

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231514

## 基于低频扰动的多分布式电源孤岛检测方法

杨帆<sup>1</sup>, 杨志淳<sup>1</sup>, 陈鹤冲<sup>1</sup>, 雷杨<sup>1</sup>, 徐丙垠<sup>2</sup>, 张新慧<sup>2</sup>

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077;

2. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:** 针对被动法检测盲区较大和主动法易产生稀释效应的问题, 提出基于主、被动结合的多分布式电源(distributed generation, DG)孤岛检测方法。首先, 该方法利用有源电力滤波器(active power filter, APF)实现无功功率扰动, 即通过扰动 APF 的  $q$  轴参数来控制其输出频率为 2 Hz 的无功功率, 以扰动孤岛频率周期性波动。然后, 利用小波分解和小波重构算法提取频率信号中的低频分量。最后, 利用快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)算法计算 2 Hz 低频分量的幅值并判断是否越限, 以实现多 DG 孤岛检测。Matlab/Simulink 建模仿真结果表明: 该方法能够有效地避免稀释效应, 实现多 DG 孤岛检测。

**关键词:** 有源配电网; 多分布式电源; 孤岛检测; 小波分解与重构; 主、被动结合

### Islanding detection method for multiple distributed power sources based on low-frequency disturbances

YANG Fan<sup>1</sup>, YANG Zhichun<sup>1</sup>, CHEN Hechong<sup>1</sup>, LEI Yang<sup>1</sup>, XU Bingyin<sup>2</sup>, ZHANG Xinhui<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China;

2. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** There are problems of large blind spots in passive detection and dilution effects in active detection. Thus this paper proposes a multi-distributed generation (DG) islanding detection method based on active/passive combination. First, this method uses an active power filter (APF) to achieve reactive power disturbance. This controls the reactive power output frequency of 2 Hz by perturbing the  $q$ -axis parameters of the APF, in order to perturb the periodic fluctuations of islanding frequency. Then, wavelet decomposition and wavelet reconstruction algorithms are used to extract low-frequency components from frequency signals. Finally, the fast Fourier transform (FFT) algorithm is used to calculate the amplitude of the 2 Hz low-frequency component and determine whether it is out of limit, to achieve multi-DG island detection. The modeling and simulation results using Matlab/Simulink show that this method can effectively avoid dilution effects and achieve multi-DG island detection.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5400-202322206A-1-1-ZN).

**Key words:** active distribution network; multiple distributed generators; islanding detection; wavelet decomposition and reconstruction; active/passive combination

## 0 引言

近年来, 随着分布式电源并网技术的发展, 越来越多的分布式电源(distributed generation, DG)接入配电网。当配电网因故障或检修等原因中断供电时, 易形成仅由分布式电源与负载构成的非计划孤

岛<sup>[1-3]</sup>。然而, 未配置储能装置的分布式电源可能难以满足孤岛负载的功率需求, 易导致孤岛电压和频率发生偏移, 损坏电气设备。此外, 非计划孤岛的运行会给检修人员的安全带来威胁, 因此, 分布式电源必须具备防孤岛保护功能<sup>[4-6]</sup>。

目前, 防孤岛保护方法主要分为远程法、被动法和主动法, 其中, 远程法通过检测电网侧断路器的状态实现防孤岛保护功能, 具有对电网扰动小的优点, 但投资费用较高<sup>[7]</sup>; 被动法根据 DG 并网点

**基金项目:** 国家电网有限公司总部科技项目资助 (5400-202322206A-1-1-ZN)

电压/频率的幅值<sup>[8]</sup>、电压谐波含量<sup>[9]</sup>或电压相位突变变量<sup>[10]</sup>是否越限实现孤岛检测, 具有原理简单、投资费用低的优点, 但孤岛检测盲区较大; 主动法可分为频率扰动法和功率扰动法, 其中, 频率扰动法可分为主动频率偏移法(active frequency drift, AFD)<sup>[11]</sup>、Sandia 频率偏移法(Sandia frequency shift, SFS)<sup>[12]</sup>和滑模频率偏移法(slip-mode frequency shift, SMS)<sup>[13]</sup>等, 功率扰动法可分为有功功率扰动法<sup>[14-15]</sup>和无功功率扰动法<sup>[16-18]</sup>等, 主动法的优点是检测盲区较小, 缺点是注入的扰动量会降低并网运行时 DG 的发电利用率和输出的电能质量<sup>[19]</sup>。

对于多 DG 孤岛检测, 由于 AFD 法、有功功率扰动法和无功功率扰动法的扰动策略为双向扰动, 故扰动方向相反时可能会产生稀释效应。由于 SFS 法和 SMS 法的扰动方向受孤岛频率偏移方向的影响, 故频率偏移较小时易产生稀释效应<sup>[20-22]</sup>, 上述两种稀释效应均可能导致多 DG 孤岛检测失败。

针对主动法易因稀释效应导致多 DG 孤岛检测失败的问题, 本文通过研究有源电力滤波器(active power filter, APF)的控制原理和孤岛无功功率平衡与频率的关系, 提出了基于低频扰动的多 DG 孤岛检测方法, 即控制 APF 向其并网点注入频率为 2 Hz 的无功功率扰动, 进而利用小波分解和小波重构算法提取 DG 并网点电压信号频率的低频分量, 并利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)算法计算 2 Hz 低频分量的幅值, 从而根据该幅值是否越限来实现孤岛检测功能。

## 1 孤岛频率与无功功率平衡的关系

受光伏板表面光照强度和温度波动的影响, 分布式电源的输出功率具有波动性, 因此, 为了满足 DG 并网点的电能质量要求, 其一般运行在并网状态, 并网示意图如图 1 所示, APF 可降低铁磁型、电子开关型和电弧型负载对电网电能质量的影响。

