

1-8-2019

A Composite Islanding Detection Method Based on NDZ Pre-estimation Mechanism

Long Xin

School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

Ziwei Zhu

School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

Xu Min

School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

A Composite Islanding Detection Method Based on NDZ Pre-estimation Mechanism

Abstract

Abstract: Islanding detection methods are divided into passive and active types. The former has a large detection blind area and low success rate. The latter has high accuracy and reliability, but it reduces the power quality of the grid by continuously adding disturbances. Thus, *this paper proposes a compound islanding detection method based on NDZ pre-estimation. Several electrical parameters of the load flow on the grid side and the flow load on the inverter side are separately calculated and pre-evaluated, and Sandia frequency offset method is selectively introduced according to the evaluation result to complete the islanding detection.* The NDZ of this method is very small, no blind area detection can be realized under certain load conditions, and the power quality of the output current is greatly improved. Through simulation and analysis, the feasibility of the hybrid algorithm is verified.

Keywords

photovoltaic power generation system, grid-connected inverter, islanding detection, NDZ pre-estimation, AFDPF

Recommended Citation

Long Xin, Zhu Ziwei, Xu Min. A Composite Islanding Detection Method Based on NDZ Pre-estimation Mechanism[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3445-3450.

结合盲区预评估机制的复合式孤岛检测法

龙鑫, 朱自伟, 徐敏

(南昌大学信息工程学院, 南昌 330031)

摘要: 孤岛检测方法分为被动式和主动式, 前者有较大的检测盲区、成功率低, 后者的准确性和可靠性高, 却因持续不断地加入扰动量从而降低电网的电能质量。基于此, 提出了结合检测盲区预评估机制复合式孤岛检测法。分别采集电网侧流向负载及逆变器侧流向负载的几个电参量进行计算和预评估, 根据评估结果选择性地引入 Sandia 频率偏移法来完成孤岛检测, 该方法的盲区很小, 在某些负载情况下能实现无盲区检测, 且极大地改善了输出电流的电能质量。通过仿真和分析, 验证了复合式算法的可行性。

关键词: 光伏发电系统; 并网逆变器; 孤岛检测; 盲区预评估; AFDPF

中图分类号: TP391.9; TM464

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 09-3445-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809027

A Composite Islanding Detection Method Based on NDZ Pre-estimation Mechanism

Long Xin, Zhu Ziwei, Xu Min

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

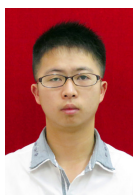
Abstract: Islanding detection methods are divided into passive and active types. The former has a large detection blind area and low success rate. The latter has high accuracy and reliability, but it reduces the power quality of the grid by continuously adding disturbances. Thus, *this paper proposes a compound islanding detection method based on NDZ pre-estimation. Several electrical parameters of the load flow on the grid side and the flow load on the inverter side are separately calculated and pre-evaluated, and Sandia frequency offset method is selectively introduced according to the evaluation result to complete the islanding detection.* The NDZ of this method is very small, no blind area detection can be realized under certain load conditions, and the power quality of the output current is greatly improved. Through simulation and analysis, the feasibility of the hybrid algorithm is verified.

Keywords: photovoltaic power generation system; grid-connected inverter; islanding detection; NDZ pre-estimation; AFDPF

引言

孤岛效应是指电网出现故障或维修时与本地负载断开连接, 而光伏发电系统保持连接且继续供

电, 从而形成一个不受控的本地自主自行供电的独立系统^[1-3]。孤岛效应的发生对电网设备和检修人员的人身安全都有极大的危害^[4], 所以光伏发电系统反孤岛机制必须具备检测速度快、可靠有效的特点, 并且能及时做出决策。应用更为广泛的检测方法是无源检测法(被动式)、有源检测法(主动式)^[5-7]。被动法无复杂的算法程序, 不会给电网加入扰动量。然而当所在地负载吸收的功率与光伏发



