

家用光伏发电并网装置的研制

刘鸿源 李震^(通讯作者) 覃祥媚 冯汉杰 陈志 陈增晋 王红

桂林电子科技大学机电工程学院, 广西桂林, 541004;

摘要: 基于 SOGI 原理与扰动观察法设计了一款具备 MPPT 功能的家用光伏发电并网装置。该装置能够精准检测电网交流电压相位, 以及逆变器输出电流的相位与幅值等关键参数, 具备功率因数可控、运行稳定可靠的突出特性。实际运行数据显示, 该装置持续稳定地向电网输出有功功率, 且精准实现最大功率点跟踪。本文重点介绍了装置的方案设计和硬件电路设计。

关键词: SOGI; MPPT; 光伏发电

DOI: 10. 69979/3041-0673. 25. 11. 100

引言

在绿色能源发展浪潮中, 家用光伏发电并网是实现可持续能源利用的关键, 逆变器性能直接影响系统稳定性与效率^[1]。传统边沿触锁相技术虽简单、成本低, 但在相位跟踪精度、动态响应及抗干扰能力方面表现欠佳, 仅适用于对性能要求较低的简单家用场景; 而优势显著的无需虚拟正交量的单相并网逆变器矢量控制技术, 能精准实现相位跟踪, 面对复杂多变的电网环境可快速响应并有效抵抗干扰, 确保电能高质量传输, 尽管实现过程较为复杂, 但随着硬件性能提升, 成本逐渐可控, 在中高端家用场景中性价比极高, 有力推动家庭能源高效、稳定并网, 有望引领家庭能源利用的新变革。

1 方案设计

本设计主要由辅助电源、电压电流采样模块、降压式变换器、逆变器、微控制器五部分构成, 系统结构框图如图 1 所示。

系统以微控制器 STM32F407ZGT6 为控制核心。电压电流采样模块由运放电路与电流测量芯片 INA282AIDR 组成, 负责检测电网交流电压相位及逆变器输出电流的相位和幅值, 并将数据传至微控制器。控制上采用双环策略: 电流内环基于 SOGI 原理精确控制输出电流; 功率外环用扰动观察法实现 MPPT 功能, 提升能源转换效率。

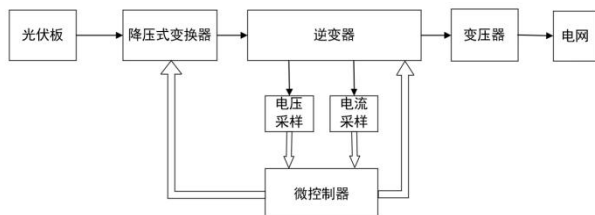


图 1

2 硬件电路设计

根据上述图 1 系统结构框图, 各模块硬件电路原理及功能如下。

2.1 辅助电源

辅助电源用于外部电源供电时给电压电流采样模块、降压式变换器、逆变器以及微控制器供电。本文所设计的辅助电源电路主要由两个部分构成, 分别是以 LM15144DDAR 为核心的+12V 输出电路和以 TPS54202DDCR 为核心的+5V 输出电路。输入电压经过相关处理后, 首先通过 LM15144DDAR 芯片转换为+12V 直流电压, 然后+12V 电压再作为 TPS54202DDCR 芯片的输入, 进一步转换为+5V 直流电压, 以满足不同电路模块的供电需求。辅助电源模块电路如图 2 所示

