

# 基于改进 MPPT 算法的微电网 电能质量改善作用研究

郭芳<sup>1,2</sup>, 邓长虹<sup>2</sup>, 廖毅<sup>1</sup>, 谭茂强<sup>1</sup>, 贺艳芝<sup>1</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 武汉大学 电气工程学院, 武汉 430072)

**摘要:** 基于最大功率跟踪(MPPT)技术的光伏发电系统, 其控制器输出功率参考值由 MPPT 算法实时计算得到。MPPT 算法的快速性、准确性和稳定性可直接影响光伏发电系统的输出功率特性及发电质量。为此, 结合单级式光伏并网发电系统的控制原理, 分析了 MPPT 算法对光伏发电系统的控制作用; 并针对一种常用变步长扰动算法存在的问题, 结合光伏电池的数学模型, 提出了一种改进的变步长扰动算法。该算法可有效提高跟踪速度和精度, 降低功率波动, 提高发电质量。最后, 仿真分析了改进前后含光伏发电系统的微电网的电能质量, 验证了改进 MPPT 算法对微电网电能质量的改善作用。

**关键词:** 光伏发电; MPPT; 微电网; 电能质量

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)01-0071-06

## Research on Improvement of Micro-grid Power Quality Base on the Advanced MPPT Algorithm

GUO Fang<sup>1,2</sup>, DENG Changhong<sup>2</sup>, LIAO Yi<sup>1</sup>, TAN Maoqiang<sup>1</sup>, HE Yanzhi<sup>1</sup>

(1. Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Energy Engineering Group, Guangzhou 510663, China;

2. College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The power quality of PV generation is greatly affected by the maximum power point tracking (MPPT) algorithm. Researching an improvement measure of MPPT algorithm, is an effective way to reduce the power quality problems caused by the PV generation system and improve the micro grid power quality. The drawbacks of a commonly used variable step perturbation algorithm and its effects on the power quality of micro-grid are analyzed. According with the drawbacks, an improved variable step perturbation algorithm is proposed combining with the mathematical model of PV cells. And the simulation analysis show that through improving the MPPT algorithm can effectively improve the power quality of micro-grid which contains PV generation system.

**Key words:** photovoltaic generation; MPPT algorithm; micro-grid; power quality

由于微电网地理范围较小, 小的电能质量扰动会迅速在微电网内扩散, 甚至演变为稳定性问题。因此改善微电网电能质量对微电网的经济可靠运行有重要意义。随着微电网研究的深入和应用范围的扩大, 微电网中分布式电源(DG)的种类越来越多, 数量越来越大, DG 的发电质量对微电网电能质量的影响越来越大<sup>[1-2]</sup>。提高 DG 自身的发电质量, 降低由源头引起的电能质量问题, 是改善微电网电

能质量的有效途径。光伏发电无污染、无噪音、运行成本低, 具有良好的发展前景, 是目前 DG 发展的重要方向之一<sup>[3-7]</sup>。光伏发电系统一般由光伏电池板及控制器组成。为提高太阳能电池的工作效率, 最大化利用太阳能, 光伏发电系统通常采用基于最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, 简称 MPPT)技术的最大功率输出控制, 使光伏阵列的输出功率最大化, 从而提高太阳能电池工作效率。实际运行过程中, 由于光照和温度具有随机性和波动性, 光伏阵列的最大功率点也随之变化, 若 MPPT 控制不能及时准确的跟踪最大功率点, 可能会使光伏发电系统输出功率振荡, 进一步加剧微电

收稿日期: 2014-10-01

作者简介: 郭芳(1983), 女, 湖北荆州人, 博士, 主要从事为微电网及储能技术研究工作(e-mail) guofang2@gedi.com.cn。

网的电压和频率波动,增大系统谐波含量,影响电能质量。因此设计性能良好的最大功率跟踪方法,提高光伏发电系统的发电质量,可有效改善微电网电能质量。本文针对常规变步长扰动算法的原理,提出了一种简单的MPPT改进算法,结合一种含光伏发电系统的简单微电网结构,分别针对光照强度大幅度变化及随机波动两种情况下,使用MATLAB/SIMULINK软件仿真分析了交流母线电压的偏差、三相不平衡、总谐波畸变率以及系统频率等电能质量指标,结果显示改进MPPT算法对含光伏发电系统微电网的电能质量有较好的改善作用。

