

# 基于改进滑模频移法的孤岛检测算法研究

胡丹丹<sup>1</sup>, 赵倩<sup>1</sup>, 许昊<sup>1</sup>, 朱哲然<sup>1</sup>, 龙洁<sup>1</sup>, 朱立尧<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司焦作供电公司, 河南 焦作 454150;

2. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 基于传统滑模频移法难以兼顾检测速度和对电能质量影响的问题, 提出了一种基于根号 tan 函数的改进滑模频移算法, 在有效提高检测速度的同时降低了扰动对电能质量的影响, 此外, 改进算法的扰动函数具备初始斜率无穷大的特点, 可以有效地提高检测可靠性。通过仿真和实验结果验证了算法的准确性和有效性。

**关键词:** 滑模频率偏移; 孤岛检测; 检测速度

**中图分类号:** TM615 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed20565

## Research on Islands Detection Based on Improved Slip-mode Frequency Shift Method

HU Dandan<sup>1</sup>, ZHAO Qian<sup>1</sup>, XU Hao<sup>1</sup>, ZHU Zheran<sup>1</sup>, LONG Jie<sup>1</sup>, ZHU Liyao<sup>2</sup>

(1. State Grid Henan Electric Power Company Jiaozuo Power Supply Company, Jiaozuo 454150, Henan, China;

2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Based on the problem that the traditional slip-mode frequency shift method can not take into account both the detection speed and the impact on power quality, an improved slip-mode frequency shift algorithm was proposed, which could effectively improve the detection speed while reducing the impact of disturbance on power quality. In addition, the disturbance function of the improved algorithm has the characteristics of infinite initial slope, so it could effectively improve the detection reliability. The simulation and experiment results prove the accuracy and validity of the algorithm.

**Key words:** slip-mode frequency shift(SMS); islanding detection; detection speed

随着分布式并网光伏发电系统技术的快速发展,越来越多的分布式系统并入电网中,对其供电的可靠性和安全性要求也日益提高,同时一些问题也凸显而出,其中比较典型的便是“孤岛效应”。孤岛效应可能会造成电能质量降低、本地负载损坏、工作人员触电等危害<sup>[1]</sup>,因此及时有效地检测出孤岛效应便显得尤为重要,我国于2005年发布了孤岛检测的相关标准,要求光伏逆变器设备至少具备一种孤岛检测方法且必须保证孤岛发生时设备在2 s内切除电网。目前常见的孤岛检测法可分为三类:远程通信法、被动检测法及主动检测法。文献[2-6]介绍了各类检测方法的优缺点。

滑模频移法(slip-mode frequency shift, SMS)是主动检测法的一种,其通过扰动电流相位的方法

使得频率越限,从而实现孤岛检测。文献[7]提出一种基于模糊控制的改进SMS法,优化了扰动系数的选取。文献[8]提出在检测算法中加入额外的相角偏移量,以此提高检测可靠性,但也加大了扰动对电能质量的影响。文献[9]提出了一种将滑模频移法和相位突变法结合的混合检测法,但实际情况中,由较小扰动引起的相位突变阈值难以整定。

SMS法具备对电能质量影响小、能消除特定负载品质因数(通常为2.5)以下的检测盲区等优点,但存在检测初始时刻负载曲线和扰动曲线提前重合,进而导致检测速度大幅降低甚至检测失败的问题,为改善这一问题,并提高检测速度、进一步降低对电能质量的影响,提出了一种改进SMS检测算法,文中对其可行性和有效性进行了

**基金项目:** 国家电网公司科技项目资助(SGHAJZ00XTJS1800653)

**作者简介:** 胡丹丹(1987—),女,本科,工程师,Email:654509112@qq.com

分析,并通过PSIM仿真软件和实验平台进行验证。

### 1 传统SMS法分析

传统的滑模频移法通过改变公共耦合点(point of common coupling, PCC)处电流相位的方式扰动PCC处的电压频率,孤岛情况下,电压频率失去主电网的钳制,会产生一定程度的变化,而频率的变化会进一步加大相位变化量,直至频率到达稳定点,即通过正反馈的作用使逆变器输出电压的频率迅速脱离正常的频率波动范围,进而检测出孤岛。

传统滑模频移法的扰动函数可表示为

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

式中: $\theta_m$ 为最大移相角(可视为扰动系数); $f_m$ 为最大移相角对应的频率; $f$ 为公共耦合点处电压频率; $f_g$ 为电网频率,一般为50 Hz。

