

1-4-2019

## Comparative Study of Photovoltaic Islanding Detection Based on SMS and AFD

Yunjun Yu

1. *Nanchang university, School of Information Engineering, Nanchang 330031, China; ;*

Guoying Zhong

1. *Nanchang university, School of Information Engineering, Nanchang 330031, China; ;*

Ruixiang Fan

2. *Jiangxi Electric Power Science Research Institute, Nanchang 330096, China; ;*

Qingzhao Ji

2. *Jiangxi Electric Power Science Research Institute, Nanchang 330096, China; ;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Comparative Study of Photovoltaic Islanding Detection Based on SMS and AFD

### Abstract

**Abstract:** There are many islanding detection methods, especially the active islanding detection method. It is difficult to choose the best method among so many active islanding detection methods in practice. In this paper, *the non-detection zone (NDZ), detection speed and their effect to power quality* of slide-mode frequency shift (SMS) method and active frequency drift (AFD) were researched. The results show that SMS is superior to AFD at the aspect of the effect on power quality when they have same NDZ. While the detection speed of SMS has big difference under different parameters. The Islanding detection model was built on Matlab/Simulink. The experimental results show the correctness of theoretical analysis.

### Keywords

SMS, AFD, NDZ, power quality, detection speed

### Authors

Yunjun Yu, Guoying Zhong, Ruixiang Fan, Qingzhao Ji, and Jianyong Zhu

### Recommended Citation

Yu Yunjun, Zhong Guoying, Fan Ruixiang, Ji Qingzhao, Zhu Jianyong. Comparative Study of Photovoltaic Islanding Detection Based on SMS and AFD[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1572-1580.

# 基于 SMS 法和 AFD 法的光伏孤岛检测对比研究

余运俊<sup>1,2</sup>, 袁国瑛<sup>1</sup>, 范瑞祥<sup>2</sup>, 纪清照<sup>2</sup>, 朱建勇<sup>3</sup>

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 国网江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096;  
3. 华东交通大学 电气工程学院, 江西 南昌 330096)

**摘要:** 孤岛检测的方法很多, 尤其是主动式孤岛检测方法。如何在众多的主动孤岛检测法中选择最合适的方法是应用中的难点。针对主动法中的应用较多的滑模频率偏移法和有源频率偏移法, 分别对其检测盲区、检测速度、对电能质量影响进行机理分析。理论分析结果表明在盲区相同时, SMS(Slip-Mode Frequency Shift)法造成的逆变电流总谐波含量更小, 但 SMS 法的检测速度在不同参数条件下存在较大区别。在 Matlab/Simulink 中对孤岛检测方法进行建模, 实验结果证明了理论分析的正确性。

**关键词:** 滑模频率偏移法; 有源频率偏移法; 检测盲区; 电能质量; 检测速度

中图分类号: TM391.9      文献标识码: A      文章编号: 1004-731X (2018) 04-1572-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201804045

## Comparative Study of Photovoltaic Islanding Detection Based on SMS and AFD

Yu Yunjun<sup>1</sup>, Zhong Guoying<sup>1</sup>, Fan Ruixiang<sup>2</sup>, Ji Qingzhao<sup>2</sup>, Zhu Jianyong<sup>3</sup>

(1. Nanchang university, School of Information Engineering, Nanchang 330031, China;  
2. Jiangxi Electric Power Science Research Institute, Nanchang 330096, China;  
3. Huadong Jiaotong University, Electrical Engineering College, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** There are many islanding detection methods, especially the active islanding detection method. It is difficult to choose the best method among so many active islanding detection methods in practice. In this paper, the non-detection zone (NDZ), detection speed and their effect to power quality of slide-mode frequency shift (SMS) method and active frequency drift (AFD) were researched. The results show that SMS is superior to AFD at the aspect of the effect on power quality when they have same NDZ. While the detection speed of SMS has big difference under different parameters. The Islanding detection model was built on Matlab/Simulink. The experimental results show the correctness of theoretical analysis.

**Keywords:** SMS; AFD; NDZ; power quality; detection speed

## 引言

孤岛效应是指当电网出现故障时, 分布式发电系统仍然向附近的负载供电, 从而形成一个无法控

制本地供应网络<sup>[1-2]</sup>。无意的孤岛会带来安全、经济、电能质量、系统整体性问题<sup>[3-4]</sup>。因此当孤岛发生后, 能够及时检测出孤岛并及时作出相应的反应显得尤为重要。

目前孤岛检测的方法一般可分为三大类, 分别是无源检测方法、有源检测方法、通信式检测方法<sup>[5-6]</sup>。通信式检测方法由于需要完善的通信技术的支撑, 相比于前两种方法难度更大, 成本更高, 因此目前被动法和主动法受到更多的欢迎。被动法



收稿日期: 2016-05-18      修回日期: 2016-06-30;  
基金项目: 国家自然科学基金(61563034), 国家国际科技合作专项(2014DFG72240), 江西省自然科学基金(20151BAB206051), 江西省科技支撑计划(2013BBE50102);  
作者简介: 余运俊(1978-), 男, 江西上饶, 博士, 副教授, 研究方向为光伏智能微网控制、低碳电力。