## 1 单级式光伏发电系统的控制

### 1.1 控制策略

单级式光伏并网发电系统包括光伏阵列、稳压电容、三相全桥逆变器、滤波器、隔离变压器和交流电网<sup>[8]</sup>。并网光伏系统的控制目标一方面要实现光伏电池的最大功率跟踪,提高光伏电池的工作效率;另一方面要实现并网控制,保证并网电流与电网同相位。图1所示是采用PQ控制的单级式光伏并网发电系统的控制框图。通过实时检测光伏阵列的输出电流 $I_{pv}$ 和输出电压 $V_{pv}$ ,作为MPPT模块的输入,经计算后得到直流电压参考值,随后与无功参考值先后经过外环控制、内环控制之后得到逆变器的控制信号。从控制过程可见,MPPT算法的计算结果决定了逆变器的控制参考目标,是直接影响逆变器输出电能质量的关键因素。因此研究设计合理的MPPT算法,可有效提高光伏发电系统的发电质量。

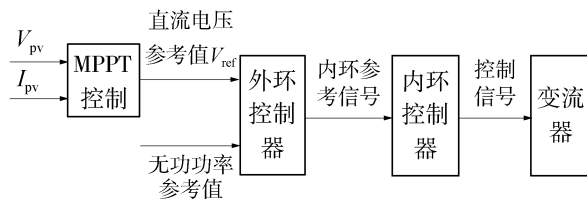


图1 单级式光伏发电系统控制结构图

Fig. 1 Single-stage PV System Control Structure Diagram

### 1.2 MPPT 算法

目前已有的MPPT算法种类较多,其中扰动观测法因其算法简单、所需变量较少、易于实现等优点,应用最为广泛<sup>[9-10]</sup>。以某100 kWp光伏阵列的输出功率-电压曲线为例(如图2所示),其中 $S$

表示光照强度,环境温度为标准温度(298 K)。当环境温度和光照条件一定时,光伏电池的 $P-V$ 曲线其斜率 $dP/dV$ 在最大功率点的左侧大于0;在最大功率点的右侧小于0;在最大功率点处等于0。且随着运行点靠近最大功率点,斜率的绝对值越来越小。因此,若以 $\alpha \cdot |dP/dV|$ 作为扰动步长<sup>[8,11-13]</sup>周期性的对光伏阵列电压施加一个扰动,检测光伏阵列输出功率的变化,即可判断光伏阵列的运行点在 $P-V$ 曲线上的位置,进而决定下一步的电压控制方向。

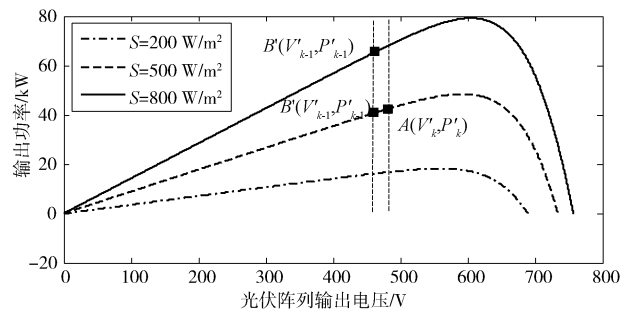


图2 某100 kWp光伏阵列的输出功率-电压曲线

Fig. 2 P-V Curve of a PV Array with 100 kWp

然而在实际运行过程中,环境温度和光照强度都是实时变化的,尤其光照强度变化较快。因此,由特定条件下的 $P-V$ 曲线特点得出的扰动算法难免受到光照强度变化的影响而产生不适应甚至误判的情况,影响微电网的电能质量,具体如下:

