

一种改良的主动频率偏移孤岛检测方法

林 义, 何通能

(浙江工业大学 信息学院 电子信息与智能系统研究所, 杭州 310023)

摘要: 分布式发电系统中的孤岛检测问题是目前研究的难点, 特别是传统主动频率偏移法在逆变器输出功率与负载功率平衡或者不平衡程度较小时, 较难检测出孤岛并且输出电流存在较大的谐波含量; 针对这个问题, 在光伏并网发电系统中提出了一种改良的主动频率偏移孤岛检测方法; 该方法把主动频率偏移与卡尔曼滤波的谐波估计相结合组成判断是否发生孤岛的依据; 在 Matlab/Simulink 下进行系统仿真, 验证了该方法有效地减少了传统主动频率偏移法存在的检测盲区, 也明显地降低了逆变器输出电流的谐波含量。

关键词: 孤岛检测; 检测盲区; 主动频率偏移法; 谐波估计

An Islanding Detection Method Based on Improved Active Frequency Drift

Lin Yi, He Tongneng

(Information and Intelligent System Institute, College of Information, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Island detection in the distributed power generation system is the difficulty of the current research. In particular, the traditional active frequency drift method is difficult to detect the islanding phenomenon and the current-output has large harmonic contents when the inverter output power and load active power keep balance or a small degree of imbalance. For this problem, an improved active frequency drift island detection method is proposed in PV grid-connected power generation system. This method combines the active frequency drift and Kalman filtering of harmonic estimation method to determine whether or not it is produced the islanding phenomenon. At the same time, by reducing the frequency detection threshold, the traditional active frequency drift method reduces effectively non-detection zone, and reduces significantly the inverter output current harmonic contents. Simulation of Matlab/Simulink is carried out to verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: islanding detection; non-detection zone; active frequency drift; harmonic estimation

0 引言

随着工业化的发展, 全球范围内的能源紧缺已经变成阻碍社会可持续发展的严重问题。特别是广泛使用的化石燃料的不可再生性以及对环境的污染程度, 迫使发展新能源成为当前迫在眉睫的任务。光伏发电^[1]因其设备安装简单、规模灵活、维护简单、无污染等优势展示出其广泛的应用前景。随着分布式光伏系统规模不断扩大, 为了使电网系统能够安全运行, 孤岛检测成为研究光伏并网的核心问题, 各种不同的孤岛检测算法^[2-4]被陆续提出。

在光伏发电系统正常工作情况下, 若公共电网突然不再继续向本地负载供电, 而光伏发电系统仍然进行工作, 导致本地负载处于局部供电的情况, 形成一个独立的供电系统, 则称此状态为孤岛现象。在并网系统中, 孤岛现象包括非计划性孤岛现象与计划性孤岛现象。其中, 非计划性孤岛现象是指非计划、不受控地发生孤岛现象; 计划性孤岛现象是按照事先选择的控制策略, 人为地发生孤岛现象。

非计划性孤岛现象会对系统设备带来非常大的危害, 例如会造成用户的设备损坏、发电系统的烧毁, 同时也对电网的供电品质产生影响, 使得电网的安全性大大地降低, 那么必须要抑制非计划性孤岛现象的产生。因此, 如何准确、快速地检测出孤岛现象^[5]对整个并网系统可靠运行有着十分重要的意义。

1 孤岛检测的传统方法

当前孤岛检测方式包含两种: 被动检测法和主动检测法。被动检测法主要是通过检测公共耦合点 PCC (Point of Common Coupling) 的电压幅值、相位以及频率等参数变化作为判断电网是否发生断电的依据, 例如通过远程通信方法来检测 PCC 点断路器是否发生跳闸来判断孤岛等。这种方法通常检测周期长且存在比较大的检测盲区 NDZ (non-detection zone), NDZ 是判断该孤岛检测方法是否高效的标准; 主动检测法是通过主动加入扰动的正反馈信号到并网逆变器中, 使得逆变器的输出电压幅值、相位、频率等参数产生一定的波动。在电网正常工作时, 这些扰动信号不会促使并网逆变器的输出特性发生改变; 在电网发生故障时, 因为主动加入扰动的信号存在正反馈作用, 这使得并网逆变器的输出特性能够迅速累加且超过阈值从而被检测到。