<http://www.china-simulation.com>

• 1572 •

算法实现简单, 并且不会对电能质量产生影响, 但其在负载高品质因素情形下检测速度慢, 并且存在大的盲区, 不符合国家孤岛检测标准。主动法通过向电网注入扰动信号, 使得逆变电压, 频率等参数快速超过阈值。主动法的特点的检测速度快, 检测盲区小, 但对电能质量的影响较大。文献[7-8]分别对主动频率偏移法和滑模频率偏移法进行了盲区分析, 文献[9]通过对主动频率偏移法进行傅里叶变换分析其对电能质量的影响。虽然对主动法的研究很多, 但是没有比较各种主动法之间检测盲区的大小, 及对电能质量的不同影响, 并且没有定量分析不同参数条件下孤岛检测方法的检测速度。所以当我们面对两种或者三种主动法孤岛检测时, 我们还是无法确定哪一种方法更好并作出选择。基于此, 本文将拿出主动法中常用的有源频率偏移法和滑模频率偏移法, 分析比较两种方法的检测盲区和对电能质量的影响, 以及定量分析两种方法的检测速度。

## 1 滑模频率偏移法

滑模频率偏移法(Slip-Mode Frequency Shift, SMS)是主动孤岛检测法中的一种频率检测法。它给逆变输出电流的相位添加扰动, 使得逆变输出电流和输出电压的相位存在一定偏差, 导致电网失压后公共点的频率会偏离阈值, 从而判别出孤岛<sup>[10-11]</sup>。不加 SMS 算法时, 公共点电压  $U_{pcc}$  和逆变电流相位和频率相等; 加入 SMS 孤岛检测算法后, 控制逆变器输出电流的频率不变, 给电流相位添加偏

移量, 偏移大小由 SMS 算法决定, 通常取

$$\theta_{SMS} = \theta_m \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f - f_g}{f_m - f_g}\right) \quad (1)$$

式中:  $\theta_m$  为最大频率相移;  $f_m$  为产生最大相移时对应的频率;  $f_g$  为电网频率;  $f$  为公共点频率。一般取  $|f_m - f_g| = 3 \text{ Hz}$ 。

光伏并网系统的输出参考电流为:

$$I = I_m \sin(2\pi ft + \theta_{SMS}) \quad (2)$$

$I_m$  为参考电流峰值,  $f$  为上一个采样时刻电压频率值,  $t$  采样计数值,  $\theta_{SMS}$  电流相位偏移角。

电网稳定运行时, 由于电网的钳制作用, 公共点电压  $U_{PCC}$  频率不会变化,  $\theta_{SMS}$  为 0,  $U_{PCC}$  频率不会偏离阈值。当电网断开后,  $U_{PCC}$  频率会有微小的波动, 导致  $\theta_{SMS}$  不为 0, 扰动加入到逆变输出电流后, 使得  $U_{PCC}$  频率进一步偏移。设置公共点的电压频率阈值, 一旦检测到电压频率偏离阈值, 检测出孤岛, 控制参考输出电流为 0, 停止向负载供电。

## 2 有源频率偏移法

如图 1 所示为 AFD 法基本原理图, 虚线为 AFD 算法电流波形, 实线为公共点电压波形,  $t_z$  是注入的畸变时间, 即加入的死区时间。从图 1 中可知, 电流波形在前半周期保持正弦但频率不同于电网电压, 当该电流波形达到过零点, 输出电流将保持  $t_z$  时间的零值, 直到电压过零, 后半周期开始: 当输出电流再次达到过零点, 电流保持为零直到电压到达零值, 一个周期结束<sup>[12-13]</sup>。

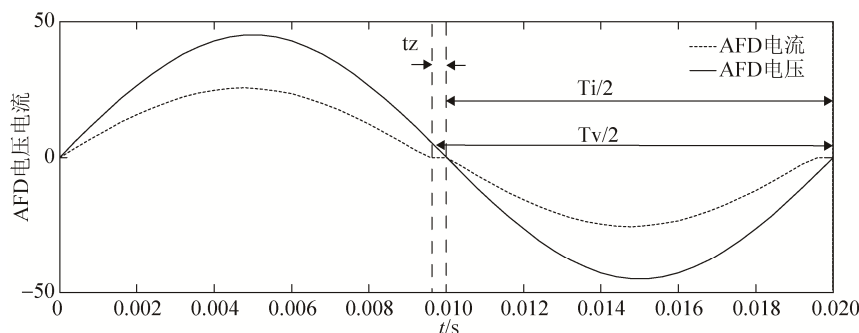


图 1 AFD 法原理图

Fig. 1 The principle fig of AFD method

<http://www.china-simulation.com>

• 1573 •

定义  $cf$  为斩波系数,

$$cf = \frac{2tz}{T_v} \quad (3)$$

利用傅里叶变换分析 AFD 电流的基波分量, 得到 AFD 电流超前逆变电压的相位角  $\frac{wtz}{2}$ , 定义为主动频率偏移角  $cf$ 。

$$\theta_{AFD} = \frac{wtz}{2} = \frac{\pi}{2} cf \quad (4)$$

当电网正常时, 由于电网的钳制作用, 逆变输出电压的频率和相位和电网电压相同。当电网断开后, 电流的相位角受 AFD 算法控制, 电流的相位角偏移, 使得逆变电压的相位角也偏移进而改变其频率, 当电压的频率偏移量超过阈值后, 启动孤岛保护。

### 3 检测盲区、对电能质量影响、检测速度分析

#### 3.1 检测盲区(NDZ)分析

##### 3.1.1 AFD 法检测盲区分析

电网失压后, 稳态工作点满足  $\angle G(jw) + \theta_{AFD} = 0$ ,  $\angle G(jw)$  为负载端电流超前电压的相位角。

$$\begin{aligned} \angle G(jw) &= \tan^{-1} \left( R \left( wC - \frac{1}{wL} \right) \right) = \\ &\tan^{-1} \left[ Q_f \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $w$  为公共点电压角频率;  $Q_f$  为负载品质因素;  $f_0$  为谐振频率。