收稿日期: 2016-12-07 修回日期: 2017-03-09;
基金项目: 国家自然科学基金(51367014);
作者简介: 龙鑫(1993-), 男, 江西宜春, 硕士生, 研究方向为电力系统自动检测与控制; 朱自伟(1975-), 男, 江西南康, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统运行与控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 3445 •

电系统的输出功率完全或者近乎达到平衡时,此时被动法失去检测作用,所以它的检测盲区 NDZ(Non-Detection Zone)较大。主动式法具备速度快、NDZ 范围小、可靠性高的优势,然而加入的扰动量会给电网带来比较大的谐波影响。

文献[8-9]都是纯粹地仅对主动式法进行改进,在检测速度、准确可靠性等方面都有极大的优化,也在一定程度下改善了检测方法降低电能质量的问题,但是没有从根本上改变主动式法必须持续不断地给电网加入扰动量这一缺陷。基于此种情况,本文提出选择性引入主动式法的复合式孤岛检测方法。

1 盲区预评估机制置入复合式算法中

根据标准 IEEE STD 929-2 000 的规定,一旦出现孤岛,光伏并网系统中的保护控制装置必须迅速动作,一般在 2 s 内须检测到孤岛效应的发生。所以在光伏并网逆变器中,主动法因为具备速度快、可靠性高的优势而作为不可或缺的方法。

据统计,目前太阳能光伏发电的产量并没有达到一定的规模,占比例小,所在地负载吸收的功率与光伏发电系统的输出功率完全或者近乎达到平衡的可能性极小^[10]。并且现代的电网系统本身具有很高的可靠性,进一步减小了电网断电时而系统处于被动检测法的检测盲区的可能性。目前常用的主动检测法是持续不断地给电网加入扰动量来检测发生小概率事件带来的孤岛效应。

站在提高电力系统的效率的角度上来说,这种检测算法存在一定的改进空间。针对这种情况,这篇文章提出了盲区预评估的机制。所谓盲区预评估,就是算法对系统每时每刻所处的工况做准确可靠的预判,通过盲区预评估公式来判断系统某个时刻是否处于被动式法的 NDZ 范围内,并将这种机制置入复合式检测算法中。

2 复合式法的算法流程

复合式孤岛检测法是一种结合检测盲区预评估的混合算法,算法对系统每时每刻所处的工况做准确可靠的预判,通过盲区预评估公式来判断系统某个时刻是否处于被动式法的 NDZ 范围内,进而选择最合适的算法将孤岛效应快速可靠地检测出来。如果系统某时刻的工况恰好处于被动式法的 NDZ 范围内,则必须引入带正反馈的主动频率偏移法 AFDPF(Positive Feedback Active Frequency Drift Method)法;若不处于直接使用被动式法,复合式算法的简化流程图如图 1 所示。

