

电流扰动双轨迹最大功率跟踪技术研究

尹超华 葛红娟 党润芸

(南京航空航天大学新能源发电与电能变换重点实验室 南京 211106)

摘要:提出了一种基于电流扰动的双轨迹最大功率跟踪控制方法。该方法采用 $P-V$ 、 $I-V$ 相结合进行光伏最大功率点跟踪,跟踪分为3个区域,电流源和电压源区采用短路电流法将光伏阵列工作点电流调整到最大功率点附近,电流扰动工作区采用电流扰动观察法进一步精确跟踪光伏最大功率点。采用短路电流法确定不同光照强度下的上、下边界阈值函数,建立带有线性化光伏电池等效电路模型,对其进行了幅频、相频特性分析,得到了稳定的闭环参数。将该方法用于某115 V/400 Hz独立光伏发电系统,并进行了一系列的仿真和实验研究,结果表明,系统运行稳定、状态良好,验证了方法的可行性和正确性。

关键词:光伏阵列;最大功率点跟踪;短路电流法;电流扰动观察法;光伏发电系统

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on current perturbation two-phase maximum power point tracking technology

Yin Chaohua Ge Hongjuan Dang Runyun

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Key laboratory of New Energy Power Generation and Electrical Energy Transformation, Nanjing 211106, China)

Abstract: A current perturbation two-phase maximum power point tracking (MPPT) control method is proposed, which divides MPPT into three regions by the combination of $P-V$ and $I-V$ curves. In current and voltage source regions, which adjusts the working point current of the PV array near the maximum power point (MPP) by short-current method. Later current perturbation and observation (P&O) method is adopted to regulate the PV array operating point to achieve the MPP accurately. The short-current method is introduced to determine the upper and lower boundary of the threshold function under different light intensities. The linear equivalent circuit model of PV array is established, analyzing its amplitude frequency and phase frequency characteristics, stability of the closed loop parameters are obtained. The proposed method has been applied to 115 V/400 Hz standalone PV power generation system. The simulation and experiment of system show that the system runs stably and maintains a good working condition. The results prove the proposed method is quite more feasible and correct.

Keywords: PV array; maximum power point tracking; short-current method; current perturbation and observation method; PV power generation system

1 引言

光伏发电作为一种前景广阔的绿色可再生能源,以其无噪声、无污染、能量随处可得、使用方便等优点得到人们的青睐,蓬勃发展^[1]。我国是一个能源消耗大、环境污染严重的国家,发展光伏清洁能源的重要性不言而喻^[2]。最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)是确保光伏发电能够较充分利用的关键技术^[3],目前常用的

MPPT控制方法有固定参数法(如开路电压法、短路电流法)、电导增量法和扰动观察法等^[4-5]。

固定参数法利用光伏最大功率点工作电压、电流与其开路电压、短路电流存在近似的比例关系进行跟踪控制,具有控制简单有效、易实现、被测参数少等优点,但存在控制精度较差、功率损失较大等问题^[6]。扰动观察法是周期性地给光伏输出电压施加扰动,根据扰动后光伏输出功率变化情况决定下一步扰动方向,是工程上实现MPPT控制常

用方法之一。优点是原理简单易实现、被测参数较少；缺点是响应速度较慢、扰动步长难以确定、稳态时最大功率点附近存在振荡现象，造成一部分的功率损失^[7]。电导增量法是通过比较光伏瞬时电导和电导变化量实现最大功率点跟踪控制，优点是可以消除扰动观察法在最大功率点附近的振荡现象，但需要传感器精度较高和较长的计算时间，从而也会造成些许功率损失^[8]。综合各种最大功率点跟踪方法的优缺点，提出了一种基于电流扰动的双轨迹最大功率跟踪控制方法。该方法在跟踪初期采用短路电流法将光伏阵列工作点电流调整到光伏最大功率点附近，以保证跟踪的快速性；为进一步提高对光伏阵列的利用率，在光伏最大功率点附近采用电流扰动观察法，精确靠近光伏最大功率点，提高跟踪精度，减少系统在最大功率点附近的振荡现象。

2 电流扰动双轨迹最大功率跟踪技术

光伏最大功率跟踪方法的目的是最大限度地利用光伏输出，提高光伏发电效率^[9]。电流扰动双轨迹最大功率跟踪法将跟踪过程分为 3 个区域，电流源区、电流扰动工作区和电压源区，如图 1 所示。