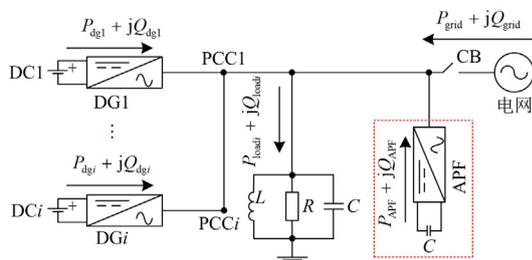


图 1 多 DG 并网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-DG grid connection

由图 1 可知, 当 DG 并网运行时, 负载所需的功率由电网、分布式电源和有源电力滤波器共同提

供, 如式(1)和式(2)所示。

$$P_{\text{load}} = P_{\text{grid}} + \sum_{i=1}^n P_{\text{dgi}} + P_{\text{APF}} = 3 \frac{U_{\text{load}}^2}{R} \quad (1)$$

$$Q_{\text{load}} = Q_{\text{grid}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{dgi}} + Q_{\text{APF}} = 3U_{\text{load}}^2 \left( \frac{1}{2\pi fL} - 2\pi fC \right) \quad (2)$$

式中:  $n$  为 DG 数量;  $P_{\text{load}}$  和  $Q_{\text{load}}$  分别为负载消耗的有功功率和无功功率;  $P_{\text{grid}}$ 、 $P_{\text{dgi}}$ 、 $P_{\text{APF}}$  和  $Q_{\text{grid}}$ 、 $Q_{\text{dgi}}$ 、 $Q_{\text{APF}}$  分别为电网、各 DG 和 APF 输出的有功功率、无功功率;  $U_{\text{load}}$ 、 $f$  分别为负载的电压有效值和频率;  $R$ 、 $L$ 、 $C$  分别为负载的等效电阻、等效电感和等效电容。

当发生孤岛效应时,  $P_{\text{grid}} = Q_{\text{grid}} = 0$ ; 由能量守恒定律可知, APF 直流侧稳压电容的输出有功功率  $P_{\text{APF}}$  为 0。将式(1)代入式(2), 化简后可得

$$f = \frac{-\frac{QL}{P_{\text{load}}R} + \sqrt{\left(\frac{QL}{P_{\text{load}}R}\right)^2 + 4LC}}{4\pi LC} \quad (3)$$

式中,  $Q = \sum_{i=1}^n Q_{\text{dgi}} + Q_{\text{APF}}$ 。

当 DG 并网运行时, 受电网钳位作用的控制, 其并网点电压的频率围绕 50 Hz 波动。当发生孤岛效应时, 由式(3)可知, 孤岛无功功率的不平衡会引起 DG 并网点电压的频率发生偏移, 因此, 对于单 DG 孤岛, 可利用 DG 注入无功功率扰动以打破孤岛功率平衡, 从而实现单 DG 孤岛检测。然而, 对于多 DG 孤岛, 由于其扰动方向与各自的控制策略有关, 故难以实现各 DG 的同向扰动, 从而产生稀释效应, 导致多 DG 孤岛检测失败。

由上述分析可知, 当电网侧开关(circuit breaker, CB)断开时, 为了扰动多 DG 孤岛的频率, 可利用 APF 进行无功功率扰动, 如图 1 中红色虚线框所示。由式(3)可知, 在发生孤岛后的数秒内, 可认为 DG 输出的无功功率和负载所需的无功功率保持不变, 故孤岛频率的偏移程度仅与 APF 注入无功功率扰动的幅度和发生孤岛前电网输送无功功率的数值有关, 因此, 该方法可有效地避免稀释效应, 实现多 DG 孤岛检测。

## 2 低频无功扰动的孤岛检测方法

### 2.1 无功功率的扰动控制

#### 1) 有源电力滤波器的控制原理

以电力电子器件为代表的非线性负载会产生大量的谐波电流, 严重降低配电网的电能质量, 目前常

用的手段是在配电变压器低压侧安装有源电力滤波器，以补偿非线性负载所需的谐波电流，尽可能地提高电能质量，其中，APF 的控制框图如图 2 所示。

由图 2 可知，该控制步骤如下所述：1) 利用 Park 变换将 abc 坐标系下含有谐波分量的交流电流变换为 dq0 坐标系下脉动的直流电流；2) 分别利用低通滤波器提取 d 轴和 q 轴的直流分量，即 abc 坐标系

下三相电流中的工频分量，并利用直流侧电容电压实际值与设定值的差值调节 d 轴电流；3) 利用 Park 反变换将 dq0 坐标系下的直流电流变换为 abc 坐标系下的工频周期分量，故高次谐波分量  $i_{abc\_h}$  为原始电流信号与该工频周期分量的差值，从而实现谐波电流的补偿。

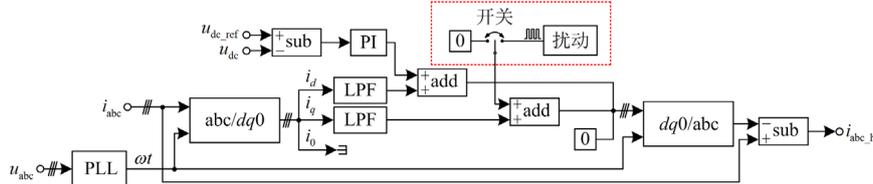


图 2 APF 的控制框图

Fig. 2 Control block diagram of APF

2) 有源电力滤波器的无功功率扰动控制

由图 2 可知，有功电流  $i_d$  和无功电流  $i_q$  分别控制 APF 向配电网输出的有功功率和无功功率，因 APF 无电源，故其输出的有功功率为零，即需控制  $i_d$  的幅值来稳定 APF 直流侧电容电压。因无功功率为直流侧和交流侧的能量交换，故 APF 可持续输出无功功率，即通过控制  $i_q$  来实现对 APF 输出无功功率的控制。

