

DOI: 10.7667/PSPC151921

# 基于无功电流扰动的孤岛与扰动辨识的研究

唐忠<sup>1</sup>, 朱瑞婷<sup>1</sup>, 张合栋<sup>2</sup>, 田梁玉<sup>1</sup>

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 国网山东省电力公司济宁供电公司, 山东 济宁 272111)

**摘要:** 为了防止孤岛检测时电网扰动的干扰并提高孤岛与电网扰动辨识的准确率, 提出了一种能够减小检测盲区且不带入有功功率扰动的孤岛与电网扰动辨识新方法。该方法是在检测到公共耦合点电压波动后, 通过注入周期性无功电流扰动, 迫使公共耦合点电压频率出现相应波动。利用小波分析分解公共耦合点电压频率信号得到的高频分量作为特征分量, 用神经网络进行孤岛与扰动的辨识。通过理论分析与仿真实验证明该方法能准确辨识孤岛与电网扰动。

**关键词:** 孤岛检测; 无功电流; 频率波动; 小波分析; 神经网络

## Identification research of the island and the disturbance based on reactive current disturbance

TANG Zhong<sup>1</sup>, ZHU Ruiting<sup>1</sup>, ZHANG Hedong<sup>2</sup>, TIAN Liangyu<sup>1</sup>

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Jining Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Jining 272111, China)

**Abstract:** In order to prevent the interference of power network disturbance and improve the accuracy of island and the disturbance identification, this paper proposes a new identification method of the island and the disturbance, which can reduce the non-detection zone and the active power disturbance. When the voltage fluctuation is detected, a periodic reactive disturbing current which affects the voltage frequency of the point of common coupling is applied. The high frequency component of the common coupling point voltage frequency signal decomposed by wavelet analysis is put into the neural network as the characteristic component to identify. Theoretical analysis and simulation results prove that the method can accurately identify island and grid disturbances.

**Key words:** islanding detection; reactive current; frequency fluctuation; wavelet analysis; neural network

## 0 引言

随着世界范围内能源危机的爆发, 分布式发电逐渐进入人们的视线。然而, 大规模的分布式发电并网运行对整个电力系统带来了挑战, 其中孤岛检测即是一个亟待解决的技术难题。孤岛检测过程中有时会被电网扰动所干扰, 发电系统并网处公共耦合点(Point of common coupling, PCC)电压发生变化时, 不能区分是电网扰动还是孤岛效应, 极易出现孤岛检测的误判, 以致不能及时采取有效措施来应对孤岛发生时电压波动对负荷的影响。传统的被动孤岛检测方法<sup>[1-3]</sup>, 存在较大的检测盲区; 相较于被动检测法, 主动检测法<sup>[4-9]</sup>通过注入干扰信号检测孤岛效应, 可以减小检测盲区, 但具有破坏性, 容易引起光伏电源并网和离网模式切换过程中的过电流或过电压, 不利于两种模式的平滑切换。

针对传统孤岛检测方法的不足, 小波分析与神经网络近年来被应用于孤岛检测。小波分析具有极强的信号分析处理能力; 神经网络作为一种人工智能算法, 以其特定的训练学习算法, 进行有效分类与识别。现有的孤岛与电网扰动辨识方法中一般先用小波分析进行特征分量的提取, 再用神经网络对电网扰动与孤岛进行分类, 只是依靠现代算法的自主学习, 没有提出具体的分类原理, 并且分类的准确率较低<sup>[10-11]</sup>, 效果并不理想。

为了避免传统孤岛检测方法可能引发的问题, 本文通过注入周期性无功电流扰动, 迫使PCC点电压频率出现相对应波动, 利用小波分析和神经网络对特征分量进行提取并分类。通过理论分析, 注入周期性无功电流扰动以后, 若发生孤岛效应, 公共耦合点电压频率出现周期性波动; 若为电网扰动, 公共耦合点电压频率出现非周期性的并总在额定频

