

单级式光伏并网逆变系统中的 最大功率点跟踪算法稳定性研究

吴理博, 赵争鸣, 刘建政, 王 健, 刘 树

(清华大学电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京市 海淀区 100084)

Research on the Stability of MPPT Strategy Applied in Single-stage Grid-connected Photovoltaic System

WU Li-bo, ZHAO Zheng-ming, LIU Jian-zheng, WANG Jian, LIU Shu

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment,
Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Single-state grid-connected photovoltaic (PV) system has advantages such as simple topology, low cost, etc. However, this kind of system has only one stage of power conversion and all the control objectives need to be considered simultaneously, such as maximum power point tracking (MPPT), synchronization with the utility voltage and harmonics reduction for output current. Then the complexity of control strategy is increased. This paper proposes a modified MPPT strategy, which remarkably improves the stability of the single-state grid-connected PV system during rapidly changing process of light intensity, with realizing all the control objectives. In steady state, the modified strategy tracks the recent maximum power point of the PV panel by adjusting the output power of the inverter, in which step length changes according to the tracking direction; in dynamic state, by detecting step change of insolation with feed-forward method, the modified strategy is able to rapidly reset the reference value of inverter output power to avoid DC-link voltage collapse phenomenon. Comparing the novel strategy with constant-step MPPT strategy, this paper illustrates the improvement of the new strategy based on PSIM simulation platform. Experimental results also show the high stability and high efficiency of this modified strategy applied in single-stage grid-connected PV system.

KEY WORDS: solar energy; photovoltaic; grid-connected; MPPT

摘要: 单级式光伏并网逆变系统具有拓扑简单, 成本较低的优点。但是这种系统中只存在一个能量变换环节, 太阳能最大功率点跟踪(Maximum power point tracking, MPPT)、电网电压同步和输出电流正弦度等控制目标要求同时得到考虑,

实现较为复杂。该文提出了一种改进的 MPPT 算法, 在实现上述功能的同时, 显著提高了单级式光伏并网逆变系统在光照强度快速变化时的稳定性。该算法的改进主要在于稳态情况下, 调整光伏阵列工作点时根据增减方向分别选取合适的步长值; 动态情况下, 采用前馈方法检测光照强度突变过程, 从而迅速改变并网系统运行状态以避免母线电压崩溃现象。基于 PSIM 仿真平台, 对比了定步长 MPPT 算法和新算法, 在阐述算法改进的基础上给出了仿真结果。实验室还建立了 300Wp 的单级式光伏并网逆变系统, 应用全数字化 DSP 控制技术和改进 MPPT 算法, 实现了系统的并网和可靠运行。仿真和实验结果表明, 应用改进 MPPT 算法的单级式光伏并网逆变系统能够准确跟踪太阳能电池最大功率点, 并具有较好的稳定性。

关键词: 太阳能; 光伏; 并网; 最大功率点跟踪

0 引言

随着传统能源的日益枯竭, 太阳能已经成为一种十分具有潜力的新能源, 而光伏发电是当前利用太阳能的主要方式之一^[1-7]。光伏发电系统可分为独立供电系统和并网系统两种。前者不与电网相连, 一般使用蓄电池作为储能设备, 白天将太阳能电池输出的电能储存起来, 夜间直接向负载提供电力; 后者可看作集中式或者分布式的太阳能电站。本文讨论的单级式光伏并网逆变系统属于后者。

在光伏发电系统中, 主要的问题是如何提高太阳能电池工作效率, 以及提高整个系统工作的稳定性^[8-10]。由于单级式光伏并网逆变系统中只有一个能量变换环节, 控制时既要考虑跟踪太阳能电池最大功率点, 也要同时保证对电网输出电流的幅值和

正弦度，控制较为复杂。目前实际应用的光伏并网系统采用这种拓扑结构的仍不多见。但随着现代电力电子技术以及数字信号处理技术的飞速发展，系统拓扑结构引起的控制困难正在逐渐被克服，单级式光伏逆变系统已成为国内外光伏领域的一个研究热点^[11-12]。

1 单级式光伏逆变系统的组成

单级式光伏并网逆变系统由太阳能电池阵列、直流母线电容C、逆变桥以及滤波电感L组成，示意图如图1所示。在有的系统中，由于光伏电池电压较低，逆变桥后还会增加一个升压变压器。