收稿日期: 2018-02-11; 修回日期: 2018-03-22。

作者简介: 林 义(1992-), 男, 浙江温州人, 硕士, 主要从事微电网方向的研究。

何通能(1962-), 男, 浙江义乌人, 副教授, 主要从事模式识别与计算机智能控制方向的研究。

主动检测法的优点是检测盲区较小、检测精度高，但是主动加入的扰动信号会对电能质量产生一定的影响。主动检测法主要包括有滑模频率偏移法 SMS (slip-mode frequency shift)^[6]、无功功率补偿法、主动频率偏移法 AFD (Active Frequency Drift) 和频率跳变法^[7]等。其中 AFD 是比较常用的主动检测法。它的特点是检出率较高、检测速度较快。但是当逆变器输出功率与负载功率平衡或者不平衡程度较小时，难以检测出孤岛且输出电流含有较大的谐波。为了能够在这种情况下检测出孤岛效应，提出了许多改进的 AFD 检测方法^[8-10]，大部分方法基本都是对减少检测盲区 and 系统所增加的扰动量之间进行抉择。本文提出一种改良的主动频率偏移孤岛检测算法，该方法能够较大的减少检测盲区，降低电流的谐波含量，从而提高了整个光伏发电系统的可靠性^[11-12]。

2 AFD 法的基本原理及其参数

2.1 AFD 法的基本原理

主动频率偏移法 (AFD) 是一种常用的主动式检测方法，该方法通过对逆变器输出电流注入扰动信号，当发生孤岛状态时，使得频率发生偏移超出设定阈值，从而检测出孤岛状态。通常电网电压和输出电流的周期必须相同，即使得这两种信号同时过零，那么该方法则是通过电流频率要稍低于或高于 PCC 点的电压频率，从而达到扰动信号注入的目的。图 1 是 AFD 的基本原理图。图中 U_g 是电网电压， I_o 是逆变器输出电流，输出电流的偏移时间是 t_z ，电网的电压周期是 T_u ，输出电流的周期是 T_i 。图 1 中，电网电压频率小于输出电流扰动频率，在输出电流为零时，保持为零状态，并且持续时间 t_z ，等到电压频率为零。在负半周期时，输出电流的数值与正半周期相反，在输出电流为零时，与正半周期一样，同样保持为零状态，等待电网电压归零。

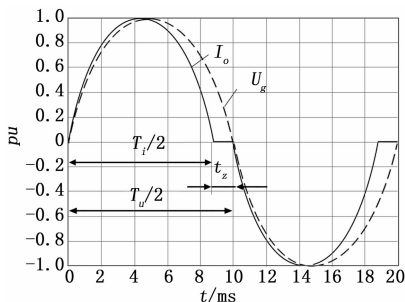


图 1 AFD 的基本原理图

当光伏并网系统正常运行时，注入适量的电流扰动，因为电网的相位效果与锁相环 (Phase Locked Loop, PLL) 的存在，使得逆变器输出电流初始相位能够正常跟踪光伏并网系统的电压相位，这对整个系统的正常工作不会产生影响；但是当发生孤岛状态时，因为电流的偏移和偏移时间 t_z 的存在，使得公共耦合点的电压 U_{PCC} 的频率发生变化，从而形成正反馈，增加了 U_{PCC} 的频率偏移量。一旦超过设定

的频率阈值，即可检测到孤岛状态。

2.2 斩波率与检测盲区

斩波率 (chopping fraction, cf) 是 AFD 中一个十分重要的参数，它表示系统受到扰动的强度，其大小和电流偏移时间 t_z 和电网的电压周期 T_u 有关，即：

$$cf = \frac{t_z}{T_u/2} \quad (1)$$

在式 (1) 中，斩波率 cf 可以是正也可以是负，当 cf 为正值的时候，PCC 点处的电压频率小于逆变器输出电流的频率；当 cf 为负值的时候，PCC 点处的电压频率大于逆变器输出电流的频率。同时，电流偏移时间 t_z 的大小可以随着 cf 大小的改变而改变，使得逆变器输出电流的频率发生变化。

AFD 并网电流函数可表示为：

$$i_{AFD}(t) = \begin{cases} I_m \sin(2\pi\lambda t) & 0 \leq \omega t < \pi - t_z \\ 0 & \pi - t_z \leq \omega t < \pi \\ -I_m \sin(2\pi\lambda t) & \pi \leq \omega t < 2\pi - t_z \\ 0 & 2\pi - t_z \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

