微电网模拟系统

**摘要：**

**关键词**：

# 方案论证

### 逆变方式选择

**方案一：双极性SPWM调制。**该方案使用内置正弦表生成正弦调制波驱动全桥，控制策略简单，但相对单极性SPWM调制谐波分量频率较低需要截止频率较低的滤波器，故滤波电感电容值较大，滤波器体积较大。

**方案二：单极性SPWM调制。**该方案使用内置正弦表配合定时器产生单极性SPWM驱动全桥，控制策略相对复杂，但实现了载波的倍频，可使谐波分量高频化，滤波器体积相对较小且正弦输出电压THD小。

综上所述，为了减小功率因数测量的误差，需要逆变输出电压THD尽可能小，故选择方案二。

### 无线通信方式选择

**方案一：蓝牙通信。**该方案使用蓝牙模块实现两控制器之间无线数据收发。蓝牙通信方案控制简单，但通信距离较短，传输速率有限，且抗干扰能力较差，通信过程中容易丢失数据包甚至断开连接。

**方案二：2.4G无线通信。**该方案使用2.4G无线模块实现无线数据收发，容易受到2.4G WLAN无线信号等的干扰。但2.4G无线通信方案成本相对较低，操作方便，能实现超远距传输，稳定性相对更好，但是传输速率有限。

综上所述，为了提高系统稳定性，实现远距离电网质量监控，选择方案二。

## 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、显示电路与无线通信电路组成。其中主电路采用全桥拓扑，实现DC/AC变换，测量电路实现了输入电压与输出电压电流的精确测量，无线通信电路实现了主控制器与从控制器间的通信，辅助电源电路将输入电压降压至5V与15V，为控制电路、测量电路、驱动电路以及无线通信电路供电。系统总体方案如图1所示。



图 1 系统总体方案

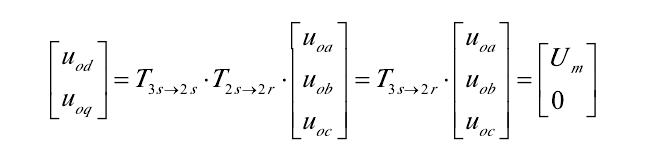
# 理论分析与计算

## 逆变器提高效率的方法

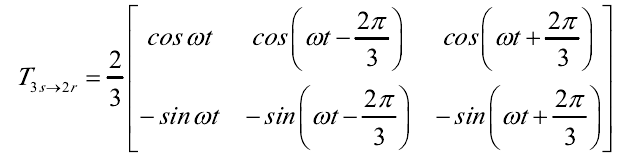
## 同时运行模式控制策略

### 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变换到dq坐标系下的变量，此时可得：



其中，三相静止坐标系到两相旋转坐标系的转换矩阵为：



在三相逆变器输出电压对称的情况下，dq坐标系下的d轴分量为输出电压幅值，而q轴分量为0。据此，在主控制器中使用dq坐标变换算法测得输出电压幅值并通过PI调节实现稳压，从控制器中通过PI调节调整ω使输出电压q轴分量为0实现PLL锁相环。主、从控制器的控制框图如图x所示。

### 基于主从控制的均流策略

系统采用主从控制策略实现同时运行及并联均流。主逆变器设为电压源，实现输出稳压。从逆变器设为电流源，调节两逆变器输出电流，实现输出均流。

其中，主控制器采用dq坐标变换算法，将三相静止坐标系下的电压电流变换到两相旋转坐标系中的电压电流，并采用PI调节实现稳压。从控制器采用PLL锁相环实现对交流母线电压锁相，并依据主逆变器输出电流，采用PI调节控制输出电流，实现两逆变器输出的均流。

# 电路与程序设计

## 逆变器主电路与器件选择

## 控制电路与控制程序

系统划分为主控制器与从控制器两部分。主控制器工作在电压源模式，通过dq坐标变换算法与PI调节算法实现输出幅值稳定的对称三相电压。从控制器工作于电流源模式，在PLL锁相环获取交流母线相位后，通过PI调节算法调节输出同频同相电流并实现两逆变器的均流。主、从控制器的程序流程图如图x所示。

# 测试方案与测试结果

## 测试方案及测试条件

### 测试方案

（1）调节系统输入电压Uin=60V，线路电阻R=10Ω，调节负载RL使负载电流IO在0.8A~1.33A内变化，测量负载两端电压UO，计算负载调整率。

（2）切换负载为阻容性负载，电阻RO=20Ω，负载电容CO=50μF，使用钳形功率计测量负载侧功率因数角，并记录控制器显示值，计算显示误差。

（3）切换负载为阻感性负载，电阻RO=20Ω，负载电容LO=60mH，使用钳形功率计测量负载侧功率因数角，并记录控制器显示值，计算显示误差。

（4）切换负载为电阻串联二极管，此时输出电流为半波，有效值为全波的0.707倍，调节负载电阻RL使输出电流在0.57A至0.94A内变化，使用钳形功率计测量负载侧功率因数角与频谱，并记录控制器显示值，计算显示误差。

