

基于定位 d 轴谐波电压偏移的孤岛检测新方法

白洪山¹,王鲁杨¹,柏扬²,邱蕾霓³,丁丽青¹,黄河遥¹

(1.上海电力大学 电气工程学院,上海 200090;2.国网上海市电力公司,上海 200120;

3.国网四川省电力公司,四川 成都 610094)

摘要:针对传统谐波域电量变化的被动式孤岛检测法检测盲区大、灵敏度低的问题,提出一种基于定位 d 轴谐波电压偏移的孤岛检测新方法。首先,通过计算公共耦合点处谐波有功功率贡献量,选择来自光伏侧和系统侧方向的代表频次谐波;然后,利用滑动加窗傅里叶变换和Park变换,求取代表谐波频次 d 轴谐波电压偏移,并作为孤岛特征量,依此建立检测判据。若来自光伏侧和系统侧的特征量均超过检测阈值,则判定孤岛。另外,分析计算孤岛特征理论阈值,提高孤岛检测的准确性。设置极端工况下孤岛和并网的多种故障进行仿真验证。结果表明,该方法简单可靠,不仅可以区分孤岛和非孤岛故障,而且在强背景谐波场景下能实现快速、无盲区检测。

关键词:光伏并网发电系统;孤岛检测; d 轴谐波电压偏移;谐波有功功率贡献量

中图分类号:TM7 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22449

A New Islanding Detection Method Based on the Locating d -axis Harmonic Voltage Offset

BAI Hongshan¹, WANG Luyang¹, BAI Yang², QIU Leini³, DING Liqing¹, HUANG Heyao¹

(1. College of Electrical Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200120, China; 3. State Grid

Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610094, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the problems of large blind areas and low sensitivity of the traditional passive islanding detection method for power changes in the harmonic domain, a new method of islanding detection based on the locating d -axis harmonic voltage offset was proposed. First, the representative harmonics from the photovoltaic side and the system side were selected by calculating the contribution of harmonic active power at the point of common coupling (PCC). Then, the sliding windowed Fourier transform and Park transform were used to calculate the d -axis harmonic voltage offset of the harmonic frequency of the substitution table as the islanding characteristic quantity, and the detection criterion was established accordingly. If the parameters from the photovoltaic side and the system side both exceed the threshold, there is an island. In addition, the theoretical threshold of islanding was analyzed to improve the accuracy of detection. Various faults of islanding and grid connection under extreme conditions were set up for simulation verification. The results show that the method is simple and reliable, it not only distinguishes islanding and non-islanding faults, but also can achieve fast and no blind spot detection in strong background harmonic scenes.

Key words: photovoltaic grid-connected power system; islanding detection; d -axis harmonic voltage offset; harmonic active power contributions

随着化石能源紧缺、环境污染等问题日益严重,新能源开发和利用不断增加,分布式发电技术的研究具有重大意义。光伏发电作为太阳能的主要利用方式,其波动性和间歇性给电网运行、控制及保护等方面造成诸多困难,孤岛故障

就是其中之一。基于逆变器的光伏发电系统若发生非计划性孤岛故障而未能快速、准确检测切除,会对电能质量造成不良影响,损坏电网和用户设备,严重时可能威胁到电力检修人员的人身安全。由此引出了对孤岛检测多种方法的研究^[1-2]。

基金项目:上海绿色能源并网工程技术研究中心资助项目(13DZ2251900)

作者简介:白洪山(1995—),男,硕士研究生,Email:1422194551@qq.com

现有的孤岛检测方法主要分为通信式、主动式和被动式^[3]。通信式检测法通过传递开关状态信号进行判别,该类方法无检测盲区、可靠性高,但实现困难、成本高,不利于推广。主动式检测法是不断地向系统注入规律性扰动,当某项运行参数超过检测阈值时,则发生孤岛^[4]。该类方法检测盲区小、灵敏度高,但会污染电能质量。文献[5]通过注入低频正弦无功电流扰动,使公共耦合点(point of common coupling, PCC)处频率发生波动,但其没有考虑多逆变器并网运行时,扰动注入不同步导致孤岛误判的问题。文献[6]通过实时反馈负载阻抗角改变注入的电流频率扰动,虽然完全消除了检测盲区,但造成了严重电流畸变问题。被动式检测法是通过实时监测PCC点处电量变化来判定孤岛^[7]。该类方法不影响系统电能质量和稳定性,但存在较大的局限性,如文献[8]以电压、频率作为特征量建立深度学习模型,虽然减小了检测盲区,但实际应用中很难获得大量的训练数据集,导致检测可靠性低,算法复杂而导致时效性差。

基于工频域的被动式孤岛检测法难以进一步突破,目前已有文献针对谐波域电量变化提出新的检测方法。文献[9]分析光伏电站高低次谐波电流输出特性,提出光伏电站动态谐波域模型,为本文建立光伏并网发电系统谐波电路模型提供基础;文献[10]提出以谐波电压为主、基波频率为辅的孤岛特征量,但其在强背景谐波场景下,存在检测盲区;文献[11]通过构建谐波阻抗特征函数作为孤岛特征量,利用BP神经网络实现检测,但其代表频次谐波选取不合理,检测准确性下降;文献[12]利用PCC点处特定次谐波阻抗 d, q 轴分量变化来判定孤岛,但并没有针对谐波信号门槛值的设定进行理论分析。