率附近的波动, 并会带入部分高频分量。当公共耦合点电压变化时, 该方法能够快速准确地辨识出孤岛或者电网扰动, 减小了不可检测域的存在, 并且对于检测的速度也有一定的优化, 还有利于在完成在确定孤岛发生后能“无缝转换”到孤岛运行模式<sup>[12]</sup>。

### 1 孤岛与扰动辨识基本原理

光伏并网发电的基本原理图如图 1 所示, 系统正常工作时, 断路器 K 处于闭合状态, 系统此时属并网运行, 电网和光伏发电系统同时向负载供电; 当电网由于电气故障或误操作等原因停电时, 即断路器处于断开的状态时, 光伏系统没能及时的检测到, 还是持续的将电能供给负载, 所以孤岛效应就在负载和光伏发电系统之间产生了自给供电。

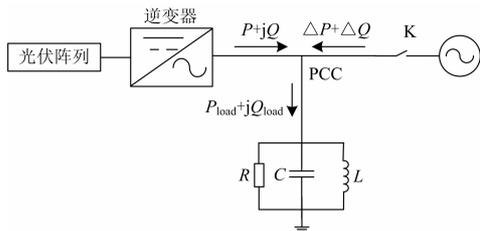


图 1 光伏微网基本原理图

Fig. 1 Basic principle diagram of photovoltaic (PV) microgrid

光伏逆变器并网控制策略如图 2 所示, 有功电流参考值和无功电流参考值直接影响到逆变器输出的有功功率、无功功率及功率因数, 有功电流与其参考值的误差信号经过 PI 调节器, 再经过前馈解耦分量可以得到  $V_d$ , 同理也可以得到  $V_q$ ,  $V_d$ 、 $V_q$  经过 SVPWM 得到控制光伏逆变器开关的信号。有功电流和无功电流是光伏逆变器网侧电流在  $dq$  同步旋转坐标系下得到的电流分量<sup>[13]</sup>, 一般无功电流参考值为零 (即 S1 闭合), 以达到逆变器单位功率因数运行, 保证逆变器电流与电网电压同频同相运行。

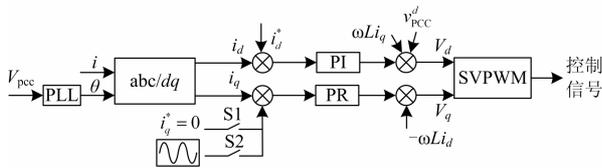


图 2 光伏逆变器控制框图

Fig. 2 Photovoltaic (PV) inverter control

光伏发电系统的逆变器输出到网侧的有功功率、无功功率分别为

$$P = \frac{3}{2}(V_d i_d + V_q i_q) \quad (1)$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_d i_q - V_q i_d) \quad (2)$$

电网电压在理想的情况下可以假定为正弦波,

那么, 则有

$$V_d = \sqrt{2}U \quad (3)$$

$$V_q = 0 \quad (4)$$

其中,  $U$  为电网相电压有效值。

将式(4)代入式(1)、式(2)可以得到:

$$P = \frac{3}{2}V_d i_d \quad (5)$$

$$Q = \frac{3}{2}V_d i_q \quad (6)$$

由于, 本地负载可以用  $R, L, C$  并联电路等效代替, 因此本地负载消耗的有功电流、无功电流也可以表达为

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (7)$$

$$Q = \frac{U^2}{\omega L} - U^2 \omega C \quad (8)$$

式中:  $R, L, C$  分别表示本地负载等效的  $R, L, C$  的值;  $\omega$  为电网所在负载的电压角频率。

负载的品质因数表示为

$$Q_f = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (9)$$

将式(7)、式(9)代入式(8)可以得到  $\omega$  的表达式为

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(1 - \frac{1}{2 PQ_f}\right) \quad (10)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (11)$$

