第39卷 第9期
2018年9月

太 阳 能 学 报
ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA

Vol. 39, No. 9
Sept., 2018

文章编号:0254-0096(2018)09-2387-06

基于谐波阻抗*dq*分量的孤岛检测新方法

高淑萍[1]，李文浩[2]，汪凯昌[1]，贠保记[3]

（1. 西安科技大学电气与控制工程学院，西安 710054；2. 国网汉中供电公司，汉中 723000；
3. 西安西瑞控制技术股份有限公司，西安 710018）

摘 要：通过逆变器输出谐波阻抗的分析，发现特征频率阻抗信号在并网运行时及断开时是不同的。根据此差异，提出利用公共连接点（PCC）处特定次谐波阻抗*dq*分量在孤岛故障及正常并网运行的差异，实现检测孤岛状态的方法。仿真分析结果表明，该方法能快速有效检测出孤岛的发生，并且与传统被动式检测方法相比，该方法最大的优点在于可避免检测盲区的存在。

关键词：光伏发电；孤岛检测；谐波阻抗；故障分量；阻抗*dq*分量

中图分类号：TM76 **文献标识码**：A

0 引 言

随着能源紧缺、环境污染等问题日益严重，可再生清洁能源的发电技术成为研究热点，太阳能发电以其灵活性、清洁性和普遍性的优势成为最具前途的分布式电源之一。通过光伏并网发电系统将太阳能转换为电能，并将电能输送到电网上，是太阳能利用的主要形式。孤岛效应即当操作不当、电气故障或自然因素等造成大电网异常时，各分布式发电（distributed generation，DG）系统仍在并网运行并处于独立运行状态给本地负荷供电的一种现象[1]，如图1所示。

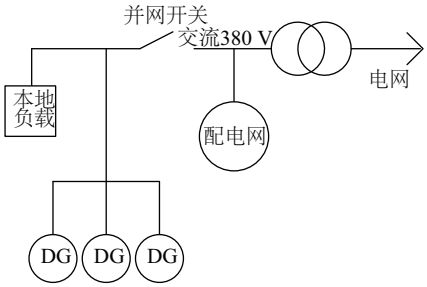


图1 分布式发电系统的孤岛效应示意图

Fig. 1 Islanding of distributed generation system

由图1可看出，分布式发电系统通过并网开关将分布电源与本地负载相连接。当电网正常运行时，并网发电装置输出的功率与负载需求的功率通常并不匹配，甚至不匹配的程度较大。此时，如果电网断开，功率之间的不匹配必然引起系统电压或频率的改变，因此可通过检测孤岛前后这一变化来进行孤岛检测。但当功率匹配情况下（即分布电源输出功率等于负载需求的功率），孤岛发生时，分布式电源侧与电网侧功率缺额量基本相等，因此公共连接点（point of common coupling，PCC）处电压和频率的变化很小，利用被动检测方法检测电压和频率的变化将很难判断出孤岛的发生，并网发电设备将持续向负载供电，这时就形成了由分布式发电系统与负载共同组成的孤岛系统。

孤岛效应不仅影响大电网安全运行，还可能对电力人员造成人身伤害。为此，孤岛检测作为并网故障检测关键技术之一，对其开展研究具有重要意义。已有的孤岛检测法主要有基于通信的孤岛检测方法和局部孤岛检测方法[2]。基于通信的孤岛检测方法利用通信方法传递开关状态信息进行孤岛检测，该方法检测效率高，但成本过高，并不实用[3]。局部孤岛检测方法是通过监控并网发电装置的端电压以及电流信号来检测孤岛效应，可分为被动式与主动式，其中被动式方法通过监测系统运行参数的改变来判定孤岛的发生[4-6]；而主动式方法则是不断地向系统加入一定的扰动，当某项运行参数超过允许范围时，则判定孤岛的

收稿日期：2017-06-08
基金项目：陕西省自然科学基础研究计划-面上项目（2017JM5138）
通信作者：高淑萍（1970—），女，博士、讲师，主要从事高压直流输电线路保护及新能源并网关键技术方面的研究。gao.sp2003@163.com

发生[7~10]。被动式和主动式方法各有优劣，通常被动式方法存在相对较大的不可检测区（non-detection zone，NDZ）[11]，主动式方法虽然有效减少了不可检测区，但会或多或少影响电能质量[12]。

