

基于谐波阻抗的光伏并网孤岛检测新方法

高淑萍¹, 汪凯昌¹, 李文浩²

(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)

摘 要: 为了解决现有的孤岛检测方法所存在的问题,研究光伏并网发电系统的结构特征与故障特征的关系,发现阻抗在光伏并网正常运行与孤岛运行时存在差异。根据此差异,提出利用特征频率阻抗序分量的光伏并网发电系统无盲区反孤岛保护新原理。该原理能在不对电能质量产生影响的前提下,通过检测公共耦合点故障阻抗的变化量,快速有效检测出孤岛故障,在并网开关单相以及两相断开情况下依然可进行判别。仿真结果表明该方法能有效检测孤岛,具有检测无盲区,对电能质量影响小,响应速度快等优点。

关键词: 光伏发电; 孤岛检测; 谐波阻抗; 故障分量; 阻抗序分量

中图分类号: TM76

文献标识码: A

0 引 言

随着分布式发电系统规模的不断扩大,新能源的开发和利用也在不断增加,太阳能作为一种新型清洁能源具有很大的潜力。光伏发电系统作为分布式供电系统中的一类,需要通过逆变器将光伏阵列发出的电能逆变后再馈送到电网。正常运行时,逆变系统并联在电网上向电网输送有功功率。但是,当电网供电因故障事故或停电维修而跳闸时,光伏并网系统未能及时检测出停电状态,从而形成了一个由光伏并网发电系统向周围的负载进行供电,但电力系统无法掌握的自给供电状态,这种现象被称为孤岛效应^[1]。如果不能及时检测出孤岛现象是否发生并切除,将会给系统设备和相关人员造成危害,由此引出了对孤岛状态进行检测的多种研究方法^[2]。传统的孤岛检测法以被动检测法和主动检测法为主,被动法是通过检测孤岛现象发生前后系统相关电气参数的变化而进行判断的方法,如检测孤岛发生时电压^[3]、频率^[4,5]和相位^[6]的变化。主动法是通过注入系统内的扰动所产生的电气参数变化而进行检测的方法^[7-9]。被动检测法由于检测盲区的存在,效率较低;主动法由于扰动的注入会或多或少影响系统的电能质量。因此,针对传统孤岛检测方法所存在的问题,需寻求新的检测方法^[10-12]。

选取光伏并网发电系统进行孤岛效应分析,功率匹配情况对于孤岛的发生具有重要影响。

由图1可看出,并网光伏发电系统通常由光伏阵列和逆变器组成,该发电系统通过一个变压器(可能安装在逆变器外或不安装)和断路器K与电网连接。当电网正常运行时,假设:

- 1)图1所示的发电系统中的逆变器工作于单位功率因数;
- 2)逆变器输出的功率为 $P+jQ$;
- 3)电网输出功率为 $\Delta P+j\Delta Q$;
- 4)负载需求的功率为 $P_{load}+jQ_{load}$,且用并联RLC电路(即总负载由阻性、感性、容性负载构成)来模拟相关的局部的负载。

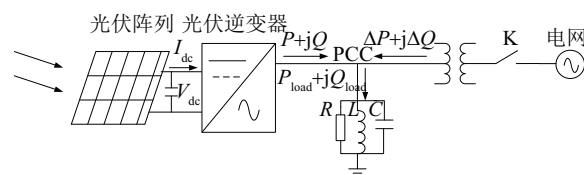


图1 光伏并网发电系统的功率流图

Fig. 1 Power flow diagram of photovoltaic grid-connected generation system

根据能量守恒原理,可知公共连接点(point of common coupling, PCC)处的功率流具有以下规律:

$$\begin{cases} P_{load} = P + \Delta P \\ Q_{load} = Q + \Delta Q \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2017-04-19

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(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

通常情况下,并网发电装置输出的功率与负载需求的功率并不匹配,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的变化来进行孤岛检测。但当功率匹配,即 $P = P_{\text{load}}, Q = Q_{\text{load}}$, 孤岛发生时,公共连接点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。