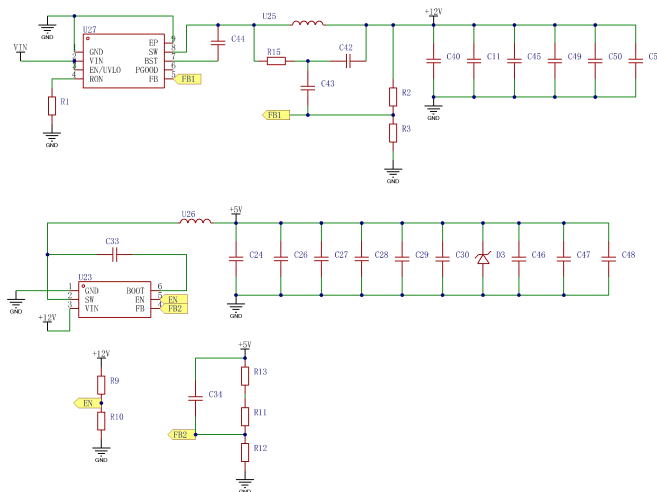


图 2

2.2 电压电流采样模块

图 3 为电压采样电路图。外部交流电压信号 ACN 和 ACL 端口输入。首先, 信号经 R5、R6 组成的分压电路, 将幅值调整至适合后续电路处理的范围。分压后的信号接着流入由 C25、C28 与 R8、R9 构成的 RC 滤波电路, 滤除高频噪声。

随后,经过分压与滤波的交流信号进入运算放大器U8。该运算放大器同相输入端连接的1.5V参考电压,将原本以零电位为中心波动的交流信号进行电平抬升,使其整体上移1.5V,为后续ADC采集电路的处理提供便利。同时,运算放大器对信号进行放大与精细调理,输出幅值和电平平均恰到好处的交流信号。

最后,经运算放大器处理的信号通过R7接入后级电路。由C27和E1组成的电路对其进一步滤波与稳压,最终输出的信号可用于后续的精确定量与分析,例如输入微控制器ADC引脚进行数字化采集,进而精准计算出交流电压的幅值、频率等参数。

在交流电流检测领域,电流传感器扮演着关键角色。电流传感器能够直接对交流电流展开感应与测量。它内部集成了感应元件,可精准地将被测交流电流所产生的磁场转化为电信号,鉴于此,电流传感器U2常被选作电流采样电路的核心部件。

当有交流电流通过电流传感器的测量通道时,传感器内部的感应元件会产生一个与电流大小成正比的微弱电信号。接着,芯片内部的信号调理电路会对这个微弱电信号进行放大、滤波等处理,以增强信号的强度和质量,减少噪声干扰。最终,芯片输出一个与输入交流电流幅值成比例的模拟电压信号。

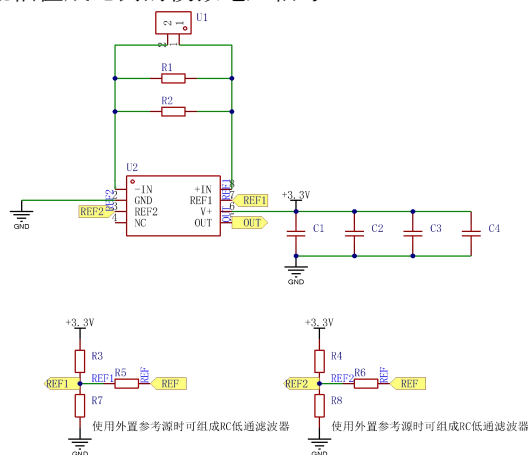


图 3

2.3 降压式变换器

图 4 为降压式变换器拓扑图。在运行过程中,当开关管 S1 导通、S2 关断,太阳能板所提供的直流电源迅速通过 S1 对电感 L 和电容 C 充电,同时为实际存在但图中未显示的负载供电。期间,电感 L 储存能量,电流逐步上升,电容 C 两端的电压也随之升高。当 S1 关断、S2 导通时,由于电感 L 中的电流不能瞬间改变,便会产生感应电动势以维持电流,通过 S2 的体二极管持续向电容 C 和负载释放先前储存的能量,电流逐渐下降。此外,由电感 L 与电容 C 构成的滤波电路,借助电感对