将式(5)、式(6)、式(11)代入式(10)可以得到

$$i_q = 2i_d Q_f \left(1 - \frac{2\pi}{\omega_n}\right) \quad (12)$$

式中:  $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。

当有功电流与负载品质因数不变时, 电压频率与无功电流成线性相关, 即保持有功电流不变时, 当无功电流呈周期性变化, 电压频率也呈周期性变化。

并网扰动情况下, 注入周期性无功电流扰动后, 由于受大电网的钳制作用公共耦合点电压频率呈非周期性变化, 并总在额定频率附近的波动。孤岛效应发生时, 由于不受电网的钳制作用, 当无功功率呈正弦周期性变化, 电压频率也呈正弦周期性变化。

为了保证光伏发电系统的能源利用率,  $i_q^*$  一般取 0 值 (即 S1 闭合), 以达到功率因数为 1 运行。在 PCC 处电压发生波动时, 为了辨识所处状态为孤岛还是电网扰动, 注入正弦周期性无功电流, 即  $i_q^*$  不再为 0, 本文取  $i_q^*$  为 1% 倍的  $i_d^*$  (即 S2 闭合)。因为为了保证不脱网, 即光伏逆变器保护不动作, 需要使光伏逆变器输出电流不过流, 限制输出电流在 1.1

倍额定电流之内, 则无功电流参考值应满足  $i_q^* < \sqrt{(1.1I_N)^2 - i_d^{*2}}$  [14]。

## 2 孤岛与扰动辨识原理

### 2.1 小波分析理论

对于分析瞬变信号, 小波变换尤其有效[15], 因此可以把小波变换用于检测孤岛与扰动辨识中的电压频率特征分量的提取。对信号分析进行小波分析时母小波的选取, 会直接影响到孤岛与电压扰动辨识的准确率。母小波的紧支性能减少特征分量分解时各分解级之间能量的损失, 突出了小波分析的局部分析能力。因为  $db_N$  小波系( $N$  为小波序号)紧支性较好, 而且具有小波的消失矩、正交性等所有特性, 使其非常适用于分析瞬态信号。其中  $db_4$  小波具有紧凑的特点, 处理后信号特征量差异最明显, 故选择  $db_4$  小波作为此次辨识用的母小波。

公共耦合点 PCC 点电压频率通过小波变换的多分辨分析获取了频率的三组离散小波分解序列, 分别与不同尺度下的小波序列相对应, 电压频率的特征能在不同的尺度下被反映出来。由于根据分解后的小波细节系数, PCC 点电压频率的高频分量可以实时地被捕捉到, 因此本文对小波细节系数进行检测。由香农定理, 特征分量的高频分量可最多被分解到基波以上第 7 层, 由于孤岛检测电压值小波分解后的第 4 层及以上高频系数的高频分量已很不显著, 所以下面仅仅将电压频率值小波分解到第 3 层。通过仿真实验可以看出孤岛与电网扰动时第一、二、三阶小波高频系数表现出明显的不同, 因此可以用第一、二、三阶小波高频系数  $d1$ 、 $d2$ 、 $d3$  作为孤岛与电网扰动辨识的特征分量。

### 2.2 神经网络理论

神经网络的复杂程度越低, 其实时性的进行孤岛与扰动辨识的准确性越高。为了使神经网络的分析过程得到简化, 神经网络的输入量个数不宜过多, 因此, 对于识别分辨率很小的特征量将不作为神经网络的输入量, 因识别分辨率很小的特征量对结果影响较小, 这样准确率不会受到较大影响[16]。本文将电压频率经过小波分解后第一、二、三层高频系数  $d1$ 、 $d2$ 、 $d3$  作为神经网络中输入层的三个特征值, 输入到神经网络系统, 进行学习、训练。当测量到 PCC 点电压波动并注入周期性无功电流扰动后, 测量得到实际电压频率值, 小波神经网络就可以辨识出孤岛与电网扰动, 然后给分布式并网系统的控制装置部分发送信号, 在孤岛现象发生时, 采取相应措施“无缝切换”到孤岛运行状态。