2.2 频率信号的分解、重构和低频分量幅值的计算

由第 1 节的分析可知，当 DG 并网运行时，受电网钳位作用的控制，其电压频率与电网频率保持一致，且电网会发出/吸收无功功率，以抵消 APF 注入的扰动，即 DG 侧电压频率不会因 APF 注入无功功率扰动而发生周期性波动。当发生孤岛效应时，由式(3)可知，孤岛频率的变化情况与孤岛无功功率的平衡程度有关，即孤岛无功功率过剩，则孤岛频率偏低，反之，孤岛频率偏高。由此可知，孤岛运行时，DG 并网点电压的频率会随着 APF 注入/吸收无功功率而发生周期性波动，即孤岛频率信号会出现 2 Hz 的周期性低频波动现象，为了实现孤岛检测功能，本文采用小波分解和小波重构算法进行滤波并提取低频信号，采用快速傅里叶变换计算 2 Hz 低频分量的幅值，其中小波分解原理如图 3 所示。

由图 3 可知，当利用小波分解算法对原始信号 S(假设其频率范围为 0~f)进行分解时，可得到离散近似信号 A1(频率范围为 0~f/2)和离散细节信号 D1(频率范围为 f/2~f)；再对 A1 分量进行分解，可得到 A2(频率范围为 0~f/4)和 D2(频率范围为 f/4~f/2)，逐次分解，即可得到所需频率的近似分量和细节分量。因 APF 注入的无功功率扰动频率为 2 Hz，故仅需利用包含 2 Hz 频段的信号进行小波重构，即

可生成仅包含低频分量的频率波形，从而利用 FFT 算法计算 2 Hz 低频分量的幅值。

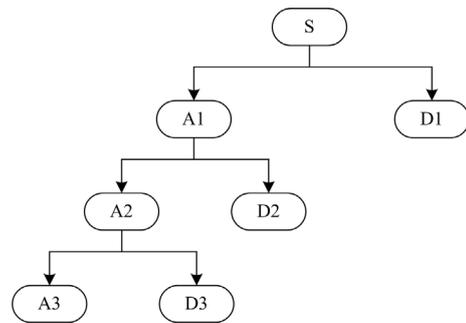


图 3 小波分解原理

Fig. 3 Schematic diagram of wavelet decomposition principle

2.3 多 DG 孤岛检测方法

当 DG 并网运行时，受电网钳位作用的控制，APF 输出的无功功率扰动量被电网吸收，即 DG 并网点的频率会围绕 50 Hz 波动，且波动频率中 2 Hz 分量较少。当发生孤岛效应时，APF 注入的无功功率扰动会打破孤岛无功功率平衡，将导致 DG 并网点频率发生周期性波动，且波动周期与 APF 的扰动周期一致，因此，孤岛运行时 DG 并网点的电压频率值会出现明显的波动现象，且波动频率为 2 Hz 的周期分量明显增大，故可根据该幅值是否越限来实现孤岛检测功能。由上述分析可知，本文所提基于低频扰动的多分布式电源孤岛检测方法流程如图 4 所示，该方法主要分为以下 3 个步骤。

1) 控制 APF 进行无功功率扰动。利用无功功率扰动法打破孤岛的无功功率平衡，即在 q 轴加入周期性扰动，从而控制 APF 输出幅值为 100 var、频率为 2 Hz 的周期性无功功率，如图 2 中红色虚线框所示。

2) 利用小波分解算法提取频率信号的低频分量, 并利用小波重构算法合成低频信号。根据原始信号的采样频率和需提取的特征频率确定分解层数, 例如: 当采样频率为  $f_x$  时, 由采样定理可知, 此时信号的最高频率为  $f_x/2$ , 因此, 当分解层数为 1 时, 可获得  $0 \sim f_x/4$  的低频信号, 当分解层数为 2 时, 可获得  $0 \sim f_x/8$  的低频信号, 以此类推, 可计算出所需分解层数, 实现低频信号的提取。

3) 利用快速傅里叶变换算法计算该低频信号中各频率范围的幅值, 并根据幅值是否越限实现孤岛检测。由于各 DG 安装位置的不同, 当大容量非线性负载与某台 DG 的电气距离较近时, 可能导致该 DG 并网点 2 Hz 低频分量的幅值较大, 但波动幅度较小, 因此, 可将本文方法的动作阈值设为并网运行时的 2 倍, 以防止因负载性质的不同而导致保护误动作。

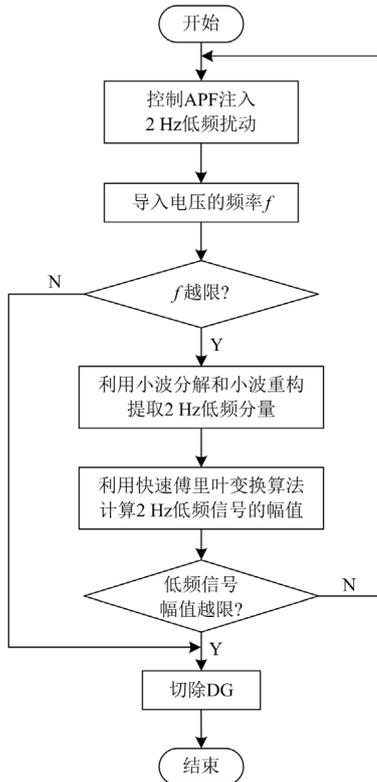


图 4 本文方法的孤岛检测流程图

Fig. 4 Flow chart of island detection method in this paper

### 3 仿真验证

为了验证本文方法检测孤岛的有效性, 利用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型, 对单/多 DG 构成的孤岛依次进行检测。假设系统中有两台 DG, 依次记为 DG1 和 DG2, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 多 DG 并网系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of multi-DG grid-connected system

