

基于樽海鞘群算法的仿生智能孤岛检测新方法

赵倩¹, 胡丹丹¹, 许昊¹, 李忠良¹, 崔立闯²

(1. 国网河南省电力公司 焦作供电公司, 河南 焦作 454000;

2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为保证分布式光伏发电系统安全可靠运行, 考虑到传统检测方法以及现有基于最大功率跟踪(MPPT)检测方法的缺陷, 提出一种适用于多变环境下基于樽海鞘群算法(SSA)的MPPT仿生智能孤岛检测新方法。该方法利用SSA实时寻找光伏并网发电系统最大功率点(MPP), 通过对DC/DC换流器的占空比周期性地扰动, 间接地改变逆变器的输出功率与负载功率的匹配程度, 从而判断是否发生孤岛效应, 以此避免检测盲区及不均匀光照的影响。依据IEEE Std.929—2000的规定进行仿真验证, 验证了新方法的有效性。

关键词: 孤岛检测; 樽海鞘群算法; 不均匀光照

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd20839

A Bionic Intelligence Islanding Detection New Method Based on Salp Swarm Algorithm

ZHAO Qian¹, HU Dandan¹, XU Hao¹, LI Zhongliang¹, CUI Lichuang²

(1. Jiaozuo Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Jiaozuo 454000,

Henan, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System

Security and New Technology, Chongqing University,

Chongqing 400044, China)

Abstract: For distributed PV power system security and stability, considering the defects of traditional detection methods and existing maximum power point tracking(MPPT)detection methods, a new MPPT biomimetic intelligent island detection method based on the salp swarm algorithm(SSA) in a variable environment was proposed. The method used SSA to find maximum power point(MPP) of the PV grid-connected power generation system in real time, by periodic perturbing the duty cycle of the DC/DC converter, the degree of matching between the output power and the load power of the inverter was indirectly changed to determine whether an islanding effect occurs, so as to avoid the detection of blind spots and the effects of partial shading conditions. The simulation was verified according to the IEEE Std.929—2000, and verify the effectiveness of the new method.

Key words: islanding detection; salp swarm algorithm(SSA); partial shading conditions

分布式光伏发电迅速发展的同时也带来了诸多新的问题, 其中关键问题之一就是如何检测孤岛效应。孤岛效应是指由于电气故障或自然因素等原因电网中断供电, 而光伏并网发电系统并未检测出故障而继续为周围负载供电, 从而形成脱离电网公司控制的自给供电系统^[1]。这一现象可能会带来损坏用电设备、威胁检修人员人身安全、重合闸失败等严重后果。因此对检测孤岛

效应方法的研究具有重要的意义。

孤岛检测方法通常采用本地检测法^[2], 其包括主动法和被动法^[3-5]。主动检测法通过向电网注入干扰信号, 利用扰动信号使电气量发生变化来判断孤岛的发生, 主要包括滑模频率漂移法^[6]、主动移频法^[7]、有功电流扰动法等方法^[8-9], 此类方法有效地减小了检测盲区, 但对电能质量造成影响^[10-12]。被动法主要注重逆变器的输出参数, 无

基金项目: 国网河南省电力公司焦作供电公司科学技术项目(SGHAJZ00XTJS1800653)

作者简介: 赵倩(1986—), 女, 硕士, 工程师, Email: 1261486282@qq.com

需注入扰动量,不会影响电能质量和系统稳定性,但其检测盲区较大,可靠稳定性较差^[13-15]。为了避免上述方法的缺陷,文献[16]提出基于MPPT(maximum power point)的无源检测法,相比于传统检测方法,不会引入谐波,且不需要添加其他的设备,但其扰动参数设计不合理,存在检测盲区。文献[17-18]进一步改进了基于MPPT的孤岛检测方法,虽然考虑了最恶劣条件,从而避免检测盲区,但仅仅局限在均匀光照的环境,并未考虑光伏系统常常因环境突变而工作在不均匀光照的工况。

针对现有孤岛检测方法的缺陷,本文提出一种应用于环境突变的基于樽海鞘群算法(salpswarm algorithm, SSA)的MPPT的仿生智能孤岛检测新方法。该方法采用改进的SSA实时跟踪MPP,并利用扰动参数进行周期性地扰动,间接地改变逆变器的输出功率与负载的匹配程度,从而进行孤岛检测。通过仿真验证了所提方法的有效性及其可靠性。

1 基于MPPT的孤岛检测方法原理

此类方法的基本原理如下:通过周期性地调节DC/DC换流器的占空比 D ,间接扰动逆变器输出与负载功率的匹配程度,从而利用过/欠压法或过/欠频法检测出孤岛效应。

常用的两级式光伏并网发电系统示意图如图1所示,其中 P_{pv} , Q_{pv} 分别为光伏阵列输出有功功率、无功功率; P , Q 分别为逆变器输出有功功率、无功功率;节点 a 为并网点; S 为断路器; U_g 为电网电压; ΔP , ΔQ 分别为并网点 a 送入电网的有功功率、无功功率,也可称为功率不匹配度^[16]; R , L , C 为本地等效负载; P_{load} , Q_{load} 分别为负载有功功率、无功功率。忽略逆变器、线路等损耗,光伏输出功率与逆变器输出功率相等,即 $P_{pv}=P$, $Q_{pv}=Q$ 。