综上所述,实时监测谐波域本地电量的变化可实现被动式无盲区孤岛检测,但需要对谐波代表频次的选取、谐波特征量阈值的整定以及强背景谐波环境下检测可靠性的要求进一步研究。本文提出基于定位 d 轴谐波电压偏移的孤岛检测法,相较于目前已有的主动式检测法,未向并网系统注入扰动,对电能质量无污染,并且其独立作用于逆变器,多分布式电源并网运行时,检测可靠性高;与其他被动式检测法相比,该方法算法简单,响应速度快,特别针对在强背景谐波场景下,可实现孤岛故障的无盲区检测。

1 基于谐波域的孤岛检测分析

光伏发电系统正常并网运行时,由于大容量电网系统的等效阻抗非常小,与本地负荷并联,使得PCC点处的等效阻抗很小,孤岛故障发生后,PCC点处等效阻抗等于本地负荷阻抗。孤岛发生前后,PCC点处等效谐波阻抗的变化引起谐波电压波动,可据此判定孤岛。

传统基于谐波域电量变化的孤岛检测法忽略来自电网侧背景谐波,近似认为由光伏侧提供主要的谐波电流。光伏并网发电系统谐波电路如图1所示。

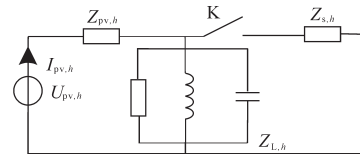


图1 光伏并网发电系统谐波电路图

Fig.1 Harmonic circuit of photovoltaic grid-connected power system

在孤岛发生后,即并网开关K断开,逆变器输出的谐波电流未发生突变,则PCC点处的 h 次谐波电压变化为

$$|U'_{pcc,h} - U_{pcc,h}| = |I_{pv,h} \cdot (Z_{L,h} - \frac{Z_{s,h} \cdot Z_{L,h}}{Z_{s,h} + Z_{L,h}})| \quad (1)$$

式中: $U_{pcc,h}$, $U'_{pcc,h}$ 分别为孤岛发生前、后PCC点处谐波电压; $I_{pv,h}$ 为逆变器输出谐波电流; $Z_{L,h}$ 为负荷等效谐波阻抗; $Z_{s,h}$ 为电网等效谐波阻抗。

基于谐波域电量变化的被动式孤岛检测法采用功率失配区间坐标来描述检测盲区。

孤岛发生前,负荷谐波有功功率 $P_{L,h}$ 为

$$P_{L,h} = U_{pcc,h}^2 / R \quad (2)$$

孤岛发生后,若光伏发电系统工作在恒功率模式下,逆变器输出谐波有功功率 $P_{pv,h}$ 保持不变,则PCC点处谐波电压有效值为

$$U'_{pcc,h} = \sqrt{P_{pv,h} \cdot R} \quad (3)$$

由式(2)~式(3)联立可得并网状态下功率不匹配表达式为

$$\frac{\Delta P_h}{P_{pv,h}} = \frac{P_{L,h} - P_{pv,h}}{P_{pv,h}} \frac{U_{pcc,h}^2}{U'^2_{pcc,h}} - 1 \quad (4)$$

相较于传统电压判据,当负荷功率和光伏发电系统输出功率完全匹配时,负载品质因数 Q_L 为1,孤岛处于极端状态,PCC点处电压和频率几乎保持不变,但由于谐波阻抗的变化,导致PCC点处谐波电压波动,故基于谐波电压变化的检测方法盲区更小,但该方法仍然存在较大的检测盲

区,其原因如下:

1)大容量非线性负荷及电力电子设备投入电网系统,造成系统侧波形畸变严重,使得PCC点处谐波电压增加,而造成孤岛误判;

2)针对实际应用中的三相系统,在发生单相断路、两相断路情况下,仅用某一相的谐波电压变化建立孤岛判据,孤岛保护装置无法快速准确动作,造成孤岛漏检;

3)正常并网运行时,由太阳能的间歇性和波动性使光伏系统内部产生谐波电流源,造成PCC点处谐波电压波动,导致孤岛保护误动作。

针对上述问题,提出基于定位*d*轴谐波电压偏移的孤岛检测法。根据谐波有功功率贡献量定位原则,选取来自光伏侧和系统侧的代表频次谐波,并将2个方向代表谐波频次*d*轴谐波电压偏移作为孤岛特征量,建立检测判据,有效地解决了检测盲区大、检测灵敏度低的问题。

2 基于定位*d*轴谐波电压偏移的孤岛检测原理及实现

2.1 基于定位*d*轴谐波电压偏移的孤岛检测

在并网系统中,光伏发电系统与电网通过PCC点进行能量交换。通过采集PCC点处电压、各支路电流进行计算,分析光伏侧产生的谐波或电网中含有的背景谐波对并网系统的影响,进一步划分各次谐波责任大小^[13]。