电流变化的阻碍作用以及电容存储和释放电荷的特性,共同使输出电压更加平滑,有效减少纹波,稳定输出 4 2V 直流电,为负载提供可靠的电力供应。

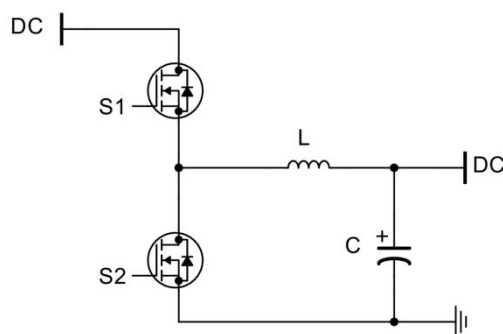


图 4

2.4 逆变器

图 5 为逆变器拓扑图。在逆变输出交流电压正半波时候,高频桥臂上管 S1 由占空比 D 驱动跟随输出正弦波参考值与输入直流母线的关系决定降压的比例,高频桥臂下管 S3 与 S1 互补驱动。在交流正弦波正半周期期间,工频桥臂下管 S4 则是一直处于导通状态,而工频桥臂上管 S2 则是一直处于关断状态。在逆变输出交流电压负半周时候,高频桥臂下管 S3 由占空比 D 驱动跟随输出正弦波参考值与输入直流母线的关系决定降压的比例,高频桥臂上管 S1 与 S3 互补驱动。在交流正弦波负半周期期间,工频桥臂上管 S2 则是一直处于导通状态,而工频桥臂下管 S4 则是一直处于关断状态。

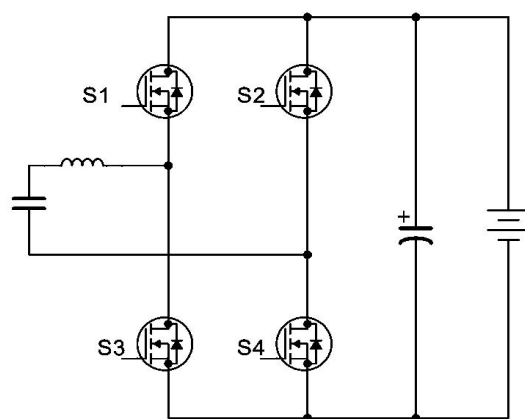


图 5

3 软件设计

由基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律分析得到并网逆变器在旋转坐标系下的数学模型^[2]:

$$\begin{cases} u_d = L \frac{di_d}{dt} - \omega_0 Li_q + e_d \\ u_q = L \frac{di_q}{dt} + \omega_0 Li_d + e_q \end{cases} \quad (1)$$

u_d 、 u_q : 逆变器输出电压的 d、q 轴分量;

i_d 、 i_q : 逆变器输出电流的 d、q 轴分量;

e_d 、 e_q : 电网电压的 d、q 轴分量; ω_0 : 电网电压的角频率。

这里的旋转坐标系是以电网电压的角频率进行同步旋转的。 α 、 β 轴矩阵与 dq 轴矩阵的相互变换关系为^[3]:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

在三相对称系统中, 相位信息比较容易获得, 故同步旋转坐标系下的 PI 控制已经被广泛使用。但是在单相系统中, 在同一时刻只能采样到一个电压值, 无法直接将电压瞬时值转换到旋转坐标系下^{[4][5]}。为了得到单相系统在旋转坐标系中的数学模型, 需构造一个虚拟的正交输入电流变量 i_b , 其构造方法为: 将网侧电流的瞬时值作为电流的 α 轴分量 i_a , 设 I_{grid} 网侧电流的幅值, 为锁相环检测网侧电压, 得到的相位 θ_{grid} 和频率作为 i_a 的相位和频率^{[6][7]}。设定电流 β 轴与电流 α 轴频率相同, 但其相位滞后 90° , 那么也可以得到 i_a 和 i_b 的表达式:

$$\begin{cases} i_a = i_{\text{grid}} = I_{\text{grid}} \cos \omega t \\ i_b = I_{\text{grid}} \sin \omega t \end{cases} \quad (3)$$

将电网电压作为网侧电流的参考向量, 进行坐标变换可得:

$$\begin{cases} I_d = I_{\text{grid}} \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (4)$$