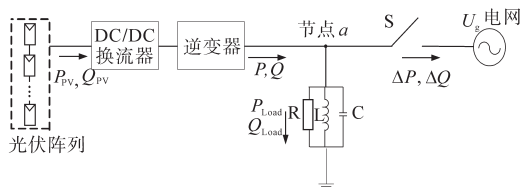


图1 常用两级式光伏并网发电系统

Fig. 1 Schematic diagram of the two-stage grid-connected PV generation system

当正常工作时,并网点 a 的电压被钳位为电网电压。当断路器 S 断开时,并网点电压 U_a 脱离

电网的钳位,幅值由本地负载及逆变器输出功率所决定,即 $U_{pcc} = \sqrt{P_{pv} R}$ (R 为等效负载电阻)。当孤岛发生后,即断路器 S 断开,由于光伏并网发电系统采用单位因数并网,为保证逆变器输出电流与并网点电压同步,其电流频率逐渐改变,直至与并网点电压零相位,即逆变器输出电流稳定在本地负载的谐振频率 f_0 。当负载功率与光伏输出功率匹配且负载频率为50 Hz时,存在较大的非检测区域,为减小该区域的范围,可以对光伏输出功率进行适当的扰动,从而并网点电压幅值发生波动,这恰好与MPPT的特性相符合,即通过改变占空比 D 的大小,影响光伏阵列的功率输出,从而能够达到检测孤岛效应的目的。光伏电池板输出特性曲线如图2所示,其中 I_{pv} , U_{pv} , P_{pv} 分别为光伏组件输出的电流、电压、功率; I_{sc} , U_{oc} 分别为光伏组件短路电流、开路电压; I_m , U_m , P_m 分别为光伏组件最大工作点输出的电流、电压、功率; U_1 , P_1 为扰动后光伏组件输出的电压、功率。从图2中可以看出,当光伏组件工作在 $P-U$ 曲线的左半部分时, U_{pv} , P_{pv} 近似成线性关系,即 $P_{pv}=kU_{pv}$ 。利用这一特征及本文所采用Boost升压电路的原理,通过增大占空比 D ,将光伏组件的工作点从 A 移动至 B ,实现对光伏组件功率输出的扰动。

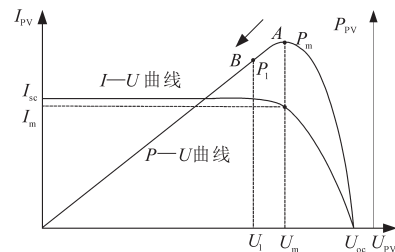


图2 光伏电池板输出特性曲线

Fig. 2 Output characteristic curves of the photovoltaic array

2 SSA算法的基本原理

SSA算法是由Mirjalili等人在2017年以樽海鞘群体的特征提出的仿生算法^[19]。与其他群体不同,樽海鞘并不是以“群”的方式分布,而是呈“链”状分布,其中某个樽海鞘仅对紧挨着自己的樽海鞘产生影响,而不能直接影响其它樽海鞘。这种严格的等级制度使得在群体移动过程中不至于随机地发散移动,且不会一味地朝某一方向移动,导致算法陷入局部最优。

假设在 N 维的欧式空间,其中 N 表示群体规模,种群的位置信息可以用二维矩阵表示。领导者负责在空间中搜索食物源,引领整个群体移

动,按下式更新位置:

$$X_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1(u_j - l_j)c_2 + c_1l_j, & c_3 \geq 0.5 \\ F_j - c_1(u_j - l_j)c_2 + c_1l_j, & c_3 < 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $c_1 = 2e^{-(4l/l_{\max})^2}$ (2) 式中: X_j^1 为在第 j 维中第一个樽海鞘(领导者)的位置; F_j 为第 j 维食物源的位置; u_j, l_j 分别为第 j 维搜索空间的上、下界; c_1, c_2, c_3 为随机数, 其中 c_2, c_3 的范围为 $[0, 1]$, c_2, c_3 具有增强领导者移动的随机性、加强全局搜索能力的作用, c_1 是最为重要的参数, 可视为由 2 至 0 的递减函数; l 为当前迭代次数; $l_{\max}$ 为最大迭代次数。

c_1 常常被称为收敛因子, 用于平衡算法在迭代过程中的探索和开发能力。当收敛因子大于 1 时, 算法进行全局探索; 当收敛因子小于 1 时, 算法进行局部开发, 进而精确地寻找最优值。跟随者成链状依次跟随领导者移动, 按下式更新位置:

$$X_j^i = \frac{1}{2} (X_j^i + X_j^{i-1}) \quad (3)$$

式中: X_j^i 为第 j 维中第 i 个跟随者的位置, $i \geq 2$; X_j^{i-1} 为第 j 维中第 $i-1$ 个跟随者的位置。

为了加快算法的收敛时间, 对原始算法进行优化, 在跟随者位置更新时, 增加线性减小的惯性权重 w , 即

$$w = 0.9 - \frac{(0.9 - 0.2) \times (l - 1)}{iter_{\max}} \quad (4)$$

式中: l 为当前迭代次数; $iter_{\max}$ 为最大迭代次数。优化后的跟随者更新公式为

$$X_j^i = \frac{1}{2} (wX_j^i + X_j^{i-1}) \quad (5)$$

相对于目前的仿生智能算法, SSA 具有较快的收敛速度, 且仅需更新一个参数。考虑到光伏系统常常工作在变化的环境中, 而传统 MPPT 算法易陷入局部最优, 当孤岛发生后需要确保快速有效地检测以及对突变环境的适应, 因此本文采用改进 SSA 算法, 从而使所提孤岛检测方法具有更好的适应性。