选择代表频次谐波时,一般在PCC点处将光伏并网系统谐波等效电路分为光伏侧和系统侧,如图2a所示。利用诺顿等效原理,将两侧等效为谐波电流源和谐波阻抗的并联,如图2b所示。图中, $I_{pv,h}$ 和 $I_{s,h}$ 分别为光伏侧和系统侧谐波电流; $Z_{eq,h}$ 为PCC点处等效谐波阻抗; $I_{pcc,h}$ 和 $U_{pcc,h}$ 分别

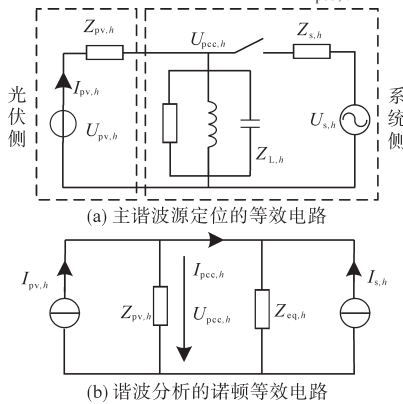


图2 光伏并网发电系统谐波等效模型

Fig.2 Harmonic equivalent model of PV grid-connected power system

为PCC点处谐波电流和谐波电压。

光伏并网系统在正常运行和孤岛故障情况下,PCC点处等效谐波阻抗 $Z_{eq,h}$, $Z'_{eq,h}$ 分别为

$$\begin{cases} Z_{eq,h} = Z_{s,h} \cdot Z_{L,h} / (Z_{s,h} + Z_{L,h}) \\ Z'_{eq,h} = Z_{L,h} \end{cases} \quad (5)$$

其中, h 次谐波阻抗由基波阻抗计算可得:

$$\begin{cases} Z_{L,h} = R / jh\omega L // -j \frac{1}{h\omega C} \\ Z_{s,h} = jhX_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: R, L, C 为本地负荷; X_s 为系统基波感抗; ω 为PCC点处电压的角频率。

根据叠加定理,将图2b分解为单个谐波源作用下的诺顿等效电路,如图3所示。

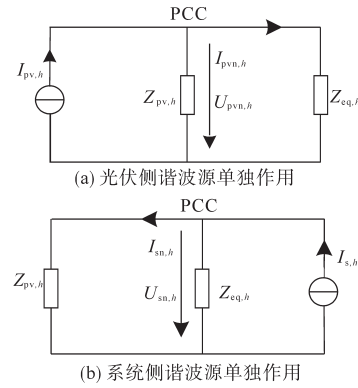


图3 分解后的诺顿等效电路

Fig.3 Decomposed Norton equivalent circuit

计算来自光伏侧和系统侧的*h*次谐波源单独作用时,PCC点处谐波电流贡献量分别为

$$\begin{cases} I_{pvn,h} = \frac{Z_{pv,h} \cdot I_{pv,h}}{Z_{pv,h} + Z_{eq,h}} = \frac{Z_{pv,h}}{Z_{pv,h} + Z_{eq,h}} \cdot \left(\frac{U_{pcc,h}}{Z_{pv,h}} + I_{pcc,h} \right) \\ I_{sn,h} = \frac{Z_{eq,h} \cdot I_{s,h}}{Z_{pv,h} + Z_{eq,h}} = \frac{Z_{eq,h}}{Z_{pv,h} + Z_{eq,h}} \cdot \left(\frac{U_{pcc,h}}{Z_{s,h}} - I_{pcc,h} \right) \end{cases} \quad (7)$$

因此,在正常并网与孤岛情况下,光伏侧代表频次(h_1 次)谐波源在PCC点处产生的谐波电压 $U_{pvn,h1}$, $U'_{pvn,h1}$ 分别为

$$\begin{cases} U_{pvn,h1} = \frac{Z_{pv,h1} \cdot Z_{eq,h1}}{Z_{pv,h1} + Z_{eq,h1}} \left(\frac{U_{pcc,h1}}{Z_{pv,h1}} + I_{pcc,h1} \right) \\ U'_{pvn,h1} = \frac{Z_{pv,h1} \cdot Z'_{eq,h1}}{Z_{pv,h1} + Z'_{eq,h1}} \left(\frac{U_{pcc,h1}}{Z_{pv,h1}} + I_{pcc,h1} \right) \end{cases} \quad (8)$$

同理,在正常并网和孤岛故障情况下,系统侧代表频次(h_2 次)谐波源在PCC点处产生的谐波电压 $U_{sn,h2}$, $U'_{sn,h2}$ 分别为

$$\begin{cases} U_{sn,h2} = \frac{Z_{pv,h2} \cdot Z_{eq,h2}}{Z_{pv,h2} + Z_{eq,h2}} \left(\frac{U_{pcc,h2}}{Z_{s,h2}} - I_{pcc,h2} \right) \\ U'_{sn,h2} \approx 0 \end{cases} \quad (9)$$

针对三相系统不同断路故障类型而形成的孤岛,利用Park变换计算PCC点处三相谐波电压贡献量d轴分量。再根据下式:

$$U_{d,hi}\% = \frac{|U'_{d,hi} - U_{d,hi}|}{|U_{d,hi}|} \times 100\% \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