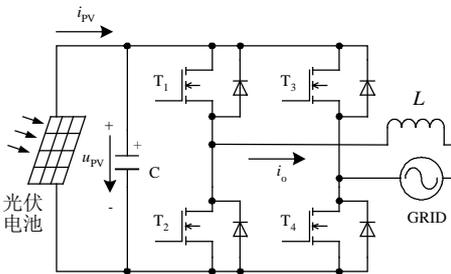


图1 单级式光伏并网系统电路示意图

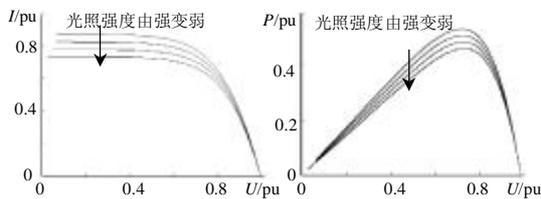
Fig. 1 Schematic diagram of a single-stage grid-connected photovoltaic system

在图1所示的单级式并网系统中，一般用双闭环控制。电网交流电压和电流采样环节，电压同步环节，PWM调制环节和驱动单元4部分作为内环控制，控制直流到交流的逆变，保证系统较好的逆变品质；输入功率采样环节和功率点控制环节作为外环控制，保证光伏并网系统工作在最大功率点，实现最大的功率输出。内环控制可采用普通的PWM滞环比较方式，也可以采用对控制实时性要求更高的单周期控制^[11,13-14]。外环为功率环，是系统控制的核心。

2 定步长 MPPT 算法及其稳定性问题

2.1 太阳能电池输出特性

太阳能电池输出特性为非线性，而且受光照强度和环境温度影响。如图2所示，太阳能电池在任何



(a) 太阳能电池电压电流特性曲线 (b) 太阳能电池电压功率特性曲线
图2 太阳能电池输出特性曲线(不同光照强度下)

Fig. 2 Simulated characteristics of ideal PV panel

时刻都存在一个最大功率输出的工作点，而且随着光照强度和温度的变化而变化。为能让太阳能电池在供电系统中充分发挥它的光电转换能力，就需实时控制太阳能电池的工作点以获得最大功率输出。

2.2 定步长 MPPT 算法

太阳能电池最大功率点的跟踪实现，一般采用功率差分值作为判据。通过对太阳能电池的输出电压和电流进行连续的采样，并将每次采样的一组电压电流数据相乘折合成功率值，然后减掉上一次采样得到的功率值，即为功率差分值。当功率达到最大值时满足

$$\frac{\partial P_{PV}}{\partial U_{PV}} = \frac{\partial(U_{PV}I_{PV})}{\partial U_{PV}} = U_{PV} \frac{\partial I_{PV}}{\partial U_{PV}} + I_{PV} \frac{\partial U_{PV}}{\partial U_{PV}} = 0$$

即可近似认为达到最大功率点。

如果
$$U_{PV} \frac{\partial I_{PV}}{\partial U_{PV}} + I_{PV} \frac{\partial U_{PV}}{\partial U_{PV}} > 0$$

说明太阳能电池阵列输出功率增大的方向为电压增加方向；

如果
$$U_{PV} \frac{\partial I_{PV}}{\partial U_{PV}} + I_{PV} \frac{\partial U_{PV}}{\partial U_{PV}} < 0$$

说明太阳能电池阵列输出功率增加的方向为电压减少的方向^[15]。

由于在一定的光照强度下，太阳能电池的输出功率只与环境温度和端电压有关，因此在单级式光伏并网逆变系统中，改变太阳能电池的工作点只能通过调整母线电容C上的电压进行，即改变逆变电路的输出有功来进行调节。定步长MPPT算法就是以固定步长修改逆变电路输出有功设定值(P_{REF})从而跟踪太阳能电池最大功率点的。

图3给出了应用定步长MPPT算法的单级式光伏并网逆变系统在稳态下的仿真波形。仿真的光伏系统中太阳能电池为300Wp、开路电压约23V，最大功率点电压约17V，母线电容为2200μF。