同时, 算法需要实时跟踪 MPP, 即当光照、温度等外界环境变化时, 光伏阵列的输出功率也跟随变化, 因此为避免算法陷入死循环, 需要重新启动算法进行功率跟踪。当输出功率变化满足下式时, 重新启动算法。

$$\frac{|P_{\text{real}} - P_m|}{P_m} > \Delta P \quad (6)$$

式中: P_{real} 为光伏阵列实际的输出功率; P_m 为当前

工况下光伏阵列在 MPP 处的输出功率; ΔP 为光伏阵列输出功率变化的阈值, 设置为 0.5。

3 基于 SSA 的仿生智能孤岛检测方法

IEEE Std.92—2000, UL1741 等标准提出分布式供电系统必须具有检测孤岛效应的功能, 其要求当发生孤岛效应后并网点电压 U_{PCC1} 满足 $0.88U_N \leq U_{\text{PCC1}} \leq 1.1U_N$ (U_N 为电网电压额定值) 时, 允许最大检测孤岛的时间为 2 s。

考虑到施加扰动时尽可能小地引起并网点电压波动及功率的损失等因素, 所提出的仿生智能孤岛检测新方法采用每隔 1 s 施加一次扰动, 扰动持续时间为 2 个工频周期, 每个工频周期内的扰动量由并网点电压自适应地变化。这样既能够有效地减小孤岛效应的持续时间, 又能保证所提方法的可靠性。因此本文所提出的基于 SSA 的仿生智能孤岛检测新方法的具体过程介绍如下:

1) 孤岛效应发生前, 由改进的 SSA 算法实时寻找最大工作点, 并维持系统稳定运行, 同时实时检测孤岛效应;

2) 若孤岛效应发生后, 当并网点电压 U_{PCC1} 的幅值和频率大小满足条件: a) $U_{\text{PCC1}} < 0.88U_N$; b) $U_{\text{PCC1}} > 1.1U_N$; c) $f - f_g > 0.5 \text{ Hz}$ 中的任意一个, 即可依据过/欠压检测法或过/欠频检测法确定为孤岛状态, 其中, f 为并网点电压频率, f_g 为电网电压频率。

当并网点电压 U_{PCC1} 满足 $0.88U_N \leq U_{\text{PCC1}} \leq 1.1U_N$, 则需要施加一定扰动, 使并网点电压降至 $0.88U_N$ 以下, 即通过施加扰动改变逆变器输出功率与负载功率的匹配程度, 扰动后占空比 D_1 的取值由下式决定:

$$D_1 = 0.24 + \frac{0.76 \times U_N^2}{U_{\text{PCC1}}^2} \times D_0 \quad (7)$$

式中: D_0 为扰动之前的占空比。

由于扰动周期为 1 s, 每扰动周期持续时间为 2 个工频周期, 故在实际计算时, 式(7)中 U_{PCC1} 取为 U_{50n-2} (n 为正整数), 则 D_1 也可表示为

$$D_1 = 0.24 + \frac{0.76 \times U_N^2}{U_{50n-2}^2} \times D_0 \quad (8)$$

假设光照强度和温度不发生突变的情况下, 即施加扰动时外界环境保持恒定, 根据 Boost 升压电路的原理, 本文所提方法对逆变器输出功率的影响如下式所示:

$$P_{PV} = 0.96P_m + 0.04 \times P'_m \geq 0.985P_m \quad (9)$$

式中: P'_m 为扰动时光伏阵列的输出功率; 系数 0.96 和 0.04 分别为一个周期内正常工作时间、扰动时间所占周期的比例。

从式(9)可以看出, 所提出的仿生智能孤岛检测方法造成的功率损耗不足 1.5%。

上述等式成立的条件是基于光伏阵列 $P-V$ 曲线为单峰值的结果, 当 $P-V$ 曲线呈多峰值时, 可以借鉴文献[20-22]针对处理不均匀光照下光伏阵列 $P-V$ 曲线所提出的策略。多峰值 $P-V$ 特性曲线如图 3 所示。

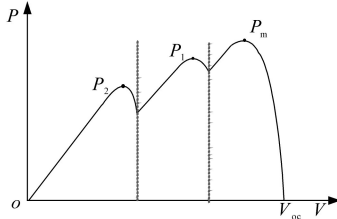


图 3 多峰值 $P-V$ 特性曲线

Fig. 3 Multi-peak $P-V$ characteristic curve

图 3 中, 虚线将多峰值 $P-V$ 曲线分为三部分, 各部分曲线所对应的峰值点分别为 P_m, P_1, P_2 , 各部分曲线均可以由一个等效的关键模块所决定^[22], 且曲线的左半部分可以近似为线性, 即 $P_i = kU_i$ (i 表示所划分的部分)。因此上述等式仍适用于不均匀光照的条件。

综上所述, 当孤岛发生后并网点电压 U_{PCC1} 在 $0.88U_N \leq U_{PCC1} \leq 1.1U_N$ 范围内时, 无论 $P-V$ 曲线是否为单峰值, 施加周期性扰动, 可以将并网点电压幅值降到 $0.88U_N$ 以下, 超出了过/欠压保护阈值, 从而判断出孤岛效应, 避免检测盲区。所提方法流程图如图 4 所示。

