

基于准 PR 双闭环控制的单相光伏并网逆变系统研究

霍彩虹 徐 彤

(江苏师范大学科技学院, 江苏 徐州 221132)

摘要: 为提高光伏并网逆变系统的动、静态特性, 根据单相光伏并网逆变系统的数学模型, 提出了一种基于准比例谐振双闭环控制的单相光伏并网逆变系统控制算法, 即直流母线电压外环并网电流内环的反馈控制方式, 对单相光伏并网逆变系统的控制进行研究。通过准比例谐振调节控制策略来控制内环并网电流信号, 跟踪其电流的实际输出, 使用过零点检测电路配合软件锁相环实现对电网频率和相位的跟踪以及并网电流相位和频率的调节。

关键词: 光伏; 并网逆变; 数字信号处理; 准比例谐振; 软件锁相

能源是人类赖以生存和发展的基础, 然而随着人类对能源需求的日益增加以及化石能源的储量正日趋枯竭, 引起了人们对可再生能源的关注。太阳能及其光伏发电的应用是解决能源危机和环境污染的有效途径, 成为世界各国研究的热点。并网逆变器作为光伏发电系统与电网的接口装置, 其控制方法的选择, 对提高光伏发电效率, 降低成本等具有重要的意义。本文提出了一种通过电网电压前馈控制策略来控制外环直流母线上的电压, 通过准比例谐振调节控制策略来控制内环并网电流信号, 跟踪其电流的实际输出的单相光伏并网逆变系统的控制策略。

一、单相光伏并网逆变系统的组成

光伏并网逆变系统主要由光伏阵列、DC/DC 升压电路、DC/AC 全桥逆变电路、LCL 滤波电路和以 TI 公司的 TMS320F28335 DSP 作为主控芯片的相关控制电路构成。光伏并网逆变系统的结构框图如图 1 所示, 其工作过程为: 首先光伏阵列将太阳光的辐射能量转换为电能, 然后经直流升压达到逆变要求的电压, 并通过控制逆变器将直流转换为交流电, 最后将逆变后的交流电经滤波后输送到电网或直接供给负载使用。设计采用单相两级式光伏并网逆变拓扑结构, 主电路拓扑结构如图 2 所示。

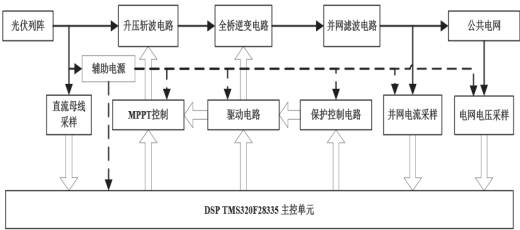


图 1 光伏并网逆变系统结构框图

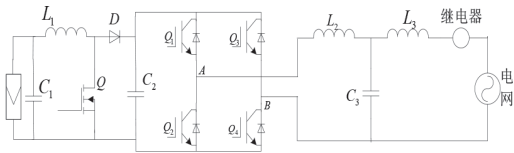


图 2 光伏并网逆变系统主电路拓扑结构图

二、并网逆变系统的控制策略

(一) 逆变系统的建模

根据并网型光伏逆变系统的控制结构, 把公共电网看作稳定的电压源, 可以画出等效的后级逆变系统的电路图及其控制模型框图, 如图 3 所示。其中, UPWM 为逆变器输出 SPWM 波; i_1 , i_2 , i_c 分别为流过电感 L_1 、电感 L_2 、电容 C_2 的瞬时电流; U_g 为电网电压。

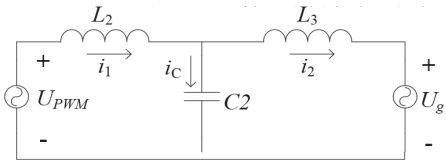


图 3 (a) 光伏逆变系统的等效电路图

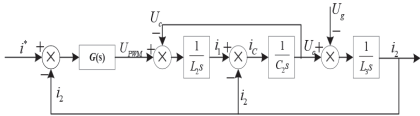


图 3 (b) 光伏逆变系统的控制模型框图

根据光伏逆变系统的控制模型框图可知, 以并网电流 i_w 为控制参考电流, 可推导出后级逆变系统输出电流的表达式, 如图 (1); 若不计开关功率器件以及死区时间等因素的影响, 单极性倍频 SPWM 控制下的单相全桥逆变电路环节则可以用一个高增益的一阶惯性环节来等效, 且具有较高的开关频率, 故该环节的传递函数可直接由比例系数来表示, 如图 (2); 根据基尔霍夫定律以及线性叠加原理, 分析 LCL 型滤波电路的传递函数如图 (3)。

$$i_2(s) = \frac{G(s)G_{INV}(s)G_T(s)}{1+G(s)G_{INV}(s)G_T(s)} \cdot i^*(s) - \frac{G_T(s)}{1+G(s)G_{INV}(s)G_T(s)} \cdot U_g(s) \quad G_{INV}(s) = K_{PWM}$$