本文在被动式的孤岛检测方法基础上，提出一种利用谐波阻抗 dq 分量来检测孤岛的方法，该方法仅需特定频率信号（150、250 Hz）数据便可实现，硬件实现简单。无论系统发生何种断路故障导致孤岛产生，均能在不影响电力系统电能质量的情况下，快速有效检测出孤岛效应，且不会干扰系统的暂态响应，能在孤岛最严重的情况下快速有效检测出孤岛效应，满足 IEEE Std. 1547 中对孤岛检测的时间要求。

1 基于谐波阻抗 *dq* 分量的孤岛检测方法原理

利用谐波阻抗 dq 分量检测孤岛故障的方法是通过监测 PCC 处谐波阻抗在正常并网和孤岛运行状态下的值，由于该谐波阻抗分量在正常并网运行很小，而在孤岛运行时较大，根据此 2 种状态下的谐波阻抗分量差异来实现孤岛检测。并网状态与孤岛状态下等值阻抗示意图如图 2 所示，其对应矢量图如图 3 所示。

通常情况下，主网可视为容量无穷大系统，PCC 处电压为电网电压 $\dot{U}_{grid}$ 且保持稳定，主网向微电网输入电流为 $\dot{I}_{grid}$，逆变器输出电流为 $\dot{I}_v$，负载电流为 $\dot{I}_z$。

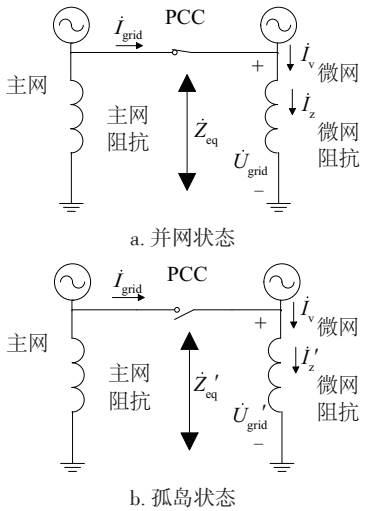


图2 PCC处等值阻抗变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of equivalent impedance change of PCC

孤岛运行时，主网电流 $\dot{I}_{grid}=\dot{0}$，逆变器侧电压不能突变，仍保持 $\dot{U}_{grid}$。当孤岛发生时，由于失去电网的支撑，分布式发电系统单独向本地负载供电，谐波电流流入阻抗远远大于系统阻抗的本地负载中的，此时谐波含量将大大提升。采用电网电压定向的光伏逆变器矢量图如图 4 所示。

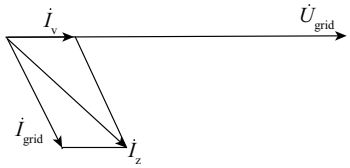


图3 光伏并网电流矢量图

Fig. 3 The vector diagram of PV grid current

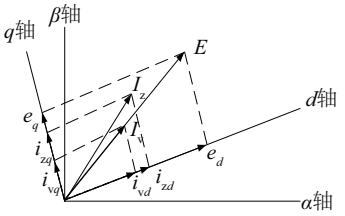


图4 基于电网电压定向的光伏逆变器矢量

Fig. 4 Vector of photovoltaic inverter based on grid voltage orientation

由图 4 可知，在电网电压定向的同步旋转坐标系中有：

$$\begin{cases}\left|\Delta Z_d\right|=\left|\dfrac{e_d'}{i_{vd}'}-\dfrac{e_d}{i_{vd}}\right|\\ \left|\Delta Z_q\right|=\left|\dfrac{e_q'}{i_{zq}'}-\dfrac{e_q}{i_{zq}}\right|\end{cases}\tag{1}$$

式中，$|\Delta Z_d|$——谐波阻抗 d 轴分量；e_d、e_d'——正常并网与孤岛状态下公共点处谐波电压 d 轴分量；i_{vd}、i_{vd}'——正常并网与孤岛状态下 PCC 处谐波电流 d 轴分量；e_q、e_q'——正常并网与孤岛状态下公共点处谐波电压 q 轴分量；i_{zq}、i_{zq}'——正常并网与孤岛状态下公共点处谐波电压 q 轴分量。

通过快速傅里叶变换（fast Fourier transform，FFT）提取出特定次谐波（150、250 Hz）阻抗 dq 分量，即可快速检测出孤岛的发生。由于谐波的产生是逆变器本身的作用，与电网侧的功率缺额量无关，因此该方法可克服传统被动式检测方法存在检测盲区的缺点。