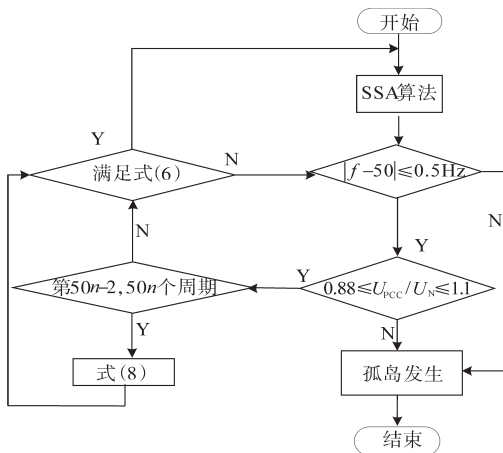


图 4 所提方法的流程图

Fig. 4 Flow chart of the proposed method

4 仿真验证

为了验证所提新方法的有效性及其可靠稳定性, 在 Matlab/Simulink 中搭建如图 1 所示的光伏发电并网系统仿真模型。DC/DC、DC/AC 换流器分别采用 Boost 升压电路、三相全桥逆变电路。三个光伏阵列构成的光伏系统参数设置为: 额定输出有功功率 400 kW; 电网相电压峰值 311 V; 电网阻抗 $L_g = 0.05$ mH; 电网频率 50 Hz; 直流母线电压 700 V。滤波电路的参数为: 逆变器侧滤波电感 $L_i = 0.11$ mH, 滤波电容 $C_i = 137$ μ F, 网侧滤波电感 $L_s = 0.022$ mH; 开关频率 $f_s = 10$ kHz。

仿真光照条件分别为光照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 的均匀光照及光照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2, 800\text{ W/m}^2, 600\text{ W/m}^2$ 的不均匀光照; 本地负载分别为 $R=R_m$ 即 $U_{PCC1} = 1.1U_N$ (R_m 为逆变器输出有功功率与负载有功功率平衡时的负载电阻), $R=1.21R_m$ 即 $U_{PCC1} = 1.1U_N$ 。

采用 IEEE Std.92—2000 规定推荐的 RLC 负载谐振频率为 50 Hz、品质因数 $Q_f = 2.5$ 。本文所提出的孤岛检测方法, 扰动周期为 1 s, 每个周期对 MPPT 实施连续的 2 个工频周期扰动。设置 0.7 s 时发生孤岛效应。因在三相平衡条件下, 三相电压、电流波形相同, 相位相差 120° , 故本文仿真只给出 a 相电压、电流波形。

当 $U_{PCC1} = U_N$ 即 $R=R_m$ 情况下, 在光照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 的均匀光照条件下, 正常工作时扰动前后波形如图 5 所示, 其从上至下分别为光伏阵列输出功率 P_{PV} 、占空比 D 、光伏阵列输出电压 U_{PV} 、直流母线电压 U_{bus} 、并网点 a 相电压 U_{PCCa} 和 a 相电流 I_{PCCa} 曲线。改进的 SSA 算法在 0.14 s 寻找到 MPP 并稳定运行。当仿真时间到达 0.96 s 时通过改变占空比 D 施加扰动, 此时光伏阵列的输出电压 U_{PV} 、输出功率 P_{PV} 均减小。虽然并网点 a 的电压 U_{PCCa} 受电网电压的钳位, 但由于电网阻抗的存在, 其仍发生轻微的波动, 逆变器输出的 a 相电流 I_{PCCa} 减小。上述的参数变化波形均与理论分析相符合, 验证了所提方法的有效性。

在光照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 的均匀光照条件下发生孤岛效应后, 其扰动前后波形如图 6 所示。仿真中设置为 0.7 s 时光伏并网系统脱离电网, 即发生孤岛效应, 当检测到孤岛效应后, 立即关断逆变器桥臂功率开关管。由于逆变器输出有功功率与负载有功功率平衡, 即 $R=R_m$, 从图

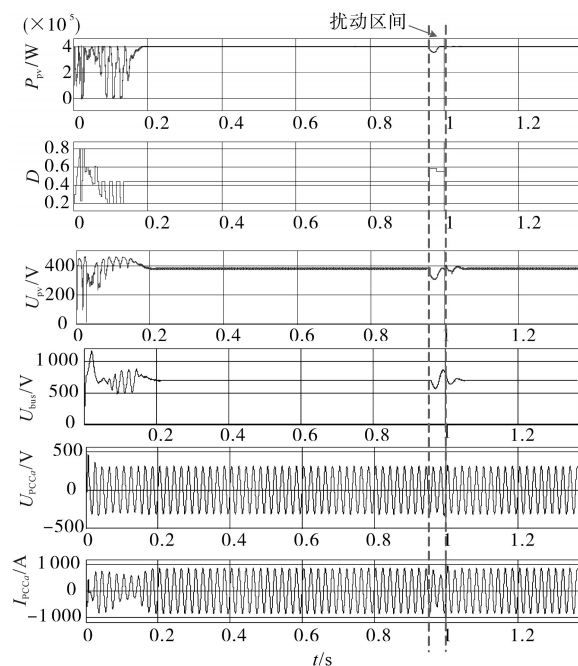


图5 均匀光照下正常扰动波形

Fig. 5 Normal disturbance waveforms under uniform irradiation

6b、图6c可以看出,并网点电压 U_{PCC1} 幅值没有发生突变,此时系统处于孤岛运行且并网点电压、频率都在正常范围内。从图6a可以看出在0.96 s对占空比 D 进行扰动,此时,光伏阵列的输出电压 U_{PV} 、输出功率 P_{PV} 减小,导致 a 点电压 U_{PCCa} , a 点功率 P_{PCCa} 生波动,且电压幅值减小到 $0.88U_N$ 以下,从而检测出孤岛效应,该方法的检测时间约为20 ms。