1)不同光照强度下,扰动步长 $\alpha \cdot |dP/dV|$ 不一致,很难找到一个合适的 $\alpha$ 值来满足全天光照强度变化下的步长反应灵敏度。容易出现弱光照下跟踪速度过慢,而强光照下又跟踪步长太大而无法跟踪的状况,从而加剧微电网的电压和频率波动,甚至影响微电网的正常运行。

2)在光照强度变化时,可能发生误判,造成跟踪失败。此时光伏发电系统的输出功率需经历一段大幅振荡调整后再次达到稳定跟踪。振荡过程会造成微电网的电压和频率波动,增大系统谐波及三相电压不平衡等。

## 2 光伏发电系统的MPPT算法的改进

### 2.1 光伏电池模型

光伏电池是光伏发电系统中最基本的能量转换单元,图3所示是光伏电池的基本模型<sup>[14]</sup>,可知光伏电

池的输出电流为  $I = I_{ph} - I_d - I_{sh}$ , 见式(1)~(3)。

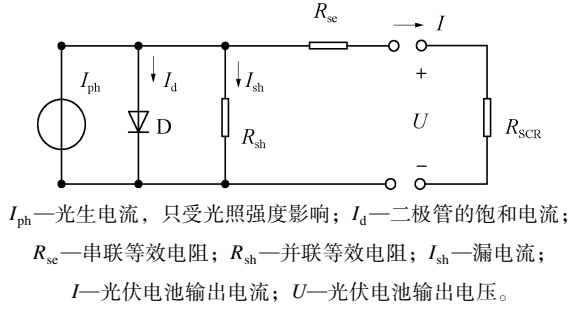


图3 光伏电池模型  
 Fig. 3 Model of PV Cell

$$I_{ph} = \frac{S}{S_{ref}} [I_{ph,ref} + C_T (T - T_{ref})] \quad (1)$$

$$I_d = I_{os} (e^{\frac{qU}{AKT}} - 1) \quad (2)$$

$$I_{sh} = \frac{U + I \cdot R_{sc}}{R_{sh}} \quad (3)$$

式中:  $S$ —实际光照强度;  $S_{ref}$ —标准条件下的光照强度;  $T$ —光伏电池工作的绝对温度值(K);  $T_{ref}$ —标准条件下电池工作的绝对温度(K);  $C_T$ —温度系数(A/K);  $I_{ph,ref}$ —标准条件下的光生电流值;  $q$ —电荷常量( $1.602 \times 10^{-19}$  C);  $A$ —二极管特性拟合系数;  $K$ —玻尔兹曼常数( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)。

通常取  $S_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$  及  $T_{ref} = 298 \text{ K}$  为标准测试条件。 $I_{os}$  为光伏电池反向饱和电流, 满足式(4):

$$I_{os} = I_{s,ref} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 e^{\left[\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (4)$$

式中:  $I_{s,ref}$ —标准条件下的二极管饱和电流;  $E_g$ —禁带宽度(eV), 与光伏电池材料有关。

2.2 改进的变步长扰动观测法

由光伏电池的等效模型可见, 光伏电池的输出电流主要由光生电流  $I_{ph}$ 、二极管的饱和电流  $I_d$  以及漏电流  $I_{sh}$  组成, 而  $I_{sh}$  一般较小, 当输出电压  $U$  不大时, 可认为光伏电池的输出电流主要由光生电流  $I_{ph}$  决定。因此, 假设  $P'$  按式(5)计算, 可将光伏电池的输出功率近似折算至标准光照强度下功率。

$$P' = P \cdot S_{ref}/S = V_{PV} \cdot I_{PV} \cdot S_{ref}/S \quad (5)$$

式中:  $P'$ —折算后的功率;  $P$ —光伏阵列的实际输出功率;  $V_{PV}$ 、 $I_{PV}$ —光伏阵列的输出电压和电流。

图4所示是折算后的光伏阵列的输出功率—电压曲线。比较图2和图4可见, 功率折算可显著降低光照强度对  $P$ - $V$  曲线的影响。因此, 采用折算后的  $P$ - $V$  曲线作为扰动算法的判断依据, 可降低由光