参数名称	数值
电网电压/kV	10
变压器额定容量/MVA	20
变压器额定电压比/kV	10/0.4
变压器一次侧接线	$\Delta$
变压器二次侧接线	Yn
各 DG 直流侧电压/kV	0.8
各 DG 并网点电压/kV	0.4
各 DG 并网点频率/Hz	50
各 DG 输出的有功功率/kW	15
各 DG 输出的无功功率/kvar	0

由于本文仿真的采样频率为 20 kHz, 故原始信号的最高频率为 10 kHz, 为了提取到 2 Hz 的低频信号, 根据 2.3 节的分析可知, 需要对原始信号进行 11 层分解, 即最低层频率范围为  $0 \sim 4.88$  Hz。为了保证小波重构后得到的波形具有光滑性, 本文所采用的小波函数为 db9。

#### 3.1 APF 的谐波补偿

为了验证加入无功功率扰动后 APF 进行谐波补偿的有效性, 依次在 0.3 s 和 0.5 s 各投入一组三相桥式整流负载, 电网输出电压、电流、负载电流和 APF 输出电流如图 5 所示。

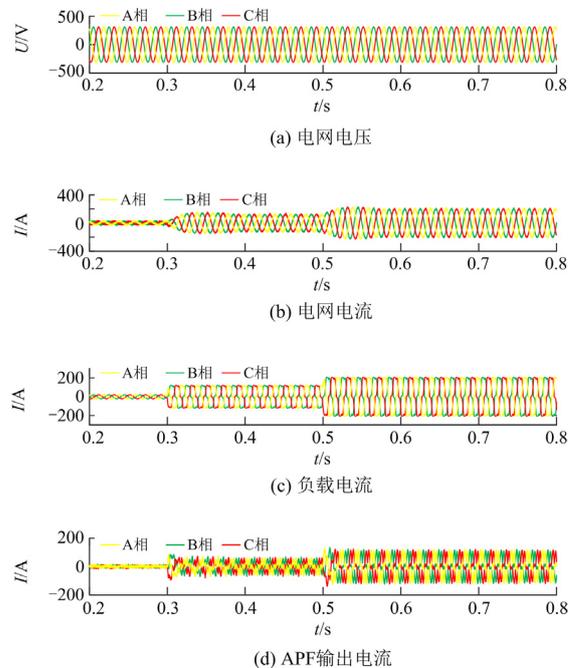


图 5 电网输出电压、电流、负载电流和 APF 输出电流

Fig. 5 Grid output voltage, current and load current and APF output current

由图 5 可见, 在 0.3 s 和 0.5 s 依次投入三相桥式整流负载时, 负载侧电流中出现了大量的谐波电流, 此时 APF 能够检测到该谐波电流并注入对应的补偿电流, 从而保证电网侧输出电流仍为正弦波, 其中, 投入整流负载后数周期内负载侧和电网侧电流的谐波含量(total harmonic distortion, THD)分别如图 6 和图 7 所示。

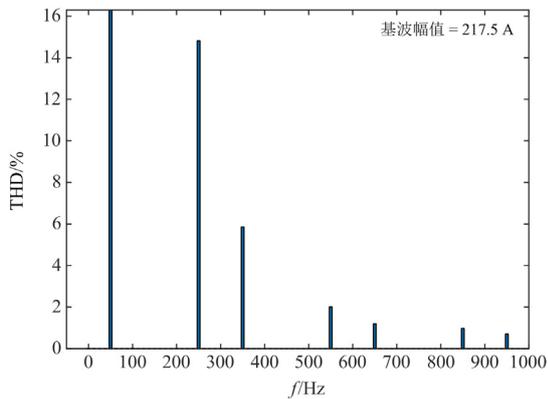


图 6 负载侧电流的谐波含量图

Fig. 6 Harmonic content diagram of load side current

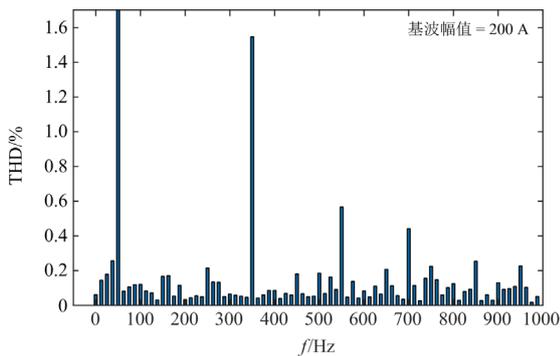


图 7 电网侧电流的谐波含量图

Fig. 7 Harmonic content diagram of grid side current

由图 6 和图 7 可见, 当负载侧接入整流负载时, 其电流的总谐波含量为 16.18%, 而利用 APF 进行谐波电流补偿后, 电网侧电流的总谐波含量为 3.54%, 故加入无功功率扰动的 APF 能够实现谐波补偿功能。

### 3.2 单/多 DG 接入配电网的孤岛检测

为了避免因孤岛功率平衡导致被动法陷入孤岛检测盲区的弊端, 本文利用主动法中无功功率扰动法打破孤岛的无功功率平衡, 以缩小孤岛检测盲区; 为了解决多 DG 孤岛检测中因各 DG 扰动方向相反而产生稀释效应, 导致孤岛检测失败的问题, 本文控制各 DG 输出无功功率为零, 仅控制 APF 注入/