下面简要分析孤岛发生的必要条件:当孤岛发生时,PCC 处的电压 u_a 将受到逆变器控制系统的监控,且由负载的欧姆定律响应确定。 i_{inv} 频率将到达一个(且是唯一的)稳态值(即负载的谐振频率 f_0),这是由于电网跳闸后 RLC 负载的无功需求只能由逆变器提供(即 $Q = Q_{\text{load}}$),逆变器为了保持输出电流 i_{inv} 与端电压 u_a 的同步,将驱使 i_{inv} 的频率改变直到 i_{inv} 与 u_a 之间的相位差为零。可用式(2)相位平衡关系来描述这种因电网跳闸而形成的无功功率平衡关系,即:

$$\varphi_{\text{load}} + \theta_{\text{inv}} = 0 \quad (2)$$

式中, θ_{inv} ——电流超前电压的角度; φ_{load} ——负载阻抗角。

如果连接的负载为 RLC 时,可得到:

$$\varphi_{\text{load}} = \tan^{-1} \left[R \left(\omega C - (\omega L)^{-1} \right) \right] \quad (3)$$

通过上面的推导及分析可总结出并网发电系统产生孤岛效应的必要条件是:并网发电系统输出的有功和无功功率与负载需求的有功和无功相匹配,即:

$$\begin{cases} P = P_{\text{load}} \\ \varphi_{\text{load}} + \theta_{\text{inv}} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

1 阻抗测量法基本原理

配电网的阻抗由电源内阻和负载阻抗组成。一般情况下,可认为配电网为一无穷大网络,与微电网容量相比,其等值阻抗很小。负载阻抗主要由配电变压器和用户设备阻抗组成,线路参数影响较小,所以微电网系统等值阻抗相对较大。通过在主网与微电网之间 PPC 处测量系统等值阻抗可发现,微电网处于并网状态时 PPC 处等值阻抗为主网与微电网并联下的阻抗,其值通常很小;微电网处于孤

岛状态时,PCC 处的等值阻抗通常较大,仅为微电网阻抗值^[13]。由此,根据 PCC 处等值阻抗的变化可判断出孤岛的发生。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。

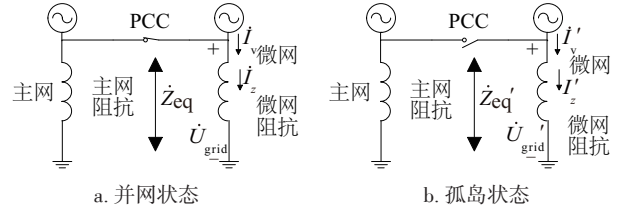


图2 公共连接点等值阻抗变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of equivalent impedance change of PCC

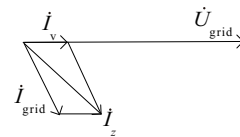


图3 光伏并网电流矢量图

Fig. 3 Photovoltaic grid-connected current vector

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,设主网向微网输入电流 \dot{I}_{grid} ,逆变器输出电流 \dot{I}_v ,负载电流 \dot{I}_z ,则并网运行时有:

$$\begin{cases} \dot{I}_z = \dot{I}_{\text{grid}} + \dot{I}_v \\ |\dot{Z}_{\text{eq}}| = \frac{|\dot{U}_{\text{grid}}|}{|\dot{I}_z|} \end{cases} \quad (5)$$

孤岛运行时,主网电流 $P + jQ$,逆变器侧电压不能突变,仍保持 $P + jQ$,则有:

$$\begin{cases} \dot{I}_z' = \dot{I}_v \\ |\dot{Z}_{\text{eq}}'| = \frac{|\dot{U}_{\text{grid}}|}{|\dot{I}_z'|} \end{cases} \quad (6)$$

比较式(5)和式(6)可知,并网状态下系统阻抗的模值 $P + jQ$ 小于孤岛状态下系统阻抗的模值 $P + jQ$,故对 PCC 靠近微网侧阻抗进行检测并比较其数值可判断系统是否处于孤岛状态。