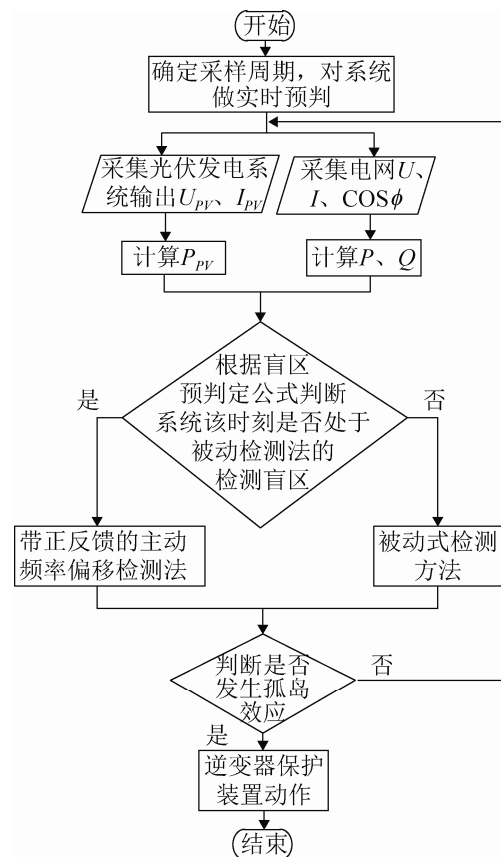


图 1 复合式算法的简化流程图

Fig. 1 Simplified flow chart of the compound algorithm

从图 1 可以看到,预评估公式是复合式算法的关键所在。

因为光伏发电系统的控制方式为恒电流控制,即这个系统的输出电流的大小是恒定不变的。电网与本地负载保持正常连接时,假设并网逆变器输出

的有功功率为 P_{pv} , 无功功率为 Q_{pv} , 并网逆变器输出的是纯有功功率, 即 Q_{pv} 的值为 0。电网提供的功率为 $P+jQ$, 负载吸收的功率为 $P_{load}+jQ_{load}$ 。在文献[11]中提到, 公共电网与负载断开连接的瞬间, 本地负载的阻抗变化率低于 0.5%。当电力系统断开连接发生孤岛效应时, 本地负载阻抗变为 Z_{load}' , 且 $Z_{load}' \approx Z_{load}$, 公共耦合点的电压的大小

$$V' = \frac{P_{pv}}{V} \frac{V^2}{\|P_{pv} + P + jQ\|} = \frac{V}{\sqrt{\left(1 + \frac{P}{P_{pv}}\right)^2 + \left(\frac{Q}{P_{pv}}\right)^2}} \quad (1)$$

式中: V 是并网逆变器的逆变电压, 也是电网未断开时公共耦合点的电压。

根据国际标准 IEEE STD 1547-2003, 规定电压阈值为 $0.88 U_{norm} \sim 1.10 U_{norm}$, 则

$$0.88^2 \leq \left(1 + \frac{P}{P_{pv}}\right)^2 + \left(\frac{Q}{P_{pv}}\right)^2 \leq 1.10^2 \quad (2)$$

一般为了提高检测方法的有效性, 所以将检测盲区的边界扩大 3.5%, 并且 $P=UI\cos\phi$, $Q=UI\sin\phi$, 所以通常被动式法的 NDZ 通过式 3 来描述:

$$0.91^2 \leq \left(1 + \frac{UI\cos\phi}{U_{pv}I_{pv}}\right)^2 + \left(\frac{UI\sqrt{1-(\cos\phi)^2}}{U_{pv}I_{pv}}\right)^2 \leq 1.14^2 \quad (3)$$

式中: $\cos\phi$ 是公共电网某一时刻的功率因数; U 、 I 分别为公共电网侧流向所在地负载的电压和电流。现将式 3 定义为算法流程图中的盲区预评估条件, 并将其置入反孤岛检测机制的算法里, 即通过式 3 对系统所处的工作状态作实时预判。

预评估算法的实现需要对光伏发电系统的逆变电压 U_{pv} 、逆变电流 I_{pv} 和电网的电压 U 、电流 I 及功率因数 $\cos\phi$ 五个电参量做实时采样。 U_{pv} 、 I_{pv} 可以直接从逆变器中读取并加以处理。在现代智能电网的构建下, 具备无线通讯模块的智能终端普及率超过 90%, 电网流向本地负载的电压 U 、电流 I 及功率因数 $\cos\phi$ 可以利用终端传输到并网逆变器的 DSP。将采集的实时数据加以处理和计算便可以对系统所处的工作状态作实时预判。

逆变器的控制电路采用 DSP 为主控芯片, 通过驱动电路和检测电路实现各项功能^[12]。DSP 具

有很强的实时处理能力, 计算准确、快速可靠; 信号调理板负责各种信号的采集和检测, 具有良好的动态响应特性。

因为电力系统的理想运行条件是不存在的, 在电力系统运行时, 在允许范围内的随机的电压波动时常发生, 为了消除算法在执行时出现误判的情况, 算法规定在每个采样周期采集一次需要的电参量, 若 N 次连续的取样数值经计算后得到的预判结果相同(N 取值越大, 判定失误的几率越小), 算法才会执行下一个流程。