图1为PCC处电压相位与频率之间的关系,其中直线为本地负载的相位响应,曲线为滑模频移法扰动函数的相位响应。 $B$ 点为系统正常运行时的额定频率点,孤岛状态下,频率会受到扰动和本地负载的影响发生偏离,最终稳定在 $A$ 点或 $C$ 点。

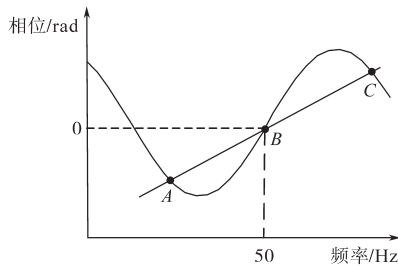


图1 滑模频率偏移法的相位与频率的关系  
Fig.1 The relation between phase and frequency of SMF migration method

将图1相位响应局部放大,如图2所示。

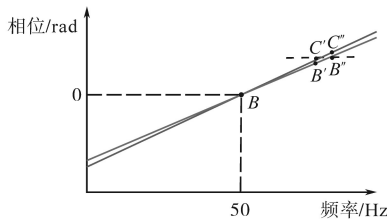


图2 滑模频率偏移法的相位与频率的关系局部放大  
Fig.2 Relation between phase and frequency of SMF migration method with local amplification

图2中,初始状态下,频率 $f$ 位于 $B$ 点,受到本地负载的影响,PCC处电压频率 $f$ 会发生微小的

偏移,至 $B'$ 点,该频率在扰动曲线所对应的干扰点为 $C'$ 点, $f$ 受其影响朝着 $C'$ 点的方向继续发生偏移至 $B''$ ( $B''$ 对应的相位响应与 $C'$ 点一致)点,此时干扰点为 $C''$ 点,不断重复这一过程形成反馈, $f$ 会不断发生偏移,直至负载曲线和扰动曲线相交, $f$ 最终达到稳定。

图3为不同扰动系数下滑模频移法相位与频率关系图,其中,直线为品质因数为2.5的本地负载的相位响应,当扰动函数响应曲线的初始斜率小于负载响应曲线(对应扰动系数 $\theta_m=1^\circ$ ),扰动无法产生有效作用,反馈无法形成,如果扰动系数不够大( $\theta_m=3^\circ$ ),会在频率越限之前提前达到稳定点,因此需要合理选择扰动系数的值。随着扰动系数的增加,扰动函数的初始斜率会不断增加,越容易形成反馈,但在系统正常运行情况下的干扰量也随之增大,即对电能质量的不利影响愈加严重。

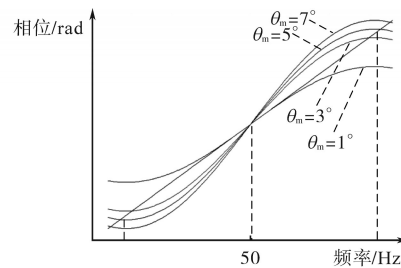


图3 不同扰动系数下滑模频移法相位与频率关系  
Fig.3 The relation between phase and frequency of SMS with different perturbation coefficients

综上可知,滑模频移法的实现需满足如下两点:1) $B$ 点处扰动函数的初始斜率应大于负载曲线的斜率;2) $A$ 点或 $C$ 点处的频率不在系统正常频率波动范围内。

为适应我国光伏逆变器的实际情况以及对于孤岛检测的要求,通常令 $\theta_m=5^\circ$ , $f_m-f_g=1$  Hz,在该参数下相位扰动可使频率迅速脱离出49.5~50.5 Hz的频率范围,且对于品质因数 $Q_f \leq 2.5$ 的负载无检测盲区,因此可以较好的检测出 $Q_f \leq 2.5$ 时的孤岛情况<sup>[10]</sup>。

由于系统正常运行时,频率波动范围为49.8~50.2 Hz,因此在 $\Delta f = \pm 0.2$  Hz时,将 $f-f_g=0.2$  Hz, $\theta_m=5^\circ$ , $f_m-f_g=1$  Hz代入式(1),求解得到 $\delta_{扰动} = 1.54^\circ$ ,此角度即为滑模频移法在系统正常运行时的扰动角,其可以反映所施加的扰动对电能质量的影响。

由以上分析可知,滑模频移法是通过反馈的

方式不断增加扰动量,直至频率越限。由图2可见,当扰动系数较低时,在初始时刻附近,负载曲线与扰动曲线接近重合,一些微小的扰动都可能导致B'点和C'点提前重合,使得反馈作用无法可靠形成,进而导致检测速度大幅降低,甚至检测失败,因此扰动函数的初始斜率大小尤为重要。