2 基于谐波阻抗序分量的孤岛检测方法

阻抗测量法作为一种新方法在孤岛检测方面得到广泛使用。文献[14]介绍了主动式阻抗测量

孤岛检测方法,此方法通过在并网点引入高频信号,从而判断系统阻抗变化,进行微网或光伏孤岛检测,该方法由于信号扰动,会引起系统电能质量问题。

对于一个完整的电力系统而言,无论处于何种运行状态,均可用序网络将其等效。由于光伏逆变器侧以及主电网侧阻抗序分量不相等,使得利用谐波阻抗序分量构建的孤岛检测方法成为可能。当并网逆变器处于并网运行状态时,电网可看作是一个容量很大的电压源,由于电压等电位,PCC处电位与主网侧相同,谐波电流流入阻抗较小的电网中,此时电压畸变程度趋近于零。而当孤岛故障发生时,由于失去了电网支撑分布式发电系统(distributed generation, DG)单独向本地负荷供电,谐波电流将流入阻抗较大的本地负载中,此时谐波阻抗序分量发生突变,可通过快速傅里叶变换(FFT)提取出特征频率(100、200 Hz)阻抗信号,快速有效检测到孤岛故障的发生。而谐波的产生是由于逆变器本身的作用,与电网侧的功率缺额量无关,所以此方法可完全克服传统被动式检测方法存在非检测区的缺陷。

本文在故障暂态过程中,利用与光伏并网发电系统结构特点相关的故障阻抗序分量的特征频率信号,实现无盲区反孤岛保护。研究光伏并网发电系统的结构特征与故障特征的关系,发现阻抗在正常并网运行与孤岛运行时存在差异。根据此差异,提出利用特征频率阻抗序分量的光伏并网发电系统无盲区反孤岛保护新原理。该原理可在不对电能质量产生影响的前提下,快速有效检测出孤岛故障,在并网开关单相及两相断开情况下依然可进行判别。仿真结果表明,故障阻抗序分量方法可有效检测出孤岛,避免检测盲区的出现,且响应速度快,检测结果准确。

3 故障整定与判别

由第2节可知,孤岛故障发生前后公共连接点谐波阻抗序分量发生变化。针对上述现象,可将特征频率阻抗(2、4次谐波)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:

$$|\Delta Z_2^{(1)}| > Z_{\text{set1}} = 0.2 \Omega \quad (7)$$

$$|\Delta Z_2^{(2)}| > Z_{\text{set2}} = 0.2 \Omega \quad (8)$$

$$|\Delta Z_4^{(1)}| > Z_{\text{set3}} = 0.2 \Omega \quad (9)$$

$$|\Delta Z_4^{(2)}| > Z_{\text{set4}} = 0.2 \Omega \quad (10)$$

式中, $Z_2^{(1)}$ 、 $Z_2^{(2)}$ ——2次谐波阻抗正、负序分量阻抗值; $Z_4^{(1)}$ 、 $Z_4^{(2)}$ ——4次谐波阻抗正、负序分量阻抗值; Z_{set1} 、 Z_{set2} ——2次谐波阻抗正、负序分量整定值; Z_{set3} 、 Z_{set4} ——4次谐波阻抗电压正、负序分量谐波阻抗整定值。

4 孤岛故障保护逻辑

根据上述分析,可构造如图4所示的利用谐波阻抗序分量检测孤岛的反孤岛策略动作逻辑图。

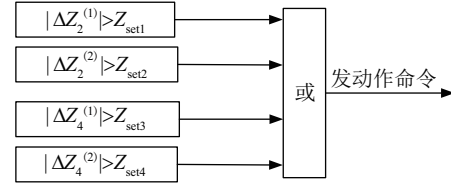
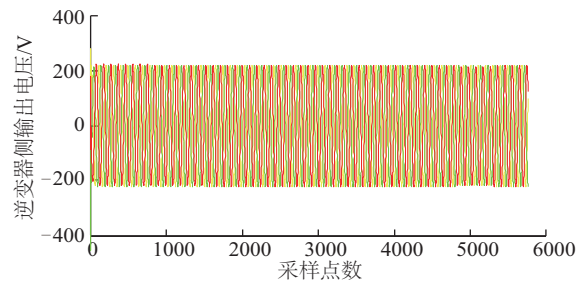