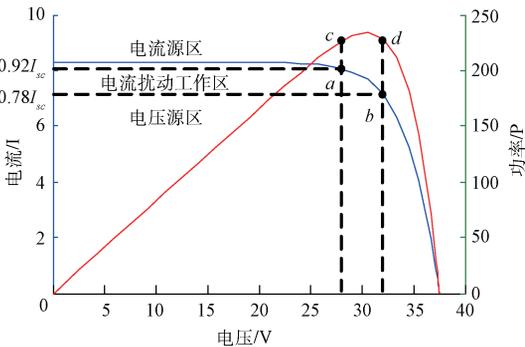


图 1 电流扰动双轨迹最大功率点跟踪

当跟踪过程处于电流源、电压源区时，沿 $I-V$ 曲线采用短路电流法将光伏阵列工作点电流调整到光伏最大功率点附近，以保证跟踪的快速性；而在电流扰动工作区则选择 $P-V$ 、 $I-V$ 曲线相结合，采用电流扰动观察法代替传统的扰动观察法中的电压扰动，进一步精确靠近光伏最大功率点，提高跟踪精度，减少系统在最大功率点附近的振荡现象。电流扰动代替电压扰动的好处是在给定条件下，电流扰动工作区可以使用较小的步长跟踪光伏最大功率点，从而有效减小光伏最大功率点附近的振荡现象以及提高跟踪速度。

电流扰动双轨迹最大功率跟踪法引入短路电流法确定 3 个区域的 2 个分界点 $a(c)$ 和 $b(d)$ 。基于光伏最大功率点处的工作点电流 I_{MPP} 与其短路电流 I_{SC} 存在近似的比例关系：

$$I_{MPP} \approx k_{SC} I_{SC} \quad (1)$$

式中： k_{SC} 为比例常数，对于不同外部条件和不同型号的光

伏电池，表达式(1)均是成立的，那么 I_{MPP} 可以看作是一个阈值函数，光照强度的不同， I_{SC} 的值也会有所不同。根据经验值 $k_{SC} = 0.78 : 0.92$ ^[10]，则有：

$$I_{MPP(max)} = 0.92 I_{SC} \quad (2)$$

$$I_{MPP(min)} = 0.78 I_{SC} \quad (3)$$

不妨设电流扰动工作区的上边界点为 $I_{MPP(max)}$ ，下边界点为 $I_{MPP(min)}$ 。其中 $a(c)$ 点所对应的为 $I_{MPP(max)}$ 在 $I-V$ ($P-V$) 曲线上的位置， $b(d)$ 点所对应的为 $I_{MPP(min)}$ 在 $I-V$ ($P-V$) 曲线上的位置。由于边界点是由 k_{SC} 的最小、最大值分别选取，则电流扰动工作区中必存在最大功率点。

电流扰动双轨迹最大功率跟踪法的流程图如图 2 所示。定义系统在 k 时刻光伏阵列的输出电压和输出电流分别为 $V_{PV}(k)$ 和 $I_{PV}(k)$ ，系统根据光伏阵列的输出电流判断光伏最大功率跟踪位于哪个区。