## 2 改进SMS算法原理分析

### 2.1 改进滑模频移法提出

为减小SMS算法对电能质量的影响,并提高孤岛检测速度,避免孤岛发生初始时刻扰动曲线与负载曲线提前重合进而导致检测速度降低甚至检测失败的问题,文章提出一种改进型滑模频移孤岛检测方法,对传统SMS算法的扰动函数进行改进优化,改进算法的扰动函数表达式为

$$\delta = \begin{cases} k\sqrt{|\tan[\frac{\pi}{2}(f-f_g)]|} & f \geq f_g \\ -k\sqrt{|\tan[\frac{\pi}{2}(f_g-f)]|} & f < f_g \end{cases} \quad (2)$$

式中: $k$ 为扰动系数。

该函数的曲线如图4所示,可见扰动函数的初始斜率为无穷大,可以满足在较高品质因数条件下,负载曲线初始斜率始终小于扰动曲线的初始斜率,因此即使系数 $k$ 设定值很小,初始时刻扰动曲线也会迅速脱离负载曲线附近,不会与负载曲线提前重合,使得反馈作用可以更加快速、可靠地形成,进而保证检测可靠性并提高了检测速度。

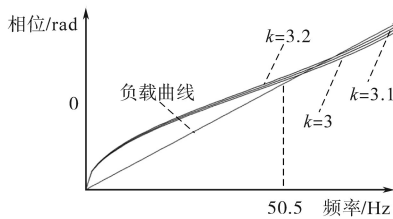


图4 改进滑模频移法的相位与频率的关系  
Fig.4 The relationship between phase and frequency of improved SMS method

为有效地实现孤岛检测,需要对扰动函数中的扰动系数 $k$ 值进行整定,与传统SMS算法类似,扰动系数过小,可能导致检测速度降低甚至检测失败;扰动系数过高,虽然可以消除特定品质因数下的检测盲区,但也加大了扰动对电能质量的影响。因此需要设定合理的扰动系数,扰动系数 $k$ 的整定过程如第2.2节所述。

### 2.2 改进算法盲区分析及扰动系数整定

由于扰动函数具备初始斜率无穷大的特点,因此仅需考虑第1节条件2),即稳定点的频率越限(49.5~50.5 Hz),采用 $Q_{i0} \times C_{norm}$ 空间描述法对扰动系数 $k$ 进行整定,其中横坐标采用类负载品质因数的参数 $Q_{i0}$ ,纵坐标采用的“标准化电容” $C_{norm}$ ,可表示为

$$Q_{i0} = \frac{R}{\omega_0 L} \quad (3)$$

$$C_{norm} = \frac{C}{C_{res}} \quad (4)$$

其中

$$C_{res} = \frac{1}{L\omega_0^2}$$

式中: $R, L, C$ 分别为本地负载的电阻、电感、电容值; $\omega_0$ 为电网角频率。

$Q_{i0} \times C_{norm}$ 空间描述法的相位判据为下式:

$$\arctan [ R(\omega C - \frac{1}{\omega L}) ] \leq \varphi_{inv} \quad (5)$$

式中: $\varphi_{inv}$ 为特定反孤岛策略下逆变器输出电流超前于公共耦合点电压的相位角。

对于文章提出的改进滑模频移法, $\varphi_{inv}$ 可表示为

$$\varphi_{inv} = k\sqrt{|\tan[\frac{\pi}{2}(f-f_g)]|} \quad (6)$$

公共耦合点PCC处的角频率 $\omega$ 可表示为

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \quad (7)$$

式中: $\Delta\omega$ 为公共电网角频率的微偏量。

由式(4)“标准化电容”的定义可知:

$$C = C_{norm} C_{res} = C_{res} (1 + \Delta C) \quad (8)$$

式中: $\Delta C$ 为负载电容的微偏量。

联立式(3)~式(8),化简整理得到:

$$\arctan [ Q_{i0} \omega_0 \frac{(\frac{\Delta\omega}{\omega_0})^2 + \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} + \Delta C (1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0})^2}{\omega_0 + \Delta\omega} ] \leq k\sqrt{|\tan[\frac{\pi}{2}(f-f_g)]|} \quad (9)$$