图4 反孤岛策略动作逻辑图

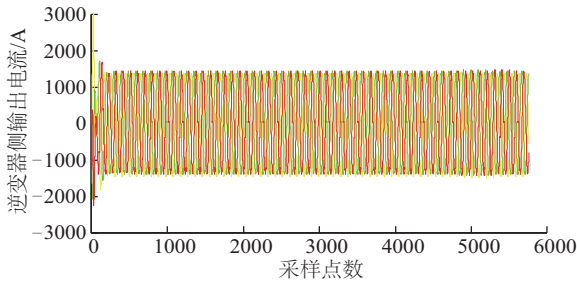
Fig. 4 Action logic diagram of anti islanding strategy

5 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600V,逆变侧输出线电压为270V,输出电流1000A,输出功率为470kW。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1, $R=0.4673 \Omega$, $L=0.001487 \text{ H}$, $C=6812 \mu\text{F}$ 。系统运行参数如图5所示。由图5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,本文仿真时选择100、200Hz的特征频率电压信号,应用本节提出的检测方法进



a. 逆变器侧输出电压波形



b. 逆变器侧输出电流波形

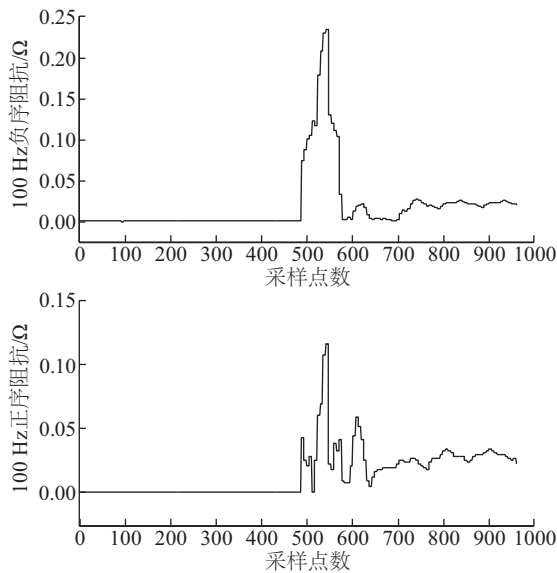
图5 单PV并网发电系统运行参数图

Fig. 5 Operating parameters of single PV grid-connected power system

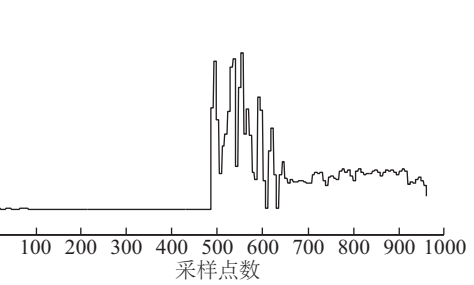
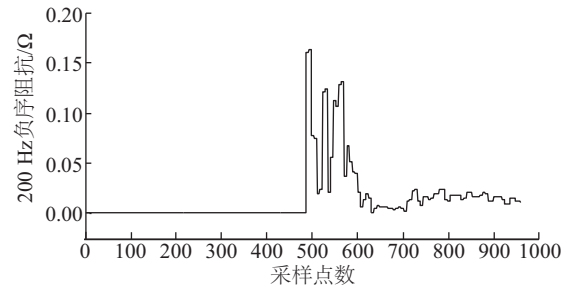
行检测,其中系统运行时间为 1.2 s,采样时间为 0.2 s (0.9~1.1 s),孤岛发生于 $t=1$ s 时刻,滑动数据窗为 20 ms,采样频率为 4.8 kHz。由于正、负序分量完全对称,本节仅给出 100、200 Hz 谐波阻抗的正、负序阻抗故障分量波形。