吸收无功功率, 以扰动孤岛频率, 从而避免产生稀释效应现象, 实现多 DG 孤岛检测。

#### 3.2.1 单 DG 孤岛检测

为了验证本文所提方法的有效性, 搭建如图 1 所示的含 DG 和 APF 的孤岛检测仿真模型。根据 GB/T 33593—2017 标准<sup>[23]</sup>规定 2 s 内完成孤岛检测的要求, 可忽略短时间内负载所需功率的波动和 DG 输出功率的波动, 故可分别将其设定为恒功率负载和电源。

假设在 1 s 时刻发生孤岛效应, 电网和单 DG 输出无功功率和频率波形如图 8 所示。

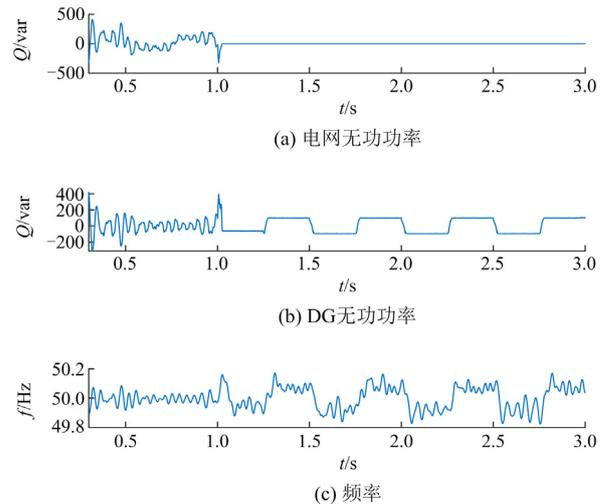


图 8 电网和单 DG 输出无功功率波形图

Fig. 8 Waveform diagram of reactive power output from the power grid and single DG

由图 8 可见, 当 DG 并网运行时(0~1 s), 受电网钳位作用的控制, APF 输出的无功功率扰动将被电网进行吸收, 故配电网的无功功率仍保持平衡, 且 DG 输出电压的频率与电网频率保持一致, 即频率持续围绕 50 Hz 上下波动且未出现明显的低频周期性波动。当发生孤岛效应时(1~3 s), 由于失去了电网的钳位作用, APF 的无功功率扰动会打破孤岛的无功功率平衡, 由式(3)可知, 孤岛无功功率缺额/过剩会导致孤岛频率升高/降低, 即孤岛频率的波动频率将与 APF 的无功功率扰动的波动频率一致。

由 2.3 节的分析可知, 通过提取 DG 并网点电压频率值的波动频率, 当其波动频率与扰动频率一致时, 即可判定 DG 发生孤岛效应并切除。为了提取频率的低频分量, 本文利用小波分解算法对频率原始信号进行分解, 结果如图 9 所示, 进而对低频分量部分进行小波重构, 结果如图 10 所示。

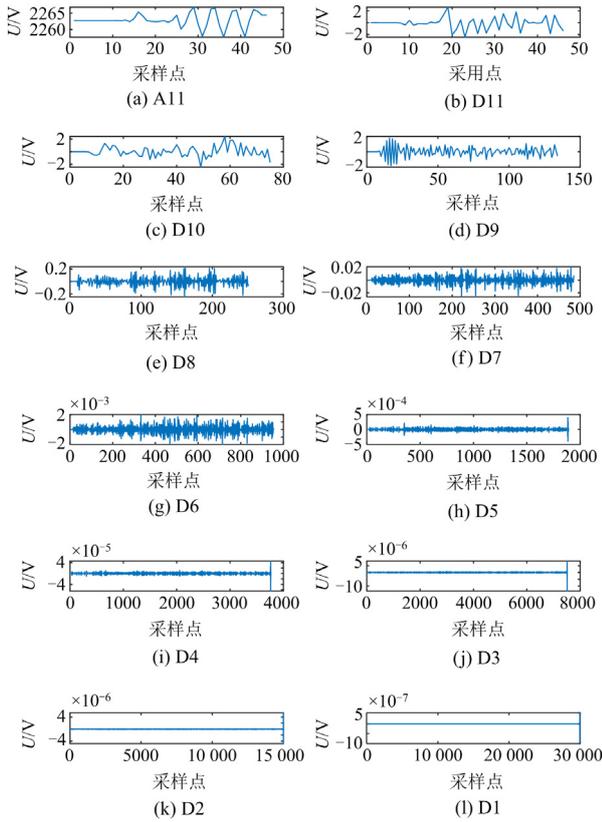


图 9 小波分解结果(单 DG 孤岛)

Fig. 9 Wavelet decomposition results (single DG island)

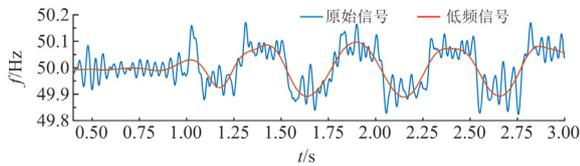


图 10 小波重构结果(单 DG 孤岛)

Fig. 10 Wavelet reconstruction results (single DG island)

由图 9 可见, 利用小波分解算法可将原始信号分解为不同频段的信号, 由图 3 的分析可知, 表示频率最低的图 9(a)为本文方法所需的低频分量。图 10 给出了单 DG 孤岛的小波重构结果。