照强度变化对判断结果产生的影响, 缩小不同光照强度下扰动步长  $\alpha \cdot |dP/dV|$  的变化范围, 提高算法和适应性和准确性, 可有效提高光伏发电系统的发电质量。

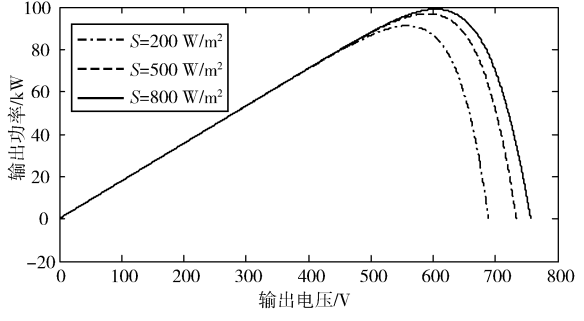


图4 折算至标准光照强度下的输出功率-电压曲线  
 Fig. 4 P-V Curve Converted to a Standard Light Intensity

3 仿真分析

针对上节提出的常用变步长扰动观测法存在的两点问题, 本文以图5所示的小型微电网结构为例, 分别假设光照强度如图6(a)、(b)所示进行仿真分析。其中图6(a)模拟从早晨到正午光照强度由弱变强的情形。为缩短仿真时间, 将光照强度的整个变化过程压缩至20s内。图6(b)模拟由于云层遮挡等天气及环境原因造成的光照强度随机波动或突变的情形。仿真中均设定光伏发电系统在柴油发电机组基本稳定运行后(第5s时刻)接入系统。

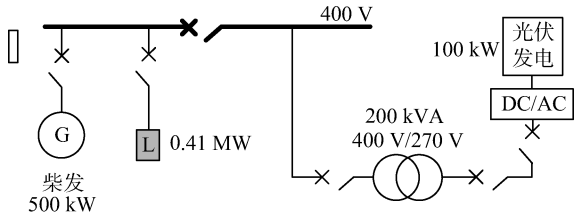
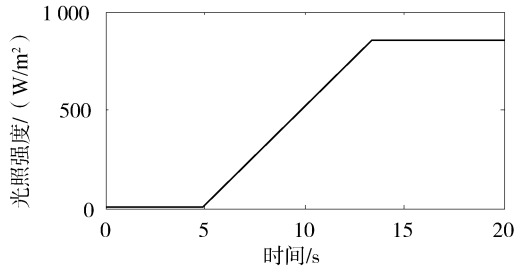
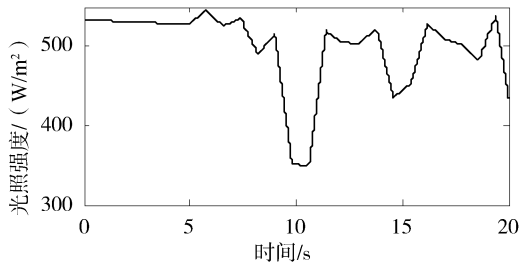


