

基于负序电流注入的光伏并网逆变器孤岛检测方法

崇志强, 戴志辉, 焦彦军

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 孤岛运行时光伏电源继续向负载供电, 会给检修人员和用户设备带来安全隐患, 快速有效地实现孤岛检测具有重要意义。提出了一种通过并网逆变器注入负序电流并检测公共连接点电压不平衡度的快速孤岛检测方法。通过合理投切负序电流注入降低了对电网的干扰, 不受电网不对称故障的影响且无检测盲区。在光伏电源功率与负荷功率匹配、公共连接点电压和频率基本不发生偏移的情况下对该方法进行了仿真验证, 结果表明即便在这种最不利于孤岛检测的情况下, 该方法仍能快速准确地检测出孤岛运行状态。

关键词: 孤岛检测; 电压不平衡度; 负序电流; 电压谐波畸变率; 光伏并网

Islanding detection method based on grid-connected photovoltaic converter and negative sequence current injection

CHONG Zhi-qiang, DAI Zhi-hui, JIAO Yan-jun

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The photovoltaic power source would keep supplying power under unscheduled islanding operation, and hence bring potential risk for maintenance personnel and electric equipments, so it is of great significance to enforce accurate and rapid islanding detection method. A method based on negative sequence current injection and voltage imbalance on the point of common coupling is proposed. The reasonable switching strategy of negative sequence current in the grid-connected inverter reduces the impact of injected current on the main power grid. The method, without non-detection zone, is also unaffected by asymmetric faults of the power grid. Case study shows that the method could detect islanding state accurately and quickly under the worst condition while the power of the PV matches the load power, and the voltage and the frequency of the PCC has small shift.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307059) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014MS86).

Key words: islanding detection; voltage imbalance; negative sequence current; voltage harmonic distortion; grid-connected photovoltaic

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0065-07

0 引言

随着地球环境污染的加剧和常规能源的逐渐枯竭, 新能源的开发利用成为当前的研究热点。光伏发电(Photovoltaic, PV)作为其中一种重要的发电形式, 仍存在三大主要难题: 最大功率跟踪控制、并网技术和孤岛检测。孤岛效应是指当电网由于电气故障、误操作或自然因素等原因中断供电时, 分布式发电(Distributed Generation, DG)系统未能检测出停电状态而脱离电网, 仍然向周围负载提供电能,

从而形成一个电力公司无法控制的自给供电孤岛^[1]。DG 孤岛运行时可能会给用户设备带来安全隐患, 同时非计划孤岛运行对检修人员的人身安全也会构成潜在威胁, 快速有效地检测孤岛运行状态并采取合理的控制策略, 有利于提高供电可靠性和分布式电源的利用效率。

目前, 孤岛检测主要可分为基于通信的孤岛检测方法和基于本地信息的孤岛检测方法。基于通信的孤岛检测方法通过无线或有线通信传输断路器的状态信息, 进而判断是否孤岛。本地孤岛检测方法可大致分为被动式孤岛检测和主动式孤岛检测。其中, 被动式检测方法主要利用孤岛时分布式电源与电网公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307059); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014MS86)

的电压、相位、频率、谐波含量来检测孤岛,例如“过/欠压”(Over Under Voltage, OUV)^[2]、“过/欠频”(Over Under Frequency, OUF)^[3]方法,电压谐波含量检测法(Harmonics Detection, HD)^[4],电压相位突变检测法(Phase Jump Detection, PJD)^[5-6]等。被动式检测法不需增加额外硬件电路,对负荷不会造成冲击,缺点是存在较大的检测盲区(Non-Detection),与负荷功率匹配时,电压、频率维持在正常运行范围内,基于 OUV 和 OUF 的孤岛检测方法可能失效。主动式检测法则是在 DG 并网运行时定期向公共连接点注入扰动信号来判断孤岛是否发生。电网正常运行时由于电网锁相环的平衡作用,该扰动不会被检测到,孤岛时逆变器的这些注入扰动将会累积,超出设定的范围时便会触发孤岛检测电路检测到孤岛发生。主动式孤岛检测法也主要是基于电压偏移、频率偏移和相位偏移原理,其优点是检测盲区小,缺点是在分布式电源并网运行时会给电网造成一定扰动。文献[7]提出一种基于负序电压正反馈的孤岛检测方法,文献[8]提出一种注入负序电流孤岛检测方法,两者都具有无检测盲区的特点,但由于持续存在负序电流流入电网,可能对发电机等设备产生不良影响。文献[9]提出一种基于负序电压分配因子的孤岛检测方法,该方法抗电网扰动能力强,但需要引入负序电源。同时,基于负序电流的孤岛检测方法可能受电网侧非对称故障的影响^[10-12]。GB/T 19939-2005^[13]规定防孤岛效应保护应在 2 s 内动作,将光伏系统与电网断开,其也规定了当电网电压不在 85%~110%这一范围时,光伏并网逆变器应与电网断开。基于上述分析,本文提出一种基于谐波畸变率和电压不平衡度的负序电流注入式孤岛检测方法,与其他主动式孤岛检测方法相比对电网扰动小、抗干扰性强、检测速度快。