2　孤岛故障整定与判别

由第 1 节可知，孤岛故障发生前后公共连接点谐波电压发生变化。针对上述现象，可将特征频率（3、5 次谐波）阻抗均进行监测，并设立相应的整定值，当有一路或多路信号超过门槛值时，即可认为此时处于孤岛状态，其整定规则如下：

$$|\Delta Z_{3d}| > Z_{set1} = 0.2\ \Omega \tag{2}$$

$$|\Delta Z_{3q}| > Z_{set2} = 0.2\ \Omega \tag{3}$$

$$|\Delta Z_{5d}| > Z_{set3} = 0.2\ \Omega \tag{4}$$

$$|\Delta Z_{5q}| > Z_{set4} = 0.2\ \Omega \tag{5}$$

式中，$|\Delta Z_{3d}|$、$|\Delta Z_{3q}|$——3 次谐波阻抗 d、q 分量模值；$|\Delta Z_{5d}|$、$|\Delta Z_{5q}|$——5 次谐波阻抗 d、q 分量模值；Z_{set1}、Z_{set2}——3 次谐波阻抗 d、q 分量整定值；Z_{set3}、Z_{set4}——5 次谐波阻抗 d、q 分量整定值。

3　孤岛故障保护逻辑

根据上述分析，可构造如图 5 所示的利用谐波阻抗 d、q 分量检测孤岛的反孤岛策略动作逻辑图。

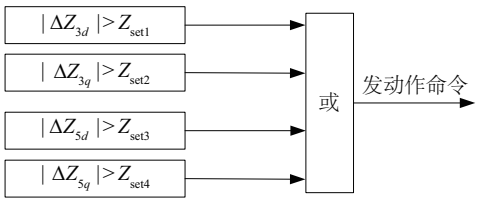


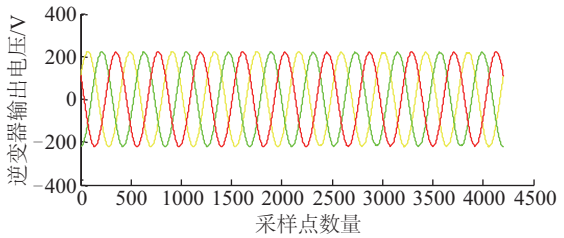
图 5　孤岛故障动作逻辑图

Fig. 5　Action logic diagram of anti islanding strategy

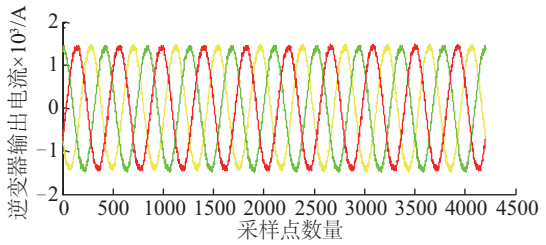
4　仿真分析

在单 PV 并网发电系统详细仿真模型中设置参数，光伏阵列输出电压为 600 V，逆变侧输出线电压为 270 V，输出电流 1000 A，输出功率为 470 kW。本地负荷采用 RLC 并联电路（此时孤岛处于最严重的状态），品质因数取为 1，$R = 0.4673\ \Omega$，$L = 0.001487$ H，$C = 6812\ \mu$F。其中系统运行时间为 1.2 s，孤岛发生在 $t = 1.0$ s 时刻，采样频率为 4.8 kHz，采样时间为 0.2 s（0.9~1.1 s）。系统运行参数如图 6 所示，分别给出光伏并网逆变器输出电压和输出电流。由图 6 可知，在正常并网运行及孤岛运行时，系统运行参数基本未发生改变，说明此时孤岛处于最严重的状态。