图5 小型微电网结构图  
 Fig. 5 Structure Diagram of a Small Micro-grid



(a) 24 h光照强度模拟波形



(b) 随机波动光照强度模拟波形

图6 光照强度

Fig. 6 Light Intensity

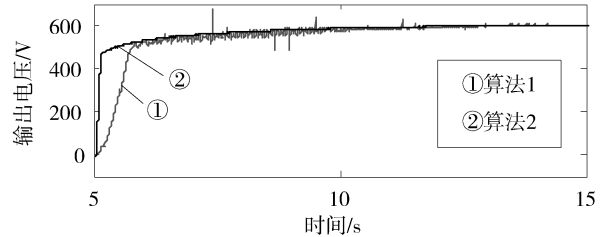
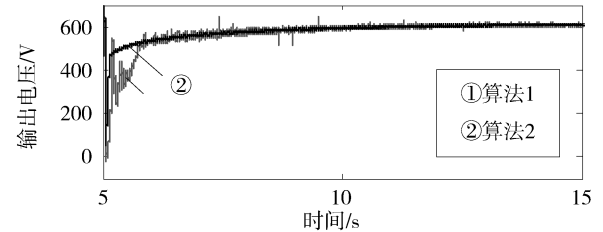
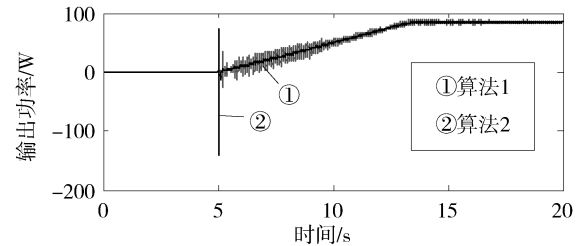
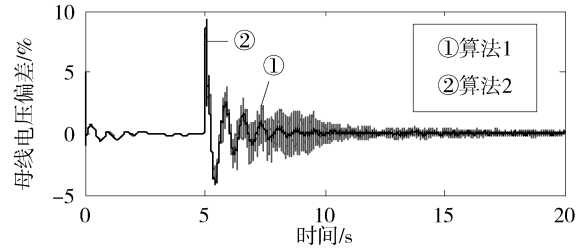
### 3.1 光照强度较强或较弱时的电能质量

仿真中设定光照强度如图6(a)所示，可研究不同光照强度下的电能质量。图7所示是分别采用常用变步长观测法(记为算法1)和改进算法(记为算法2)得到的仿真结果。柴油发电机组0 s开始启动，约5 s后基本稳定运行，此时接入光伏发电系统，MPPT模块开始动作。由图7可见，采用算法1时，在光照强度较弱的区域，跟踪步长过小，跟踪速度较慢；当光照强度大于 $100 \text{ W/m}^2$ 后，MPPT模块可实现实时跟踪，但由于光照强度的实时变化，跟踪步长 $\alpha \cdot |dP/dV|$ 中的 $dP$ 并不完全由 $dV$ 产生，使得功率跟踪过程中无法精确跟踪，光伏发电系统的输出功率及输出电压均在最大功率点附近大幅波动；当光照强度稳定于 $850 \text{ W/m}^2$ 后，按照特定光照强度下的 $P-V$ 特性得到的跟踪算法1可得到较好的跟踪效果，光伏发电系统的输出功率及输出电压波动较小，对微电网的电能质量影响较小。

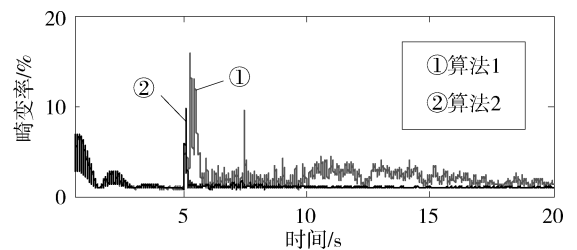
采用算法2时，由于光伏发电系统输出功率经过了折算，降低了光照强度对扰动步长灵敏度的影响，可适应全天变化的光照强度，快速地为光伏控制系统提供准确的直流电压参考值。从图7(a)~(c)可见，采用算法2的MPPT模块经0.16 s后跟踪到最大功率工作点，随后光伏发电系统一直稳定以最大功率输出。待光伏发电系统稳定工作后，母线电压的总谐波畸变率维持在1%左右，三相不平衡度维持在0.5%以下，经3.5 s后母线电压偏差降至正负0.5%以内。系统频率的波动则主要由光伏发电系统最大输出功率的变化产生。

比较两种算法可见，在光照强度较弱及光照强度变化的阶段，算法2可显著降低光伏发电系统输出功率的波动，减小光伏发电系统产生的电压波动、谐波、三相不平衡以及系统频率波动等，综合