不均匀光照的仿真采用三组光伏组件,光照强度分别为 $1\,000\text{ W/m}^2$, 800 W/m^2 , 600 W/m^2 ,其光伏阵列的 P — V 特性曲线如图7所示。由图7可知,最大输出功率 $P_{\max}$ 为275.1 kW。当不均匀光照条件下发生孤岛效应时,若逆变器输出功率与负载功率不平衡时,则可由欠/过压法直接检测出孤岛效应,波形图如图8所示,其负载功率设置为400 kW。

因此,本文假设不均匀光照时逆变器输出功率与负载功率平衡,即 $R=R_m$ 。此时并网点电压 U_{PCC1} 幅值没有发生突变,系统处于孤岛运行且并网点电压、频率都在正常范围内,其扰动前后波形如图9所示。从图9a可以看出:在不均匀光照下改进的SSA算法能够在0.138 s寻找到MPP并能稳定运行,稳定时的输出功率为273.8 kW,SSA算法的跟踪效率为99.52%,证明了改进的SSA算法在不均匀光照下的有效性。在0.96 s时施加

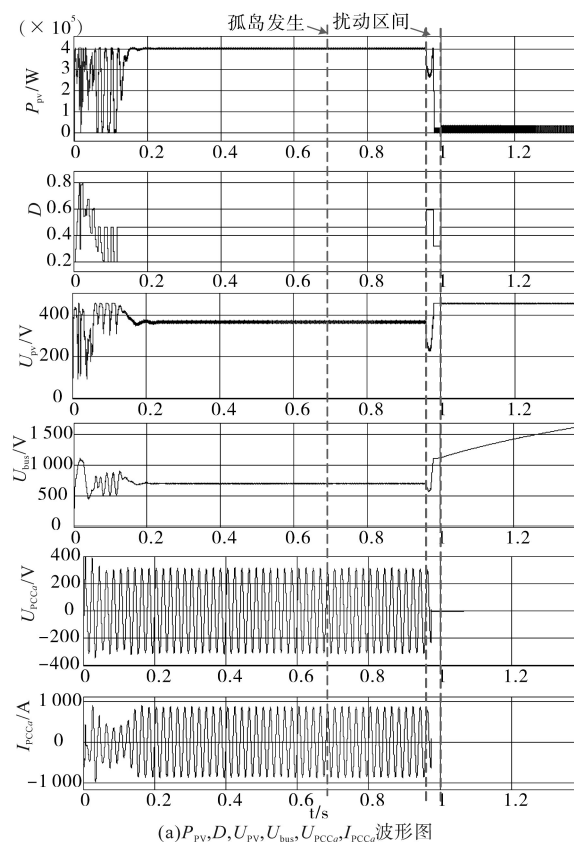
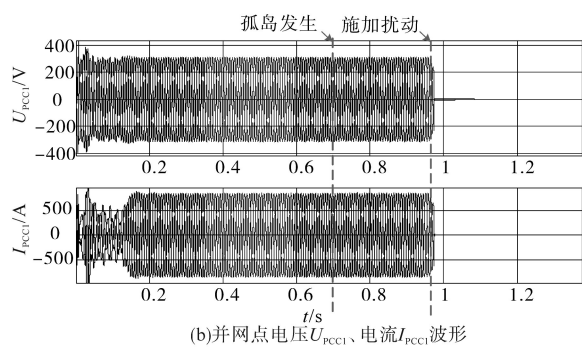
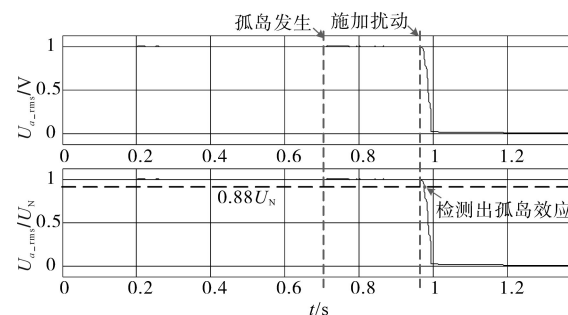
(a) P_{PV} , D , U_{PV} , U_{bus} , U_{PCCa} , I_{PCCa} 波形图(b) 并网点电压 U_{PCC1} 、电流 I_{PCC1} 波形(c) 并网点电压有效值及与 U_N 的比值

