。

### 并联负载调整率测试

测试条件：调整负载电流在1~3A内变化，使用万用表测量两台逆变器输出电流与负载电流，并计算误差，测量输出电压，计算负载调整率。

表 5 均流输出测试

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 逆变器1电流/A | 逆变器2电流/A | 负载电流/A | 绝对误差/A | 负载电压/V |
| 0.05 | 0.11 | 0.16 | 0.06 | 24.02 |
| 0.67 | 0.62 | 1.30 | 0.05 | 24.09 |
| 1.46 | 1.52 | 2.98 | 0.06 | 24.07 |
| 负载调整率 | 012% | 最大误差/A | 0.06 | |

### 分流比设定测试

测试条件：设定逆变器1与逆变器2分流比K，调整负载电流在1~3A范围内变化，使用万用表测量两台逆变器输出电流与负载电流，并计算误差。

表 6 分流比设定测试

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 设定K值 | 负载电流/A | 逆变器1电流/A | | 逆变器2电流/A | |  |
| 实际值 | 折算值 | 实际值 | 折算值 | 误差 |
| 1:2 | 1.072 | 0.360 | 0.720 | 0.712 | 0.712 | 0.008 |
| 3:4 | 2.060 | 0.902 | 1.203 | 1.158 | 1.158 | 0.045 |
| 2:1 | 2.97 | 2.003 | 1.94 | 0.967 | 0.967 | 0.069 |

经过测试，当负载电流在1~3A范围内变化时，逆变器1与逆变器2分流比可在1:2~2:1间可调，最大误差电流为0.069A,达到题设要求。

## 测试结果分析

据以上测试结果，本系统很好的完成了题设要求，逆变器1工作时，输出线电压24V，频率49.99Hz，负载电流为2A时，系统效率可达92.33%，交流母线畸变率仅为1.63%，负载调整率为0.12%。逆变器1与逆变器2并联时，负载调整率仅为0.21%，负载电流在1~3A范围内变化时，均流比可调且最大绝对误差仅为0.08A。

# 总结

系统采用三相半桥拓扑，主控制器采用dq坐标变换实现三相稳压输出，从控制器采用主从控制法实现两台三相逆变器的并联均流实现了微电网模拟。逆变器1工作时，输出交流母线电压频率为50.00Hz，总谐波畸变率仅为1.63%，系统整体效率可达92.33%，负载调整率为0.12%。逆变器并联工作时，系统实现了两台逆变器输出功率比可调，最大绝对误差仅为0.06A，负载调整率仅为0.21%。

# 参考文献

[1] 陈坚. 电力电子学—电力电子变换和控制技术. 北京: 高等教育出版社, 2004.12.

[2] 康华光. 电子技术基础（第四版）. 北京: 高等教育出版社, 1999.

[3] 谭浩强.C语言程序设计[M].北京:清华大学出版社,2012

[4] 刘风君.正弦波逆变器[M].北京:科学出版社,2002

[5] 徐慧. 电压控制型三相逆变器的并联与并网技术研究[D].华中科技大学,2007.