因此稳态时有如下关系:

$$-\tan^{-1} \left[ Q_f \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right] = \frac{\pi cf}{2} \quad (6)$$

所以, AFD 法的 NDZ 上边界为:

$$f_{0\max} = \frac{1}{2} \left\{ -\frac{f_{\max} \tan \left( \frac{\pi cf}{2} \right)}{Q_f} + \sqrt{\frac{f_{\max}^2 \tan^2 \left( \frac{\pi cf}{2} \right)}{Q_f^2} + 4f_{\max}^2} \right\} \quad (7)$$

AFD 法的 NDZ 下边界为:

$$f_{0\min} = \frac{1}{2} \left\{ -\frac{f_{\min} \tan \left( \frac{\pi cf}{2} \right)}{Q_f} + \sqrt{\frac{f_{\min}^2 \tan^2 \left( \frac{\pi cf}{2} \right)}{Q_f^2} + 4f_{\min}^2} \right\} \quad (8)$$

因此可以绘制出 AFD 的 NDZ 图, 如图 2(a)所示。

##### 3.1.2 SMS 法盲区分析

电网失压达到稳态时, 稳态工作点满足  $\theta_{SMS} + \angle G(jw) = 0$ , 即:

$$\begin{aligned} -\tan^{-1} \left( R \left( wC - \frac{1}{wL} \right) \right) &= \\ -\tan^{-1} \left[ Q_f \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right] &= \\ \theta_{SMS} = \theta_m \sin \left( \frac{\pi}{2} \times \frac{f - f_g}{f_m - f_g} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

所以, SMS 法的 NDZ 边界为:

$$f_{0\max} = \frac{1}{2} \left\{ -\frac{f_{\max} \tan[\theta_{SMS}(f_{\max})]}{Q_f} + \sqrt{\frac{f_{\max}^2 \tan^2[\theta_{SMS}(f_{\max})]}{Q_f^2} + 4f_{\max}^2} \right\} \quad (10)$$

当  $f_0 > f_g$

$$f_{0\min} = \frac{1}{2} \left\{ -\frac{f_{\min} \tan[\theta_{SMS}(f_{\max})]}{Q_f} + \sqrt{\frac{f_{\min}^2 \tan^2[\theta_{SMS}(f_{\max})]}{Q_f^2} + 4f_{\min}^2} \right\} \quad (11)$$

当  $f_0 < f_g$

可以绘制出 SMS 法的盲区图如图 2(b)所示。

由图 2 可知, AFD 法和 SMS 法的检测盲区都集中在负载谐振频率在 50HZ 附近并且品质因素高的区域, 可见两种方法在负载品质因素高而且谐振频率在 50HZ 时, 检测效果都不好。但 AFD 法的盲区在负载品质因素更小的区域, 并且检测盲区没有明显的对称性, 这增加了选择孤岛检测算法时的难度。在增大斩波系数对电能质量影响更大的情况下, 没有明显地减小检测盲区, 所以在这种情况下 AFD 法的性价比更低。

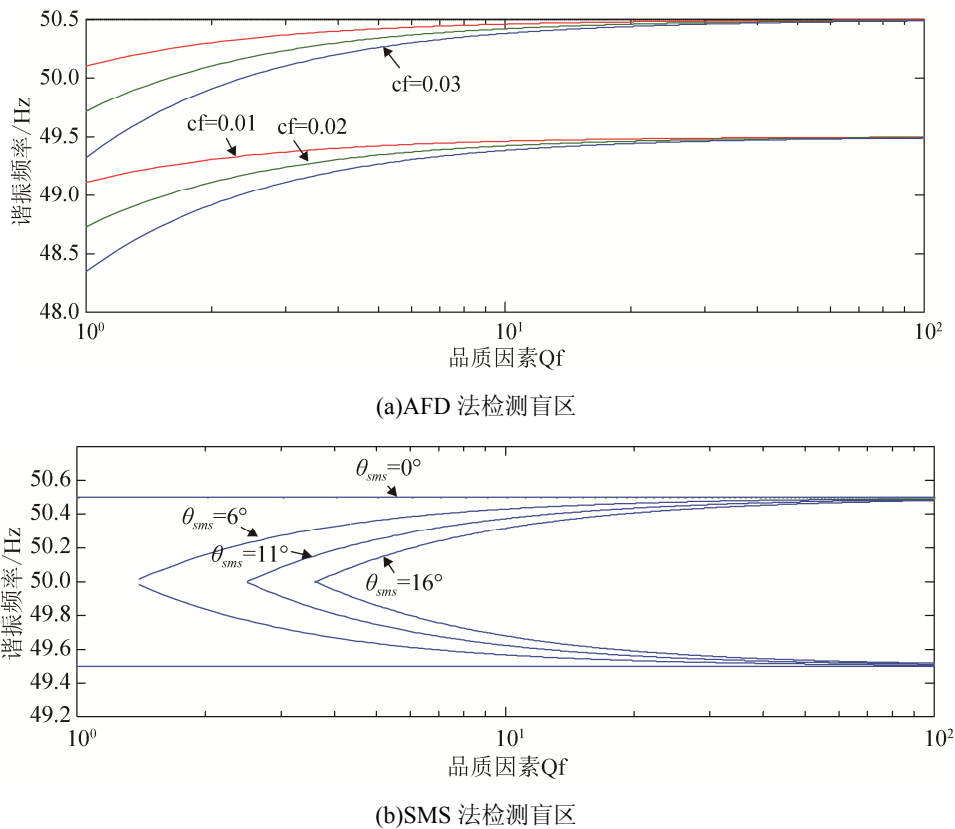


图 2 AFD 和 SMS 法检测盲区

Fig. 2 The NDZ of AFD method and SMS method

### 3.2 对电能质量的影响

对电能质量的影响主要是通过计算两种方法的造成逆变电流的总谐波失真(THD)。对逆变电流进行快速傅里叶变换, 计算出 THD。

在 AFD 法中, 当  $cf=0.04$  时参考电流的波形及其谐波分布见图 3(a)。当  $cf$  取不同参数时, 其参考电流的 THD 见表 1。在 SMS 法中, 给定电流为:

$$I = I_m \sin(2\pi f_0 t + \theta_{SMS}) \quad (12)$$

在电网正常时, 由于电网的钳制, 公共点频率不会发生变化, 由公式(1)可知,  $\theta_{SMS}$  趋近与 0, 所以在电网正常工作时, SMS 法对电网的 THD 不会产生影响。当电网断开后, 公共点电压频率失去电网的钳制作用, 由公式(1)可知, 随着频率不断偏移,  $\theta_{SMS}$  越来越大, 逆变输出电流 THD 也越来越大。图 3(b)所示为  $f-f_g=0.5$  Hz,  $\theta_m=11^\circ$  时的参考电流输出波形图, 对其进行快速傅里叶变换分析, 得到图 3(b)所示的谐波分布图。表 2 列出了不同的

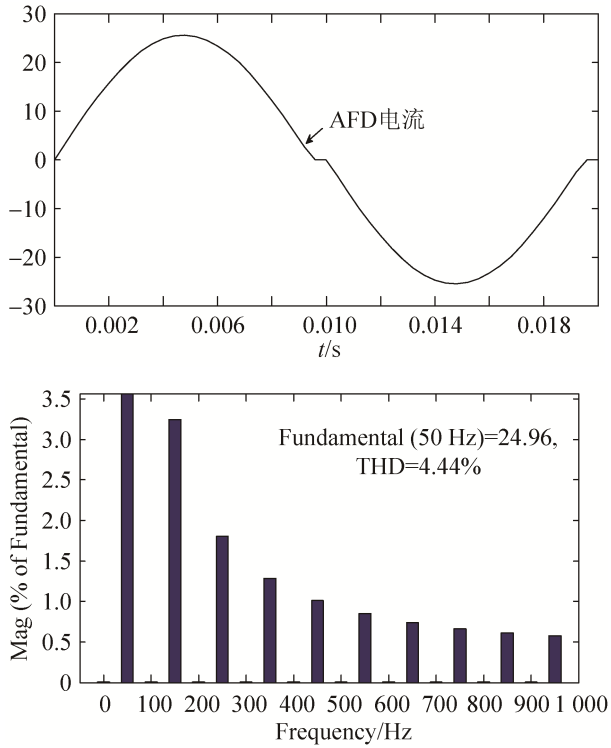
$f-f_g$  和不同的  $\theta_m$  条件下参考电流的谐波。

当电网未断开时,  $f-f_g=0$ , 所以此时 SMS 法对电能质量没有影响, AFD 法因为固定向逆变电流添加扰动量, 只要  $cf > 0$ , THD 总不为 0, 所以在电网未断开时, SMS 法优于 AFD 法。当电网断开后, 不同参数条件下, 两种方法对电能质量的影响不同。本文通过分析两种方法在盲区相同的情况下, 来比较两种方法对电能质量的影响情况。

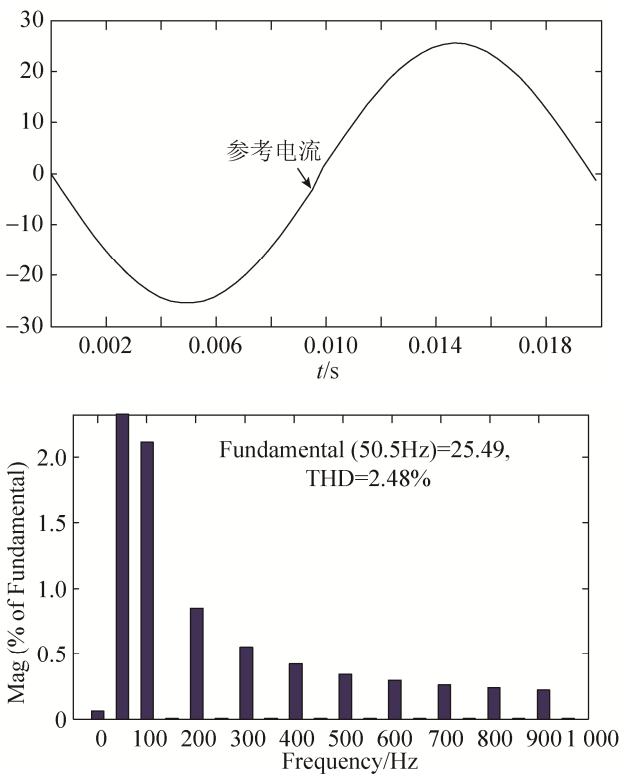
即:

$$\frac{\pi cf}{2} = \theta_m \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f-f_g}{f_m-f_g}\right) \quad (13)$$

取不同参数, 使等式两边成立, 比较两种方法参考电流的 THD, 绘制表 3。由表 3 所示, 当电网断开后, 两种检测方法盲区相同时, AFD 法参考电流的 THD 总是比 SMS 法大, 综合可知, 无论是在断网前还是断网后, AFD 法都比 SMS 法对电能质量的影响更大。