1 基于电压谐波畸变率的孤岛检测启动

电压谐波检测是通过检测公共连接点电压 V_{PCC} 的总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)来判断是否出现孤岛。其计算如式(1)所示。

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^M V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1)$$

其中, V_n 为 n 次谐波有效值。GB/T14549-1993^[14]规定了表 1 所示电网谐波电压限值。

逆变器的输出电压、电流中总会包含一定的谐波分量,但在并网运行中电网侧为阻抗很低的电压源,谐波电流流入电网,公共连接点的电压谐波畸

表 1 电网电压谐波限值

电网标称 电压/kV	电压总谐波 畸变率/%	各次谐波电压含有率/%	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

变率很低,此时 V_{PCC} 的 THD 一般低于某一阈值。而在孤岛运行时,一方面,孤岛中的非线性负荷,如配电变压器,在电流谐波的激励下电压可能出现高度失真,通常为三次谐波;另一方面,电流谐波流入阻抗较大的负载,使得 V_{PCC} 产生较大的谐波。因此,理论上选定合适的阈值,可单独利用 THD 构造孤岛检测方法,但实际应用中存在困难:很难选定既保证并网运行时不误判、孤岛运行时能灵敏判别的阈值;且当孤岛中的负荷具有很强的低通特性,非线性负荷所需要的输入谐波电流与逆变器输出电流匹配,逆变器具有高质量低失真输出等情况时,该方法也可能失效。因此,本文将作为“启动判据”,用于启动负序电流的注入,当 V_{PCC} 的 THD 小于给定定值时不注入负序电流;当电压 THD 大于给定定值时注入负序电流,且通过检测 PCC 处电压不平衡度是否大于设置的定值判定孤岛状态。

2 基于负序电流注入的孤岛检测新方法

图 1 为本文所提孤岛检测方法的原理示意,其中, R_f 、 L_f 为逆变器交流侧滤波器的电阻和电感, R_s 、 L_s 为主电网等效电阻和电感,负荷模型可以等效为 RLC 并联。 $i_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ 为光伏逆变器输出的三相电流。光伏电池阵列发出的电能经 DC/DC 变换使变换后的直流电压满足并网要求,DC/DC 变换中采取基于电导增量法的最大功率跟踪控制策略。最后通过逆变器将直流电转换为交流电并网, PV 并网时采取单位功率因数电流控制。