3 复合式法与传统检测方法 NDZ 的对比

3.1 被动式法的 NDZ

通常光伏发电系统的逆变器为恒电流控制。输出为纯有功功率, 功率因数为 1^[13]。本地负载由电阻 R 、电感 L 、电容 C 并联组成。当电网出现故障或者维修时停止向本地负载供电, 而光伏发电系统未断开连接并继续供电。

在电网断开之前, 负载侧吸收的有功功率 P_{load} 和无功功率 Q_{load} , 其中 $Q_{load}=V^2(1/(2\pi fL)-2\pi fC)$, 电网与负载断开连接后, 光伏发电系统的无功电流仍然是零输出, 在逆变器中锁相环的钳制作用下, 功率因数保持不变, 公共耦合点处的频率会与本地 RLC 负载的谐振频率 f_0 一致, 其中 $f_0=1/(2\pi\sqrt{LC})$ 。定义 $Q_f=R\sqrt{C/L}$, 其中 Q_f 为负载品质因子, 则

$$\frac{Q_{load}}{P_{load}} = Q_f \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \quad (4)$$

令 $\alpha=Q_{load}/P_{load}$, 则被动式检测法的 NDZ 上边界和下边界分别为

$$f_{0\max} = 0.5 \left(-\frac{\alpha}{Q_f} + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{Q_f}\right)^2 + 4f_{\max}^2} \right) \quad (5)$$

$$f_{0\min} = 0.5 \left(-\frac{\alpha}{Q_f} + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{Q_f}\right)^2 + 4f_{\min}^2} \right) \quad (6)$$

试验表明, 当 α 的值处于区间 $[-0.024Q_f, 0.016Q_f]$

时, 被动式检测法无法有效地检测孤岛效应的发生。为了将被动式检测法的检测盲区定量地在 (Q_f, f) 坐标轴上描述出来, 现考虑一种极端的情况, 令 $Q_f=2.5$ (在国际标准 IEEE STD 1547-2003 中提到, 光伏发电系统并网时 Q_f 的取值应该为 $Q_f \leq 2.5$), 则 α 的取值为 $-0.06 \leq \alpha \leq 0.04$ 。被动式法在 (Q_f, f) 坐标轴上的盲区描述, 如图2所示。

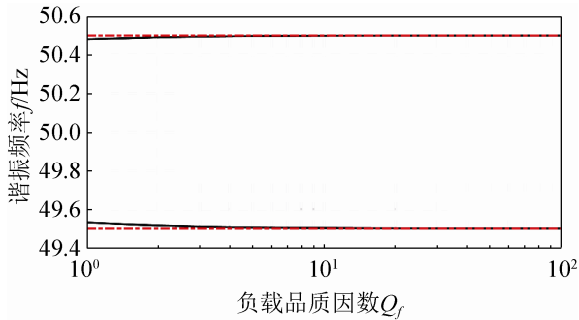


图2 被动式法 NDZ 的描述

Fig. 2 Description of the passive method's NDZ

3.2 AFDPF 法的 NDZ 分析

AFDPF 法是对主动频率偏移法^[14]AFD(Active Frequency Drift Method)的改进, 其改进在于在 AFD 算法中加入了正反馈部分, 算法的斩波因子为 $cf=cf_0+k(f-f_g)$, 式中 cf_0 是初始斩波因子, f 是公共点电压频率, f_g 是工频(国内是 50 Hz), k 是正反馈因子^[15-16]。因此, AFDPF 算法在逆变器输出电流引入的相位角 θ_{AFDPF} 为

$$\theta_{AFDPF} = \frac{\pi cf}{2} = \frac{\pi}{2} \left[cf_0 + k(f - f_g) \right] \quad (7)$$

θ_{AFDPF} 是关于谐振频率 f 的一次函数, 因此 $\theta_{AFDPF}=\theta(f)$ 。算法引入正反馈后, 加速了频率偏离, 与 AFD 相比而言, 检测速度和 NDZ 都得到了很大的优化^[17]。