(a) AFD 法逆变输出电流波形及其谐波分布图



(b) SMS 法逆变输出电流波形及其谐波分布图

图3 AFD和SMS逆变输出电流波形和谐波分布图

Fig. 3 The inverted output current waveform and harmonic distribution diagram of AFD method and SMS method

表1 AFD法的THD

Tab. 1 The THD of AFD method

$cf$	0.02	0.03	0.04	0.05
THD	1.82%	3.27%	4.44%	5.32%

表2 SMS法的THD

Tab. 2 The THD of SMS method

$f-f_g$	$6\sin(0.5\pi \times \Delta f/3)$	$11\sin(0.5\pi \times \Delta f/3)$	$16\sin(0.5\pi \times \Delta f/3)$
0.2	0.55%	1.00%	1.46%
0.3	0.82%	1.49%	2.17%
0.4	1.08%	1.98%	2.89%
0.5	1.35%	2.48%	3.62%

表3 THD对比分析表

Tab. 3 The comparative analysis table of THD

THD	$\theta_m = 6^\circ$	
$\Delta f = 0.2$	0.55%	$cf = 0.0070$ 0.73%
$\Delta f = 0.4$	1.08%	$cf = 0.0139$ 1.47%
$\Delta f = 0.6$	1.61%	$cf = 0.0206$ 2.21%
THD	$\theta_m = 11^\circ$	
$\Delta f = 0.2$	1.00%	$cf = 0.0128$ 1.36%
$\Delta f = 0.4$	1.98%	$cf = 0.0254$ 2.75%
$\Delta f = 0.6$	2.95%	$cf = 0.0378$ 4.18%
THD	$\theta_m = 16^\circ$	
$\Delta f = 0.2$	1.46%	$cf = 0.0186$ 1.77%
$\Delta f = 0.4$	2.89%	$cf = 0.0370$ 4.09%
$\Delta f = 0.6$	4.63%	$cf = 0.0549$ 5.80%

### 3.3 检测速度分析

对孤岛检测速度的分析也是一项重要指标,我国《光伏系统并网技术要求》(GB/1T9939-2005)中规定,当光伏系统并入的电网失压时,必须在规定的时限内将光伏系统和电网断开,防止出现孤岛效应。当电网失压时,防孤岛效应保护应在2s内动作,将光伏系统与电网断开。

主动法除了减小了被动法的检测盲区,在检测

速度方面, 由于添加的扰动量, 逆变电流的相位角快速偏离逆变输出电压, 使得逆变输出电压频率快速偏离阈值, 大大加快了检测速度。但 AFD 法和 SMS 不同参数对电流相位的扰动量不同, 造成其在检测速度方面的区别。绘制两种方法在谐振频率为 50 Hz 时不同参数条件下的相位—频率曲线, 如图 4 所示。由于在频率 49.5~50 的区间和 50~50.5 的区间两种方法都存在对称性, 所以本文只讨论频率范围在 50~50.5 的区间。

从图 4 可知, 不同参数条件下, 同一种方法, 参数设置越大, 引起的电流相位偏差越大, 相应电压频率越快偏离阈值, 检测速度越快。在频率区间 50~50.5 的范围内, SMS 法的相位角和负载的相位角差值与频率的变化成比例关系, cf 法则是固定的差值。可以看出, 当电网断开时, 当频率偏差很小时, SMS 法的算法原理决定电流相位偏差很小, 此时 AFD 法带来的频率变化比 SMS 大。当频率偏差很大时, SMS 法引起的电流相位偏差比 AFD 法大, 此时 SMS 法带来的频率变化比 AFD 法大。当频率越来越靠近阈值时, SMS 法电压频率偏移速度越来越大。不同的参数带来的影响是两种方法的相位角交点位置的不同。当  $cf=0.03$ ,  $\theta_m=6^\circ$  时, 两种方法没有相位交点, 这种情况下 AFD 法的检测速度是快于 SMS 法。当  $cf=0.01$  时,  $\theta_m=16^\circ$  时, 相位交点为频率为 50.1 附近, 这种情况下 SMS 法的检测速度是快于 SMS 法的。所以, 两种方法在检测速度上的区别取决于参数的不同。

## 4 系统的仿真与结果分析

根据上述这两种方法的原理, 本文采用 matlab/simulink 对这两种孤岛检测方法进行仿真。用直流电压源代替光伏电池板, 直流电压源设置为 400 V。滤波电感设置为 6mH, 利用 Simulink 模块库中固有锁相环 PLL 获得电网相位和频率信号, 经过 S-function 模块输出参考电流  $iref$ ,  $iref$  与逆变输出的电流经过 PI 调节(取  $kp=80$ ,  $ki=200$ ), 使得逆变输出电流跟踪参考电流。将逆变输出电压作为调制波, 以 40KHZ 的三角波作为载波, 比较后输出 PWM 波控制 IGBT 开关管的开通和关断。该模型由直流电源, 逆变器, 负载和电网构成。其中, 用断路器和阶跃信号来控制电网的通断。仿真模型如图 5 所示。设置两种情景来验证理论分析的结果。

$$\text{情景 1: } cf=0.0254, \theta_{SMS} = 11^\circ \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f-f_g}{f_m-f_g}\right),$$

此时  $\Delta f=0.4$  时两种方法盲区相同, 并分析  $\Delta f=0.4$  时两种方法逆变电流的 THD。分别对 AFD 和 SMS 法进行仿真, 仿真结果如图 6。

$$\text{情景 2: } cf=0.04, \theta_{SMS} = 16^\circ \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f-f_g}{f_m-f_g}\right) \text{ 时,}$$