可得 h_i 次d轴谐波电压偏移量,并将其作为孤岛特征。

综上所述,孤岛发生前后,光伏侧和系统侧代表频次谐波作用下的PCC点处d轴谐波电压发生偏移。可对代表频次(h_1, h_2)谐波电压d轴分量进行监测,并选择适当的检测阈值,当两个方向的孤岛特征量均超过阈值 $K_{d,hi}$ 时,即可判定为孤岛故障。整定规则如下:

$$\begin{cases} \bigcap_{i=1,2} (U_{d,hi}\% \geq K_{d,hi}) & \text{孤岛故障} \\ \bigcap_{i=1,2} (U_{d,hi}\% < K_{d,hi}) & \text{正常并网} \\ \text{其它} & \text{警告提示} \end{cases} \quad (11)$$

2.2 定位代表频次谐波

综合考虑来自光伏侧和系统侧方向谐波电压贡献量和谐波电流贡献量的影响,本文采用谐波有功功率贡献量来选择主谐波源代表频次,提高孤岛检测准确性。

根据式(7)~式(9),计算PCC点处来自光伏侧和系统侧代表频次谐波源单独作用时,谐波有功功率贡献量 $P_{pvn,h}, P_{sn,h}$ 如下式:

$$\begin{cases} P_{pvn,h} = \operatorname{Re}(U_{pvn,h} \cdot I_{pvn,h}^*) \\ = \frac{|U_{pcc,h} + I_{pcc,h} \cdot Z_{pv,h}|^2}{|Z_{pv,h} + Z_{eq,h}|^2} \cdot |Z_{eq,h}| \cos \theta_1 \\ P_{sn,h} = \operatorname{Re}(U_{sn,h} \cdot I_{sn,h}^*) \\ = \frac{|U_{pcc,h} - I_{pcc,h} \cdot Z_{eq,h}|^2}{|Z_{pv,h} + Z_{eq,h}|^2} \cdot |Z_{pv,h}| \cos \theta_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: θ_1, θ_2 分别为 $Z_{eq,h}, Z_{pv,h}$ 的相角; $I_{pvn,h}^*, I_{sn,h}^*$ 分别为来自光伏侧和系统侧谐波电流贡献量 $I_{pvn,h}, I_{sn,h}$ 的共轭复数。

通过比较两个方向的谐波源单独作用下在PCC点处有功功率贡献量的大小,判断主谐波源的位置并分类,判据如下:

1) 当 $\max(P_{pvn,h1,ki}, P_{sn,h1,ki}) = P_{pvn,h1,ki}$ 时,对于 $h_{1,ki}$ 次谐波,说明光伏侧对PCC点处影响更大, $h_{1,ki}$ 次主谐波源位于光伏侧;

2) 当 $\max(P_{pvn,h2,ki}, P_{sn,h2,ki}) = P_{sn,h2,ki}$ 时,对于 $h_{2,ki}$ 次谐波,说明系统侧对PCC点处影响更大, $h_{2,ki}$ 次主谐波源位于系统侧;

3) 当 $P_{pvn,h} = P_{sn,h}$ 时,说明两侧谐波对PCC处的影响相等,为简化算法,将其划分至光伏侧主要责任。

由于实际应用中变压器的接线方式,3次谐波可能无法流通至孤岛保护装置监测点,并且高次谐波受容性负载的影响大,难以检测。故根据谐波有功功率贡献量判据,对5~19次谐波进行责任划分,设置光伏侧谐波代表频次为 h_1 ,系统侧谐波代表频次为 h_2 。

代表谐波频次选取规则如下式:

$$h_i = \min \{h_{i,1}, h_{i,2}, \dots, h_{i,ki}\} \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

其中, $ki = 1, 2, 3, \dots, 8$,且 $k1+k2=8$ 。

2.3 孤岛特征理论阈值计算方法

基于谐波域电量变化的孤岛检测法存在阈值难以整定的问题,本文提供一种求取d轴谐波电压偏移理论阈值 $K_{d,h}$ 的方法。由式(5)、式(10)可得孤岛前后d轴谐波电压偏差为

$$K_{d,h} = K_m \cdot \frac{|Z_{L,h} - Z_{s,h} // Z_{L,h}|}{|Z_{s,h} // Z_{L,h}|} \times 100\% \quad (14)$$

为了防止系统滤波后造成的孤岛误判,设置谐波整定裕度 K_m ,取值为[0.9, 1.1]。

设置极端工况下,考虑到孤岛故障后所能形成最大负荷的孤岛运行状态,以光伏最大出力近似代替系统最大负荷容量。由此可得:

$$\begin{cases} R = \omega L = \frac{1}{\omega C} \\ R = \frac{U_N^2}{S_L} \approx \frac{U_N^2}{S_{pv,max}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: U_N 为电网额定电压; S_L 为负荷容量; $S_{pv,max}$ 为光伏出力最大负荷容量。