当电网断开后, 发生孤岛效应后会重新出现一个稳态工作点, 该工作点满足 $\angle G(j\omega) + \theta_{AFDPF} = 0$ 时出现检测盲区, $\angle G(j\omega)$ 是负载端电流超前电压的相位角。在稳态时有如下等式:

$$\angle G(j\omega) = -\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f_{is}} - \frac{f_{is}}{f_0} \right) \right] = \theta(f_{is}) \quad (8)$$

由式(8)得:

$$f_0^2 + \frac{f_{is} \tan[\theta(f_{is})]}{Q_f} f_0 - f_{is}^2 = 0 \quad (9)$$

由式(9), 可画出 AFDPF 算法的检测盲区, 如图3所示。

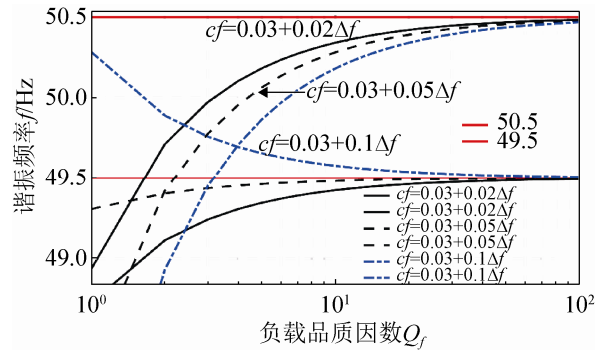


图3 AFDPF 算法的 NDZ

Fig. 3 NDZ of AFDPF

由图3可知, 正反馈因子 k 值与算法的 NDZ 成反比例的关系, k 值越大, NDZ 越小。

3.3 复合式算法的 NDZ 分析

本地负载吸收的功率和光伏并网逆变器的输出功率完全或者近乎匹配是小概率事件, 系统刚好处于被动式检测法检测盲区的可能性极小, 这意味着被动式检测方法足够保证检测孤岛的有效性, 并不需要加入扰动引入主动式法就能实现反孤岛机制。当小概率事件出现时, 就必须选择 AFDPF 法。根据算法的逻辑可以得到, 复合式孤岛检测法的检测盲区是被动式检测法与 AFDPF 两者的盲区形成的交集。如图4所示。

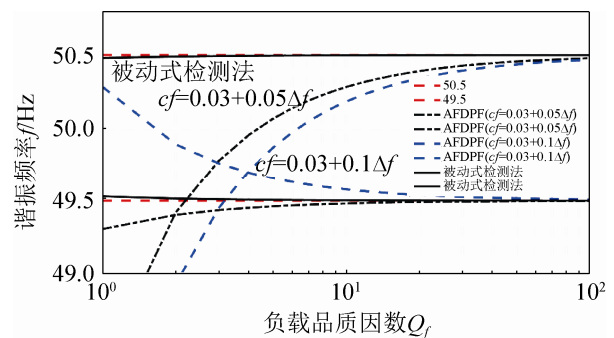


图4 复合式算法的 NDZ

Fig. 4 NDZ of the compound algorithm

从图中得到, 复合式孤岛检测法的 NDZ 得到了极大的优化, 盲区范围大大地减小, 可以有效地防范孤岛效应的发生。当初始断截因子取 0.03, 正反馈因子 k 取 0.1 时, 当负载品质因子 Q_L 达到一定值时, NDZ 消失。因此, 在负载品质因子达到一定值时, 复合式孤岛检测法可实现无盲区检测。

另外, 由于绝大多数情况下采用的是被动式法, 只有当小概率事件发生时才引入主动式法中的 AFDPF 算法。因此, 复合式孤岛检测法能够减小给电网带来谐波影响的概率, 甚至概率为零, 所以盲区预评估机制的引入可以极大地减少对电能质量的影响。在光伏发电系统并网运行期间, 若小概率事件从不发生, 则一直采用被动式检测法来实现反孤岛, 那么对电网的谐波影响可以降为零。