BP 网络输入层节点数和输出层节点数分别取

决于训练的样本向量的维数和分类类别数[17]。本文选取的 BP 神经网络特征向量是 3 个信号, 所以设定输入层节点数为 3 个。输出层仅对光伏微网系统的当前工作状态进行分类, 即孤岛状态与电网扰动状态, 所以设定输出层节点数为 2 个。因此, 神经网络采用两层 BP 网络训练函数选择 *tansig* 函数, 根据设计的需要, 输入层为 3 个输入单元, 而隐层节点个数根据经验公式(13)选择为 6 个。

$$n = \sqrt{n_i + n_o} + a \quad (13)$$

式中:  $n$  为隐层节点个数;  $n_i$  为输入节点数;  $n_o$  为输出节点数;  $a$  为 1~10 之间的任意常数。

由于要区分的只是两类情况, 即孤岛和电网扰动情况, 而 BP 神经网络的输出值可以限定在 [0,1] 范围内, 理想网络输出向量与孤岛识别分类对应关系如表 1 所示。

表 1 孤岛与扰动辨识理想网络输出向量对应关系

Table 1 Correspondence between network output and classification

节点名称	孤岛	电网扰动
输出节点 1	0	1
输出节点 2	1	0

### 2.3 孤岛与扰动辨识流程

通过理论分析, 当 PCC 点电压发生波动时, 对其注入周期性无功电流扰动, 若为孤岛状态, PCC 点电压频率也会产生周期性的波动, 由于与大电网隔离, 其高频分量表现较为平滑; 若为电网扰动, 由于大电网的钳制作用, 公共耦合点电压频率若出现非周期性的并总在额定频率附近的波动, 并引入了轻微高频分量。

孤岛与电网扰动辨识流程图如图 3 所示, 当光

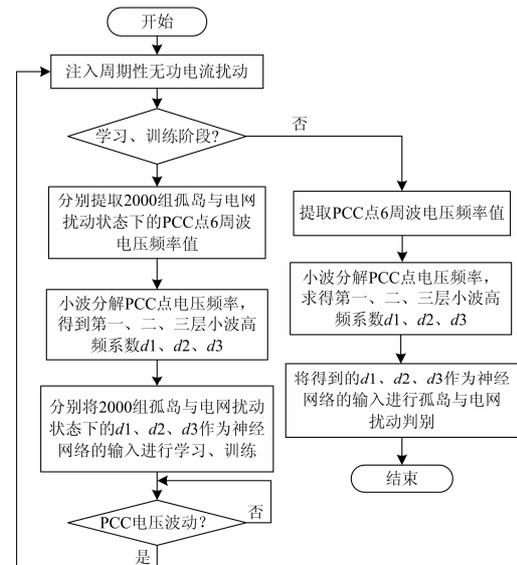


图 3 孤岛与扰动辨识流程图

Fig. 3 Flow chart of island and the disturbance identification

光伏发电系统 PCC 点处电压发生变化时,在检测到电压波动后,开始注入周期性无功电流扰动,同时采样 6 周波的 PCC 点电压频率,通过使用小波分解 PCC 点电压频率得第一、二、三层小波高频系数  $d1$ 、 $d2$ 、 $d3$ ,将  $d1$ 、 $d2$ 、 $d3$  作为特征向量输入到神经网络,利用神经网络的自学习修正算法进行孤岛与电网扰动的区分,以便确定是否控制相应的保护装置来改变当前的工作状态模式,从而确保电网的稳定运行。

### 3 仿真实验

仿真电路的具体参数设置如下:逆变器额定功率为 10 kW,开关频率为 10 kHz,母线电压为 680 V,三相等效负载中  $R$  为 14.5  $\Omega$ ,  $L$  为 18.47 mH,  $C$  为 549.05  $\mu\text{F}$ ,电网额定相电压为 220 V,电网额定频率为 50 Hz。负载品质因数为 2.5,负载谐振频率为 50 Hz。参数这样设置的目的是让孤岛发生后对光伏逆变器的输出影响最小,从而能够模拟最恶劣情况下孤岛与电网扰动辨识。