此时  $\Delta f=0.2745$  时两种方法盲区相同, 分别对 SMS 和 AFD 法进行仿真, 并分析  $\Delta f=0.2745$  时两种方法逆变电流的 THD, 如图 7 所示。

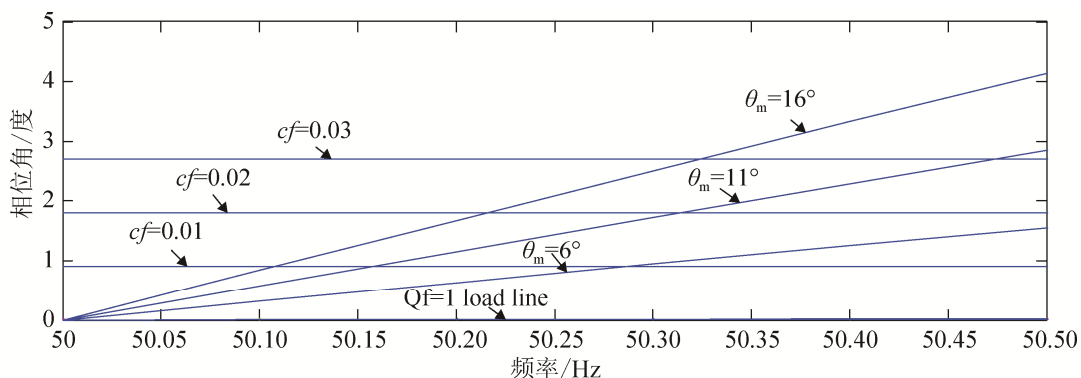


图 4 SMS、AFD 法和负载在不同参数下的相位-频率曲线

Fig. 4 The phase-frequency curves for SMS method, AFD method, and load under different parameters



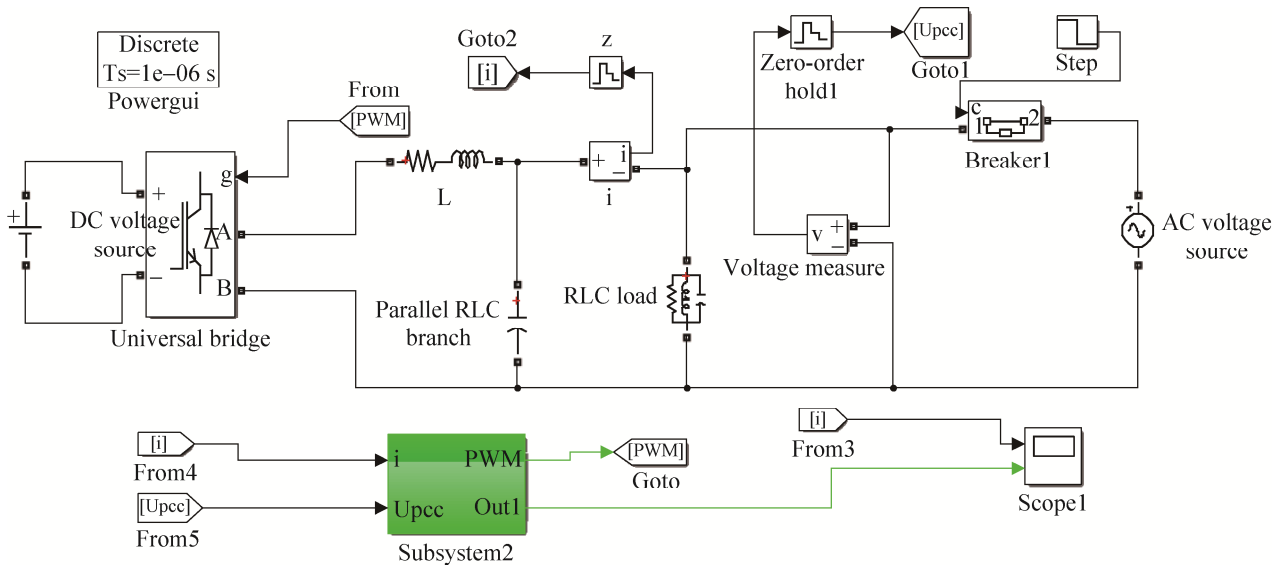
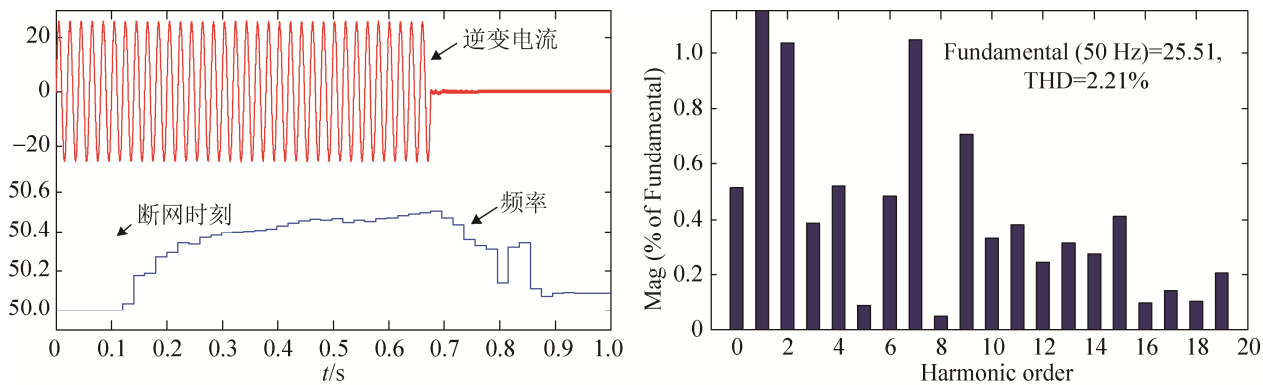
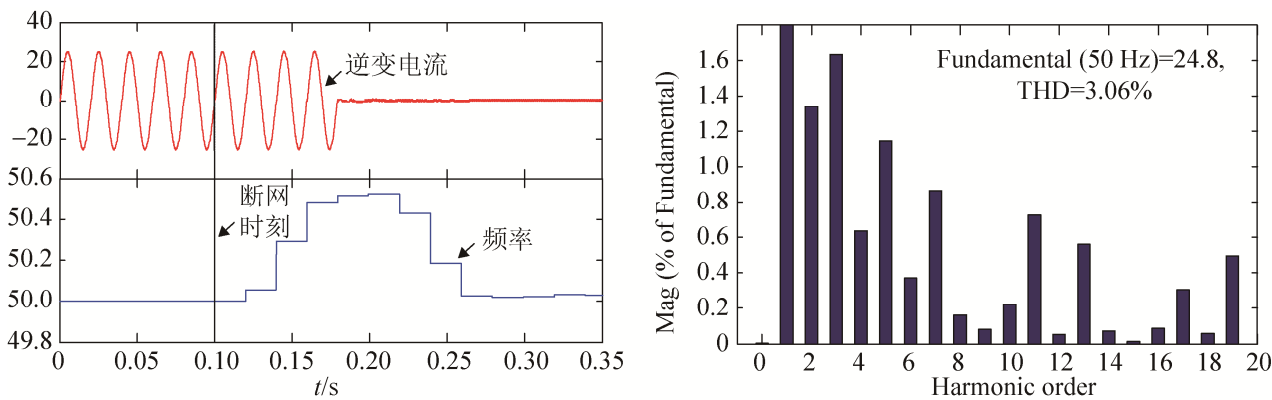