图6 均匀光照且孤岛状态下扰动波形图

Fig. 6 Disturbance waveforms under uniform irradiation and island state

扰动,经过约为一个工频周期,检测出孤岛效应,逆变器将停止工作,光伏阵列处于开路状态,输出功率减小至零,从图9可以看出参数波形变化

和理论分析相符,验证了方法的有效性,同时证明了第3节假设的成立。从图9c可以看出,所提方法能够在20 ms检测出孤岛效应。

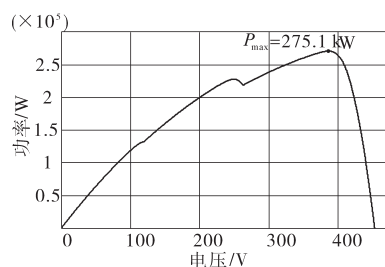
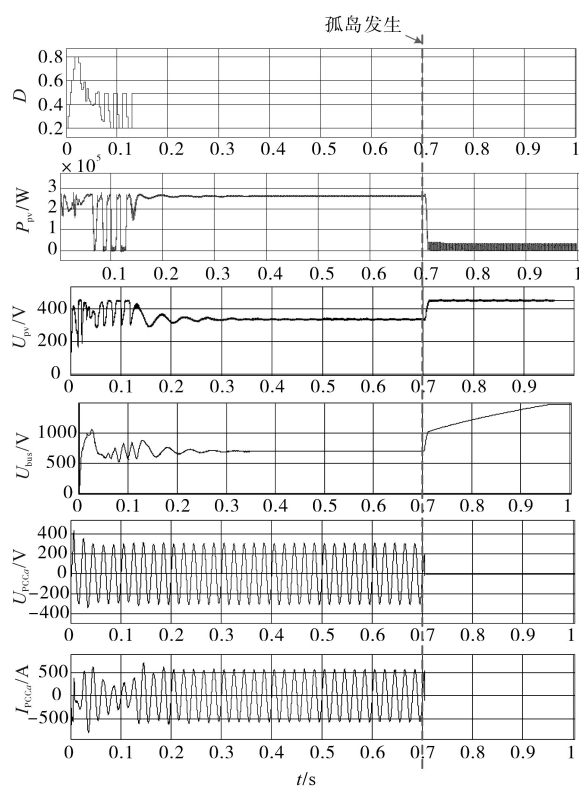
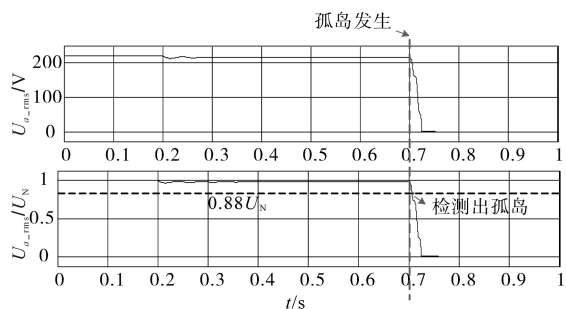


图7 不均匀光照下 P — V 特性曲线

Fig. 7 P — V characteristic curve under partial shading conditions

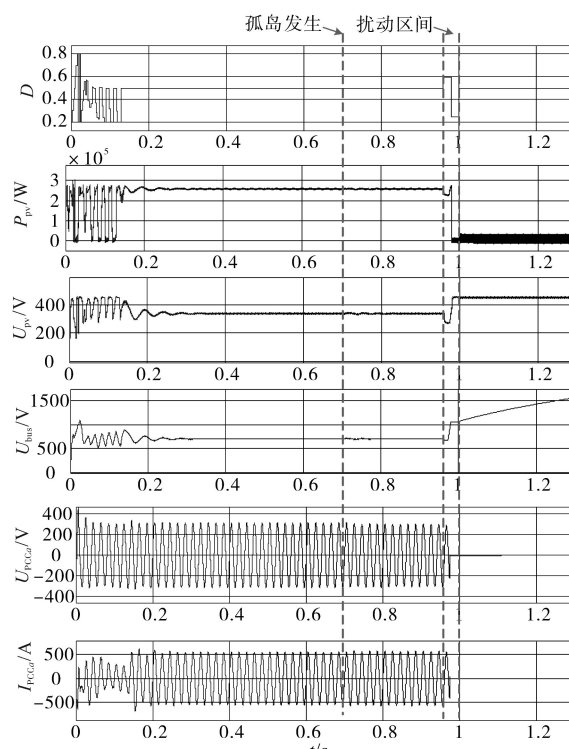


(a) $D, P_{pv}, U_{pv}, U_{bus}, U_{PCCd}, I_{PCCd}$ 波形图

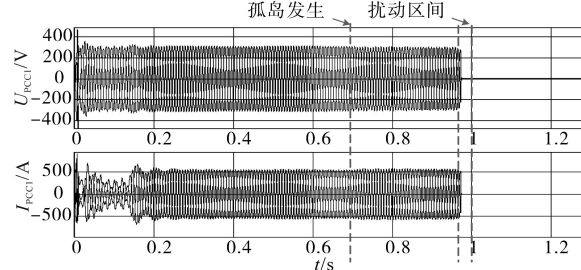


(b)并网电压有效值及与 U_N 的比值

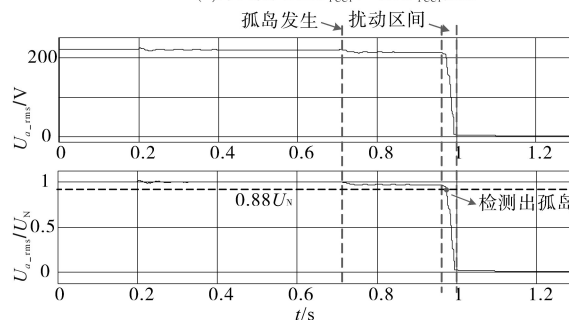
图8 功率不匹配时孤岛状态下扰动前后的波形
Fig.8 Waveforms before and after disturbance under island state when power mismatch