当检测到 PCC 点电压波动时,将无功电流参考值转变为正弦周期性信号,在公共耦合点 PCC 处采样电压频率值,由于 PCC 点电压频率的被检测值是模拟频率信息,需先把模拟电压频率量转变成数字量信息,出于对采样信号准确性的考虑,采样频率采用高频 6 400 Hz,也就是采样速率为 128 点每周波,然后对数字量信息进行数字低通滤波、降噪处理;最后对经过数字处理后的数据量进行小波分解,本文采用三阶小波分解。

小波分解首先对采集电压频率值进行多尺度分解,将提取的各尺度小波系数的某些特征量组成特征向量送入 BP 神经网络进行训练,最后利用训练好的 BP 神经网络判别出是发生了孤岛还是电网扰动。图 4 为 PCC 点电压在 0.02 s 波动时, PCC 点电压波形图,由波形图可以看出 0.02 s 时刻开始电压出现波动。图 5 分别为 DG 输出有功、无功电流波形图, DG 输出有功、无功功率图,可以看出 0.02 s 前光伏逆变器无功电流为 0,没有无功功率输出,此时输出的功率因数为 1;在 0.02 s 注入周期性无功电流扰动以后,有功电流、有功功率输出没有明显变化,即无有功功率扰动,无功电流、无功功率输出呈现周期性变化。图 6、图 7 分别为孤岛、电网扰动情况下 PCC 电压频率,孤岛情况下, PCC 电压频率呈明显周期性变化;电网扰动时, PCC 电压频率呈非周期性变化,但不能呈现出理论分析中的高频分量。

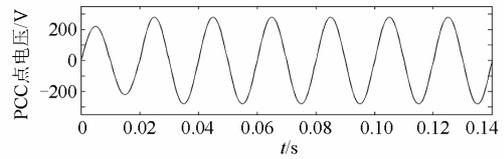


图 4 PCC 点电压波形图

Fig. 4 Voltage waveform graph of PCC

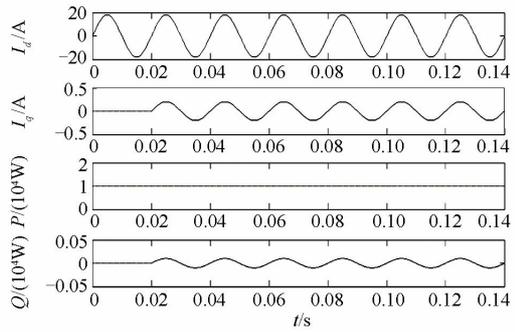


图 5 DG 输出仿真图

Fig. 5 DG output simulation diagram

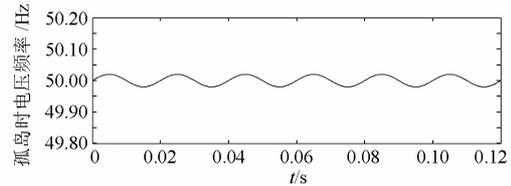


图 6 孤岛时 PCC 电压频率

Fig. 6 PCC voltage frequency when islanding

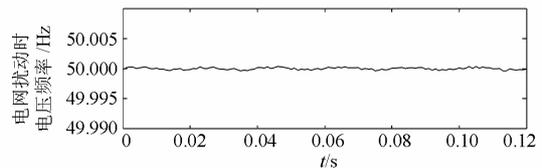


图 7 电网扰动时 PCC 电压频率

Fig. 7 PCC voltage frequency at power disturbance

为了验证本文提出的方法,先分别采集发生孤岛与电网扰动后的 768 个(6 周波, IEEE.std 1547 规定的孤岛检测最短时间)电压频率值进行小波分解,所得图形来解释孤岛与电网扰动辨识时电压频率高频分量的变化。