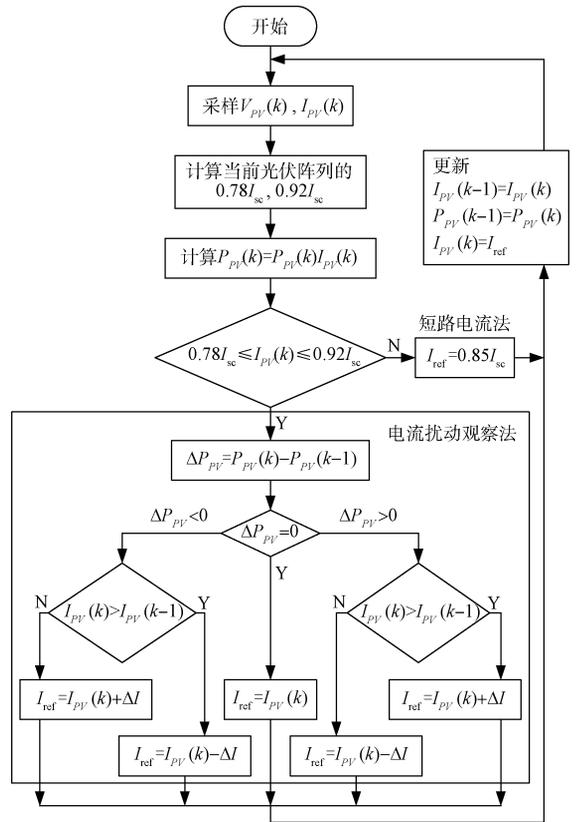


图 2 电流扰动双轨迹最大功率跟踪法流程

电流源和电压源区采用短路电流法，电流参考值 I_{ref} 为：

$$I_{ref} = \frac{0.78 + 0.92}{2} I_{SC} = 0.85 I_{SC} \quad (4)$$

电流扰动工作区采用电流扰动观察法，电流参考值 I_{ref} 为：

$$I_{ref} = I_{PV}(k) + \text{sign}[I_{PV}(k) - I_{PV}(k-1)] \cdot \text{sign}[P_{PV}(k) - P_{PV}(k-1)] \Delta I \quad (5)$$

式中： ΔI 为电流扰动的扰动步长。

3 光伏发电系统控制器设计

3.1 115 V/400 Hz 独立光伏发电系统

115 V/400 Hz 独立光伏发电系统如图 3 所示,该系统由太阳能光伏阵列、Boost 变换器、蓄电池充放电控制器、蓄电池、离网逆变器和交流负载组成。系统中太阳能光伏阵列为主要供电电源,蓄电池为储能装置,辅助源,即在光伏阵列不足以提供负载所需功率时蓄电池补充剩余所需功率,在光伏阵列足以提供负载功率还有剩余功率时给蓄电池充电^[11]。

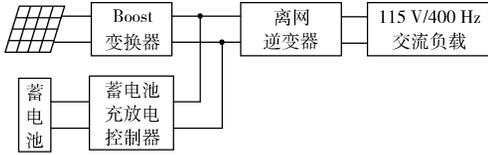


图3 115 V/400 Hz 独立光伏发电系统

图 3 中,Boost 变换器为单向 DC/DC 变换器,将太阳能光伏阵列宽范围的直流输出电压(本实验系统中为 40~60 V)变换为较高的直流母线电压(180~190 V);蓄电池充放电控制器为双向 Buck/Boost 变换器,低压侧 48 V 铅酸蓄电池通过其与直流母线电压相连接;直流母线电压通过单相全桥逆变器将直流电逆变成负载所需的 115 V/400 Hz 交流电。

系统根据直流母线电压为信息载体^[12]的功率管理控制方法,将系统分为 2 种工作状态。其中, V_{Bus} 为直流母线电压, $V_{\text{Bus_ref}}$ 为直流母线电压参考值,不同的 $V_{\text{Bus_ref}}$ 表示不同的工作状态。

1) 工作状态 1: $V_{\text{Bus_ref}} = 180 \text{ V}$, 系统带蓄电池以光伏 MPPT 运行。 V_{Bus} 由蓄电池充放电控制器控制,Boost 变换器以 MPPT 工作。系统根据光伏阵列输出和交流负载所需功率的不同,蓄电池充放电控制器控制蓄电池充放电电流吸收或放出相应的功率,以维持光伏阵列、蓄电池、交流负载三者间的功率平衡关系。

2) 工作状态 2: $V_{\text{Bus_ref}} = 190 \text{ V}$, 系统不带蓄电池以光伏恒压输出运行。 V_{Bus} 由 Boost 变换器控制,Boost 变换器工作在恒压输出模式。系统根据交流负载所需功率的不同,Boost 变换器恒压输出以维持光伏阵列实际输出功率与交流负载所需功率匹配。

3.2 控制系统传递函数

图 4 为电流扰动双轨迹最大功率跟踪方法在 115 V/400 Hz 独立光伏发电系统中的控制框图。电路采集光伏电压 v_{PV} 和光伏电流 i_{PV} 信号,然后由电流扰动双轨迹最大功率跟踪方法提供电流参考值 i_{ref} ,与 Boost 变换器电感电流 i_L 差值信号送入电流 PI 调节器,控制 Boost 变换器的占空比。由于电流 PI 调节器参数设计关系到整个系统的稳定性和快速性,下面详细介绍电流 PI 调节器参数设计。