图 (1)

图 (2)

$$G_T(s) = \frac{\Delta i_2}{\Delta U_{PWM}} = \frac{1}{sL_2 + \frac{1}{sL_3 + \frac{1}{sC_3}}} \cdot \frac{sC_3}{sL_3 + \frac{1}{sC_3}} = \frac{1}{L_2L_3C_3s^3 + (L_2 + L_3)s}$$

图 (3)

(二) 电网电压前馈控制策略

公共电网输出的额定电压及频率具有 $\pm 5\%$ 以内的扰动差, 故可视其为扰动信号, 一般用开环传递函数 $G(s)$ 来表示电网电压对并网电流的作用。由于系统内环电流的输入是由电压前馈信号和并网电流反馈信号共同控制调节的, 如果电网电压的前馈信号可以提前消除其扰动信号, 则并网电流反馈信号也可以在相对小的范围内使系统输出相对较大的并网电流。针对电网电压的开环处理, 加入一个前馈补偿环节 $G_g(s)$, 预测能够克服其扰动差对电流的影响。如图 4 所示为加入电压前馈补偿环节后的系统控制模型框图。

由于采用了电网电压前馈补偿环节, 不仅承担了内环电流反馈控制的责任, 而且反馈控制系统增益的减小大大提高了系统整体的稳定性。前馈补偿环节的加入, 使系统内环电流的控制可以近似视为一个无源跟随环节, 如图 5 所示, 可以将其进行简化为不含电网电压扰动的框图, 即含有电压前馈补偿的电流环框图。

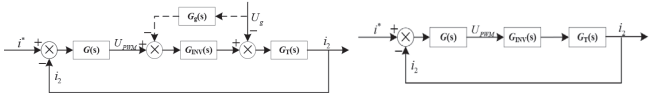


图 4 有电压前馈的系统控制模型框图

图 5 有电压前馈补偿的电流环框图

(三) 并网电流反馈控制策略

针对内环并网电流, 本文提出了一种准比例谐振调节控制策

略。该控制策略不仅具有比例谐振

调节控制保持其高增益输出的优点, 而且能够有效地增大带宽, 使电网频率的扰动对逆变输出并网电流的作用大大降低, 达到控制系统无稳态误差的目的。

对于内环并网电流信号采用准比例谐振调节方法, 其传递函数的表达式为:

$$G(s) = K_p + \frac{K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2}$$

式中, ω_c 为截止频率。传递函数的第二项可分解成三个简单的积分环节, 即:

$$\frac{\mu(s)}{x(s)} = \frac{s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \Leftrightarrow \begin{cases} \mu(s) = \frac{1}{s} [x(s) - y(s) - z(s)] \\ y(s) = \frac{1}{s} \omega_0^2 \mu(s) \\ z(s) = 2\omega_c \mu(s) \end{cases} \begin{cases} \mu_k = \mu_{k-1} + T_s \cdot [x_{k-1} - y_{k-1} - z_{k-1}] \\ y_k = y_{k-1} + T_s \cdot \omega_0^2 \mu_k \\ z_k = z_{k-1} + 2\omega_c \mu_k \end{cases}$$

图 (7)

图 (8)

利用离散信号重新定义式 (7), 设采样周期为 T_s , 如图 (8): 根据式 (8) 画出准比例谐振调节控制下的系统模型, 如图 6 所示。

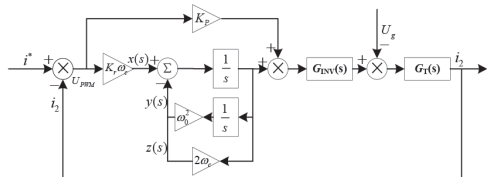


图 6 准比例谐振调节控制下系统模型框图

三、并网电流与电网电压锁相的实现

(一) 过零点比较电路设计

由于 TMS320F28335 DSP 处理器 I/O 口额定电压为 3.3V, 正好将此输出信号接入 DSP 处理, 使逆变系统输出电流波形实现同频同相跟踪电网电压波形。图 7 为过零检测电压频率跟踪电路原理图。

(二) 软件锁相环控制策略

在微控制器和数字信号处理 (DSP) 时代, 软件锁相环技术以其独特的优点、强大的计算能力得到广泛关注, 软件锁相环工作流程图如图 8 所示。首先电网电压经过同步变压器降压隔离, 再经过零比较电路获得与 DSP 接口电平相匹配的同步方波。方波上升沿对应电网电压 0° 点, 下降沿对应于电网电压 180° 点, 将该信号接入 DSP 的 CAP1 引脚, 设置捕获单元的边沿检测控制位为“检测上升沿”。程序中预置有限点的标准单位正弦表, 中断定时查表输出电流正弦指令, 若使正弦表的 0° 中断对应时刻与电网电压同步方波的上沿时刻相一致, 即表明系统与电网电压同步锁相成功。