从图 8、图 9 可以看出,当注入周期性无功电流扰动后,孤岛时, PCC 点电压频率的第一、二、三阶小波高频系数发生了周期性变化;电网扰动时,由于带入了高频分量, PCC 点电压频率信号的第一、二、三阶小波高频系数非周期性变化。由于两种状态下小波分解后电压频率变化明显,小波分析可以迅速地捕捉到电压波动带来的细节分量的变化,因此可作为特征分量的提取方式,达到孤岛与

电网扰动快速准确的辨识。

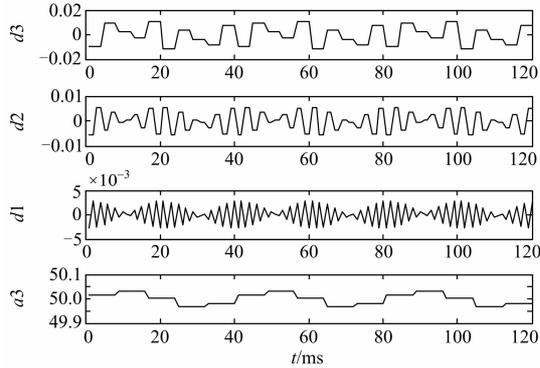


图 8 孤岛时, 电压频率信号经三阶小波分解后所得高、低频分量

Fig. 8 Voltage frequency signal by the three order wavelet decomposition after the high, low frequency component when islanding

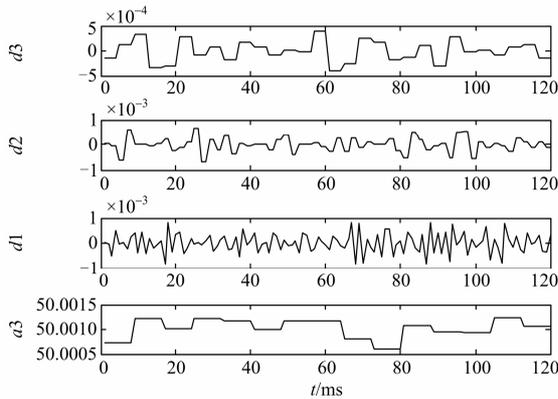


图 9 电网扰动时, 电压频率信号经三阶小波分解后所得高、低频分量

Fig. 9 Voltage frequency signal by the three order wavelet decomposition after the high, low frequency component when disturbance

下面分别取 2 000 组经小波分解后的孤岛与电网扰动时 PCC 点电压频率信号的  $d1$ 、 $d2$ 、 $d3$  数据进行学习、训练。算法训练网络的误差演化曲线如图 10 所示, 纵坐标为网络均方误差, 横坐标为迭代次数。由图 10 可以看出, 用 BP 算法训练神经网络, 在规定迭代次数内, 均可以使网络误差迅速降到 0.001 以下, 有较好的收敛效率。

从隐含层神经元的选择结果来看, 合适的神经元个数为 6, 因此, 用于孤岛与电网扰动辨识的 BP 神经网络结构为输入层节点数为 3, 隐含层节点数为 6, 输出层节点数为 2, 激活函数为 S 形对数函数  $logsig$ 。

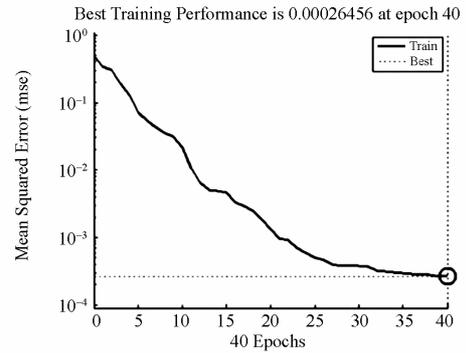


图 10 隐含层节点为 6 时误差收敛曲线

Fig. 10 Error convergence curve of 6 hidden layer nodes

在验证算法识别率时, 再分别取 2 000 个孤岛与电网扰动时的电压频率数据进行小波分解后输入到神经网络进行测试、验证。当这 2 000 组  $d1$ 、 $d2$ 、 $d3$  输入神经网络后, 若输出全为 0, 则判为电网扰动状态; 若输出数据中含有 1, 则判为电网发生孤岛效应。在 Matlab 界面中, 验证网络目标等级混淆矩阵图 11 如下。