(a) $D, P_{pv}, U_{pv}, U_{bus}, U_{PCCd}, I_{PCCd}$ 波形图



(b)并网电压 U_{PCC1} 、电流 I_{PCC1} 波形



(c)并网电压有效值及与 U_N 的比值

图9 不均匀光照且孤岛状态下扰动前后的波形

Fig. 9 Waveforms before and after disturbance under partial shading conditions and island state

为了充分证明基于改进的SSA算法的孤岛检测方法在不均匀光照下的稳定性及有效性,采用基于传统扰动观察法(P&O)的孤岛检测方法进行仿真对比,如图10所示。从图10a可以看出算法能够在0.14 s跟踪到“最大功率点”,光伏阵列输出功率稳定在230 kW,P&O算法的跟踪效率

为83.64%,且纹波较大,与改进SSA算法的99.52%相差较大。在 $t=0.7\text{ s}$ 时发生孤岛效应, $t=0.96\text{ s}$ 施加扰动,当施加扰动后即占空比增大,光伏阵列的输出电压减小、输出功率略微增大,说明其稳定时陷入局部最优值;并网点电压发生微小的波动其并网点电压幅值并未超出 $0.88U_N \leq U_{PCC1} \leq 1.1U_N$,即扰动后仍无法检测出孤岛效应。因此,基于P&O算法的孤岛检测方法并未有效地检测出孤岛效应。

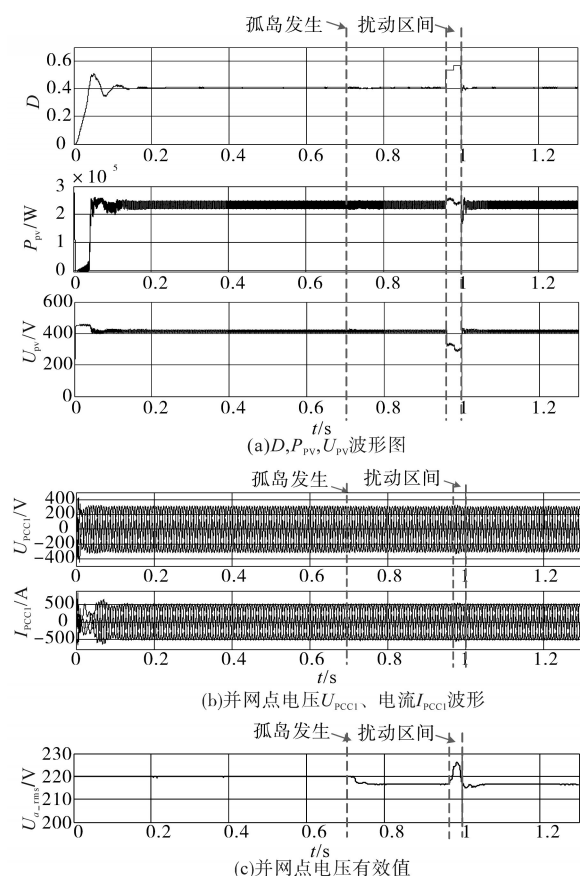


图10 基于P&O的孤岛检测方法

Fig. 10 The island detection method based on the P&O MPPT algorithm

考虑到所提方法在最难检测的工况的适应性,即 $U_{PCC1}=1.1U_N, R=1.21R_m$,本文给出不均匀光照且 $U_{PCC1}=1.1U_N$ 时,孤岛状态下扰动前后的仿真结果,如图11所示,进一步说明所提方法的有效性。

由图11可知,图11a、图11b所示的波形图符合上述理论分析,从图11c可以看出,由于 $R=1.21R_m$,当 0.7 s 发生孤岛时,其并网点电压 U_{PCC1} 近似升到 $1.1U_N$,当 0.96 s 时施加一定的扰动,使得并网点电压 U_{PCC1} 降低至 $0.88U_N$ 以下,从而检测

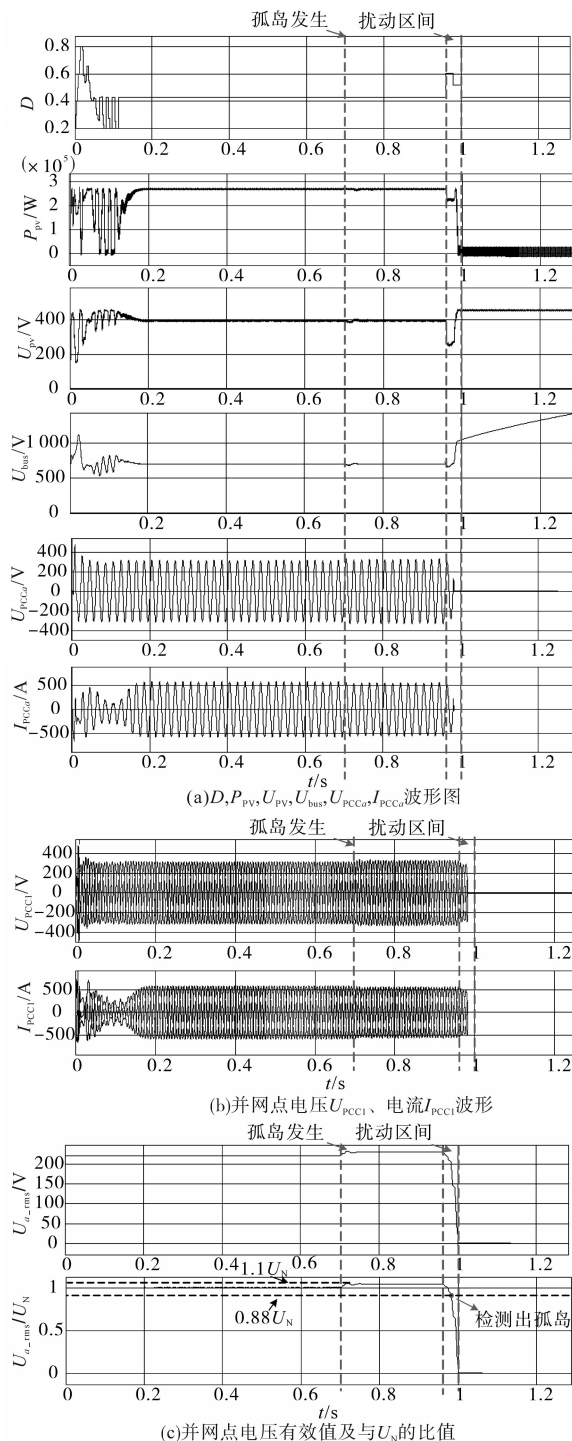
图11 不均匀光照下 $U_{PCC1}=1.1U_N$ 且孤岛状态下扰动前后的波形