由图 10 可见, 在 1 s 时刻发生孤岛效应后, 其电压频率出现了明显的周期性波动; 为了实现孤岛检测功能, 进一步利用 FFT 算法计算图 10 中低频分量的幅值, 如图 11 所示。由图 11 可见, 当 DG 并网运行时, 频率的低频波动较小, 即频率未出现周期性的波动(与图 8 的分析一致)。当发生孤岛效应时, 频率的低频分量明显增加, 即 APF 的无功功率扰动打破了孤岛的功率平衡, 使孤岛频率的低频分量中 2 Hz 的频率分量明显增大且超过并网运行时的 2 倍, 从而实现单 DG 孤岛检测。

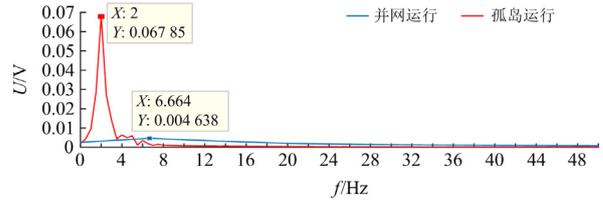


图 11 2 Hz 低频分量结果(单 DG 孤岛)

Fig. 11 Result of 2 Hz low-frequency component (single DG island)

### 3.2.2 多 DG 孤岛检测

由文献[24-25]可知, 当发生多 DG 孤岛效应时, 若各 DG 向并网点注入无功功率扰动的方向不一致, 则各 DG 容易因稀释效应导致孤岛检测失败。为了验证本文所提方法的有效性, 利用含 APF 和多 DG 的有源配电网模型进行仿真验证。

#### 1) 无功功率扰动法

假设在 0.7 s 时发生孤岛效应, 电网与多 DG 输出无功功率波形如图 12 所示。

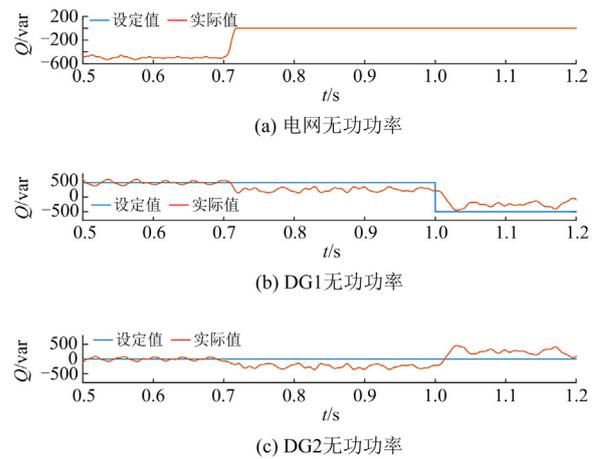


图 12 电网与各 DG 输出的无功功率波形图

Fig. 12 Output reactive power waveform of the grid and each DG

由图 12 可知, 当 DG 并网运行时(0~0.7 s), 受电网钳位作用的控制, DG1 注入的无功功率扰动被电网吸收抵消。当发生孤岛效应时, 由于各 DG 失去了电网的钳位作用, 在 0.7~1.0 s 内, DG2 会吸收 DG1 注入的无功功率, 在 1.0~1.2 s 内, DG1 吸收的无功功率由 DG2 提供, 导致 DG1 难以利用无功功率扰动法打破孤岛无功功率平衡, 即发生了稀释效应, 导致孤岛检测失败。

#### 2) 基于低频扰动的孤岛检测方法

假设在 1.0 s 时发生孤岛效应, 电网和多 DG 输出无功功率和频率波形如图 13 所示。

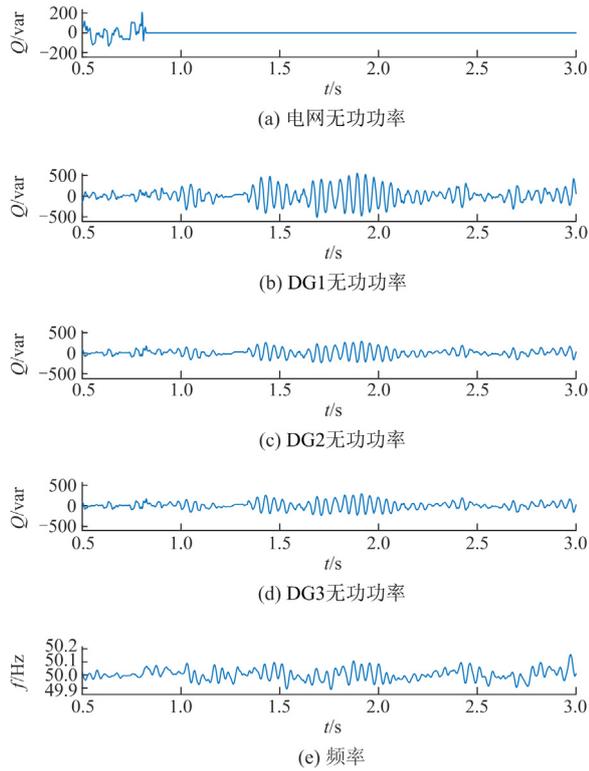


图 13 电网和各 DG 输出无功功率波形图

Fig. 13 Waveform diagram of reactive power output from the power grid and each DG

由图 13 可见, 当 1.0 s 发生孤岛效应时, 与上述单 DG 仿真分析一致, APF 注入的扰动会打破孤岛的无功功率平衡, 进而引起孤岛频率出现周期性波动。