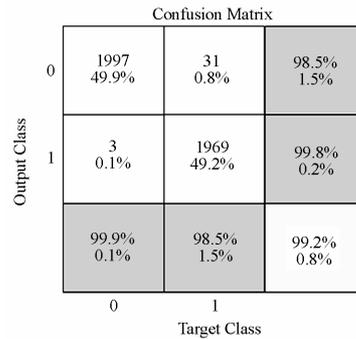


图 11 BP 神经网络目标等级混淆矩阵

Fig. 11 Confusion matrices of BP neural network

图 12 即为神经网络形成的实验误差直方图, 由仿真结果图可知此次仿真实验误差直方图分布, 仿真结果的正确率如表 2 所示。

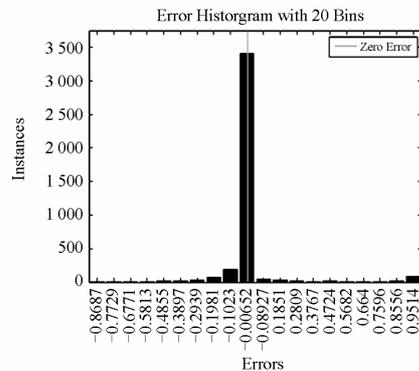


图 12 BP 神经网络仿真实验误差直方图

Fig. 12 Simulation in BP neural network and error histogram

表 2 小波神经网络仿真结果  
Table 2 Simulation results of wavelet neural network

	样本数	输出为 1 的组数	输出为 0 的组数	正确率
孤岛运行	2 000	1 969	31	98.45%
电网扰动	2 000	3	1 997	99.85%

由表 2 得知, 基于小波神经网络的孤岛效应检测方法可以较准确的检测出孤岛效应的发生, 准确率较高。

#### 4 结论

通过以上分析, 注入周期性无功电流扰动, 并运用小波分析和人工神经网络的技术, 能在无有功功率扰动的条件下将孤岛和电网扰动辨识出来, 并且系统的正常运行不会被破坏。对电压频率信号进行特征提取过程中, 采用基于各尺度小波变换系数能量的提取特征量方法, 提取出的特征向量不仅具有平移不变的特性, 还反映信号的时频局部特征, 提高了孤岛检测的实时性。采用具有强大的模式识别能力的三层 BP 神经网络, 能有效辨识孤岛和电网扰动状态。这种无破坏性的基于周期性无功电流扰动和小波神经网络的孤岛与扰动辨识方法可以快速而准确的检测出孤岛效应的发生, 并当检测到孤岛效应发生时, 为保障逆变器所带负载正常安全供电, 应启动孤岛保护, 脱离电网, 转为孤岛运行。

#### 参考文献

- [1] 曾议, 吴政球, 刘杨华, 等. 分布式发电系统孤岛检测技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(3): 106-110.  
ZENG Yi, WU Zhengqiu, LIU Yanghua, et al. Islanding detection method for distributed generation systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(3): 106-110.
- [2] MAHAT P, CHEN ZHE, BAK-JENSEN B. Review of islanding detection method for distributed generation[C] // Third International Conference on Electric Unity Deregulation, Nanjing, China: 2008.
- [3] 高金辉, 李迎迎, 苏军英. 一种新颖的孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 122-124.  
GAO Jinhui, LI Yingying, SU Junying. The research on a novel islanding detection method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 122-124.
- [4] 唐伟, 武建文, 李鹏, 等. 考虑电网内阻影响的孤岛检测研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 399-407.