（5）缓慢减小系统输入电压至50V以下，测试系统输入欠压保护功能，缓慢升高输入电压，测试自恢复功能。

（6）缓慢增加系统输入电压至70V以上，测试系统输入过压保护功能，缓慢降低输入电压，测试自恢复功能。

### 测试仪器

（1）数字万用表U3402A。

（2）钳形功率计Hioki3169-21

## 测试结果及其完整性

### 负载调整率测试

测试条件：调节Uin=60V，调节负载RL使负载电流IO在0.8A~1.33A内变化，使用万用表测量负载两端电压UO，计算负载调整率。

表 1 负载调整率测试

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 负载电流IO/A | 0.84 | 1.03 | 1.35 |
| 负载电压UO/V | 20.03 | 20.04 | 19.97 |

根据负载调整率公式SI==0.3%，达到题设要求。

### 阻容性负载功率因数测试

测试条件：调节Uin=60V，切换负载为阻容性负载，负载电阻RO=20Ω，负载电容CO=50μF，使用钳形功率计测量负载侧功率因数角，并记录控制器显示值，计算显示误差。

表 2 阻容性负载功率因数测试

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 理论功率因数 | 实际功率因数 | 显示功率因数 | 误差 |
| 0.2997 | 0.2981 | 0.294 | 1.4% |

经过测试控制器显示值与实际值误差为1.4%，达到题设要求。

### 阻感性负载功率因数测试

测试条件：调节Uin=60V，切换负载为阻感性负载，负载电阻RO=20Ω，负载电感LO=60mF，使用钳形功率计测量负载侧功率因数角，并记录控制器显示值，计算显示误差。

表 3 阻感性负载功率因数测试

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 理论功率因数 | 实际功率因数 | 显示功率因数 | 误差 |
| 0.7277 | 0.7341 | 0.7473 | 1.8% |

经过测试控制器显示值与实际值误差为1.8%，达到题设要求。

### 负载电阻串联二极管测试

测试条件：调节系统输入电压VIN=60V，切换负载为电阻串联二极管，调节负载电阻RL使输出电流在0.57~0.94A内变化。经计算可得，此时负载电路的实际功率因数为0.707。

表 1. 功率因数测量

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 测试一（IO=0.591A） | 测试二（IO=0.783A） | 测试三（IO=0.907A） |
| 测量功率因数 | 0.701 | 0.704 | 0.702 |
| 误差/% | 0.84 | 0.42 | 0.71 |

经过测试，测量所得功率因数与实际功率因数间的误差均在2%以内，满足题设要求。

表 2. 输出电流谐波列表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测试次数 | 谐波次数 | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 测试一（IO=0.591A） | 测量谐波分量有效值/A | 0.407 | 0.176 | 0.032 | 0.013 | 0.008 |
| 实际谐波分量有效值/A | 0.413 | 0.1764 | 0.034 | 0.0136 | 0.0079 |
| 误差/% | 1.45% | 0.22% | 5.88% | 4.44% | 1.26% |
| 测试二（IO=0.783A） | 测量谐波分量有效值/A | 0.544 | 0.235 | 0.043 | 0.017 | 0.01 |
| 实际谐波分量有效值/A | 0.5508 | 0.237 | 0.0442 | 0.0179 | 0.0099 |
| 误差/% | 1.23% | 0.84% | 2.71% | 5.03% | 1% |
| 测试三（IO=0.907A） | 测量谐波分量有效值/A | 0.628 | 0.272 | 0.05 | 0.019 | 0.011 |
| 实际谐波分量有效值/A | 0.6357 | 0.2752 | 0.0508 | 0.0202 | 0.0109 |
| 误差/% | 1.21% | 1.16% | 1.57% | 5.94% | 0.917% |

经过测试，除去由于高次谐波分量测量精度不足而导致误差较大外，测量所得的其余较低次谐波分量有效值与实际值间误差在2%以内，满足题设要求。

### 输入欠压保护及自恢复测试

测试条件：逐渐减小输入电压Uin至50V以下， 记录输出电流为零时的输入电压值。缓慢增加输入电压Uin，记录系统自恢复时的输入电压值。

经过测试，当输入电压为49.91V时，保护动作，输出电流为零，缓慢增加输入电压，当输入电压为50.09V时，系统恢复正常工作。

### 输入过压保护及自恢复测试

测试条件：逐渐增加输入电压Uin至70V以上，记录输出电流为零时的输入电压值。缓慢减小输入电压Uin，记录系统自恢复时的输入电压值。

经过测试，当输入电压为70.23V时，保护动作，输出电流为零，缓慢减小输入电压，当输入电压为69.98V时，系统恢复正常工作。

## 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，额定输入条件下变换器负载调整率为0.3%，输出纹波仅为400mV，跟踪伏安特性曲线最大误差为0.81%，且具有输入欠压、过压保护及自恢复功能。

# 总结

本系统采用全桥拓扑，结合双控制器实现了一个模拟电网质量控制监控系统。主控制器采用SPWM调制实现正弦输出模拟电网电压，从控制器实时测量与显示负载侧电压值、电流值与功率因数等电网质量信息。主控制器与从控制器使用超远距2.4G无线技术通信，传输负载侧电压信息，并在输入侧进行实时PI调节实现负载侧稳压输出。系统稳定性好，通用性强，负载调整率为1.3%，负载侧电压电流测量最大误差仅为1.2%，功率因数测量最大误差仅为1.7%。此外，系统具有友好的人机交互界面以及输入欠压及过压保护功能，