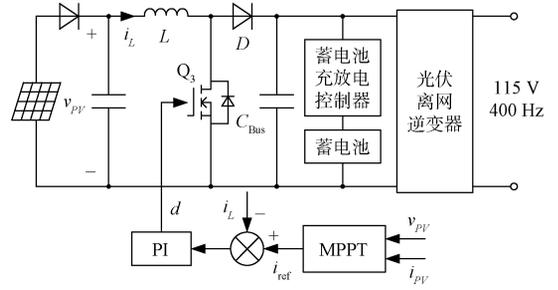


图4 光伏发电系统 MPPT 控制框图

图 5 为带有线性化光伏电池模型的 Boost 变换器^[13]。电路中 V_{eq} 、 R_{eq} 分别为光伏电池线性化等效电压和等效电阻, C 为光伏输出滤波电容, C_0 为输出滤波电容, L 为电感,输出端等效为纯阻性负载 R 。

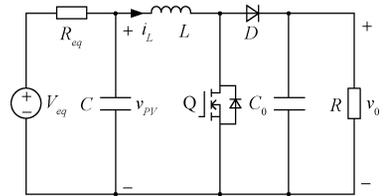


图5 带有线性化光伏电池模型的 Boost 变换器

引入状态变量扰动量如 $v_{\text{PV}} = V_{\text{PV}} + \tilde{v}_{\text{PV}}$, $i_L = I_L + \tilde{i}_L$, $v_0 = V_0 + \tilde{v}_0$, $d = D + \tilde{d}$, 由电路的 KCL、KVL 得:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{v}_{\text{PV}}}{dt} = -\frac{\tilde{v}_{\text{PV}}}{CR_{\text{eq}}} - \frac{\tilde{i}_L}{C} \\ \frac{d\tilde{i}_L}{dt} = \frac{\tilde{v}_{\text{PV}}}{L} - \frac{(1-D)\tilde{v}_0}{L} + \frac{dV_0}{L} \\ \frac{d\tilde{v}_0}{dt} = \frac{(1-D)\tilde{i}_L}{C_0} - \frac{dI_L}{C_0} - \frac{\tilde{v}_0}{RC_0} \end{cases} \quad (6)$$

式中: \tilde{v}_{PV} 、 \tilde{i}_L 、 \tilde{v}_0 、 \tilde{d} 分别为光伏输出电压、电感电流、输出电压、占空比的扰动量。由式(6)可求得电感电流 \tilde{i}_L 对占空比 \tilde{d} 的传递函数 $G_{i_L,d}(s)$ 为:

$$G_{i_L,d}(s) = \frac{\tilde{i}_L}{\tilde{d}} = \frac{a_1 s^2 + a_2 s + a_3}{b_1 s^3 + b_2 s^2 + b_3 s + b_4} \quad (7)$$

式中: $a_1 = V_0 C_0 C$; $a_2 = V_0 C_0 / R_{\text{eq}} + V_0 C / R + D' C I_L$; $a_3 = V_0 / R R_{\text{eq}} + D' I_L / R_{\text{eq}}$; $b_1 = L C_0 C$; $b_2 = L C_0 / R_{\text{eq}} + L C / R$; $b_3 = L / R R_{\text{eq}} + C_0 + D'^2 C$; $b_4 = 1 / R + D'^2 / R_{\text{eq}}$ 。

电流 PI 调节器传递函数 $G_C(s)$ 为:

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

则电流环的开环传递函数 $G_{\text{OL}}(s)$ 为:

$$G_{\text{OL}}(s) = G_{i_L,d}(s) G_C(s)$$

Boost 变换器参数如表 1 所示。 $G_{i_L,d}(s)$ 和 $G_{\text{OL}}(s)$ 的伯德图如图 6 所示。

表 1 Boost 变换器参数

物理量	符号	参数
输入电压	V_{PV}	60 V
输出电压	V_O	180 V
输入电容	C	1 880 μF
输出电容	C_O	940 μF
光伏电池等效电阻	R_{sq}	7.05 Ω
负载电阻	R	64.8 Ω
电感	L	1 mH
电感电流	I_L	8.33 A
开关频率	f_{sw}	50 kHz