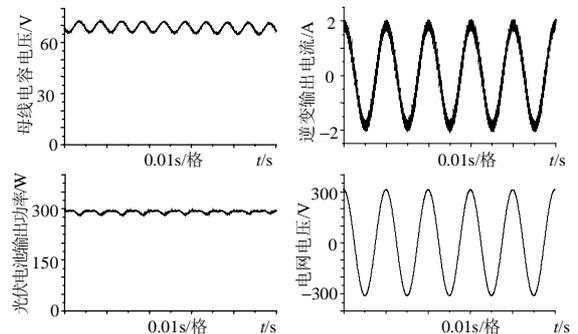


图3 定步长最大功率点时的仿真波形

Fig. 3 Simulation of constant-step MPPT strategy

2.3 母线电压崩溃现象

当光伏并网系统仅仅采用定步长跟踪策略进行 MPPT 控制时, 往往会发生母线电压崩溃现象。逆变输出有功的调整步长选取得不合适时也会引起这一现象。

由上一小节内容可知, 跟踪太阳能电池最大功率点的过程, 就是不断调整逆变电路有功输出, 从而使太阳能电池实际工作电压在最大功率点左右反复跟踪、调整的过程。当太阳能电池工作电压大于最大功率点电压时, 通过增加逆变电路输出功率使其降低; 当太阳能电池工作电压小于最大功率点电压时, 通过减小逆变电路输出功率使其增加。但是, 在后一种情况下, 如果光照减弱, 减小后的逆变输出功率仍大于太阳能电池的输出功率, 就会导致母线电容电压即太阳能电池的工作电压进一步降低。参照图2(b), 工作点由最大功率点向左移动时, 太阳能电池输出功率进一步减小, 又导致母线电压下降, 直到无法输出给定的逆变电流, 这就是母线电压崩溃过程。

图4就是仿真得到光强扰动导致的光伏并网系统母线电压崩溃过程波形。从图中可以看到, 光照强度在某一时刻发生20%的阶跃下降, 0.1s后恢复。这一扰动导致短时间内输出功率参考值偏离并超出太阳能电池当前最大功率, 从而引起太阳能电池输出侧母线电压持续下降, 直至输出电流畸变。母线电容输入和输出电流平衡后, 母线电压才能达到稳定并再次缓慢跟踪上最大功率点。

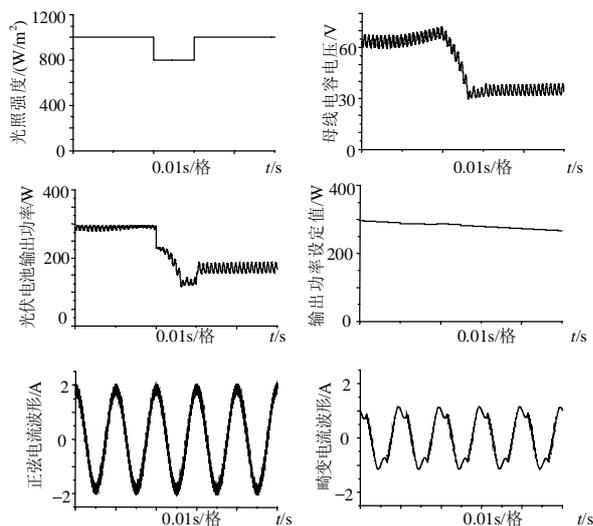


图 4 母线电压崩溃过程仿真波形

Fig. 4 Simulation of the DC link voltage collapse progress

3 变步长的 MPPT 控制算法

针对光伏并网系统中的母线电压崩溃现象, 本文提出了一种新颖的变步长的MPPT控制算法。这种算法的改进主要在于功率环的控制, 改进后的算法实现了系统的高效、稳定运行。

在光照强度比较稳定或者只有较小扰动时, 变步长的MPPT算法与定步长算法相似, 都是通过增加或减少逆变电路的输出有功达到跟踪太阳能电池最大工作点的目的。不同的是, 变步长算法中增加或减少 P_{REF} 时采用了不同的步长值。增加情况下的步长小, 减小情况下的步长大。这样, 当 P_{REF} 超出当前太阳能电池最大功率时, 系统能较快减小 P_{REF} 以保证母线电压不至于跌落太多, 使太阳能电池仍工作在最大功率点附近, 从而达到系统的稳定。