由于电网系统等效阻抗中电阻远小于感抗,可忽略其电阻。而在最小运行方式下,系统短路阻抗最大,导致孤岛前后d轴谐波电压偏移量最小,孤岛故障最难识别,故系统感抗由短路阻抗近似代替,由此可得:

$$Z_s = jX_s \approx j \frac{U_N^2}{S_{k,min}} \quad (16)$$

式中: $S_{k,min}$ 为最小运行方式下的短路容量。

根据式(6)、式(15)、式(16),计算 h_1, h_2 次负荷谐波阻抗与电网等效谐波阻抗,代入式(14)计算d轴谐波电压偏移理论阈值。

实际应用中,通过采集系统电压和电流参数,实时计算并调整d轴谐波电压偏移阈值,结合谐波有功功率贡献量定位原则,可有效防止因并

网系统谐波治理造成的孤岛漏检。

2.4 实现流程

定位d轴谐波电压偏移的孤岛检测法实现过程主要步骤如下:

1)实时采集三相光伏并网发电系统PCC点处电压、逆变器输出电流、电网系统输出电流,采用滑动加窗傅里叶变换同步计算5~19次谐波电压、谐波电流的幅值和相位。

2)根据式(12)计算PCC点处来自光伏侧、系统侧各次谐波有功功率贡献量。

3)根据谐波有功功率贡献量对各次谐波进行责任划分;根据式(13)选择光伏侧谐波代表频次为 h_1 ,系统侧谐波代表频次为 h_2 。

4)根据式(14)计算d轴谐波电压偏移理论阈值 $K_{d,h1}, K_{d,h2}$ 。

5)根据式(8)、式(9)计算PCC点处时窗 T 前后的 h_1, h_2 次谐波电压贡献量 $U_{pv,h1}(T), U_{pv,h1}(T+1), U_{sn,h2}(T), U_{sn,h2}(T+1)$ 。

6)对PCC点处 h_1, h_2 次三相谐波电压贡献量Park变换,提取d轴分量;根据式(10)计算时窗 T 前后d轴谐波电压偏移 $U_{d,h1}\%, U_{d,h2}\%$ 。

7)将 $U_{d,h1}\%, U_{d,h2}\%$ 与对应的理论阈值对比。若二者均超出阈值,则判定为孤岛故障,并采取孤岛保护措施;若均不超出阈值,则为正常并网运行状态,返回步骤5),继续同步监测运行状态;若仅单项超出阈值则可判定为非孤岛故障,发出警告提示。孤岛判据的整定方法如式(11)。

2.5 检测盲区分析

由式(4)经过Park变换可得,系统工作在恒功率模式时,所提新方法的盲区边界公式如下:

$$\frac{U_{dh}^2}{U_{dh,max}^2} - 1 \leq \frac{\Delta P_{dh}}{P_{pv,dh}} \leq \frac{U_{dh}^2}{U_{dh,mix}^2} - 1 \quad (17)$$

其中, $[U_{dh,mix}, U_{dh,max}]$ 为孤岛发生后PCC点处 h 次d轴谐波电压的范围。

可以看出,所提新方法类似于谐波电压判据检测盲区,但在此基础上,进一步缩小检测盲区。一方面,系统侧强背景谐波和光伏发电间歇性的干扰下,两个方向的判据共同作用,防止孤岛保护误动;另一方面,实际应用中,三相并网系统采用d轴分量检测孤岛,防止在单相及两相断路情况下的孤岛漏检。另外,灵活设置孤岛特征阈值,在强背景谐波场景下,理论上可实现无盲区检测。

基于光伏电站接入电网测试规程^[4]中定义的极端工况进行孤岛检测仿真验证,即孤岛内功

率平衡,负荷在50 Hz附近谐振,负载品质因数为 1 ± 0.1 。若最恶劣工况下设置各种故障均能被准确识别是否处于孤岛状态,则表明该方法可实现无盲区检测。

3 仿真验证及分析

本文使用Matlab软件对所提方法进行仿真验证,三相光伏并网发电系统模型如图4所示,并设置孤岛极端工况参数如下:电网额定电压380 V,频率50 Hz,电网等效感抗 $X_s = j0.20 \Omega$,含0.8%的11次背景谐波,取 $K_m = 1.1$;光伏阵列输出电压500 V,逆变器输出线电压380 V,输出功率25 kW,光伏发电系统等效阻抗 $Z_{pv} = 0.15 + j1.22 \Omega$;本地负荷 Z_L 采用品质因数为1的RLC并联负载,且在工频处发生谐振,取 $R = 6 \Omega, L = 19.11 \text{ mH}, C = 530.79 \mu\text{F}$ 。

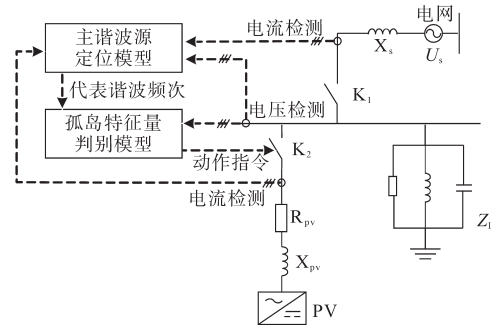


图4 三相光伏并网发电系统仿真模型

Fig.4 Simulation model of three-phase photovoltaic grid-connected power system

仿真时长1.2 s,采样频率4.8 kHz,采样时间0.2 s(0.7 s—0.9 s)。如图5所示,0.8 s时刻发生孤岛,PCC点处三相相电压的幅值和相位基本未发生改变,光伏输出功率与负荷吸收功率完全匹配,说明此时孤岛处于最严重的状态,但其d轴分量出现明显变化,且在相电压幅值附近周期性波动,故可作为孤岛检测特征量。