其中： I_m 是电流幅值， λ 是电流波形的频率；即在 PCC 点处电压相位 $0 \leq \omega t < \pi - t_z$ 的情况下，逆变器的输出电流是正半周；在 PCC 点处电压相位 $\pi - t_z \leq \omega t < \pi$ 的情况下，逆变器的输出电流是零；在 PCC 点处电压相位 $\pi \leq \omega t < 2\pi - t_z$ 的情况下，逆变器的输出电流是负半周；在 PCC 点处电压相位 $2\pi - t_z \leq \omega t \leq 2\pi$ 的情况下，逆变器的输出电流是零。

设电网频率为 f ，那么它与电流波形的频率、斩波率 cf 之间的关系式是：

$$\lambda = f \left(\frac{1}{1 - cf} \right) \quad (3)$$

此外，斩波率 cf 不但会对电流波形的总谐波率 THD (total harmonics distortion) 产生影响，而且也会对检测盲区产生影响。即检测盲区是作为判断孤岛检测方法是否可靠的关键参数。若检测盲区小，则孤岛检测更加可靠，可见减小检测盲区的重要性。

检测盲区大小的衡量准则是能够检测出的最大负载品质因数 Q_f ，即 Q_f 越大，检测盲区会越小。其定义为：

$$Q_f = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (4)$$

式 (4) 中： R 为负载电路的电阻， L 为负载电路的电感， C 为负载电路的电容。

由文献 [13] 可知，电流的畸变率 THD 跟随斩波率 cf 的增大而增大，同时能够检测的最大值 Q_f 也随之增加，从而使得检测盲区的减小。所以，在使用 AFD 法检测孤岛时，通常会在 THD 与盲区大小之间进行抉择。

3 卡尔曼滤波的谐波估计

在实际工程中，通常会遇到两类估计问题，状态估计与参数估计。参数估计是指在已知系统模型中，根据样本数据来推断和分析总体的分布。其方法有同变估计、矩

估计和贝叶斯估计等。最基本的方法是最小二乘法 and 极大似然法。而状态估计是根据可获得的量测数据来估算动态系统的内部状态。最常用的状态估计法为卡尔曼滤波, 主要得益于它响应速度快等特点。由于需要对 PCC 点进行谐波状态估计, 则对该点的电压进行建模, 其测量方程与状态方程如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k+1} &= \mathbf{B}\mathbf{X}_k + \omega_k \\ \mathbf{Z}_k &= \mathbf{Y}\mathbf{X}_k + \nu_k \end{aligned} \quad (5)$$

式中,

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_s \Delta t) & \sin(\omega_s \Delta t) & \cdots & 0 & 0 \\ -\sin(\omega_s \Delta t) & \cos(\omega_s \Delta t) & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cos(n\omega_s \Delta t) & \sin(n\omega_s \Delta t) \\ 0 & 0 & \cdots & -\sin(n\omega_s \Delta t) & \cos(n\omega_s \Delta t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{Y} = [1 \ 0 \ \cdots \ 1 \ 0] \quad (7)$$

在孤岛检测时, 需要得到的谐波状态估计量为 \mathbf{X}_k , 即 PCC 点在 k 时刻的电压状态向量; 谐波次数是 n ; 电压在 k 时刻的测量值是 \mathbf{Z}_k ; 测量噪声与状态噪声分别是 ν_k 与 ω_k , \mathbf{Q} 是状态噪声, \mathbf{R} 是测量噪声的协方差矩阵; 采样时间为 Δt 。

卡尔曼滤波谐波估计的递推过程如下:

首先需要初始化, 确认初始值 X_0 、 P_0 、 Q 和 R ; 其次, 每个采样周期内, 进行状态预测, 按下面的迭代方式:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1} = \mathbf{B}\mathbf{X}_k + \omega_k \quad (8)$$

预测误差协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{P}}_{k+1} = \mathbf{B}\mathbf{P}_k\mathbf{B}^T + \mathbf{Q} \quad (9)$$

卡尔曼增益:

$$\mathbf{K} = \hat{\mathbf{P}}_{k+1}\mathbf{Y}^T(\mathbf{Y}\hat{\mathbf{P}}_{k+1}\mathbf{Y}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (10)$$

最初状态更新:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1} + \mathbf{K}(\mathbf{Z}_{k+1} - \mathbf{Y}\hat{\mathbf{X}}_{k+1}) \quad (11)$$