将 PSCAD 进行的电力系统仿真数据导入 Matlab 进行数据处理，仿真时选择 150、250 Hz 的电压、电流信号，应用本文提出的孤岛检测方法计算特征频率（3、5 次谐波）阻抗 dq 分量，其中滑动数据窗为 20 ms。



a. 输出电压



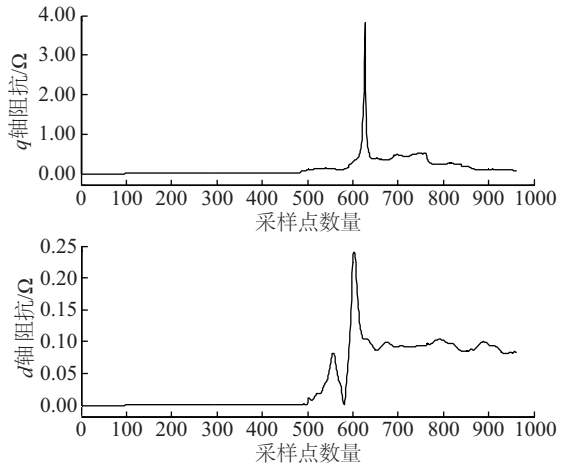
b. 输出电流

图 6　单 PV 并网发电系统运行参数图

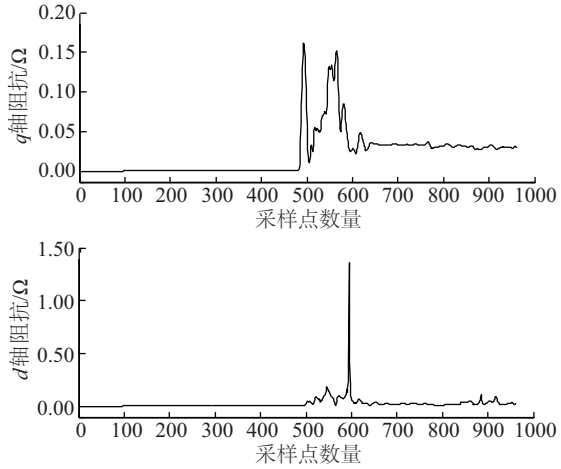
Fig. 6　Operating parameters of single PV grid-connected power system

4.1　三相断路情况下，谐波阻抗分量孤岛故障的判别

图 7 为三相断路情况下，应用本文提出的孤岛检测方法测得的各特征量波形图。由图 7 可知，在并网运行时，3 次、5 次谐波阻抗 dq 故障分量基本为零，当孤岛故障发生时（采样点数量为 480），3 次、5 次谐波阻抗 dq 故障分量逐渐发生变化，其中 3 次



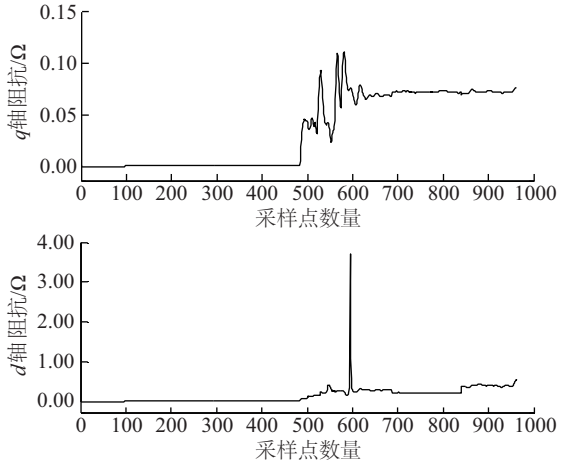
a. 150 Hz



b. 250 Hz

图7 三相断路情况下谐波阻抗 dq 故障分量的波形

Fig. 7 Waveform of dq fault component of harmonic impedance under three-phase breaking



b. 250 Hz

图8 单相断路情况下谐波阻抗 dq 故障分量的波形

Fig. 8 Waveform of dq fault component of harmonic impedance under single-phase breaking

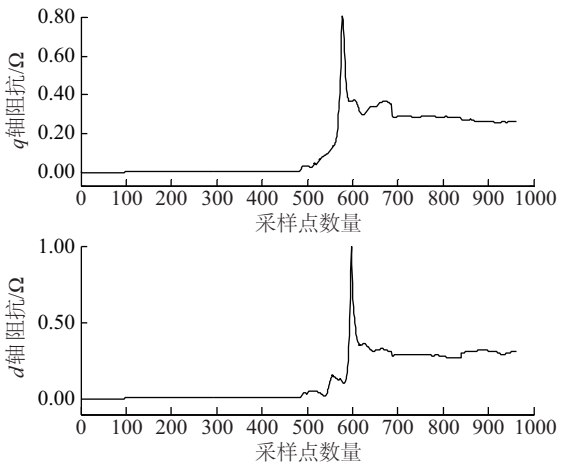
谐波(150 Hz)阻抗 dq 故障分量中 d 轴分量和 q 轴分量均大于整定值,5 次谐波(250 Hz)阻抗 q 轴故障分量虽有改变,但故障分量小于整定值,5 次谐波(250 Hz)阻抗 d 轴故障分量大于整定值,与设定的条件一致,孤岛检测成功。