利用小波分解算法对频率原始信号进行分析, 分解结果如图 14 所示, 其中低频分量部分进行小波重构, 结果如图 15 所示。

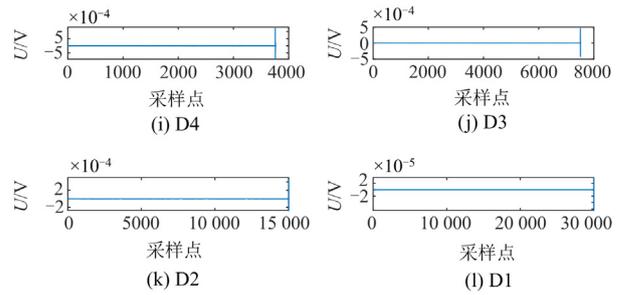
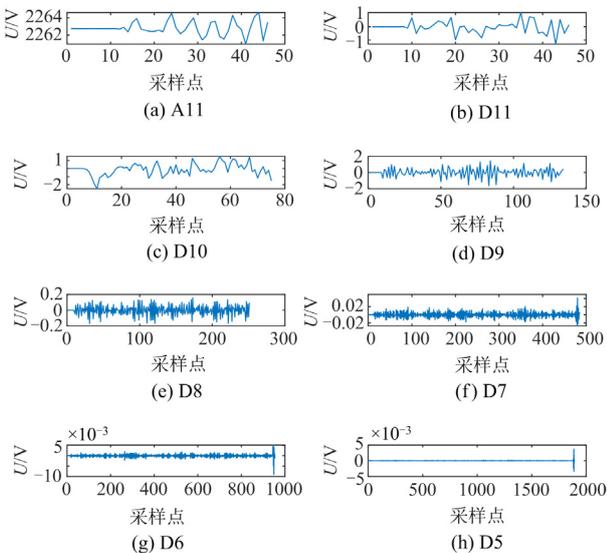


图 14 小波分解结果(多 DG 孤岛)

Fig. 14 Wavelet decomposition results (multiple DG islands)

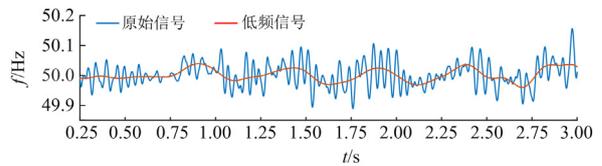


图 15 小波重构结果(多 DG 孤岛)

Fig. 15 Wavelet reconstruction results (multiple DG islands)

由图 14 可知, 与图 9 的分析一致, 利用小波分解算法能够提取出本文方法所需的低频分量(如图 14(a)所示)。图 15 给出了 DG 并网点电压频率的原始信号和利用图 14(a)中低频分量重构的低频信号, 进一步利用 FFT 算法计算其幅值, 如图 16 所示。

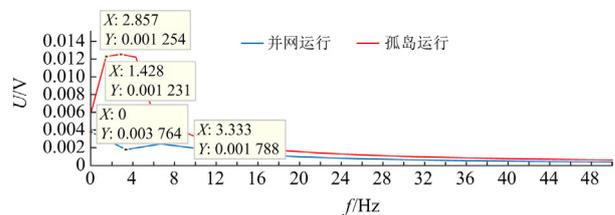


图 16 2 Hz 低频分量结果(多 DG 孤岛)

Fig. 16 Result of 2 Hz low-frequency component (multiple DG islands)

由图 16 可见, 与单 DG 孤岛的仿真结果一致, 当发生多 DG 孤岛效应时, 2 Hz 低频分量明显增加, 即 APF 的无功功率扰动打破了孤岛的功率平衡, 使孤岛频率的低频分量中 2 Hz 的频率分量明显增大且超过并网运行时的 2 倍, 从而实现多 DG 孤岛检测。

根据上述仿真结果可得以下结论: 1) 相比于扰动幅值为 500 var 的无功功率扰动法, 本文所提方法的扰动幅值为 100 var, 即扰动幅度更小, 故对电网电能质量的影响更小; 2) 对于单 DG 孤岛和多 DG 孤岛, 本文方法均能快速准确地检测到孤岛效应。

## 4 结论

为了解决多 DG 孤岛检测中因各 DG 扰动方向相反而产生稀释效应的问题, 本文提出了基于低频扰动的多 DG 孤岛检测方法。该方法利用 APF 注入频率为 2 Hz 的周期性无功功率扰动, 以扰动孤岛频率值出现周期性波动, 进而利用小波分解和小波重构算法提取频率信号中的低频分量, 并利用 FFT 算法计算低频分量的幅值, 从而根据 2 Hz 低频分量的幅值是否越限实现多 DG 孤岛检测。