4 仿真结果与分析

本文采用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型, 结合所得的结果进行对比和分析。模型由直流电压源、通用电桥模块、并联 RLC 负荷和交流电压源组成。使用直流电压源代替光伏发电系统光伏阵列, 其大小设置为 400 V, 通用电桥模块代替并网逆变器, 并联 RLC 负荷代替本地负载, 交流电压源代替电网, 其大小设为 220 V。其中, 阶跃信号模块等价于断路器, 起到控制电网是否断开的功能。设置两个案例来验证上述理论分析的结果。

案例 1: 仅采用被动式法搭建仿真模型来确定孤岛效应的状况, 单位电流为 1。仿真结果见图 5。

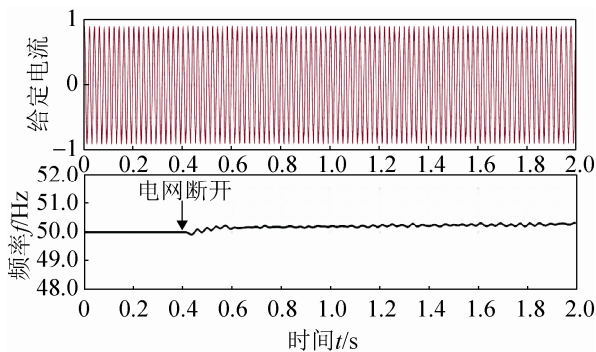


图 5 仅采用被动式法时检测失败

Fig. 5 Detection is invalid when the passive method is only used

从仿真结果可看出, 电网在时间 $t=0.4$ s 时断开后, 公共点处的频率与电压的幅值均未超过设定的上限临界值, 并且这种状态一直持续到时间 $t=2$ s 甚至之后的时刻。此时, 被动式法失效, 孤岛没有及时地被检测出来, 反孤岛机制实施失败。

案例 2: 采用本文所提的复合式方法搭建仿真模型来确定孤岛效应的状况, 单位电流为 1。电网在时间 $t=0.4$ s 时断开, 通过极其短暂的计算和判定时间, 判定此时系统的状态处于被动式法的检测盲区。于是, 复合式孤岛检测法的算法程序给逆变电流加入一定的外部扰动量, 图 6 是逆变电流移频后的波形。由图 6 可知, 移频后的电流波形中扰动量一直在增大, 会导致频率偏离量剧增。图 7 是采用复合式算法的仿真结果。