4.2 单相断路情况下,谐波阻抗分量孤岛故障的判别

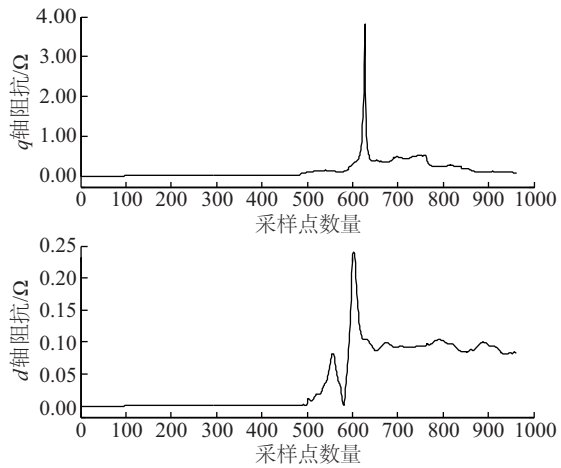
图 8 为单相断路情况下,应用本文提出的孤岛检测方法测得的各特征量波形图。由图 8 可知,在并网运行时,3 次、5 次谐波阻抗 dq 故障分量基本为零,当孤岛故障发生时(采样点数为 480),3 次、5 次谐波阻抗 dq 故障分量逐渐发生变化,其中 3 次谐波(150 Hz)阻抗 dq 故障分量中 d 轴分量和 q 轴分量均大于整定值,5 次谐波(250 Hz)阻抗 q 轴故障分量虽有改变,但故障分量小于整定值,5 次谐波(250 Hz)阻抗 d 轴故障分量大于整定值,与设定的条件一致,孤岛检测成功。

4.3 两相断路情况下,谐波阻抗分量孤岛故障的判别

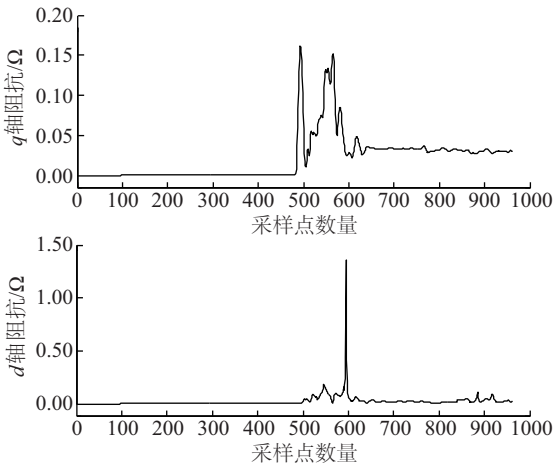
图 9 为两相断路情况下,应用本文提出的孤岛检测方法测得的各特征量波形图。由图 9 可看出,在并网运行时,3 次、5 次谐波阻抗 dq 故障分量基本为零,当孤岛故障发生时(采样点数为 480),3 次、5 次谐波阻抗 dq 故障分量逐渐发生变化,其中 3 次谐波(150 Hz)阻抗 dq 故障分量中 d 轴分量和 q 轴分量均大于整定值,5 次谐波(250 Hz)阻抗 q 轴故障分量虽有改变,但故障分量小于整定值,5 次谐波(250 Hz)阻抗 d 轴故障分量大于整定值,与设定的



a. 150 Hz



a. 150 Hz



b. 250 Hz

图9　两相断路情况下谐波阻抗 dq 故障分量的波形

Fig. 9　Waveform of dq fault component of harmonic impedance under two-phase breaking

条件一致，孤岛检测成功。

综上所述，谐波阻抗 dq 故障分量的方法能在并网开关三相、单相以及两相断开情况下均可快速有效检测出孤岛故障。该方法具有响应速度快，检测结果准确，不存在检测盲区，且不会对电能质量造成不良影响等优点。

5　结　论

本文提出一种利用谐波阻抗 dq 分量检测孤岛效应的方法，该方法通过对 150、250 Hz 的特征频率阻抗信号在正常并网运行和孤岛运行时所表现的差异进行监测，从而实现孤岛故障的检测。该孤岛检测方法能在不对电能质量产生影响的前提下，快速有效地检测出孤岛故障，在并网开关单相以及两相断开情况下依然可进行判别，可实现孤岛故障的无盲区检测。

[参考文献]

[1]　张新亮. 光伏并网逆变器的研究[D]. 无锡：江南大学，2009.