光伏并网发电系统PCC点处各次谐波有功功率贡献量的仿真结果如表1、表2所示。由表1可得,对于5次、7次、9次、15次、17次谐波, $P_{pv,h1} > P_{s,h1}$,故在PCC点处由光伏侧 h_1 次谐波承担责任更大;同理,由表2可得,对于11次、13次、19次谐波, $P_{pv,h2} < P_{s,h2}$,PCC点处由系统侧 h_2 次谐波承担责任更大。故选择光伏侧谐波代表频次为5,系统侧谐波代表频次为11。由此可见,运用谐波有功功率贡献量可以定量地划分各次谐波责任大小,更加准确地定位谐波主要来源。设置孤岛检测理论阈值取 $K_{d,5} = 122.37, K_{d,11} = 54.43$ 。

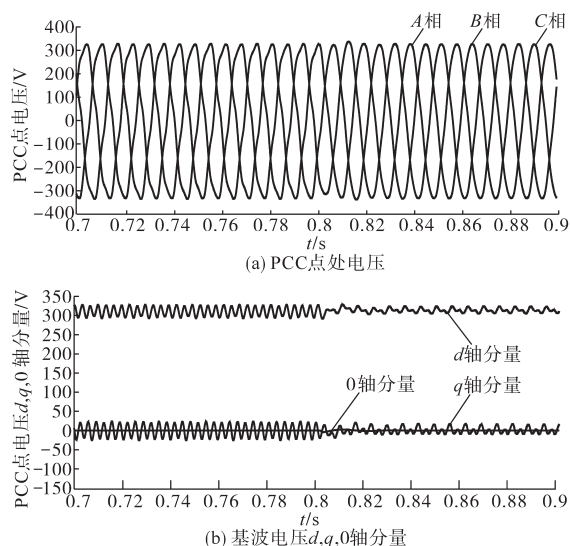


图5 光伏并网发电系统运行参数图

Fig.5 Operating parameters of photovoltaic grid-connected power system

表1 光伏侧谐波有功功率贡献量

Tab.1 Harmonic active power contribution of PV side

有功功率贡献量/W	谐波次数				
	5次	7次	9次	15次	17次
$P_{pv,h1}$	96.53	13.87	3.75	0.13	0.02
$P_{sn,h1}$	9.46	2.61	1.62	0.04	0.01

表2 系统侧谐波有功功率贡献量

Tab.2 Harmonic active power contribution of system side

有功功率贡献量/W	谐波次数		
	11次	13次	19次
$P_{pv,h2}$	0.79	0.25	—
$P_{sn,h2}$	1.42	0.65	0.005

设置极端情况下的孤岛故障(包括三相断路、两相断路和单相断路),对照设置并网运行(包括光伏波动、负荷突变和电网电压降落)不同故障下进行仿真以验证所提方法的有效性。

图6分别为极端工况下并网点处发生A相断路、AB两相断路而形成孤岛,光伏侧、系统侧代表频次谐波d轴谐波电压偏移波形变化。可以看出,正常并网运行时,5次、11次d轴谐波电压偏移基本为零;而0.8s时刻,发生孤岛故障,针对并网系统不同断路类型,5次、11次谐波d轴谐波电压偏移量逐渐发生变化,均超过其对应检测阈值,判定为孤岛故障。同时极端工况所发生的3种断路故障下,该方法均在1个周期内成功检测出孤岛状态,对比已有被动式检测法,如文献[7],在最恶劣工况下,只需0.08s检出并切除孤岛,远小于IEEE Std.1547规定的2s标准。故在极端工况下,本文所提方法可有效防止孤岛漏检,且响

应时间非常短。

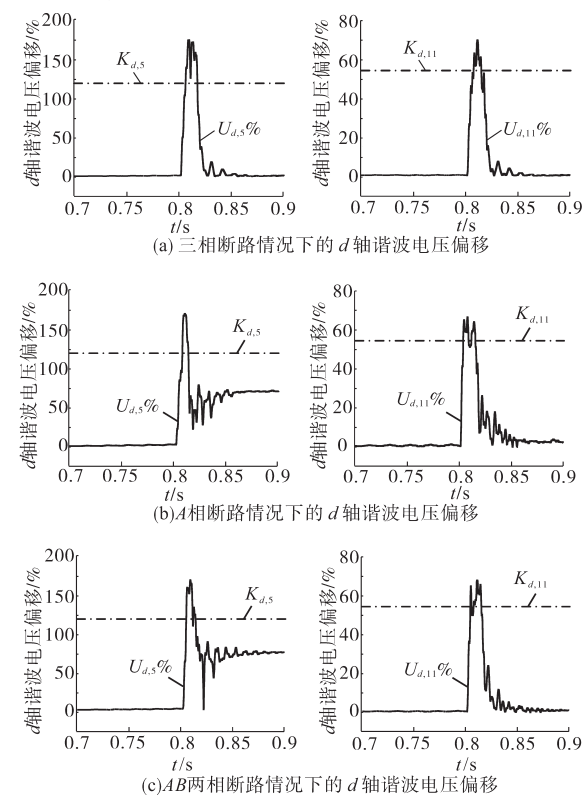


图6 孤岛故障仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms of islanding fault