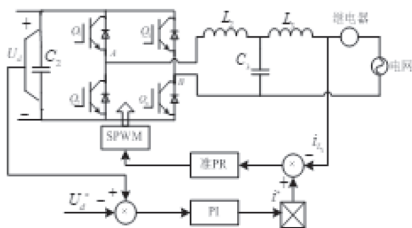


图 7 过零检测电压频率跟踪电路原理图

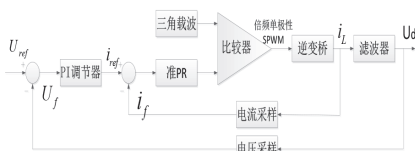


图 8 数字锁相环流程图

四、仿真及实验结果

为了验证本文所提出的光伏并网逆变系统控制策略的可行性, 使用 MATLAB/Simulink 软件对系统进行仿真。逆变系统输出电压波形及其谐波分析如图 9 所示, 输出电压总谐波畸变率为 0.62%, 满足设计要求。

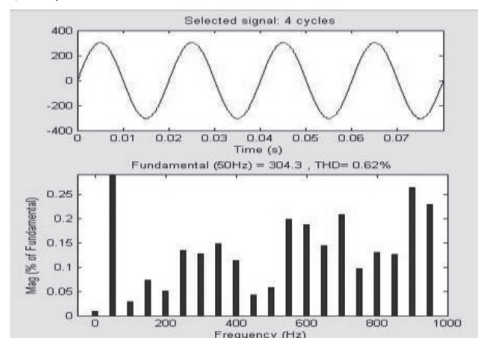


图 9 仿真输出电压波形及其 FFT 分析

在仿真的基础上研制了一台单相光伏并网逆变系统样机, 对并网逆变系统进行了测试, 波形如图 10 所示。图 10 (a) 为电网电压经过零点检测电路变为占空比为 50% 的脉冲波, 将此脉冲波输入给 DSP 进行同频同相跟踪; 图 10 (b) 为并网电流与电网电压频率相位跟踪过程波形图, 系统从开始运行到稳定经历了几个过渡波形来实现同频同相功能以及电压、电流双闭环反馈控制等系统调节, 从图中可以清楚地看到并网电流与电网电压频率相位跟踪过程, 最终实现两者的同频同相; 图 10 (c) 为并网电流与电网电压同频同相波形图, 这是最终稳定后的并网电流与电网电压同频同相。

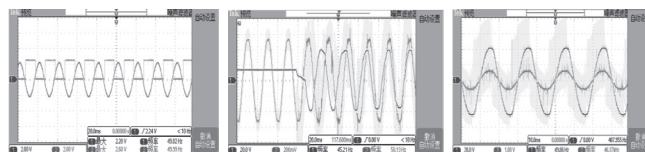


图 10 (a) 波形

图 10 (b) 波形

图 10 (c) 波形

五、结论

本文提出了两级式单相光伏发电并网逆变系统。通过搭建并网逆变系统的控制模型, 着重对光伏并网逆变控制策略及同步锁相控制方法进行论述, 详细阐述了系统电压电流双闭环反馈控制策略, 通过电压电流双闭环反馈控制策略, 提出电网电压前馈控制并网电流准比例谐振调节控制, 通过软件锁相环实现并网电流与电网电压同频同相, 通过准 PR 双闭环控制策略提高了系统的稳定性和可靠性等。通过仿真与实验验证了控制策略的可行性和正确性, 具有优良的并网电流品质和较高的转换效率。

参考文献:

- [1] 王傲, 张厚升, 朱胜杰, 等. 两级式光伏发电并网逆变系统 [J]. 山东电力技术, 2022 (005): 049.
- [2] 舒峰, 戴凯, 詹满杰, 等. 光伏发电单相单级式 DC-AC 并网逆变器的研究 [J]. 华东科技: 综合, 2020 (5): 1.
- [3] 陈锴, 杨逸, 尚锦萍. 光伏发电系统并网逆变器控制策略研究 [J]. 自动化仪表, 2020, 41 (1): 5.
- [4] 贾彦钰, 李赛. 基于比例积分与多重比例谐振策略的光伏发电并网逆变器控制技术 [J]. 上海电气技术, 2020, 13 (1): 6.
- [5] 施韬. 两级式光伏并网系统控制策略的研究 [D]. 中国矿业大学, 2020.
- [6] 刘自南. 光伏发电系统并网逆变器电压电流双闭环控制仿真研究 [J]. 自动化应用, 2021 (1): 5.