但是, 在光照强度发生较大扰动或者阶跃变化时, 用较大的步长减小 P_{REF} 仍不能保证系统的稳定。在新的算法中, 系统在前端实时检测太阳能电池输出电压 U_{pv} 和电流 I_{pv} , 计算得到其输出功率 P_{pv} 。当检测到太阳能电池输出功率突然变小的情况, 则认为光照强度发生阶跃变化, 系统参照这时的 P_{pv} 来设定逆变输出功率 P_{REF} , 使母线电容上输入输出电流基本平衡, 这样就避免了母线电压崩溃现象。

该变步长的MPPT控制算法中, 每个控制周期里, P_{REF} 的设定流程图如图5所示。其中 ΔP 为设定的太阳能电池输出功率跌落阈值, P_1 为输出功率设定值的修改步长, K 为大于1的常数, 仿真中一般取值在2~4之间。

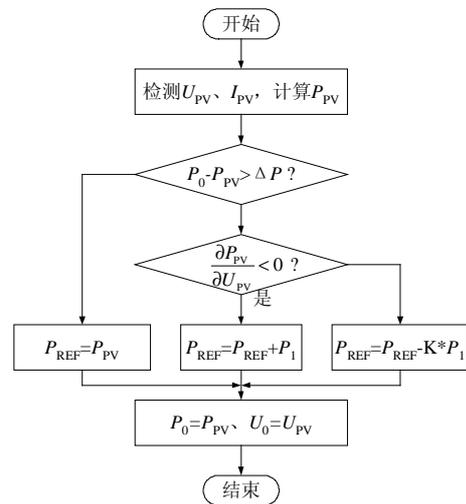


图 5 变步长 MPPT 控制算法中 P_{REF} 设定流程图

Fig. 5 Flow process diagram for determination of P_{REF} in the modified MPPT strategy

4 仿真与实验结果

采用与第3节中相同的仿真参数设置,应用新算法对光伏并网逆变系统进行了仿真。图6是光强发生下降阶跃情况下的仿真波形。由图可知,采用新的算法后,由于控制系统实现了对光照强度阶跃变化的准确检测,并快速地修改减小了逆变输出功率参考值,从而避免了母线电压崩溃现象。在光照强度下降阶跃达到40%的情况下,仿真表明系统算法仍具有较好的稳定性。

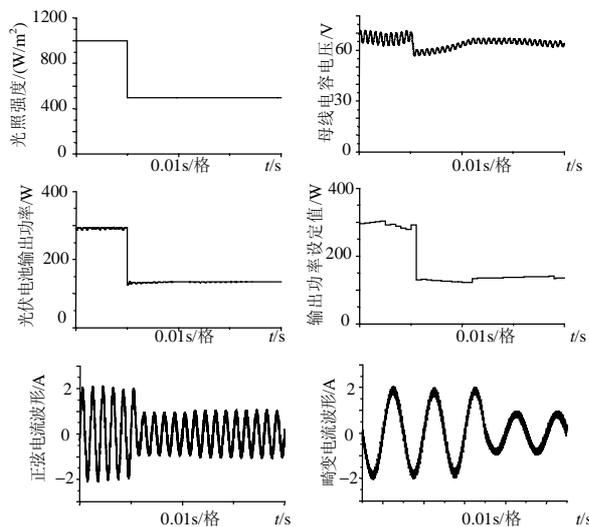


图6 变步长MPPT算法在光强下降阶跃情况的仿真波形
Fig. 6 Simulation of tracking process during step change of light intensity with the modified MPPT strategy

图7是在并网试验系统上应用上述算法得到的实验波形。其中图7(a)为实验记录的光照强度发生下降阶跃情况下的母线电压波形,图7(b)、(c)是光照强度变化前后的并网输出电流。