由于太阳能发电的间歇性和波动性,光伏出力随环境变化而改变,造成逆变器输出谐波电流波动,从而影响PCC点处d轴谐波电压偏移量。光伏发电并网系统正常运行在极端工况下,设置0.8s时刻,光伏模块的光照强度由1000 kW/m²降至500 kW/m²,仿真结果如图7所示。可以看出,0.8s时刻后,光伏侧5次谐波d轴谐波电压偏移量快速地超过了孤岛特征阈值,而相对应的系统侧11次孤岛特征量虽有变化,但明显较小。光伏并网发电系统继续运行,孤岛保护装置发出警告提示。故在极端工况下所提方法可有效防止光伏波动造成的孤岛误判。

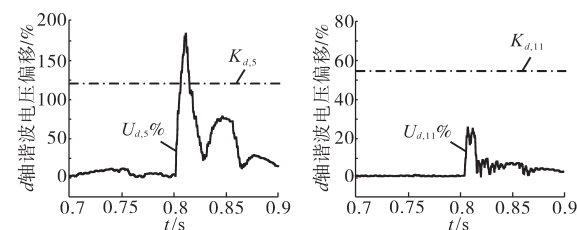


图7 光伏波动时d轴谐波电压偏移波形

Fig.7 Waveforms of d-axis harmonic voltage offset during photovoltaic fluctuation

电网电压跌落瞬间,光伏发电系统仍处于并网运行状态,光伏侧和系统侧有功功率出现偏

差,引起谐波电压增加,从而影响PCC点处 d 轴谐波电压偏移量。光伏发电并网系统正常运行在极端工况下,设置0.8 s时刻,电网电压跌落到额定值的80%。仿真结果如图8所示,11次谐波 d 轴谐波电压偏移量超过孤岛特征阈值,5次 d 轴谐波电压偏移量虽有变化,但波动较小且未超过阈值,光伏并网发电系统继续运行,孤岛保护装置发出警告提示。故在极端工况下所提方法可有效防止电网电压跌落造成的孤岛误判。

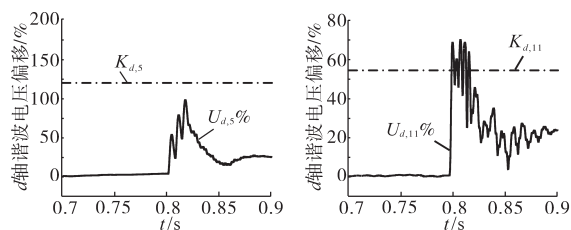


图8 电网电压跌落时 d 轴谐波电压偏移波形

Fig.8 Waveforms of d -axis harmonic voltage

offset during the grid voltage drop

PCC点处谐波等效阻抗由电网谐波等效阻抗和负荷谐波阻抗并联组成,且前者远小于后者,在正常并网运行的情况下,可近似认为PCC点谐波阻抗不变。光伏发电并网系统正常运行在极端工况下,设置0.8 s时刻,负荷有功功率由25 kW增至35 kW;1 s时刻,增加10 kvar感性无功功率;1.2 s时刻,增加5 kvar容性无功功率。仿真结果如图9所示,当负荷发生突变时,11次谐波 d 轴谐波电压偏移量超过孤岛特征阈值,而5次谐波 d 轴谐波电压偏移量低于检测阈值。光伏并网发电系统继续运行,孤岛保护装置发出警告提示。故在极端工况下所提方法可有效防止负荷突变造成的孤岛误判。

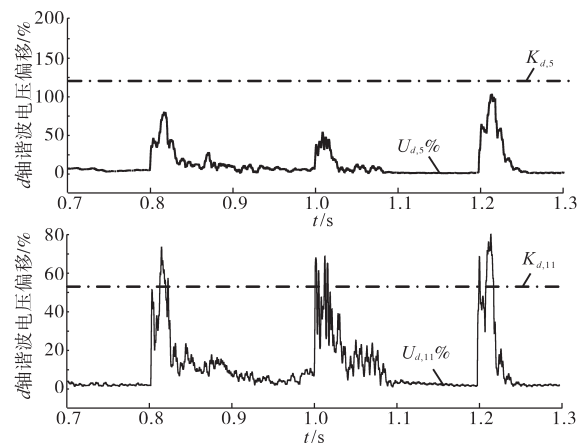


图9 负荷突变时 d 轴谐波电压偏移波形

Fig.9 Waveforms of d -axis harmonic voltage

offset during the load mutation

4 结论

本文提出一种基于定位 d 轴谐波电压偏移的孤岛检测方法,详细分析了其工作原理、检测盲区、定位谐波代表频次的选取和孤岛理论阈值的计算,通过在最恶劣工况下的仿真实验,验证了其有效性。结果表明,同时考虑光伏侧和系统侧孤岛发生前、后PCC点处谐波电压 d 轴分量变化情况,可以在孤岛极端情况下并网点发生单相及两相断路时仍准确识别孤岛,并在光伏波动、电网电压降落、负荷突变扰动下,发出警告提示。该方法与已有的检测法相比,可靠性高,响应速度快,对电能质量无污染,特别针对强背景谐波场景下,可实现孤岛故障的无盲区检测,具有良好的实用价值。