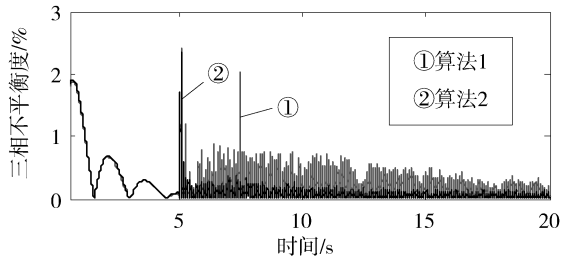
改善微电网的电能质量。另外，算法1由于需要兼顾弱光、强光时跟踪步长的灵敏度，可能导致在 $850 \text{ W/m}^2$ 的光照强度下，步长偏大，致使当光照强度稳定在 $850 \text{ W/m}^2$ 时，算法2依然有比算法1更好的跟踪效果。因此算法2下，微电网母线电压偏差更小、谐波及三相不平衡度都更低。可见算法2具有更好的适应性。

(a) MPPT算法输出的直流电压参考值  $V_{ref}$ (b) 光伏阵列实际输出电压  $V_{PV}$ (c) 光伏阵列输出功率  $P_{PV}$ 

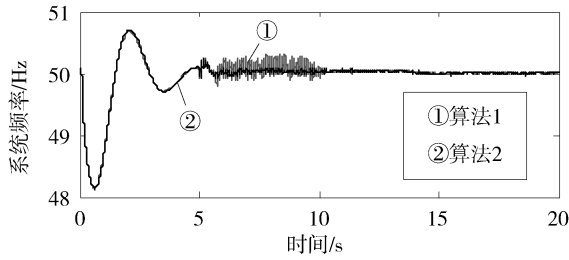
(d) 交流母线电压偏差



(e) 交流母线电压总谐波畸变率



(f) 交流母线电压三相不平衡度



(g) 系统频率

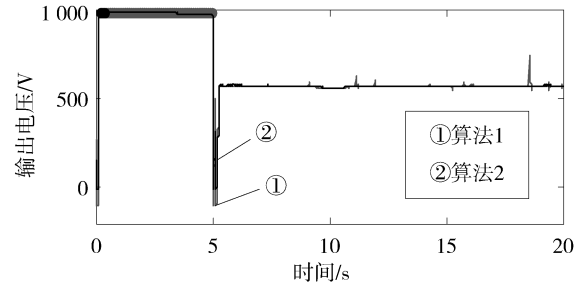
图 7 全天光照强度变化下的仿真计算结果

Fig. 7 Simulation Results Under the Light Intensity Changes as a Whole Day

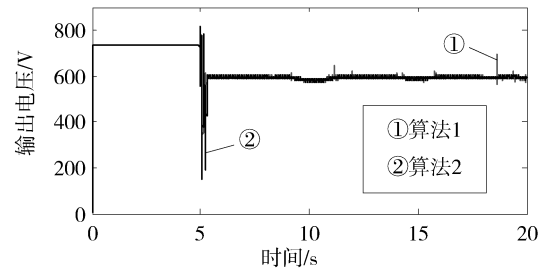
### 3.2 光照强度随机变化时的电能质量

实际运行中, 光照强度常因天气原因而随机波动。假设某段时间光照强度如图 6(b) 所示, 分别采用算法 1 和算法 2 进行仿真分析, 可得到图 8 所示的仿真结果。两种算法皆有较好的跟踪速度, 均可在 0.3 s 内调整光伏电池运行至最大功率点附近。然而通过比较两种算法的仿真结果可见, 算法 1 输出的直流电压参考值曲线毛刺较多, 说明算法 1 出现误判的几率较大。而毛刺的产生将引起光伏发电系统输出电压和输出功率的波动, 进而造成微电网电压和频率波动, 增加谐波和三相不平衡度。从图 8 可见 MPPT 模块给出的直流电压参考值偏离最大功率工作点越远, 光伏发电系统输出功率波动越大, 对微电网的电能质量影响越大。因此尽量消除误判, 减小误判发生时参考电压的偏离范围, 是提高光伏发电系统电能质量的有效方法。