协方差矩阵估计值更新:

$$\mathbf{P}_{k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{Y})\hat{\mathbf{P}}_{k+1} \quad (12)$$

然后根据上述步骤中各个时刻的谐波估计值, 周期性的计算谐波电压累计值, 公式如下:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} m |\mathbf{X}(k)| \quad (13)$$

其中: n 是采样点数, m 是比例系数, 用于适当的比例调整, 以方便设定孤岛检测阈值。

4 改良的检测法

当光伏系统发生孤岛时, 主动频率偏移 (AFD) 法主要是基于负载功率和逆变器输出功率之间的不平衡程度较大, 导致逆变器输出电流的频率发生改变, 从而检测出孤岛效应。依照 IEEE Std 929-2000 的规定, 电压频率的正常波动是在 ± 0.5 Hz 范围, 但是出现频率的波动, 表明可能孤岛效应已经发生。特别是在某些负载功率和逆变器输出功率非常接近的情况下, 较小的频率波动无法超出 AFD 法设定的检测阈值, 使得该方法检测失败。如果增大电流

频率偏移量, 则斩波率 cf 也会随之增大, 从而提高了检测效率, 但是输出电流波形的谐波畸变 THD 也会增大, 这对电能质量会造成较大的影响。如果电流偏移量越小, 则会使得检测盲区的增大, 降低了孤岛检测的可靠性。

本文提出了一种改良的主动频率偏移孤岛检测方法。通过把主动频率偏移与卡尔曼滤波的谐波估计相结合, 组成判断是否发生孤岛的依据。在确保高效的检测效率与检测盲区较小的条件下, 有效地减少了电流的谐波畸变率 THD。

如图 2 所示, 通过检测逆变器输出电流的频率偏移量 F , 设定频率偏移的检测阈值 F_1 与 F_2 , 使 $F_2 < F_1$, 其中在负载功率和逆变器输出功率不平衡程度较小或者相平衡的情况下, F_1 的取值要大于其引起的频率偏移最大量, F_2 的取值越小, 检测盲区越小; 若 $F_1 < F$ 时, 采用主要检测方式, 即 AFD 法来判断光伏系统是否发生孤岛, 其中 cf 的取值如下:

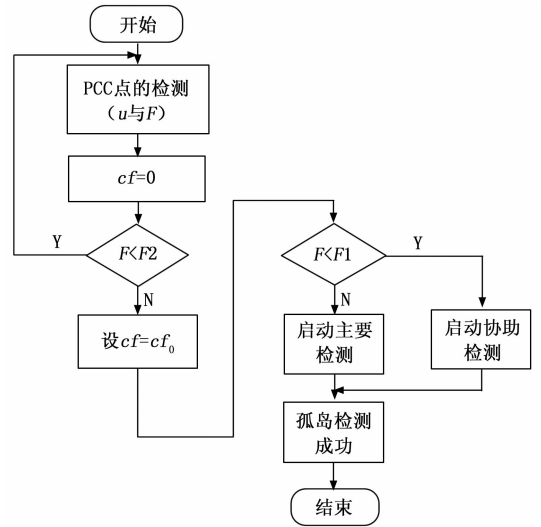


图 2 孤岛检测流程图

$$cf = \begin{cases} 0, & F < F_2 \\ cf_0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

cf_0 的选取由输出电流 THD 来决定, 必须保障 $\text{THD} < 5\%$, 频率偏移量 $F < F_2$ 时, cf 为零。若 $F_2 < F < F_1$ 时, 采用协助检测, 即对 PCC 点的电压进行谐波估计并计算谐波电压累计值来判断光伏系统是否发生孤岛。该检测主要用在负载功率和逆变器输出功率不平衡程度较小或者相平衡的情况下, 通过检测谐波电压累加值, 来判断光伏系统是否发生孤岛。

5 仿真结果与分析

在 Matlab/Simulink 平台上建立光伏并网系统的孤岛检测仿真模型, 如图 3 所示。一般参数设置要使得负载的功率与光伏发电的功率相等, 逆变器输出的无功功率为 0。即电网电压是 220 V, 负载的谐波频率为 50 Hz, 在功率为 2 kW 的条件下, 负载的取值是 R 为 26.4 Ω , L 为 88 mH, C