图5 AFD和SMS法matlab/Simulink模型图  
Fig. 5 The matlab/Simulink model diagram of AFD method and SMS method



(a) SMS 逆变输出电流波形和频率变化及谐波分布图



(b) AFD 逆变输出电流波形和频率变化及谐波分布图

图6 输出波形对比分析图

Fig. 6 The comparison and analysis diagram of the output waveform

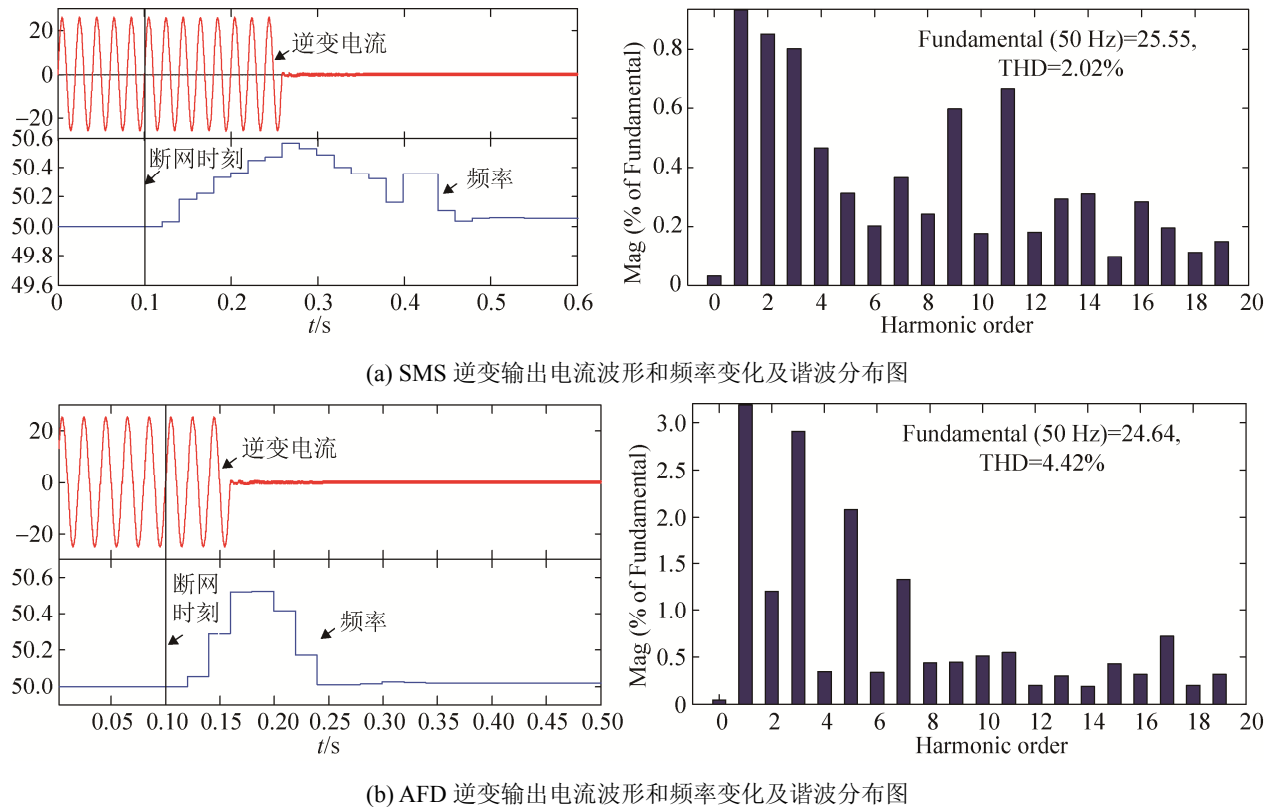


图 7 输出波形对比分析图

Fig. 7 The comparison and analysis diagram of the output waveform

在情景一中, 当两种方法盲区相同时, SMS 法逆变电流的 THD 为 2.21%, 检测时间为 0.57S, AFD 法的逆变电流的 THD 为 3.06%, 检测时间为 0.08S; 在情景二中, 当两种方法盲区相同时, SMS 法逆变电流的 THD 为 20.2%, 检测时间为 0.16 s, AFD 法的逆变电流 THD 为 4.42%, 检测时间为 0.06 s。