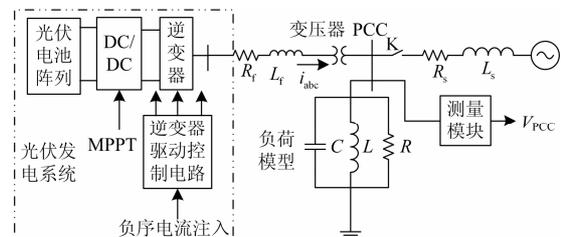


图 1 孤岛检测原理图

Fig. 1 Islanding detection schematics

图 1 中的“负序电流注入”模块原理如图 2 所示。其中, $\mathbf{i}_{abc}^* = \mathbf{i}_{abc(1)}^* + \mathbf{i}_{abc(2)}^* = [i_a^* \ i_b^* \ i_c^*]^T$ 为进行电流控制时给定的三相参考电流, 逆变器的输出电流 \mathbf{i}_{abc} 跟踪给定电流 \mathbf{i}_{abc}^* , 通过给定不同的正序电流 $\mathbf{i}_{abc(1)}^* = [i_{a(1)}^* \ i_{b(1)}^* \ i_{c(1)}^*]^T$ 和负序电流 $\mathbf{i}_{abc(2)}^* = [i_{a(2)}^* \ i_{b(2)}^* \ i_{c(2)}^*]^T$, 可以控制注入 PCC 正序、负序电流的大小, C 为给定正序电流幅值与给定负序电流幅值的比值。并网逆变器输出与电网在 PCC 相连, 开关 K 的开合状态反映了孤岛的发生, V_{PCC} 为公共连接点的三相电压, 其中包括各次谐波分量, 基波正序、负序和零序分量。通过测量光伏电池组件的输出电压 U_{DC} 和输出电流 I_{DC} 实时计算其输出功率 $P = I_{DC}U_{DC}$, 忽略逆变器功率损耗时交流侧的功率和直流侧功率相等, 因此 $I_{abc}^* = I_{DC}U_{DC} / \sqrt{3}U_{AC}$ 。其中, U_{AC} 为交流侧额定电压, \mathbf{i}_{abc}^* 为给定电流 \mathbf{i}_{abc}^* 波形有效值。

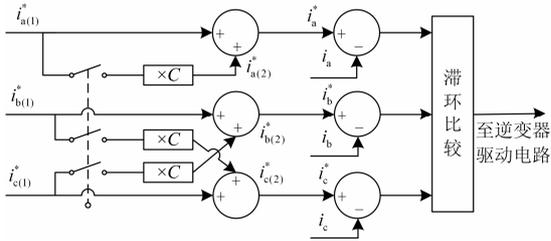


图 2 负序电流注入原理图

Fig. 2 Negative sequence current injection schematics

UL1741^[15]及 IEEE1547^[16]均可作为孤岛检测的测试标准, 其中, UL1741 为北美配电用逆变器、变频器、控制器和系统互连设备标准, 其规定了经逆变器并网的 DG 并网要求; IEEE1547 为 DG 接入标准, 规定了分布式电源接入电网对公共连接点电压、频率、谐波等影响的限制。本文选取 UL1741 为后续测试的标准。

2.1 三相电压不平衡度

三相电压不平衡度(Voltage Imbalance, VI)的定义见式(2), 三相电流不平衡度(Current Imbalance, CI)的定义如式(3)所示。

$$VI = (V_{(2)} / V_{(1)}) \times 100\% \quad (2)$$

$$CI = (I_{(2)} / I_{(1)}) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $V_{(2)}$ 为负序电压幅值; $V_{(1)}$ 为正序电压幅值; $I_{(2)}$ 和 $I_{(1)}$ 分别为负序和正序电流幅值。三相电压矢量 $\mathbf{U}_{abc} = [\dot{U}_a \ \dot{U}_b \ \dot{U}_c]^T$ 可分解为正序电压 $\mathbf{U}_{(1)} =$

$[\dot{U}_{a(1)} \ \dot{U}_{b(1)} \ \dot{U}_{c(1)}]^T$ 、负序电压 $\mathbf{U}_{(2)} = [\dot{U}_{a(2)} \ \dot{U}_{b(2)} \ \dot{U}_{c(2)}]^T$ 和零序电压 $\mathbf{U}_{(0)} = [\dot{U}_{a(0)} \ \dot{U}_{b(0)} \ \dot{U}_{c(0)}]^T$, A 相的正序、负序和零序分量与三相电压矢量 \mathbf{U}_{abc} 的关系如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{a(1)} \\ \dot{U}_{a(2)} \\ \dot{U}_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于 PCC 有逆变器的注入电流, 所以 PCC 电压含有谐波分量, 在提取 PCC 电压各序分量之前须先进行滤波处理, 并得到基波分量。

2.2 基于负序电流注入的孤岛检测原理

利用负序电流注入并在 PCC 处检测电压不平衡度可实现快速准确、无盲区孤岛检测, 能够满足 GB/T 19939-2005 规定的时间要求。

结合图 1, 不难得到负序等效网络如图 3 所示, 正序等效网络如图 4 所示。其中, G_1 为 PV 电源, 相当于一个电流源, 其可以通过设定逆变器的给定三相电流 \mathbf{i}_{abc}^* 来确定注入正序、负序电流的大小; 电网侧等效为一个电压源, 设其电压为 U_{Grid} 。 $Z_{DG(1)}$ 、 $Z_{DG(2)}$ 为 PV 电源的正负序等值阻抗, $Z_{L(1)}$ 、 $Z_{L(2)}$ 为负荷的正负序等值阻抗, $Z_{S(1)}$ 、 $Z_{S(2)}$ 为主电网的正负序等值阻抗。