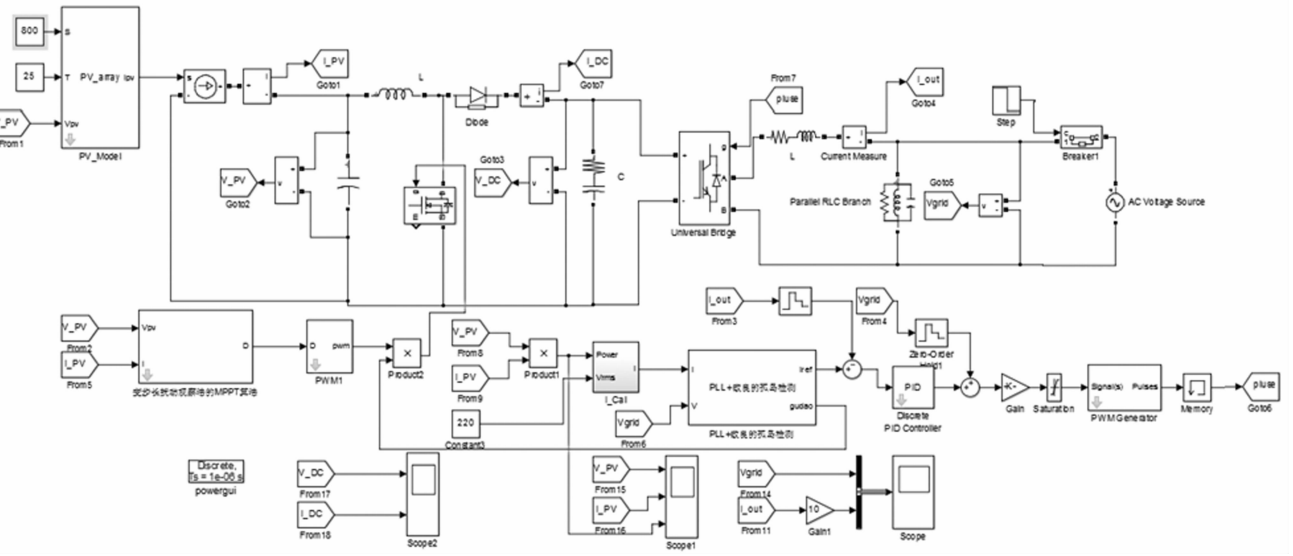


图 3 光伏并网系统的孤岛检测仿真模型

为 127 μF ，其中比例系数 $m=10$ ，仿真时间设置 $t=0.4 \text{ s}$ 。设定在 0.2 s 时产生孤岛效应。当断开电网时，PCC 点的电压频率就会产生改变，当频率大于 F_2 时，即可认为发生孤岛效应，此时，通过协助检测来防止主要检测方法 AFD 法失效的可能。同时为了减小 THD，式 (14) 中 cf_0 所取的值一定要使得 THD 在 5% 以内，取 cf_0 为 0.02，并且在改变 cf 的取值时，系统能够正常运行。设定频率检测阈值 F_2 为 $\pm 0.1 \text{ Hz}$ ， F_1 为 $\pm 0.5 \text{ Hz}$ ，即 $F_2 < F_1$ 。

图 4 所示是负载功率和逆变器功率不平衡程度较大时的仿真结果图。可见在电网 0.2 s 断开时，发生孤岛，由于功率不平衡程度较大，使得频率波动也变大，此时采用的方法是主动频率偏移检测方法，斩波率 cf_0 为 0.02 的情况下，在 0.259 s 处能够高效的检测出孤岛。