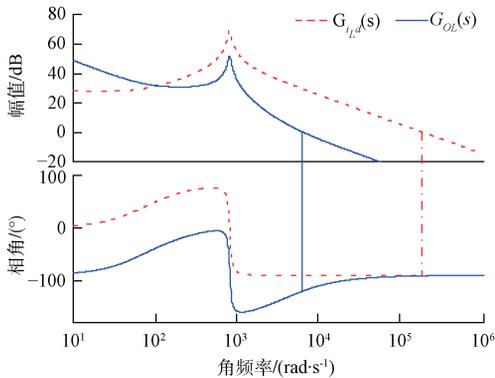


图 6 电流环控制伯德图

由图 6 可以得到, $G_{ia}(s)$ 的截止频率和相位裕度分别为 28.65 kHz 和 89.995°。根据工程经验,取开关频率 f_{sw} 的 1/50 作为电流环的截止频率,取电流环的相位裕度为 60°,确保系统的稳定性和快速性。因此, $G_{ol}(s)$ 的截止频率和相位裕度分别为 1kHz 和 60°。通过计算,得到电流 PI 调节器的 K_p 和 K_i 分别为:0.03 和 107.4。

4 仿真与实验结果

以 Boost 变换器作为 DC/DC 变换电路,建立了基于电流扰动的双轨迹最大功率点跟踪 115 V/400 Hz 独立光伏发电系统主电路及控制系统电路仿真模型。电流扰动双轨迹最大功率跟踪方法通过采集光伏输出电压 U_{PV} 和输出电流 I_{PV} 信号,提供电流参考值 i_{ref} ,与电感电流 i_L 差值信号送入电流 PI 调节器,控制 Boost 变换器的占空比使其工作在光伏最大功率点。

考虑到电流扰动双轨迹最大功率跟踪方法的边界由短路电流比例法确定,而光伏阵列的短路电流主要受光照强度的影响,温度对其影响不大。所以本文采用 3 种不同的光照强度(1 200 W/m^2 、1 000 W/m^2 、800 W/m^2) 分别进行仿真,图 7 为不同光照强度下的光伏 $P-V$ 和 $I-V$ 曲线。

由图 7,在光照强度 800 W/m^2 时,光伏阵列的最大功率为 380 W,短路电流 I_{sc} 为 8.48 A;光照强度 1 000 W/m^2

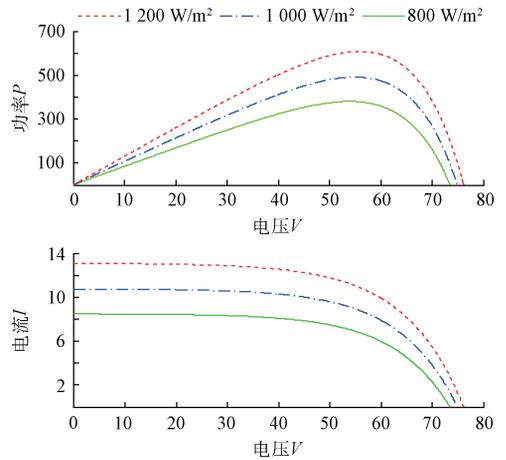


图 7 不同光照强度下光伏 $P-V$ 、 $I-V$ 曲线

时,光伏阵列的最大功率为 492 W,短路电流 I_{sc} 为 10.75 A;光照强度 1 200 W/m^2 时,光伏阵列的最大功率为 608 W,短路电流 I_{sc} 为 13.08 A。

不同光照强度下电流扰动双轨迹最大功率跟踪法得到的光伏输出功率、光伏输出电流、变换器输出电压仿真波形分别如图 8(a)~(c)所示。

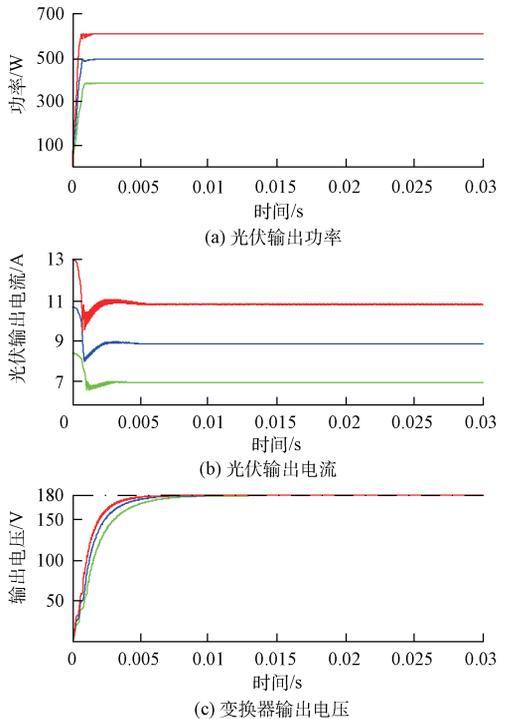


图 8 不同光照强度下仿真波形

从图 8(a)可以观察到在 3 种不同的光照条件下,电流扰动双轨迹最大功率跟踪技术都可以快速地找到最大功率点,且最大功率点的振荡现象较弱,与图 7 中的最大功率值吻合,有效证明了该方法的正确性。图 8(b)可以观察到不