[1]　Zhang Xinliang. Study on photovoltaic grid connected inverter[D]. Wuxi：Jiangnan University，2009.

[2]　张　兴，曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京：机械工业出版社，2009.

[2]　Zhang Xing，Cao Renxian. Photovoltaic grid-connected generation and its inverter control[M]. Beijing：China Machine Press，2009.

[3]　马　静，米　超，王增平. 基于谐波畸变率正反馈的孤岛检测新方法[J]. 电力系统自动化，2012，36(1)：47—50.

[3]　Ma Jing，Mi Chao，Wang Zengping. A novel islanding detection method based on positive feedback of voltage harmonic distortion[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(1)：47—50.

[4]　Jang S I，Kim K H. An islanding detection method for distributed generations using voltage unbalance and total harmonic distortion of current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2004，19(2)：745—752.

[5]　El-Arroudi Khalil. Data mining approach to threshold settings of islanding relays in distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2007，22(3)：1112—1119.

[6]　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—25.

[6]　Hou Meiyi，Gao Houlei，Liu Bingxu，et al. Islanding detection method based on phase shift[J]. Electric Power Automation Equipment，2009，29(11)：22—25.

[7]　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.

[7]　Li Jun，Huang Xueliang，Chen Xiaohu，et al. Application of islanding detection technology based on voltage divider in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE，2010，30(34)：15—21.

[8]　肖　龙，杨国华，鲍丽芳，等. 基于改进滑模频率偏移法的光伏孤岛检测研究[J]. 电测与仪表，2012，49(6)：52—56.

[8]　Xiao Long，Yang Guohua，Bao Lifang，et al. Islanding detection for PV grid-connected system based on improved slip-mode frequency shift[J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2012，49(6)：52—56.

[9]　Yafaoui A，Wu Bin，Kouro S. Improved active frequency drift anti-islanding detection method for grid connected photo-voltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2012，27(5)：2367—2375.

[10]　应展烽，陈运运，田亚生，等. 基于抗干扰六点测频法的主动频移孤岛检测[J]. 电力自动化设备，2013，33(4)：72—76.

[10]　Ying Zhanfeng，Chen Yunyun，Tian Yasheng，et al. Active frequency shift islanding detection based on anti-interference sixpoint frequency detection algorithm[J].

Electric Power Auto-mation Equipment, 2013, 33(4): 72—76.

[11] 冯 轲, 贺明智, 游小杰, 等. 光伏并网发电系统孤岛检测技术研究[J]. 电气自动化, 2010, 32(2): 139—142.

[11] Feng Ke, He Mingzhi, You Xiaojie, et al. Research on islanding detection method for photovoltaic grid-connected power system[J]. Eletrical Automation, 2010, 32(2): 139—142.

[12] Ishikawa T. Grid-connected photovoltaic power systems: Survey of inverter and related protection equipments [R]. Tokyo, Japan: Report IEA-PVPS Task, 2002.

A NEW ISLANDING DETECTION METHOD BASED ON HARMONIC IMPEDANCE *dq* COMPONENT

Gao Shuping[1], Li Wenhao[2], Wang Kaichang[1], Yun Baoji[3]

(1. *College of Electrical and Control Engineering*, *Xi'an University of Science and Technology*, *Xi'an* 710054, *China*;
2. *State Grid Hanzhong Electric Power Supply Company*, *Hanzhong* 723000, *China*;
3. *Xi'an Xirui Engineering Technology Limited Company*, *Xi'an* 710018, *China*)

Abstract: By analyzing the harmonic impedance of the inverter, it is found that the characteristic frequency impedance signal is different when it is connected to grid or when it is disconnected to grid. According to this difference, a new detecting islanding method is proposed, which is implemented by using the difference of *dq* component of harmonic impedance at the PCC position when it is connected to grid or when it is disconnected to grid. Simulation results showed that this method can quickly and effectively detect the islanding. Comparing with the traditional passive detection method, the method proposed can avoid the blind detection.

Keywords: photovoltaic generation; islanding detecting; harmonic impedance; fault component; impedance *dq* component