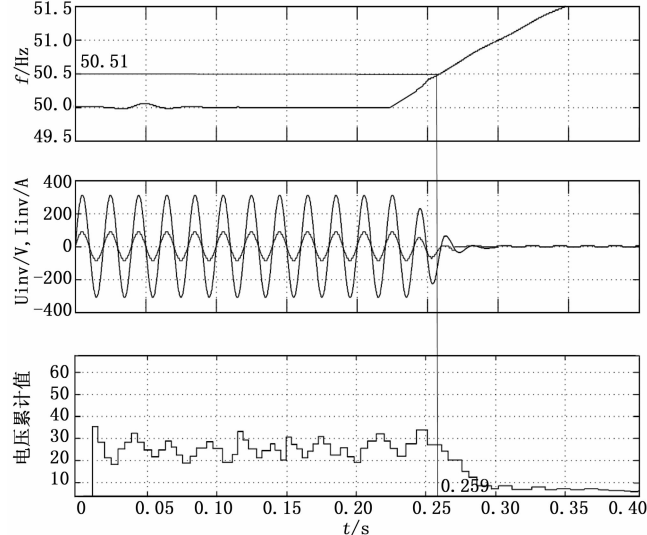


图 4 负载功率和逆变器功率不平衡程度较大时的仿真结果图

图 5 所示是负载功率和逆变器功率不平衡程度较小时的仿真结果图。其频率波动范围较小，没有超过 $\pm 0.5 \text{ Hz}$ ，导致主要检测方法不能正常启动，从而采用协助检测卡尔曼滤波的谐波估计来检测电压累计值。本文所设定的阈值范围是 15~45，在电网正常运行时，谐波的电压累计值保持在小范围内的波动，当发生孤岛时，累计值骤降，低于设置的阈值，从而检测出孤岛。

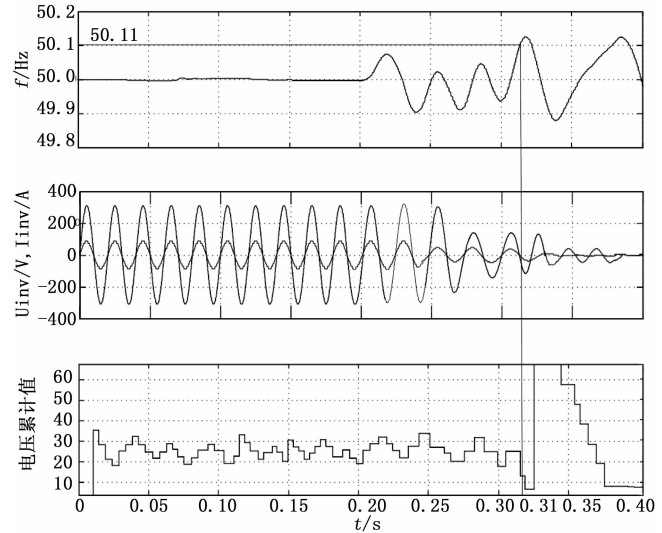


图 5 负载功率和逆变器功率不平衡程度较小时的仿真结果图

图 6 所示是以往的主动频率偏移法和本文提出改良后的主动频率偏移法所产生的电流谐波 THD 比较图。一般都是在 5% 以下，但是以往的主动频率偏移法都会使用较大斩波率 cf ，用来提高检测效率，这使得谐波含量较高。但是本文提出改良的主动频率偏移法通过降低斩波率 cf

所产生的检测盲区, 由协助检测来消除, 这不但能够降低电流谐波 THD, 而且还保证检测效率较高。另外, 以此为基础, 采用不同的斩波率 cf 进行赋值, 使得谐波含量更加减小。

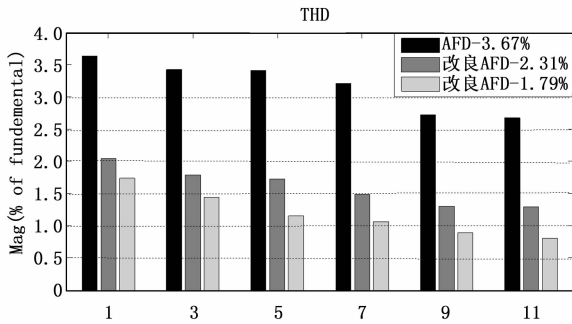


图 6 电流谐波 THD 比较图

6 结束语

本文搭建了光伏并网系统的孤岛检测仿真模型, 主要针对主动频率偏移法的不足, 提出基于 AFD 法和卡尔曼滤波的谐波估计相结合的方法来检测孤岛效应, 此方法在保障较高的检测效率条件下, 不但有效地减小了检测盲区, 而且降低了输出电流的谐波含量, 提升了光伏系统的可靠性。通过搭建的 Matlab/Simulink 仿真结果也表明了该方法的优越性。当然, 本文也可以进一步优化该方法, 例如加入神经网络算法来提高检测效率, 这是下一步所需要研究的重点。

参考文献:

[1] 赵 为. 太阳能光伏并网发电系统的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.

（上接第 42 页）

[4] Raheja JL, Kumar S, Chaudhary A. Fabric defect detection based on GLCM and Gabor filter: A comparison [J]. Light and Electron Optics, 2013, 124 (23): 6469-6474.