由实验结果可知, 在断网后, 当两种方法盲区相同时, SMS 法的逆变电流的 THD 都比 AFD 低, 这与理论分析结果相符。而两种方法的检测速度取决于参数的不同取值, 情景一时 SMS 法比 AFD 的检测速度慢很多, 情景二  $cf$  减小,  $\theta_m$  增加, 两种速度差大大减小, 这与理论分析相同。从而可以得出结论, 在电网正常工作时, SMS 对电能质量没有影响, 而 AFD 则对电网添加固定的扰动, 因此这种情况下 SMS 法具有明显的优势; 当孤岛形成后, 在盲区相同的情况下, SMS 法对电能质量的影响也都比 AFD 法小, 两者检测速度情况因参数不同而不同。

## 5 结论

文章先从理论上分析了 AFD 和 SMS 法在不同参数条件下的检测盲区, 对电能质量的影响和检测速度。两种方法的检测盲区都分布在谐振频率在 50HZ 附近和负载品质因素高的区域。在两种方法盲区相同时, SMS 法对造成的逆变电流的总谐波含量更小。在检测速度方面, AFD 法由于添加的是固定的扰动信号, 频率的变化速度恒定。SMS 的频率变化快慢取决于电网失压后频率偏差情况。逆变电压频率越接近阈值, 其频率变化越快。两种方法在检测速度上的区别取决于参数的不同。在 matlab 的 simulink 中对两种方法进行仿真。分别设置两种情形进行理论分析验证, 最后仿真结果印证了理论分析的结果。

从图 2 和图 3 可知, 两种方法在品质因素高的情形下, 都存在很大的检测盲区。这大大限制了两种方法的现实应用, 因此, 对两种方法的改进尤为

重要。SMS法在对电能质量影响上相比于AFD法，存在明显的优势，因此对SMS法的改进进而加快SMS法的检测速度也是今后一个研究重点。

本文只是在检测盲区上，对电能质量影响，检测速度方面比较两种方法的优劣，在其他方面两种方法的优缺点还有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems[S]. IEEE Std. 929-2000.
- [2] Khamis A, Shareef H, Bizkevelci E, et al. A review of islanding detection techniques for renewable distributed generation systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews(S1364-0321), 2013, 28(8): 483-493.
- [3] Ahmad K N E K, Selvaraj J, Rahim N A. A review of the islanding detection methods in grid-connected PV inverters[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews (S1364-0321), 2013, 215: 756-766.
- [4] 郭小强, 赵清林, 郭伟扬. 光伏并网发电系统孤岛检测技术[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 157-162.  
Guo Xiaoqiang, Zhao Qinglin, Wu Weiyang. Islanding Detection Method for Photovoltaic Grid-Connected Power System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 157-162.
- [5] 余运俊, 张燕飞, 万晓凤, 等. 光伏微网主动式孤岛检测方法综述[J]. 电测与仪表, 2014, 51(1): 22-29, 100.  
Yu Yun-jun, Zhang Yanfei, Wan Xiaofeng, et al. Active Islanding Detection for PV Micro-Grid: A Survey[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(1): 22-29, 100.
- [6] 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 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.
- [7] Huang W, Zheng T, Yuan F, et al. Analysis of the NDZ formulation theory of active frequency shift islanding detection method for grid-connected PV system[C]// Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2013 IEEE PES Asia-Pacific. IEEE, 2013: 1-5.
- [8] Hongpeng L, Guihua L, Wei W, et al. Research on a novel islanding detection technique[C]//Intelligent Control and Automation (WCICA), 2014 11<sup>th</sup> World Congress on. IEEE, 2014: 5448-5452.
- [9] Chen W, Wang G, Zhu X, et al. An improved active frequency drift islanding detection method with lower total harmonic distortion[C]//Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE. IEEE, 2013: 5248-5252.
- [10] Bifaretti S, Lidozzi A, Solero L, et al. Anti-islanding detector based on a robust PLL[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on(S0093-9994), 2015, 51(1): 398-405.
- [11] 陈跃, 郑寿森, 祁新梅, 等. 光伏并网系统主动移相式孤岛检测算法的改进[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(4): 748-752.  
Chen Yue, Zheng Shousen, Qi Xinmei, et al. Improvement of Active Phase-shifting Islanding Detection Algorithm in Photovoltaic Grid-Connected Systems[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(4): 748-752.
- [12] Yafaoui A, Wu B, Kouro S. Improved active frequency drift anti-islanding detection method for grid connected photovoltaic systems[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on(S0885-8993), 2012, 27(5): 2367-2375.
- [13] 刘方锐, 余蜜, 张宇, 等. 主动移频法在光伏并网逆变器并联运行下的孤岛检测机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 47-51.  
Liu Fangrui, Yu Mi, Zhang Yu, et al. Islanding Detection Evaluation for Active Frequency Drifting Methods in Multiple Photovoltaic Grid-connected Converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 47-51.