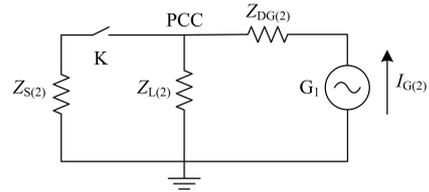


图 3 负序网络图

Fig. 3 Negative sequence network diagram

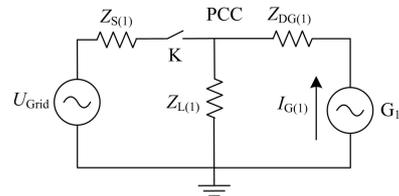


图 4 正序网络图

Fig. 4 Positive sequence network diagram

当 K 闭合, 即未出现孤岛运行时, PCC 处正、负序电压可分别利用式(5)、式(6)计算。由于 $Z_{S(1)}$ 、 $Z_{S(2)}$ 的值分别相对 $Z_{L(1)}$ 、 $Z_{L(2)}$ 而言很小, 故 $\dot{U}_{PCC(2)} \approx 0$, $\dot{U}_{PCC(1)} \approx \dot{U}_{Grid}$, PCC 处的电压不平衡度近似为 0。

$$\dot{U}_{PCC(1)} = Z_{L(1)} \frac{\dot{U}_{Grid} + \dot{I}_{G(1)} Z_{S(1)}}{Z_{L(1)} + Z_{S(1)}} \quad (5)$$

$$\dot{U}_{PCC(2)} = \dot{I}_{G(2)} \frac{Z_{S(2)} Z_{L(2)}}{Z_{S(2)} + Z_{L(2)}} \quad (6)$$

当 K 断开, 即出现孤岛运行情况时, PCC 处的正序和负序电压分别如式(7)、式(8)所示。

$$\dot{U}_{PCC(1)} = \dot{I}_{G(1)} Z_{L(1)} \quad (7)$$

$$\dot{U}_{PCC(2)} = \dot{I}_{G(2)} Z_{L(2)} \quad (8)$$

一般地, 可认为 $Z_{L(1)} = Z_{L(2)}$, 有

$$VI = \frac{V_{PCC(2)}}{V_{PCC(1)}} \times 100\% = \frac{I_{G(2)}}{I_{G(1)}} \times 100\% \quad (9)$$

其中: $U_{PCC(1)}$ 、 $U_{PCC(2)}$ 、 $I_{G(1)}$ 、 $I_{G(2)}$ 分别为 PCC 处的正、负序电压向量模值; G_1 注入 PCC 的正、负序电流向量模值。

值得注意的是, 当电网侧发生不对称短路时相当于在 PCC 处接入一负序电压源 G_2 , 如图 5 所示, 此时同样可能在 PCC 处产生较大负序电压, 造成电压不平衡度超过为孤岛检测设置的定值。

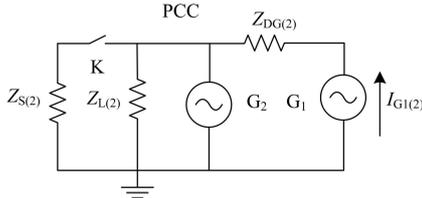


图 5 电网故障原理图

Fig. 5 Grid failure schematics

但是, 当发生不对称短路时, 只在故障瞬间和故障切除瞬间电压谐波畸变率很高, 经过很短的时间谐波畸变率会降到很低, 即其衰减时间常数通常很小, 因此新方法中, 采用当电压谐波畸变率达到设定的定值 (定值选择可参考表 1) 时, 向逆变器控制电路电流给定值 i_{abc}^* 加入负序分量, 当 PCC 电压不平衡度和总谐波畸变率超过各自孤岛检测定值的时间大于设定的延时定值即判孤岛发生, 此延时既要保证电网扰动时不能误判为孤岛, 保证孤岛检测的可靠性不发生误判, 又要满足 UL1741 规定的要求, 本文综合各因素设定为 0.1 s。孤岛检测原理框图如 6 所示。