## 参考文献

- [1] 龚逊东, 郭维嘉, 杨晨, 等. 基于动态孤岛的主动配电网多阶段故障恢复策略[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 158-166.  
GONG Xundong, GUO Weijia, YANG Chen, et al. Multi-stage fault recovery strategy for active distribution networks based on dynamic islanding[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 158-166.
- [2] 谭清波, 陈春, 曹一家, 等. 多源配电网主动孤岛恢复策略与动态组网潮流分析方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 142-151.  
TAN Qingbo, CHEN Chun, CAO Yijia, et al. Intentional islanding recovery strategy and dynamic network power flow analysis for distribution networks with multi-source[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 142-151.
- [3] 詹红霞, 肖竣文, 邓小勇, 等. 计及柔性负荷的高比例风光渗透下配电网孤岛划分策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 108-116.  
ZHAN Hongxia, XIAO Junwen, DENG Xiaoyong, et al. Islanding strategy for distribution network with high proportion of wind/photovoltaic penetration considering flexible load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 108-116.
- [4] 何国锋, 周子淳, 张国勇, 等. 孤岛光伏并联逆变器系统的固定时间模糊反步控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 147-156.  
HE Guofeng, ZHOU Zichun, ZHANG Guoyong, et al. Fixed-time fuzzy backstepping control strategy for islanded photovoltaic parallel inverters[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 147-156.
- [5] MORTEZAPOUR V, GOLSHANNAVAZ S, POURESMAEIL E, et al. A new hybrid control technique for operation of DC microgrid under islanded operating mode[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 646-656.
- [6] 陈春, 高靖, 曹一家, 等. 多源配电网主动孤岛恢复过程电压频率波动的平抑方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(5): 543-553.  
CHEN Chun, GAO Jing, CAO Yijia, et al. Voltage and Frequency suppression of intentional islanding restoration process for distribution system with multi-generations[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(5): 543-553.
- [7] 梁海峰, 丁政, 李鹏. 基于改进一致性算法的孤岛直流微电网储能系统分布式控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 59-71.  
LIANG Haifeng, DING Zheng, LI Peng. Distributed control strategy of an energy storage system in an isolated DC microgrid based on an improved consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 59-71.
- [8] 王晓寰, 张旭东, 郭红强. 基于相位簇扰动的下垂控制并网逆变器孤岛检测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1728-1738.  
WANG Xiaohuan, ZHANG Xudong, GUO Hongqiang. Islanding detection of droop-controlled grid-connected inverters on phase cluster disturbance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1728-1738.
- [9] 赵禹灿, 姜旭, 孙福寿, 等. 基于谐波特性的光伏孤岛与低电压穿越同步检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 41-50.  
ZHAO Yucan, JIANG Xu, SUN Fushou, et al. Simultaneous detection method for photovoltaic islanding and low-voltage-ride-through based on harmonic characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 41-50.
- [10] 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.
- [11] 蔡逢煌, 王武, 陈四雄, 等. 一种改进的主动移频式孤岛检测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 70-75.  
CAI Fenghuang, WANG Wu, CHEN Sixiong, et al. An improved anti-islanding detection technology of active frequency shift[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 70-75.
- [12] 吴云亚, 阚加荣, 谢少军, 等. 三种频率偏移孤岛检测方法的性能比较[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 964-971.  
WU Yunya, KAN Jiarong, XIE Shaojun, et al. Performance comparison for three different frequency shift IDMs[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 964-971.

- [13] 邹培源, 黄纯. 基于模糊控制的改进滑模频率偏移孤岛检测方法[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 574-580.  
ZOU Peiyuan, HUANG Chun. An improved slip mode frequency shift islanding detection method based on fuzzy control[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 574-580.
- [14] GUPTA P, BHATIA R S, JAIN D K. Average absolute frequency deviation value based active islanding detection technique[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 26-35.
- [15] POURBABAK H, KAZEMI A. Islanding detection method based on a new approach to voltage phase angle of constant power inverters[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(5): 1190-1198.
- [16] 邵美阳, 张子墨, 王露缙, 等. 一种无功功率扰动的孤岛检测新方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 98-107, 114.  
SHAO Meiyang, ZHANG Zimo, WANG Lujin, et al. A new islanding detection method for reactive power disturbance[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 98-107, 114.
- [17] 周林, 谢星宇, 郝高锋, 等. 一种新型的无功功率扰动孤岛检测方法[J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 275-283.  
ZHOU Lin, XIE Xingyu, HAO Gaofeng, et al. A novel reactive power disturbance islanding detection method[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(2): 275-283.
- [18] CHEN X, LI Y. An islanding detection method for inverter-based distributed generators based on the reactive power disturbance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3559-3574.
- [19] KUMAR A, PANDA R K, MOHAPATRA A, et al. Mode of oscillation based islanding detection of inverter interfaced DG using ESPRIT[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 200: 1-9.
- [20] 张明锐, 王俊凯, 王佳莹, 等. 微网混合式孤岛检测及运行模式切换研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 1-8.  
ZHANG Mingrui, WANG Junkai, WANG Jiaying, et al. Study on hybrid islanding detection and operation mode transition of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 1-8.
- [21] 谢东, 张兴, 曹仁贤. 参数自适应 SFS 算法多逆变器并网孤岛检测技术[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 89-95.  
XIE Dong, ZHANG Xing, CAO Renxian. Islanding detection technology for multiple grid-connected inverters based on adaptive parameters SFS algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 38(21): 89-95.
- [22] 吴宇奇, 马啸, 叶雨晴, 等. 适应多控制逆变器不同工况的混合式孤岛检测策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3887-3895.  
WU Yuqi, MA Xiao, YE Yuqing, et al. Hybrid islanding detection strategy suitable for different operating conditions of multi-control inverters[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3887-3895.
- [23] 分布式电源并网技术要求: GB/T 33593—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
Technical requirements for grid connection of distributed resources: GB/T 33593—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [24] 徐化博, 陈羽, 徐丙垠, 等. 基于信号同步注入的多源配网阻抗测量防孤岛保护方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-19[2023-11-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20231115.0932.002.html>.  
XU Huabo, CHEN Yu, XU Bingyin, et al. Anti-islanding protection method for multi-source distribution network impedance measurement based on signal synchronization injection[J]. Proceedings of the CSEE: 1-19[2023-11-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20231115.0932.002.html>.
- [25] 李文龙, 张新慧, 彭克, 等. 基于锁频环控制的多逆变器孤岛检测方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 5217-5227.  
LI Wenlong, ZHANG Xinhui, PENG Ke, et al. Multi-inverter islanding detection method based on frequency-locked loop control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5217-5227.

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-03-26

作者简介:

杨帆(1982—), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为配电网继电保护与自动化、分布式电源与微电网并网技术; E-mail: yangf\_82@163.com

杨志淳(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为智能配电网、分布式电源、微电网及微电网群柔性互联、信息物理融合仿真技术; E-mail: yangzhichun3600@163.com

陈鹤冲(1994—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为有源配电网保护技术、分布式电源与微电网并网技术。E-mail: 616639023@qq.com

(编辑 张颖)