5.1 三相断路情况下,谐波阻抗分量孤岛故障的判别

图 6 为三相断路情况下,应用本节提出的孤岛检测方法测得各特征量波形图。由图 6 可看出,在并网运行时,各次谐波阻抗正、负序故障分量基本为零,当孤岛故障发生时(采样点数为 480),各次谐波正、负序故障分量发生变化,其中 100 Hz 阻抗正序故障分量虽有改变,但故障分量小于整定值,100 Hz 阻抗负序故障分量大于整定值。200 Hz 阻抗负序故障分量小于整定值但正序阻抗大于整定值,与设定的条件一致,孤岛检测成功。



a. 100 Hz 谐波阻抗正负序故障分量波形



b. 200 Hz 谐波阻抗正负序故障分量波形

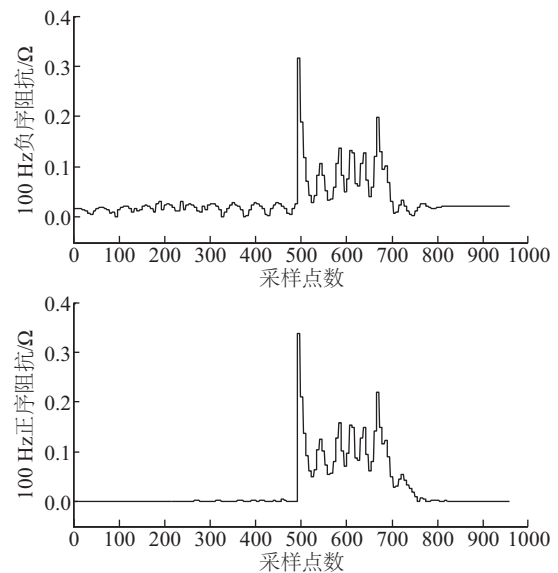
图6 三相断开时,谐波阻抗正负序故障分量波形

Fig. 6 Harmonic impedance positive and negative sequence fault component waveform when three-phase disconnected from grid

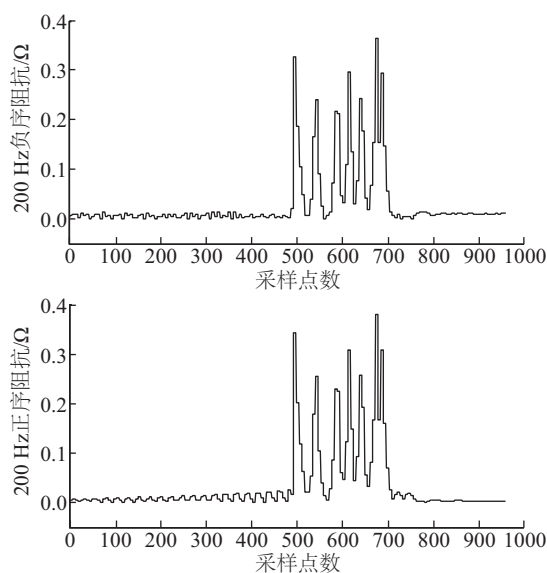
5.2 单相断路情况下,谐波阻抗分量孤岛故障的判别

图 7 为单相断路情况下,应用本节提出的孤岛检测方法测得各特征量波形图。

由图 7 可看出,在并网运行时,各次谐波阻抗正、负序故障分量基本为零,当孤岛故障发生时(采样点数为 480),各次谐波正、负序故障分量发生变化,其中 100 Hz 阻抗正负序故障分量中正序、负序