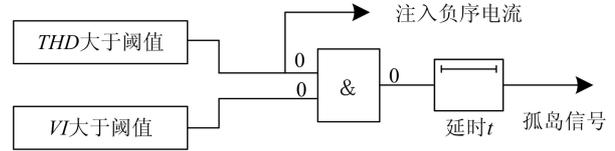


图 6 孤岛检测原理框图

Fig. 6 Block diagram of islanding detection

方法整体流程如图 7 所示。以电压谐波畸变率作为孤岛检测的启动判据而非孤岛检测判据, 降低了该判据的整定难度, 在一定程度上有利于提高检测速度。而当电压谐波畸变率超过定值时才注入负序电流的策略, 保证了在正常运行情况下最大可能地减少了对电网的干扰。

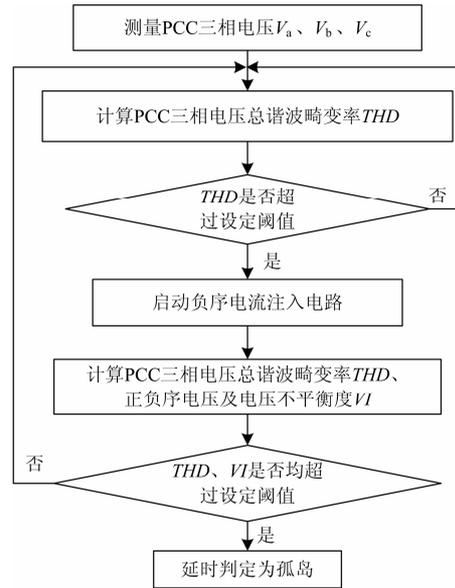


图 7 孤岛检测流程图

Fig. 7 Flow diagram of islanding detection

各定值方面, GB/T 15543-2008^[17]规定, 电力系统 PCC 正常工作电压不平衡度允许值为 2%, 短时间内不得超过 4%, 因此本文设置 C 为 0.04, 即注入 PCC 的电流不平衡度为 4%。根据式 (9), 电压不平衡度的阈值不应大于该值, 为保证孤岛检测的可靠性和灵敏性, VI 阈值可选为略低于 C 的取值, 本文取 3%。PCC 额定电压为 35 kV, 根据 GB/T 14549-1993 表 1 规定设置 THD 阈值为 3%, 即 PCC 电压总谐波畸变率超过 3%注入负序电流, 不超过 3%不注入负序电流, 光伏电源并网运行时从 PCC 向电网看去各次谐波阻抗很小, PCC 电压总谐波畸变率不超过该阈值, 孤岛时谐波阻抗变大, 光伏电源相当于一个谐波源, PCC 电压总谐波畸变率一般会超过该阈值, 为保证孤岛检测的可靠性又尽可能

减少对电网的干扰, 设置谐波畸变率定值为 2%。上述定值也可以根据正常运行的实测值乘以大于 1 的可靠系数进行整定。

3 孤岛检测仿真分析

仿真模型如图 1 所示。PCC 额定电压为 35 kV, 在 PCC 处设置两相短路、两相接地短路、单相接地短路来模拟电网发生不对称短路, 分析检测方法的有效性。设置的过渡电阻为 20Ω , 仿真总时长为 10 s, 在 2 s 发生 AB 两相短路, 2.5 s 故障切除; 在 4 s 发生 AB 两相接地短路, 4.5 s 故障切除; 在 6 s 发生 A 相接地短路, 6.5 s 故障切除; 在 8 s 断路器 K 断开 PV 孤岛运行, 同时考虑最不利孤岛检测的情况, 即 PV 容量与负荷容量匹配, PV 功率因数与负荷功率因数相同。

孤岛前后电压波形如图 8 所示, 公共连接点的电压变化如图 9 所示。由图 9 可知当 PV 容量与负荷容量匹配时, 发生故障时公共连接点电压下降, 由图 8、图 9 知孤岛瞬间公共连接点电压有瞬时波动, 以后基本保持原来水平不变, 可见当 PV 发出的功率与负荷功率匹配时基于电压偏移的方法很难检测出孤岛发生。