I_d 和 I_q 可以分别作为输入电流有功分量和无功分量的参考值。在光伏发电系统中, 最大功率点跟踪技术是提升太阳能电池板发电效率的关键, 本系统采用常见且易于实现的扰动观察法作为 MPPT 控制策略^[8]。其原理为动态监测与调整太阳能电池输出功率和逆变器输出电流间的关系: 系统启动后实时测量太阳能电池当前时刻输出电压与电流, 并据此计算输出功率; 随后将当前功率值与前一时刻功率值作比较, 若当前功率值大则扰动方向正确, 反之则错误需改变; 确定功率变化趋势后再判断功率变化量大小, 若变化量大于设定阈值则按当

前扰动步长继续调节, 小于则适当减小步长以精准跟踪; 通过不断循环测量、计算、比较和调整过程, 系统实时适应外界环境变化, 持续跟踪最大功率点, 最大程度提高发电效率, 其具体流程在图 6 算法流程图中直观呈现。dq 旋转坐标系下的电流控制框图如图 7 所示。

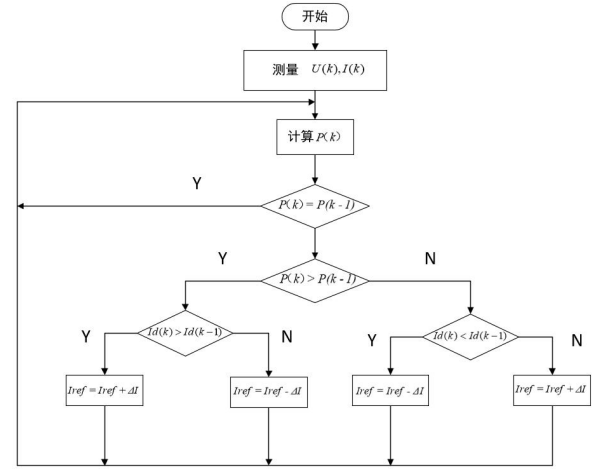


图 6

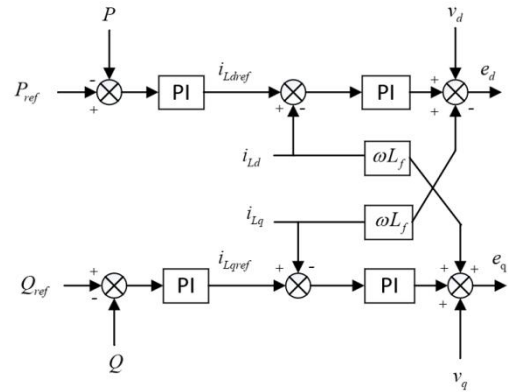


图 7

4 实验结果

校准实验仪器后, 通过台表进行实际测量。在本次试验中, 电压输入部分选用模拟光伏板, 其由直流电源与电阻依据光伏板的特性搭建而成。于整个装置的后级, 精心接入了一台变压器。这台变压器肩负着关键使命, 它能够实现电压转换, 将 24V 电压稳定提升至 220V, 从而满足并网所需的电压标准, 确保整个电力系统能够顺利并网运行。

最大功率点 P 计算如式 (5)。电网电压与逆变器输出电压见图 8, 其中 1 通道为电网电压波形, 2 通道为逆变器输出电压波形。电网电压与逆变器输出电流见图 9, 其中 1 通道为电网电压波形, 2 通道为逆变器输出电流波形。