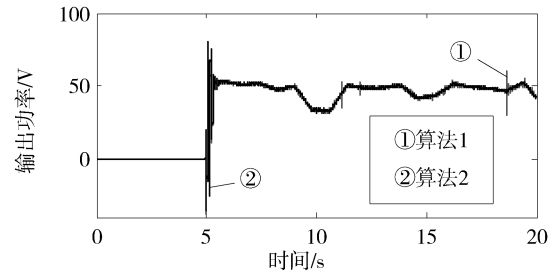
仿真结果显示, 采用算法 2 时光伏发电系统几乎不发生误动作, 始终跟随光照强度的变化稳定以最大功率输出。光照强度的随机突变或波动均不对微电网的电压质量造成影响, 母线电压偏差、母线电压总谐波畸变率以及母线三相不平衡度都维持在较低的水平, 而此时的系统频率波动则主要由光伏发电系统的出力变化产生。



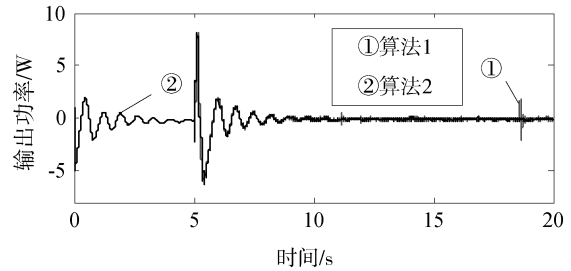
(a) MPPT 算法输出的直流电压参考值  $V_{ref}$  值



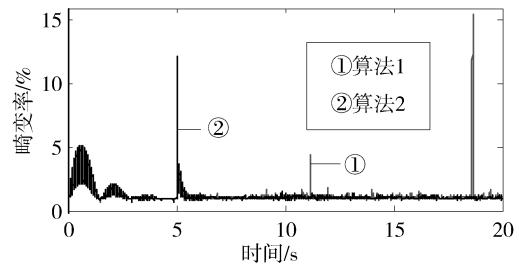
(b) 光伏阵列实际输出电压  $V_{PV}$



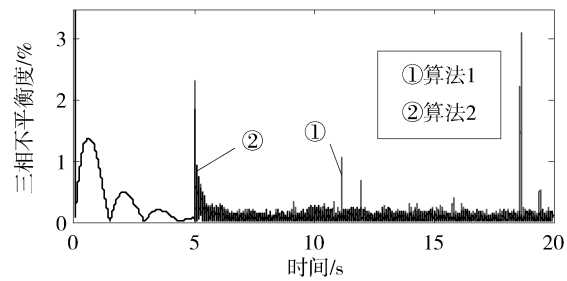
(c) 光伏阵列输出功率  $P_{PV}$



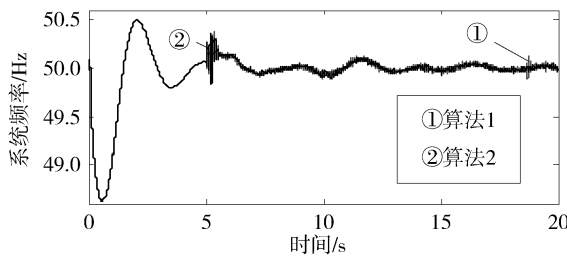
(d) 交流母线电压偏差



(e) 交流母线电压总谐波畸变率



(f) 交流母线电压三相不平衡度



(g) 系统频率

图8 光照强度突变或随机波动下的仿真计算结果

Fig. 8 Simulation Results Under the Light Intensity Sudden Changes or Random Fluctuations

## 4 结论

光伏发电的控制系统一般由 MPPT 模块和 PQ 控制模块组成。研究合适的 MPPT 算法,是提高光伏发电系统自身性能、改善含光伏发电系统微电网电能质量的有效途径之一。本文针对一种常用的变步长扰动算法,结合光伏电池的数学模型,提出了一种改进的变步长扰动算法。并采用仿真计算的方法,分光照强度大尺度变化和光照强度随机波动两种情况,详细研究了改进 MPPT 算法前后,光伏发电系统的运行状况及微电网的电能质量。仿真结果显示,对光伏发电系统 MPPT 算法进行合理的改进,可有效提高光伏发电系统的动态输出特性,降低光伏发电系统运行过程中对微电网电能质量的恶化作用,提高含光伏发电系统微电网的电能质量。