a. 100 Hz 阻抗正负序故障分量波形



b. 200 Hz 阻抗正负序故障分量波形

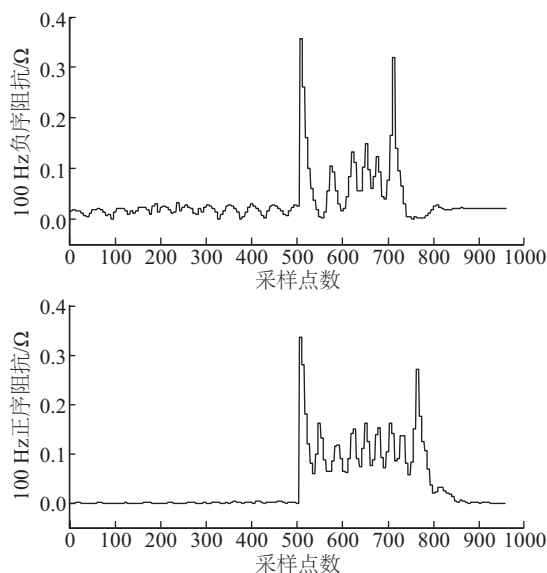
图7 单相断开时,谐波阻抗正负序故障分量波形

Fig. 7 Harmonic impedance positive and negative sequence fault component waveform when one-phase disconnected from grid

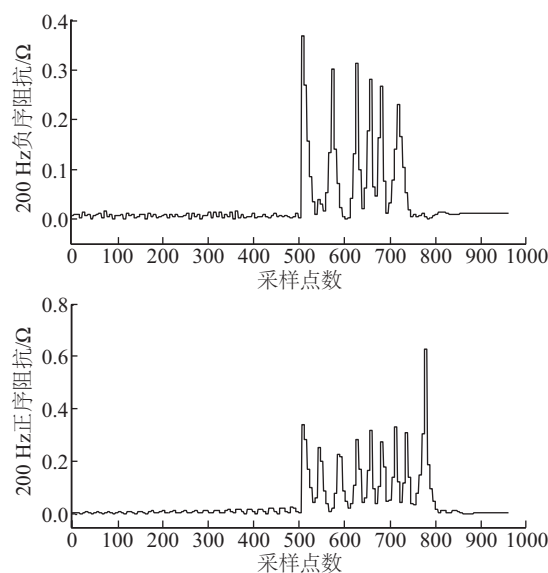
分量均大于整定值。200 Hz 阻抗正、负序故障分量中正序、负序分量均大于整定值,与设定的条件一致,孤岛检测成功。

5.3 两相断路情况下,谐波阻抗分量孤岛故障的判别

图8为两相断路情况下,应用本节提出的孤岛检测方法测得的各特征量波形图。



a. 100 Hz 阻抗正负序故障分量波形



b. 200 Hz 阻抗正负序故障分量波形

图8 两相断开时,谐波阻抗正负序故障分量波形

Fig. 8 Harmonic impedance positive and negative sequence fault component waveform when two-phase disconnected from grid

由图8可看出,在并网运行时,各次谐波阻抗正、负序故障分量基本为零,当孤岛故障发生时(采样点数为480),各次谐波正、负序故障分量发生变化,其中100 Hz 阻抗正负序故障分量中正序、负序分量均大于整定值。200 Hz 阻抗正、负序故障分量中正序、负序分量均大于整定值,与设定的条件一致,孤岛检测成功。

综上所述,故障阻抗序分量方法在并网开关三相、单相以及两相断开情况下均可快速有效地检测出孤岛故障。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。

6 结论

本文提出一种利用谐波阻抗序分量检测孤岛效应的方法,通过对100、200 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。该方法能在不对电能质量产生影响的前提下,快速并且有效检测出孤岛故障,在并网开关单相以及两相断开情况下依然可进行判别,实现孤岛故障的无盲区检测。该方法能有效检测孤岛,具有检测无盲区,对电能质量影响小,响应速度快等优点。

[参考文献]