- TANG Wei, WU Jianwen, LI Peng, et al. Research on islanding detection considering the effect of grid impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 399-407.
- [5] 崇志强, 戴志辉, 焦彦军. 基于负序电流注入的光伏并网逆变器孤岛检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 65-71.  
CHONG Zhiqiang, DAI Zhihui, JIAO Yanjun. Islanding detection method based on grid-connected photovoltaic converter and negative sequence current injection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 65-71.
- [6] 郑涛, 袁飞, 王燕萍, 等. 基于模糊控制的快速无盲区的频移式孤岛检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 38-43.  
ZHENG Tao, YUAN Fei, WANG Yanping, et al. A fast frequency drifts islanding-detecting method without non-detecting zone based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 38-43.
- [7] 张凯航, 袁越, 傅质馨. 带频率正反馈的无功电流扰动孤岛检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 96-101.  
ZHANG Kaihang, YUAN Yue, FU Zhixin. Reactive current disturbance islanding detection method with frequency positive feedback[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(1): 96-101.
- [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.  
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] 任晓鹏, 李永刚, 李亚斌, 等. 滑动频率偏移法在光伏并网逆变器孤岛检测中的应用[J]. 电器与能效管理技术, 2014(4): 37-39.  
REN Xiaopeng, LI Yonggang, LI Yabin, et al. Application of slid-mode frequency shift method in islanding detection of photovoltaic grid-connected inverter[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(4): 37-39.
- [10] 梁雪飞, 陈歆技. 小波熵和 BP 神经网络在孤岛检测与扰动辨识中的应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(3): 5-8.  
LIANG Xuefei, CHEN Xinji. Applications of wavelet

- entropy and BP neural network in islanding detection and disturbance identification[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2012, 31(3): 5-8.
- [11] 朱艳伟, 石新春, 李鹏. 多分辨率奇异谱熵和支持向量机在孤岛与扰动识别中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(7): 64-70.  
ZHU Yanwei, SHI Xinchun, LI Peng. Classification of islanding and grid disturbance based on multi-resolution singular spectrum entropy and SVM[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(7): 64-70.
- [12] 张明锐, 杜志超, 王少波, 等. 高压微网运行模式切换控制策略[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(2): 153-162.  
ZHANG Mingrui, DU Zhichao, WANG Shaobo, et al. Control strategies of high-voltage microgrid for operation modes switching[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2): 153-162.
- [13] 闫凯, 张保会, 瞿继平, 等. 光伏发电系统暂态建模与等值[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(1): 1-8.  
YAN Kai, ZHANG Baohui, QU Jiping, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(1): 1-8.
- [14] 王巨波, 鲍伟, 徐文丽. 基于 RTDS 的光伏发电系统对称跌落低电压穿越无功控制策略[J]. *华东电力*, 2014, 42(6): 1098-1103.  
WANG Jubo, BAO Wei, XU Wenli. Reactive control strategy for symmetrical low voltage ride through of photovoltaic system based on RTDS[J]. *East China Electric Power*, 2014, 42(6): 1098-1103.
- [15] HSIEH C T, LIN J M, HUANG S H. Enhancement of islanding -detection of distributed generation systems via wavelet transform-based approach[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2008, 30(10): 575-580.
- [16] 田金波, 赵智忠, 毕海岩. 基于 DSP 的 BP 神经网络真空度数据采集系统[J]. *高压电器*, 2014, 50(12): 47-54.  
TIAN Jinbo, ZHAO Zhizhong, BI Haiyan. Vacuum level acquisition system of BP neural network based on DSP[J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, 50(12): 47-54.
- [17] 朱金大, 陈良亮, 张卫国. 基于 BP 神经网络的充放电机电故障诊断[J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(10): 1-3.  
ZHU Jinda, CHEN Liangliang, ZHANG Weiguo. Fault diagnosis for charging and discharging machine based on BP neural network[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 31(10): 1-3.

收稿日期: 2015-10-31; 修回日期: 2016-01-04

作者简介:

唐 忠 (1964-), 男, 教授, 硕士生导师, 从事电力系统运行与控制电力信息技术、基于电力电子技术的节能技术、电力安全技术等的研究; E-mail: tangzhong64@163.com

朱瑞婷 (1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事电力系统运行与控制研究。E-mail: ruiting728@163.com

(编辑 葛艳娜)