[5] 屈 博, 卢朝阳, 李 静, 等. 一种改进的多通道 Gabor 滤波器布匹瑕疵检测方法 [J]. 纺织学报, 2009, 30 (12): 37-40.

[6] 尉苗苗, 李岳阳, 蒋高明, 等. 应用最优 Gabor 滤波器的经编织物疵点检测 [J]. 纺织学报, 2016, 37 (11): 48-54.

[7] Gao G, Zhang D, Li C, et al. A novel patterned fabric defect detection algorithm based on GHOG and low-rank recovery [A]. IEEE, International Conference on Signal Processing [C]. IEEE, 2017: 1118-1123.

[8] 刘洲峰, 闫 磊, 李春雷, 等. 基于特征融合与低秩分解的织物疵点检测 [J]. 棉纺织技术, 2017, 45 (10): 1-4.

[9] 李春雷, 高广帅, 刘洲峰, 等. 应用方向梯度直方图和低秩分解的织物疵点检测算法 [J]. 纺织学报, 2017, 38 (3): 149-154.

[10] GH Hu. Automated defect detection in textured surfaces using optimal elliptical Gabor filters [J]. Light and Electron Optics, 2015, 126 (14): 1331-1340.

[2] 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]. 许昌: 电力系统保护与控制, 2011, 39 (6): 147-154.

[3] 杨新华, 孙艳军, 汪龙伟, 等. 改进型正反馈主动频移孤岛检测方法的仿真研究 [J]. 上海: 电气自动化, 2015, 37 (2): 47-50.

[4] 肖巧景, 张宇翔, 郭 敏. 一种新的频率偏移技术在光伏并网发电系统孤岛检测中的应用 [J]. 陕西: 现代电子技术, 2007 (1): 107-108.

[5] 刘方锐, 段善旭, 康 勇, 等. 多机光伏并网逆变器的孤岛检测技术 [J]. 北京: 电工技术学报, 2010, 25 (1): 167-171.

[6] 刘东旭. 基于滑模频率偏移法的光伏孤岛检测的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.

[7] 殷桂梁, 孙美玲, 肖丽萍. 分布式发电系统孤岛检测方法研究 [J]. 北京: 电子测量技术, 2007 (1): 1-6.

[8] 黎璋霞, 罗晓曙, 廖志贤, 等. 改进的正反馈主动频移式孤岛检测方法 [J]. 天津: 电力系统及其自动化学报, 2015, 27 (4): 13-17.

[9] 杨恢东, 吴 浪, 李心茹, 等. 改进的周期主动频移式孤岛检测方法 [J]. 许昌: 电力系统保护与控制, 2016, 44 (16): 50-55.

[10] 袁 精, 赵清林, 张纯江, 等. 一种改进型光伏并网逆变器孤岛检测方法研究 [J]. 天津: 电源学报, 2017, 15 (6): 56-61.

[11] 王秀丽, 武泽辰, 曲 翀. 光伏发电系统可靠性分析及其置信容量计算 [J]. 北京: 中国电机工程学报, 2014, 34 (1): 15-21.

[12] 李雅梅, 蔡 军. 一种新颖的变步长光伏系统 MPPT 控制方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (6): 1981-1983.

[13] 陈佳斌, 陈阿莲. 一种改进的主动频率偏移孤岛检测算法 [J]. 天津: 电源学报, 2017, 15 (3): 140-147.

[11] A Kumar, G Pang. Fabric defect segmentation using multichannel blob detectors [J]. Optical Engineering, 2000, 39 (12): 3176-3190.

[12] R Mehrotra, K R Namuduri, N Ranganathan. Gabor filter-based edge detection [J]. Pattern Recognition, 1992, 25 (12): 1479-1494.

[13] Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection [A]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. San Diego, USA, 2005: 886-893.

[14] Kumar A. Automated defect detection in textured materials [D]. HongKong: Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Hong Kong, 2001.

[15] 邹 超, 汪秉文, 孙志刚. 基于 Gabor 滤波器组的实时疵点图像分割 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46 (12): 185-187.

[16] Jing Junfeng, Zhang Huanhuan, Wang Jing, et al. Fabric defect detection using Gabor filters and defect classification based on LBP and Tamura method [J]. Journal of the Textile Institute Proceedings & Abstracts, 2013, 104 (1): 18-27.