参考文献

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
Yang Xinfu, Su Jian, Lü Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [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.
Zhang Xing, Cao Renxian. Photovoltaic grid-connected generation and its inverter control[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [3] 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.
- [4] 郑伟航,肖伸平,张晓虎.光伏系统的新型孤岛检测方法研究[J].电气传动,2020,50(1):95-99.
Zheng Weihang, Xiao Shenping, Zhang Xiaohu. Research on the new island detection method of photovoltaic system[J]. Electric Drive, 2020, 50(1): 95-99.
- [5] 孙皓,王鲁杨,柏扬,等.基于电流扰动-频率偏差的孤岛检测方法[J].电气传动,2018,48(3):75-80.
Sun Hao, Wang Luyang, Bai Yang, et al. Islanding detection method based on current disturbance and frequency deviation [J]. Electric Drive, 2018, 48(3): 75-80.
- [6] 唐忠廷,栗梅,刘尧,等.带负载阻抗角反馈的主动频移孤岛检测技术[J].电力系统自动化,2018,42(7):199-207.
Tang Zhongting, Su Mei, Liu Yao, et al. Active frequency drift islanding detection technology with feedback of load impedance angle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 199-207.

- [7] 刘新天,冯嘉骏,何耀,等. 基于闭环锁频控制的并网逆变器孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(22):116-123.
Liu Xintian, Feng Jiajun, He Yao, *et al.* Islanding detection method based on closed-loop frequency-locked control for grid-connected inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 116-123.
- [8] 尹超勇. 同步型分布式电源的被动式孤岛检测方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
Yin Chaoyong. Research on passive islanding detection method for synchronous distributed generation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.
- [9] 谢宁,罗安,陈燕东,等. 大型光伏电站动态建模及谐波特性分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36):10-17.
Xie Ning, Luo An, Chen Yandong, *et al.* Dynamic modeling and characteristic analysis on harmonics of photovoltaic power stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 10-17.
- [10] 陈永华,唐冠军,王森,等. 基于谐波电压与基波频率的被动式孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(14):200-206.
Chen Yonghua, Tang Guanjin, Wang Sen, *et al.* Passive islanding detection method based on harmonic voltage and fundamental frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 200-206.
- [11] 戴云霞,苏建徽,刘宁,等. 基于谐波阻抗特征函数的分布式发电孤岛识别方法研究[J]. 电工电能新技术,2015,34(12): 37-42.
Dai Yunxia, Su Jianhui, Liu Ning, *et al.* Research on islanding identification method for distributed generation based on harmonic impedance characteristic function[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(12): 37-42.
- [12] 高淑萍,李文浩,汪凯昌,等. 基于谐波阻抗 dq 分量的孤岛检测新方法[J]. 太阳能学报,2018,39(9):2387-2392.
Gao Shuping, Li Wenhao, Wang Kaichang, *et al.* A new islanding detection method based on harmonic impedance dq component[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(9): 2387-2392.
- [13] 艾永乐,郑建云. 基于谐波有功功率贡献量的主谐波源定位[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(7):16-21.
Ai Yongle, Zheng Jianyun. Localization of the main harmonic source based on the harmonic active power contributions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 16-21.
- [14] 张军军. Q/GDW618—2011. 光伏电站接入电网测试规程[S]. 北京:中国电力出版社,2011.
Zhang Junjun. Q/GDW618—2011. Test procedure for photovoltaic power station connected to power grid[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- 收稿日期:2020-09-18
修改稿日期:2020-09-28
- ~~~~~
- (上接第64页)
- Technology and Engineering, 2019, 19(28): 172-178.
- [16] 黄悦华,邹子豪,张赞宁,等. 基于FP-Growth算法的配电网薄弱点分析研究[J]. 电测与仪表,2020,57(17):79-84,135.
Huang Y H, Zou Z H, Zhang Y N, *et al.* Analysis of weak points of distribution network based on FP-Growth algorithm[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(17): 79-84, 135.
- [17] 刘思怡,苏运,张焰. 基于FP-Growth算法的10 kV配电网分支线断线故障诊断与定位方法[J]. 电网技术,2019,43(12): 4575-4582.
Liu S Y, Su Y, Zhang Y. A 10 kV distribution network branch line disconnection fault diagnosis and location method based on FP-Growth algorithm[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4575-4582.
- [18] 黄知超,谢霞,王斌. 结合模糊综合评判与决策的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(7):65-69.
Huang Z C, Xie X, Wang B. Power system state estimation combined with fuzzy comprehensive evaluation and decision-making [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 65-69.
- [19] 李海英,李媛媛,宋建成. 基于模糊控制和AHP的矿井变频调速通风系统[J]. 电气传动,2012,42(1):17-21.
Li H Y, Li Y Y, Song J C. Mine frequency conversion speed regulation ventilation system based on fuzzy control and AHP[J]. Electric Drive, 2012, 42(1): 17-21.
- 收稿日期:2020-08-06
修改稿日期:2020-10-22