- [1] 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.
- [1] Zhang Xing, Cao Renxian. Photovoltaic grid-connected generation and its inverter control [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [2] 程 静. 光伏并网逆变器孤岛检测方法研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2012.
- [2] Cheng Jing. Research on islanding detection method of photovoltaic grid-connected inverter [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2012.
- [3] 青 桃, 汪 颖, 江智军, 等. 光伏发电系统并网点谐波电压波动特征孤岛检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 9—14.
- [3] Qing Tao, Wang Ying, Jiang Zhijun, et al. An islanding detection method for photovoltaic power generation system using fluctuation characteristic of point of common coupling harmonic voltage [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 9—14.
- [4] 杨 滔, 王鹿军, 张 冲, 等. 基于无功电流-频率正反馈的孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 193—199.
- [4] Yang Tao, Wang Lujun, Zhang Chong, et al. A novel island detection method based on positive feedback between reactive current and frequency [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 193—199.
- [5] Singam B, Hui L Y. Assessing SMS and PJD schemes of anti-islanding with varying quality factor [A]. IEEE Power and Energy Conf [C], Putra Jay: IEEE, 2006, 196—201.
- [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] 刘方锐, 余 蜜, 张 宇, 等. 主动移频法在光伏并网逆变器并联运行下的孤岛检测机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 47—51.
- [7] Liu Fangrui, Yu Mi, Zhang Yu, et al. Islanding detection evaluation for active frequency drifting methods in multiple photovoltaic grid-connected converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 47—51.
- [8] 丁 浩, 魏艳君, 漆汉宏, 等. 基于自适应有功电流扰动的孤岛检测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 294—300.
- [8] Ding Hao, Wei Yanjun, Qi Hanhong, et al. A novel islanding detection based on adaptive active current disturbance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 294—300.
- [9] John V, Ye Zhihong, Kolwalkar A. Investigation of anti-islanding protection of power converter based distributed generators using frequency domain analysis [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1177—1183.
- [10] 孙 博, 郑建勇, 梅 军. 基于电压不平衡度正反馈的孤岛检测新方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 121—125.
- [10] Sun Bo, Zheng Jianyong, Mei Jun. Islanding detection based on positive feedback of voltage unbalance factor [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 121—125.
- [11] 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.
- [11] Li Jun, Huang Xueliang, Chen Xiaohu, et al. Islanding detection method based on voltage divider for micro grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 15—21.
- [12] 蔡逢煌, 林琮斌, 王 武. 带有谐波补偿功能的主动移频式孤岛检测法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 54—58.
- [12] Cai Fenghuang, Lin Qiongbao, Wang Wu. Island detection by active frequency drift method with harmonic compensation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 54—58.
- [13] 杨汾艳, 张 跃, 刘 洁, 等. 基于阻抗测量的分布式光伏孤岛检测方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(1): 70—74.
- [13] Yang Fenyan, Zhang Yue, Liu Jie, et al. Islanding detection method of distributed photovoltaic based on impedance measurement [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(1): 70—74.
- [14] 唐 婷, 谢少军, 焦鑫艳. 基于电网阻抗测量的新型主动式孤岛检测法[J]. 电源学报, 2012, 10(6): 60—64.
- [14] Tang Ting, Xie Shaojun, Jiao Xinyan. A new active islanding detection method based on specific frequency impedance measurement [J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(6): 60—64.

A NEW ISLANDING DETECTION METHOD FOR GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM BASED ON HARMONIC IMPEDANCE COMPONENT

Gao Shuping¹, Wang Kaichang¹, Li Wenhao²

(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)

Abstract: In order to solve the existing problems of islanding detection methods, the relationship between the structural features and fault characteristics of photovoltaic power generation system is studied in this paper. And it is found that the impedance value is different between normal operation of the photovoltaic grid-connected and the operation of the isolated island. According to the difference, a new principle about the anti-islanding protection is proposed, which is implemented by using impedance characteristic frequency sequence components, and it has no detecting blind area. The principle can quickly identify islanding state by detecting impedance component at the PCC point even in the case of single-phase and two-phase disconnection, and it can not affect the quality of power system. The simulation results show that this method can effectively detect the island with no detection zone. And it has the advantages of fast response and smaller impact on the power quality.

Keywords: photovoltaic generation; islanding detecting; harmonic impedance; fault component; impedance sequence component