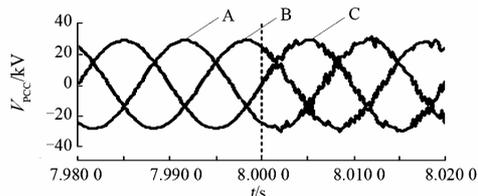


图 8 孤岛前后电压波形图

Fig. 8 Voltage waveforms before and after islanding state

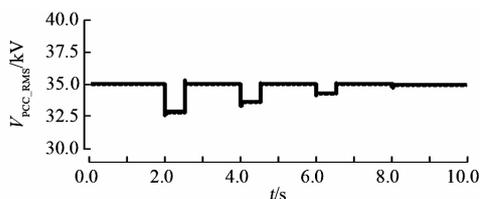


图 9 公共连接点电压变化

Fig. 9 Voltage variation of PCC

公共连接点的频率变化如图 10 所示, 可知当 PV 发出的功率与负荷功率匹配时, 孤岛时电网频率有小幅的变化但在规定的频率偏差范围内, 基于频率偏移的孤岛检测方法可能失效。

由图 11 可知, 正常运行时谐波电压畸变率为 0, 当电网发生故障和故障切除瞬间电压谐波畸变率有短时上升, 并很快衰减到 0; 孤岛时 PCC 电压发生

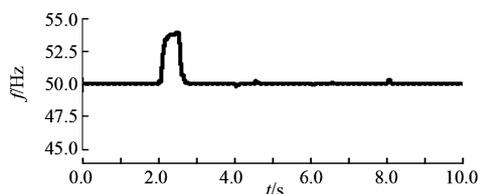


图 10 公共连接点频率变化

Fig. 10 Frequency variation of PCC

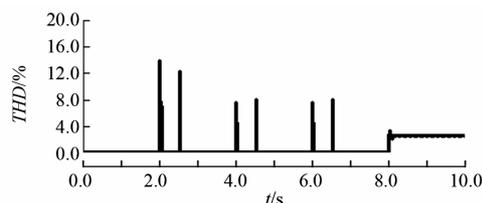


图 11 PCC 处电压谐波畸变率

Fig. 11 THD of the PCC voltage

畸变谐波含量上升, 电压谐波畸变率瞬时上升到 2.7% 后保持不变。

由图 12 可知当电网发生故障时 PV 注入 PCC 的负序电流不平衡度只出现瞬时上升, 此后很快跌落至 1% 以下; 故障切除时负序电流不平衡度有短时升高然后很快跌落至 0, 孤岛时 PV 注入 PCC 电流不平衡度迅速升至 4%。

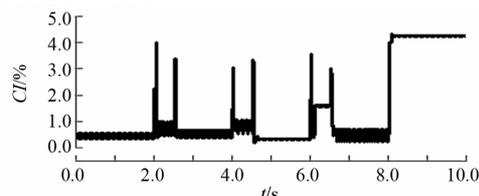


图 12 PCC 电流不平衡度

Fig. 12 CI of the PCC current

由图 13 可知当发生不对称故障时, 公共连接点电压不平衡度上升到大于 4% 的水平, 故障切除后电压不平衡度降为 0, 孤岛时电压不平衡度上升到 4%, 其等于负序电流注入的百分比, 满足式(9)。可见单纯依靠电压不平衡度检测孤岛易受电网不对称故障的影响, 可能产生误判。

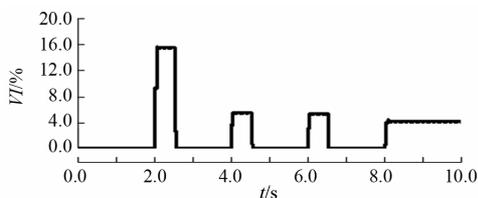


图 13 PCC 电压不平衡度

Fig. 13 VI of PCC voltage

孤岛检测结果如图 14 所示, 由图 14 可见本文方法避免了电网故障时孤岛检测的误判, 即主电网侧故障时不会误判为孤岛, 由图 15 可知真正出现孤岛情况后 0.13 s 即可成功检测, 远低于 GB/T 19939-2005 规定的 2 s。