根据我国相关负载品质因数要求以及IEEE Std.929—2000的相关规定,取 $Q_{i0}=2.5, C_{norm}=1, \omega_0=2\pi \times 50$  Hz,  $\Delta\omega=\pm 2\pi \times 0.5$  Hz,  $f-f_g=0.5$  Hz根据孤岛检测理论无盲区条件,令 $\Delta C=0$ ,将以上各参数代入式(9),化简得到:

$$\arctan [ 2.5 \times 50 \times \frac{(\frac{0.5}{50})^2 + \frac{2 \times 0.5}{50} + 0 \times (1 + \frac{0.5}{50})^2}{50 + 0.5} ] \leq k\sqrt{|\tan(\frac{\pi}{2} \times 0.5)|} \quad (10)$$

求解式(10),可得到 $k \geq 2.86$ ,即 $k$ 取2.86时,理论上改进滑模频移法不存在检测盲区,由于电网正常频率波动范围为 $\Delta f = \pm 0.2$  Hz,将 $f - f_g = 0.2$  Hz, $k = 2.86$ 代入式(2),求解得此时改进滑模频移法带来的扰动角 $\delta_{\text{扰动}(k=2.86)} = 1.68^\circ$ ,可见此时扰动角较大,为降低初始扰动角,并进一步提高检测效率,选择设定可变的系数 $k$ ,其参数整定过程如下:系统正常运行时,频率在49.8~50.2 Hz,可使扰动系数 $k$ 在这一频率范围内较低,当频率脱离这一范围时,增大 $k$ 值,以此加大扰动,加快频率越限速度。由于改进滑模频移法具备初始斜率为无穷大(远大于负载线斜率)的特点,因此初始较低的 $k$ 值不会降低检测成功率。

为得到可变系数 $k$ 的初始值,将 $\Delta f = \pm 0.2$  Hz代入式(9),得到下式:

$$\arctan \left[ 2.5 \times 50 \frac{\left(\frac{0.2}{50}\right)^2 + \frac{2 \times 0.2}{50} + 0 \times \left(1 + \frac{0.2}{50}\right)^2}{50 + 0.2} \right] \leq k_{\min} \sqrt{\left| \tan \left( \frac{\pi}{2} \times 0.2 \right) \right|} \quad (11)$$

求解式(11)可得 $k_{\min} = 1.94$ ,取 $k_{\min} = 2$ ,此时可保证扰动使得频率变化量足以达到0.2 Hz,之后提高 $k$ 值,取 $k_{\max} = 5$ ,以此加快扰动速度。

在此扰动系数下,设置 $f - f_g = 0.2$  Hz, $k_{\min} = 2$ 代入式(2),求解得此时扰动角 $\delta_{\text{扰动}(k=2)} = 1.13^\circ$ ,而SMS法的扰动角 $\delta_{\text{扰动}} = 1.54^\circ$ ,可见此时扰动带来的相位偏差有了较大程度的降低。

### 2.3 改进算法工作流程

我国相关标准对孤岛检测的规定是从检测出孤岛至逆变器断开的时间不能超过2 s,同时如前文所述,为减小算法在正常运行状态下对电能质量的影响,在正常情况下加入较小的扰动,一旦频率超过一定的范围,认为系统可能处于孤岛状态下,此时增大扰动,加速频率的越限速度。具体流程如下:

如果孤岛发生后,电压和频率的变化程度满足以下4个条件之一:1)  $f > 50.5$  Hz; 2)  $f < 49.5$  Hz; 3)  $U_{\text{PCC}} > 1.10U_N$ ; 4)  $U_{\text{PCC}} < 0.88U_N$ ,即可直接通过PCC处的电压幅值或频率检测出孤岛,其中, $U_{\text{PCC}}$ 为公共耦合点处的电压; $U_N$ 为系统额定电压。

如果孤岛发生后,电压和频率的变化程度不满足以上4个条件,即需要额外加入扰动使频率越限才可以有效地检测出孤岛。文中所加入的

扰动如下:

当公共耦合点处电压频率 $f$ 满足 $49.8 \text{ Hz} \leq f \leq 50.2 \text{ Hz}$ 时,扰动函数如下式所示:

$$\delta = \begin{cases} 2 \sqrt{\left| \tan \left[ \frac{\pi}{2} (f - f_g) \right] \right|} & f \geq f_g \\ -2 \sqrt{\left| \tan \left[ \frac{\pi}{2} (f_g - f) \right] \right|} & f < f_g \end{cases} \quad (12)$$