$$P = \frac{U^2}{4R} \quad (5)$$

式中: U — 学生电源输出电压值

R — 电阻阻值

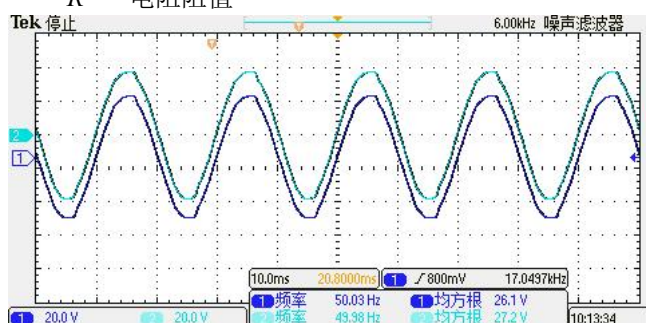


图 8

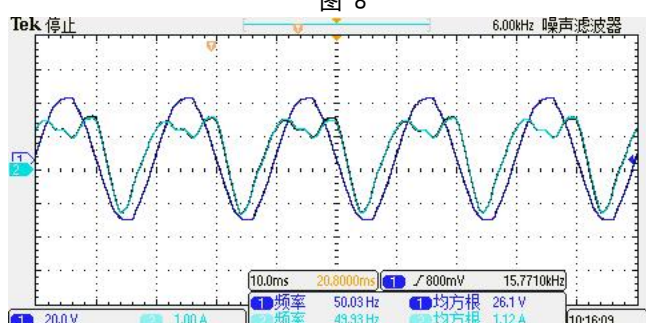


图 9

在实验过程中, 直流电源输出电压值稳定在 46V, 实验电阻阻值取 16 欧姆。通过运用式 (5) 进行精确计算, 最终得出该模拟光伏电源的最大输出功率 P 为 33.06 瓦。

从图 8 与图 9 的数据能够清晰看出, 逆变器输出电压与电网电压在频率和相位上高度一致, 完全符合并网的严格要求。在此基础上, 逆变器输出电流紧紧跟随电网电压的变化趋势, 这表明输出功率主要为有功功率。具体而言, 逆变器输出电压的有效值为 27.2V, 逆变器输出电流的有效值为 1.12A。经计算可得, 此时的输出功率达到 30.46 瓦, 这一数值已基本逼近最大功率点, 充分满足了系统预先设定的设计要求。

5 结论

本文详细阐述了家用光伏发电及其并网装置的设计方案与工作原理, 着重对并网逆变器、电压电流采样

的电路设计展开介绍。历经多次并网测试验证, 该装置不仅能够精准实现最大功率点跟踪, 且运行状态可靠稳定。其通过精确检测电网交流电压相位, 以及逆变器输出电流的相位和幅值, 运用 SOGI 原理与扰动观察法, 成功打造出一款高性价比的家用光伏发电及其并网装置。经实践对比, 该装置相较于传统并网策略, 在效率与可靠性方面实现了显著提升。

参考文献

- [1] 付宏才, 董晓, 陈婷, 等. 云南农村家用太阳能光伏发电系统的设计与探讨[J]. 机电产品开发与创新, 2015, 28(05): 11-13+24.
- [2] 张志文, 彭立英, 孙树波, 等. 单相 PWM 整流器电流解耦双闭环控制方法研究[J]. 电源技术, 2015, 39(11): 2524-2526+2551.
- [3] 陶兴华, 李永东, 孙敏, 等. 一种基于同步旋转坐标变换的单相锁相环新算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(06): 147-152.
- [4] 亓才, 王萍, 贝太周, 等. 无需虚拟正交量的单相并网逆变器矢量控制[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3470-3476.
- [5] 黄乔俊, 李志忠, 李优新. 基于 d-q 电流解耦的单相双向 AC/DC 变换器系统[J]. 电力电子技术, 2024, 58(02): 111-114.
- [6] 陶兴华, 李永东, 孙敏, 等. 一种基于同步旋转坐标变换的单相锁相环新算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(06): 147-152.
- [7] 马庆安, 李群湛, 邱大强, 等. 基于直接功率控制的单相 AC-DC 变流器控制器设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(07): 251-256.
- [8] 张志敏, 彭红义, 潘若妍, 等. 基于 MPPT 的光伏并网逆变器研究[J]. 电源技术, 2023, 47(01): 108-111.

项目基金: 创新训练项目, 基于三端口变换器的家用光伏发电储电及其并网装置的研制, 项目编号: S2024 10595294, 自治区级。