Fig. 11 Waveforms before and after disturbance under partial shading conditions and island state

出孤岛效应。

5 结论

本文提出了基于SSA的仿生智能孤岛检测新方法。当逆变器输出功率与负载功率相匹配

时,所提方法根据扰动前并网点电压 U_{50n-2} 确定所需扰动占空比 D 的大小,间接改变逆变器输出功率,通过判断扰动后并网点电压是否低于 $0.88U_N$ 从而判断是否发生孤岛效应;当逆变器输出功率与负载功率不匹配时,所提方法通过欠/过压检测判断是否发生孤岛效应。MPPT采用SSA算法进行实时跟踪MPP,使得该方法能更好地适应环境的变化。根据IEEE Std.92—2000规定并考虑最恶劣环境,进行均匀光照、不均匀光照下的仿真验证,仿真结果表明了所提新方法的稳定性及有效性,且无检测盲区。

参考文献

- [1] IEEE. IEEE Std 929—2000. IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems[S]. New York: IEEE, 1995.
- [2] 贾科,朱正轩,杨哲,等. 基于改进的Adaboost算法的光伏发电机组智能孤岛检测方法[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1227–1238.
- [3] 程启明,王映斐,程伊曼,等. 分布式发电并网系统中孤岛检测方法的综述研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 147–154.
- [4] 张明锐,王俊凯,王佳莹,等. 微网混合式孤岛检测及运行模式切换研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 1–8.
- [5] 徐云鹏,叶豪东,和敬涵,等. 带整流性负载的分布式发电系统孤岛检测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 33–39.
- [6] 余运俊,袁国瑛,范瑞祥,等. 滑膜频率偏移法和过/欠频被动作法结合的混合孤岛检测法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2): 224–229.
- [7] 刘芙蓉,康勇,王辉,等. 主动式移相式孤岛检的一种改进的算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 172–176.
- [8] 顾一丰,邱稳斌,李艳君,等. 基于虚拟阻抗和锁相环的孤岛检测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 84–91.
- [9] Zeineldin H H, Kirtley J L. A simple technique for islanding detection with negligible non detection zone[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 779–786.
- [10] 黎燕,史向月,向鹏. 带容错逆变器的孤岛微网系统及其稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 82–91.
- [11] 贺超,王冕,陈国柱. 基于下垂控制的孤岛检测方法及其改进策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 87–92.
- [12] 李军,黄学良,陈小虎,等. 基于分压器原理的孤岛检测技术在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 15–21.
- [13] Zeineldin H. Performance of the OVP/UPV and OFP/UPF method with voltage and frequency dependent loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 772–778.
- [14] 侯梅毅,高厚磊,刘炳旭,等. 基于相位偏移的孤岛检测新方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 22–26.
- [15] Reigosa D, Briz F, Blanco C, *et al.* Islanding detection in grid-connected power converters using harmonics due to the non-ideal behavior of the inverter[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, USA: IEEE, 2013: 2649–2656.
- [16] 代璐. 光伏并网发电系统中孤岛检测方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [17] 周林,郝高峰,解宝,等. 基于MPPT的自适应孤岛检测算法[J]. 太阳能学报, 2018, 39(9): 2553–2560.
- [18] 郝高峰. 分布式光伏发电系统孤岛检测算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [19] Mirjalili S, Gandomi A H, Mirjalili S Z, *et al.* Salp swarm algorithm: a bio-inspired optimizer for engineering design problems[J]. Adv. Eng. Softw, 2017, 114: 163–191.
- [20] Ahmed J, Salam Z. An improved method to predict the position of maximum power point during partial shading for PV arrays[J]. IEEE Trans. Ind. Informat., 2015, 11(6): 1378–1387.
- [21] Batzelis E I, Kampitsis G E, Papathanassiou S A, *et al.* Direct MPP calculation in terms of the single-diode PV model parameters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(1): 226–236.
- [22] Li X, Wen H, Hu Y, *et al.* Modified beta algorithm for GMPPT and partial shading detection in photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(3): 2172–2186.

收稿日期:2019-09-07

修改稿日期:2019-10-11