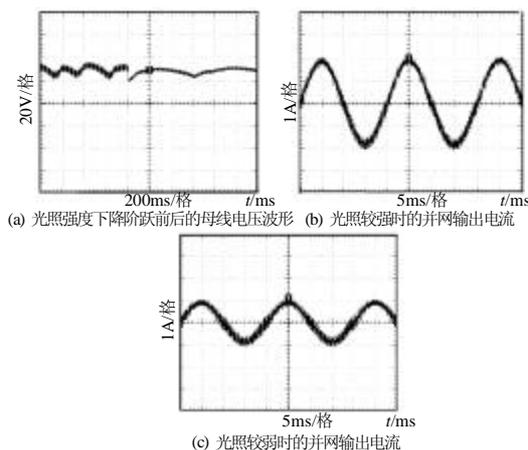


图7 并网系统实验波形图
Fig. 7 Experimental results of grid-connected system

5 结论

本文在研究现有单级式光伏并网逆变系统的控制算法基础上,提出了一种新型的改进MPPT算法。通过建立系统仿真模型,对系统运行情况进行仿真,比较了应用不同算法的控制效果。仿真和实验结果表明,在改进算法的控制下,单级式并网系统可以稳定、高效地追踪光伏阵列追踪最大功率点;同时,在光照强度、环境温度等系统参数突变的情况下,能快速寻找新的工作点,保持系统稳定,表现出很好的动态特性。

参考文献

- [1] Schaefer J C. Review of photovoltaic power plant performance and economics[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1990, 5(2): 232-238.
- [2] Cai X S. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy [J]. Renewable Energies, Present & Future, 2005, 24(1): 69-75.
- [3] Chung, H S H, Tse K K, Hui S Y R, et al. A novel maximum power point tracking technique for solar panels using a SEPIC or Cuk converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 717-724.
- [4] Eugene V Solodovnik, Shengyi Liu, Roger A Dougal. power controller design for maximum power tracking in solar installations[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2004, 19(5): 1295-1304.
- [5] Walker G R, Sernia P C. Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2004, 19(4): 1130-1139.
- [6] Strong S J. World overview of building-integrated photovoltaics [C]. Conference Record of the Twenty Fifth IEEE. Washington, DC, IEEE, 1996. 1197-1202.
- [7] 王长贵. 世界光伏发电技术现状和发展趋势[J]. 新能源, 2000, 22(1): 44-48.
Wang Changgui. The present status and the trend of development of the world photovoltaic technology[J]. J New energy, 2000, 22(2): 44-48(in Chinese).
- [8] 戴欣平, 马广, 杨晓红. 太阳能发电变频器驱动系统的最大功率追踪控制法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 95-99.
Dai Xiping, Ma guang, Yang Xiaohong. A control method for maximum power tracing of photovoltaic generation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 95-99(in Chinese).
- [9] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政, 等. 用于太阳能照明系统的智能控制器 [J]. 清华大学学报, 2003, 43(9): 1195-1198.
Wu Libo, Zhao Zhengming, Liu Jianzheng, et al. Intelligent controller for photovoltaic lighting systems[J]. J Tsinghua Univ, 2003, 43(9): 1195-1198(in Chinese).
- [10] Wu Libo, Zhao Zhengming, Liu Jianzheng, et al. Implementation of a stand-alone photovoltaic lighting system with maximum power point tracking and high pressure sodium lamp[C]. The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Singapore, 2003(2): 1570-1573.
- [11] Chen Y, Smedley K. A cost-effective single-stage inverter with maximum power point tracking[J]. IEEE Transaction on Power

- Electronics, 2004, 19(5): 1289-1294.
- [12] Liang T J, Kou Y C, Chen J R. Single-stage photovoltaic energy conversion system[J]. Proc. Inst. Elect. Eng., 2001, 4(148): 339-344.
- [13] 李圣清, 周有庆, 朱英浩, 等. 基于加权一阶局域理论的综合电力滤波器谐波电流预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 19-23.
- Li Shengqing, Zhou Youqing, Zhu Yinghao, et al. Harmonic current prediction method of combined power filter system based on weighted first-order local area theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 19-23(in Chinese).
- [14] 郭卫农, 陈坚. 基于状态观测器的逆变器数字双环控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 64-68.
- Guo Weinong, Chen Jian. Study on digital dual-loop control for inverters based on state-observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 64-68(in Chinese).
- [15] Kawamura T, Harada K, Ishihara U, et al. Analysis of MPPT characteristics in photovoltaic Power System[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1997, 47(1-4): 155-165.

收稿日期: 2005-11-08。

作者简介:

吴理博(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事电力电子与光伏发电研究, chzhao@mail.iee.ac.cn。

(编辑 王彦骏)