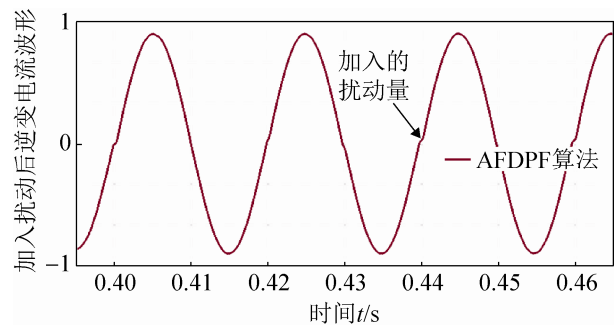


图 6 加入扰动量后的电流波形

Fig. 6 Current waveform after adding disturbance

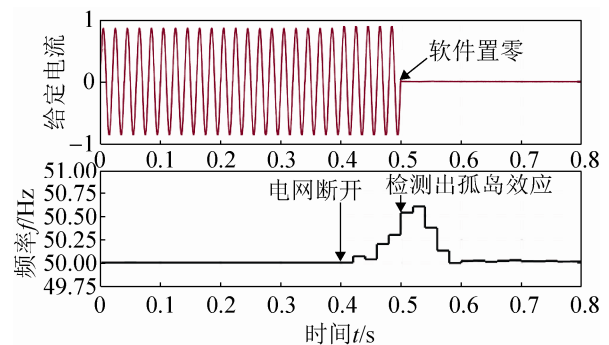


图 7 采用复合式算法后检测成功

Fig. 7 Detection is valid when the compound algorithm is used

随着扰动量的不断增大, 耦合点处的频率值迅速地增加从而越过规定的上限临界值 50.5 Hz。图 7 的仿真结果表明, 在短短 0.1 s 的时间内孤岛

效应被检测出来,有效性和可靠性被体现出来,并且并网逆变器停止向本地负载输送电流,反孤岛检测机制成功地被触发。

5 结论

本文一开始论述了被动式法和主动式法各有自身的优势和不足,针对这种情况,文章提出了一种复合式检测方法,根据电网侧流向负载及逆变器侧流向负载的电参量,并结合判定公式加以计算得到的结果来对检测盲区进行预评估。若系统不处于被动式法的 NDZ 范围内,采用被动式法;若在盲区内则引入 AFDPF 法。从理论上分析了所提方法的检测盲区得到了极大地优化,在某些负载情况下可以实现无盲区检测,而且此方法降低了检测算法给电网带来谐波影响的概率,甚至概率为零,这样电网的电能质量得到了极大的改善。

文章最后建立了 Matlab/Simulink 仿真模型,设置案例进行仿真分析,验证了这种检测方法的有效性,满足专用标准规定的检测时间。

参考文献:

- [1] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
Ding Ming, Wang Weisheng, Wang Xiuli, et al. A Review on the Effect of Large-scale PV Generation on Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [2] Khamis A, Shareef H, Bizkevelci E, et al. A review of islanding detection techniques for renewable distributed generation systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 28(8): 483-493.
- [3] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems [S]. IEEE STD. 1547-2003.
- [4] Tran-Quoc T, Le T M C, Kieny C, et al. Behavior of grid-connected photovoltaic inverters in islanding operation[C]// Power Tech, 2011 IEEE Trondheim. IEEE, 2011: 1-8.
- [5] 余运俊, 张燕飞, 万晓凤, 等. 光伏微网主动式孤岛检测方法综述[J]. 电测与仪表, 2014, 51(1): 22-29, 100.
Yu Yunjun, Zhang Yanfei, Wan Xiaofeng, et al. Active Islanding Detection for PV Micro-Grid: A Survey[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(1): 22-29, 100.
- [6] 程启明, 王映斐, 程尹曼, 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.
Cheng Qiming, Wang Yingfei, Cheng Yinman, et al. Overview study on islanding detecting methods for distributed generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 147-154.
- [7] 张有兵, 穆淼婕, 翁国庆. 分布式发电系统的孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 139-146.
Zhang Youbing, Mu Miaojie, Weng Guoqing. Research on islanding detection of distributed power generation systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 139-146.
- [8] 张学广, 王瑞, 刘鑫龙, 等. 改进的主动频率偏移孤岛检测算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 200-204, 209.
Zhang Xueguang, Wang Rui, Liu Xinlong, et al. Improved Active Frequency Drift Anti-islanding Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 200-204, 209.
- [9] 陈武, 王广江, 蒋玮. 一种低谐波畸变量的快速主动移频式孤岛检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 107-111.
Chen Wu, Wang Guangjiang, Jiang Wei. An improved active frequency drift islanding detection method with lower total harmonic distortion[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 107-111.
- [10] Ranade S J, Sagi D R, Mulpuri R. Likelihood of islanding in distribution feeders with photovoltaic generation[C]// IEEE Proceedings of Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa. New Mexico, USA: New Mexico State University, 2007.
- [11] Zhu X, Du C, Shen G, et al. Analysis of the non-detection zone with passive islanding detection methods for current control DG system[C]// Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE. USA: IEEE, 2009: 358-363.
- [12] 蒋晓明, 赵基建, 刘晓光, 等. 基于 DSP 的智能光伏并网逆变器控制电路设计[J]. 电力电子技术, 2014, 48(3): 13-15.
Jiang Xiaoming, Zhao Jijian, Liu Xiaoguang, et al. Design of the Intelligent Photovoltaic Grid-connected Inverter Control Circuit Based on DSP[J]. Power Electronics, 2014, 48(3): 13-15.

(下转第 3456 页)

<http://www.china-simulation.com>

• 3450 •