### 参考文献:

- [1] 雷之力, 鲁希娟. 微网电能质量特点及有源滤波补偿方式研究综述 [J]. 湖南电力, 2009, 29(5): 59-62.  
LEI Zhili, LU Xijuan. Features of PQ and Compensation Methods of Active Power Filter in Microgrid [J]. Hunan Electric Power, 2009, 29(5): 59-62.
- [2] VU Vanthong, JOHAN Driessen, RONNIE Belmans. The Influence of the Connection Technology of Dispersed Energy Sources on Grid Stability [C]// 2<sup>nd</sup> International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Con. Pub. No. 498, 2004,

- 2(31): 742-745.
- [3] 毛洪生, 毛行奎, 裴昌盛. 基于 Simulink 的单相光伏并网逆变器仿真研究 [J]. 低压电器, 2011(6): 28-33.  
MAO Hongsheng, MAO Xingkui, PEI Changsheng. Simulation and Research of Single-phase Grid-connected Photovoltaic Inverter Based on Simulink [J]. Low Voltage Apparatus, 2011(6): 28-33.
- [4] 谢丽美. 基于开关函数的光伏并网发电建模与仿真 [J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(5): 25-29.  
XIE Limei. The Model and Simulation of Grid-Connected PV Based On Switch Function [J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(5): 25-29.
- [5] 常超, 南海鹏, 余向阳. 三相电压型光伏并网装置控制策略的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(9): 2080-2082.  
CHANG Chao, NAN Haipeng, YU Xiangyang. Study on Control Strategy of Three Phase Voltage-type Photovoltaic Grid-connected System [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(9): 2080-2082.
- [6] 姚为正, 付永涛, 芦开平, 等. 三相光伏并网逆变器的研究 [J]. 电力电子技术, 2011, 45(7): 5-6, 16.  
YAO Weizheng, FU Yongtao, LU Kaiping, et al. Research on Three Phase Photovoltaic Grid-connected Inverter [J]. Power Electronics, 2011, 45(7): 5-6, 16.
- [7] 苏义鑫, 郭刚. 双级式单相光伏并网系统的研究与仿真 [J]. 通信电源技术, 2011, 28(5): 9-11.  
SU Yixin, GUO Gang. Research and Simulation on Two-stage Single-phase Grid-connected PV System [J]. Telecom power technology, 2011, 28(5): 9-11.
- [8] 丁菲. 含多种分布式电源和储能的低压微网系统的暂态建模与仿真 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [9] 栗秋华, 周林, 刘强, 等. 光伏并网发电系统最大功率跟踪新算法及其仿真 [J]. 电力自动化设备, 2008(7): 21-25.  
LI Qiu-hua, ZHOU Lin, LIU Qiang, et al. Simulative Research of MPPT for Photovoltaic Power System [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008(7): 21-25.
- [10] 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.  
LIU Bangyin, DUAN Shanxu, LIU Fei, et al. Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Based on Improved Perturbation and Observation Method [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2009, 24(6): 91-94.
- [11] 舒杰, 王亮平, 张先勇, 等. 光伏并网最大功率跟踪的改进型扰动控制 [J]. 电力电子技术, 2011, 45(9): 64-68.  
SHU Jie, WANG Liangping, ZHANG Xianyong, et al. Improved Perturb Control of MPPT in Photovoltaic Grid-connected System [J]. Power Electronics, 2011, 45(9): 64-68.
- [12] AHMAD A D, CONSTANTIMOS S. Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for PV Systems [J]. Communications and Information Technologies, 2006(6): 212-215.
- [13] 李鹏. 分布式发电微网系统暂态仿真方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [14] GOW J A, MANNING C D. Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power-Electronics Simulation Studies [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1999, 146(2): 193-200.

(责任编辑 黄肇和)