同光照条件下最大功率点处的光伏输出电流 I_{mpp} , 表 2 给出了不同光照条件下 I_{mpp} 与 I_{sc} 之间的关系; 图 8(c) 可以观察到不同光照条件下, 直流母线电压快速维持在 180 V, 保证了直流母线电压的稳定。

表 2 不同光照强度下 I_{mpp} 与 I_{sc} 关系表

辐照度/($W \cdot m^{-2}$)	I_{mpp}/A	I_{sc}/A	比例系数 k
800	7.05	8.48	0.83
1 000	8.94	10.75	0.83
1 200	10.87	13.08	0.83

由表 2 可以发现不同光照强度下, 最大功率点处光伏输出电流 I_{mpp} 与光伏短路电流 I_{sc} 满足式(1)中的关系。

以仿真模型为基础建立 115 V/400 Hz 独立光伏发电系统实验硬件平台, 该平台主要由 TI 公司的 TMS320F28335 DSP 芯片、Boost 变换器、蓄电池充放电控制器、Chroma 62050H-600S 太阳能光伏模拟器、逆变器、交流负载构成。实验所用太阳能光伏模拟器参数如下: 开路电压 V_{oc} 为 77 V、最大输出功率点对应输出电压 V_{mpp} 为 60 V、短路电流 I_{sc} 为 4.128 A、最大输出功率点对应输出电流 I_{mpp} 为 3.667 A、最大输出功率为 220 W。

图 9 为利用实验平台得到的实验波形。Boost 变换器开关管驱动电压 V_{gs} 和电感电流 i_L 波形如图 9(a) 所示, V_{gs} 为 12.4 V, 满足 Mosfet 驱动要求, i_L 为 4.14 A, 满足 Mosfet 导通 i_L 上升, Mosfet 关断 i_L 下降; Boost 变换器输出电压 V_{Bus} 、光伏模拟器输出电压 V_{PV} 和输出电流 I_{PV} 波形如图 9(b) 所示, V_{Bus} 为 180 V, 保证了向后级逆变器提供稳定的直流电压, V_{PV} 为 60 V, I_{PV} 为 3.6 A, 显然都与光伏模拟器设置的数据基本吻合, 说明了双轨迹最大功率跟踪技术在实验硬件平台上的跟踪性能良好, 验证了上述方法的可行性和正确性。

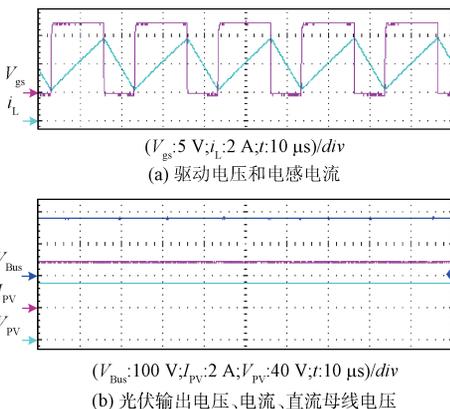


图 9 实验波形

图 10 为利用实验平台得到的后级全桥逆变器输入输出实验波形。交流负载为 52.9 Ω , 逆变器输出电压 115 V,

输出频率 400 Hz, 波形较好, 输出电流 2.17 A, 直流母线电压 180 V。交流负载需求功率为 250 W, 由蓄电池放电提供 30 W 功率。

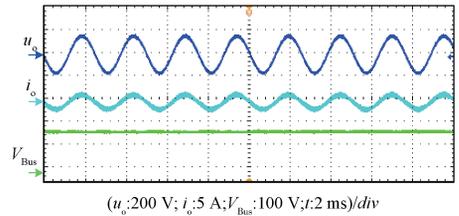


图 10 全桥逆变器输入输出实验波形

5 结 论

本文在综合分析几种传统光伏最大功率跟踪方法的基础上提出了一种新的最大功率跟踪方法, 经仿真和实验验证表明:

1) MATLAB 仿真分析得出, 电流扰动双轨迹最大功率跟踪控制方法在不同光照强度下均能正确、快速地跟踪光伏最大功率点;

2) 在 1 台 115 V/400 Hz 独立光伏发电系统实验样机上实验, 实验验证了电流扰动双轨迹最大功率跟踪控制方法的可行性和正确性。

参考文献

- [1] 汪志, 刘学锋. 光伏并网逆变器 DSP 核心控制电路设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(2): 113-116.
- [2] 柯成虎, 张辉. 小功率单相光伏并网逆变器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2866-2873.
- [3] ESPINOZA D, BARCENAS E, CAMPOS-DELGADO D, et al. Voltage-oriented input-output linearization controller as maximum power point tracking technique for photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3499-3507.
- [4] 于晶荣, 曹一家, 何敏, 等. 单相单级光伏逆变器最大功率点跟踪方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 18-25.
- [5] 崔畅, 赵强. PSMG 风力发电系统 MPPT 优化控制策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(5): 60-63.
- [6] 冯涛, 陈华. 固定电压法结合电导增量法在光伏发电最大功率点跟踪控制中的应用[J]. 电源技术应用, 2011, 14(6): 23-27.
- [7] 刘邦银, 段善旭, 刘飞, 等. 基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 91-94.
- [8] 韩文颖, 陈爱国. 具有 MPPT 功能的太阳能光伏充电器[J]. 电子测量技术, 2009, 32(10): 30-32.

- [9] 梁慧慧. 独立光伏发电系统最大功率点跟踪的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 1-65.
- [10] 刘施宇. 机场移动式光伏发电系统仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 1-57.
- [11] 张明涛, 杜威达, 谢东周, 等. 基于嵌入式平台的分布式光伏发电监测系统[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(3): 3-6.
- [12] 杨宗翰. 115V/400Hz 光伏离网逆变器研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 1-54.
- [13] RAJ J S C M, JEYAKUMAR A. A novel maximum power point tracking technique for photovoltaic

module based on power plane analysis of I-V characteristics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4734-4745.

作者简介

尹超华, 1991 年出生, 硕士生, 主要研究方向为功率电子变换技术。

E-mail: chhyin@126.com

葛红娟, 1966 年出生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子技术及电机控制。

E-mail: allenge@nuaa.edu.cn

(上接第 32 页)

2) 该聚焦线圈具有结构简单、便携、容易制作和互感系数小等特点, 相对其他聚焦结构, 此线圈结构应用不再单一, 在实际应用中选择改变重合区域面积大小和改变发射功率来针对不同管道埋深。

3) 实现磁聚焦有利于提高瞬变电磁法对局部腐蚀的检出率及有效避免了并行管道的干扰, 提高检测精度, 为以后实际应用奠定了基础。

参考文献

- [1] 左延田, 俞吼得. 在用埋地钢质管道管体无损检测技术[J]. 化工装备技术, 2010, 31(6): 53-56.
- [2] 敬人可. 超声无损检测技术的研究进展[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(7): 28-29.
- [3] 吴莉佳, 胡博. 瞬变电磁法检测埋地金属管道腐蚀模型的 ANSYS 仿真[J]. 失效分析与预防, 2013, 8(2): 69-70.
- [4] 李永年, 李晓松, 尚兵. 平行管道 TEM 检测问题探讨[J]. 防腐术, 2011, 19(3): 29-30.
- [5] 王建斌, 靳小强. 嵌入式管道超声导波检测系统设

计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(10): 73-74.

- [6] 易晓峰, 林君. 基于双匝线圈的轻便式核磁共振找水仪研制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 1-3.

- [7] 焦敬品, 于兆卿. 基于小波变换的薄层厚度电磁超声测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 588-589.

- [8] 高敬更, 徐和平. 电子式互感器现场校验技术的研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(7): 83-84.

- [9] 谭伟强, 刘冀成, 聂文亮. 基于磁聚焦阵列的埋地金属管道腐蚀检测研究[J]. 油气储运, 2013, 32(5): 537-538.

- [10] 谭伟强. 磁聚焦激励线圈在埋地金属管线中的应用研究[D]. 成都: 成都信息工程学院, 2013.

- [11] 戴伟. 基于响应面方法的立管结构可靠性研究[D]. 船舶工程学院, 2012.

作者简介

张涛, 1992 年出生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为管道无损检测技术。

E-mail: 951297058@qq.com