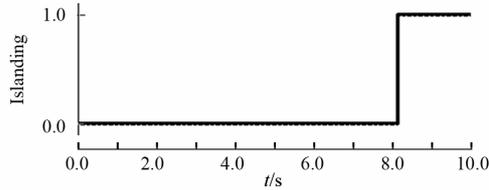


图 14 孤岛检测结果

Fig. 14 Result of the islanding detection

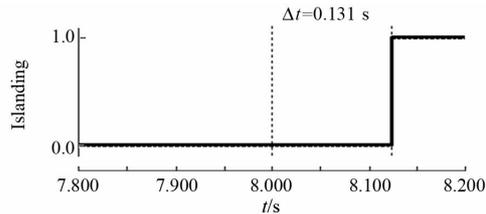


图 15 孤岛检测结果局部放大图

Fig. 15 Partial enlarged view of the detection result

4 结论

针对传统无盲区孤岛检测方法的不足, 提出一种基于电压谐波畸变率和电压不平衡度的负序电流注入式孤岛检测方法, 其在电网正常运行情况下不注入负序电流, 而在电网异常情况下注入负序电流, 与其他主动式孤岛检测方法相比具有对电网扰动小、抗干扰性强、孤岛检测速度快的特点。在 PV 功率与负荷功率匹配、电网电压电网频率都在规定的正常运行范围内的不利情况下仍能快速、有效地检测出孤岛。该方法为孤岛时分布式电源能够快速退出运行, 或使分布式电源由并网运行转入孤岛运行控制方式改变提供了参考。

参考文献

- [1] 徐青山. 分布式发电与微电网技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
XU Qing-shan. Distributed generation and micro-grid technology[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2011.
- [2] 刘芙蓉, 康勇, 段善旭, 等. 电压正反馈式孤岛检测方法的边界条件及改进算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 247-251.
LIU Fu-rong, KANG Yong, DUAN Shan-xu, et al. Boundary conditions of voltage shift techniques for islanding detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 247-251.
- [3] LIU F, KANG Y, ZHANG Y, et al. Improved SMS islanding detection method for grid-connected converters[J]. Renewable Power Generation, 2010, 4(1): 36-42.
- [4] 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.
MA Jing, MI Chao, WANG Zeng-ping. A novel islanding detection method based on positive feedback of voltage harmonic distortion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 47-50.
- [5] YU B, MATSUI M, SO J, et al. A high power quality anti-islanding method using effective power variation[J]. Solar Energy, 2008, 82(4): 368-378.
- [6] 贺眉眉, 李华强, 甘立勇. RLC 负荷模型分布式发电孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 7-11.
HE Mei-mei, LI Hua-qiang, GAN Li-yong. Islanding detection scheme evaluation for RLC load distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 7-11.
- [7] 郭小强, 邬伟扬. 微电网非破坏性无盲区孤岛检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 7-12.
GUO Xiao-qiang, WU Wei-yang. Non-devastating islanding detection for microgrids without non-detection zone[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 7-12.
- [8] KARIMI H, YAZDANI A, IRAVANI R. Negative-sequence current injection for fast islanding detection of a distributed resource unit[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(1): 298-307.
- [9] 马静, 米超, 王增平, 等. 基于负序电压分配因子的孤岛检测新原理[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 239-242.
MA Jing, MI Chao, WANG Zeng-ping, et al. A novel islanding detection method based on negative sequence voltage distribution factor[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 239-242.
- [10] JANG S I, KIM K H. An islanding detection method for distributed generations using voltage unbalance and total harmonic distortion of current[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 745-752.

- [11] 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 You-bing, MU Miao-jie, WENG Guo-qing. Research on islanding detection of distributed power generation systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 139-146.
- [12] 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 Qi-ming, WANG Ying-fei, CHENG Yin-man, 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.
- [13] GB/T 19939-2005 光伏系统并网技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [14] GB/T 14549-1993 电能质量公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [15] IEEE STD 1547 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. 2003.
- [16] UL STD 1741 inverters, converters, and controllers for use in independent power systems[S]. 2002.
- [17] GB/T 15543-2008 电能质量三相电压不平衡[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

收稿日期: 2014-03-06

作者简介:

崇志强(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护;

戴志辉(1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: daihuadian@163.com

焦彦军(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制。