扰动函数的方向应与PCC处电压频率方向保持一致,即 $50.2 \text{ Hz} > f > 50 \text{ Hz}$ 时,施加 $k=2$ 的正向扰动; $49.8 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$ 时,施加 $k=-2$ 的负向扰动;当 $f$ 位于 $f < 49.8 \text{ Hz}$ 或 $f > 50.2 \text{ Hz}$ 时,扰动函数如下式所示:

$$\delta = \begin{cases} 5 \sqrt{\left| \tan \left[ \frac{\pi}{2} (f - f_g) \right] \right|} & f \geq f_g \\ -5 \sqrt{\left| \tan \left[ \frac{\pi}{2} (f_g - f) \right] \right|} & f < f_g \end{cases} \quad (13)$$

当 $f < 49.8 \text{ Hz}$ ,施加恒定的负向扰动1 s;反之,若 $f > 50.2 \text{ Hz}$ ,施加恒定的正向扰动1 s。如果在1 s内频率越限( $f < 49.5 \text{ Hz}$ 或 $f > 50.5 \text{ Hz}$ ),则认为孤岛发生,立即断开逆变器;反之,认为是由其他问题引起的频率短暂超出正常波动范围( $49.5 \text{ Hz} < f < 49.8 \text{ Hz}$ 或 $50.5 \text{ Hz} > f > 50.2 \text{ Hz}$ ),重新进行检测流程。

图5为改进SMS算法整体流程图。

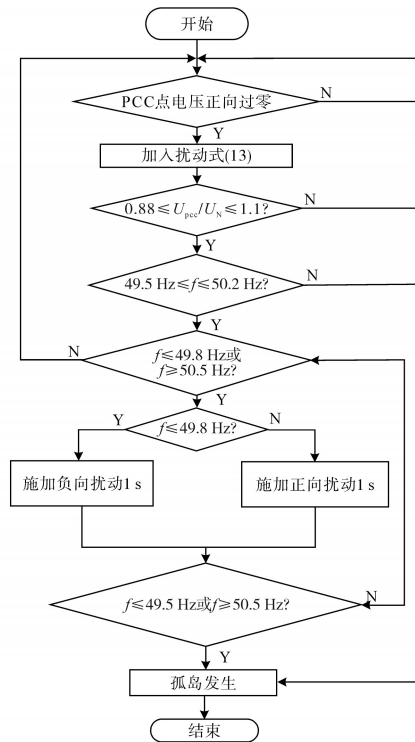


图5 改进SMS算法流程

Fig.5 Flow chart of SMS method improved



### 3 仿真及实验验证

#### 3.1 仿真验证

图6、图7分别为SMS法和改进法在谐振频率50 Hz时的孤岛检测情况,三相电网在1.2 s时断电。本地负载为三相对称的RLC并联负载,其中电阻为20.88 Ω,电容为365.5 μF,电感为24.58 mH,此负载所消耗的有功功率与逆变器提供的有功功率相等,因此在断网前后电压幅值不会产生变化,仿真测得此时负载谐振频率对应为50 Hz,该仿真环境为孤岛检测最不利情况。

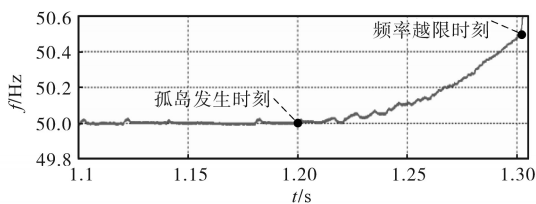


图6 SMS法在谐振频率50 Hz时的孤岛检测情况

Fig.6 The islanding detection of SMS method at 50 Hz resonance frequency

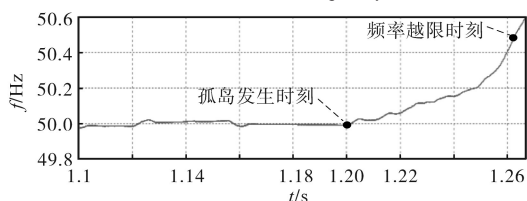


图7 改进法在谐振频率50 Hz时的孤岛检测情况

Fig.7 The islanding detection of the improved method at 50 Hz resonance frequency

由图6、图7可以看出:两种检测法在谐振频率为50 Hz时所对应的孤岛检测速度,SMS法在孤岛发生后0.103 s会检测到频率越限,而改进法在孤岛发生后0.064 s即可检测到频率越限,检测速度有了较大的提升。

为测试两种方法在不同谐振频率时所对应的检测效果,改变三相负载为 $R=20.88 \Omega$ , $L=24.58 \text{ mH}$ , $C=358.5 \mu\text{F}$ 。此时所对应的谐振频率为50.1 Hz。SMS法和改进法的仿真结果如图8、图9所示。

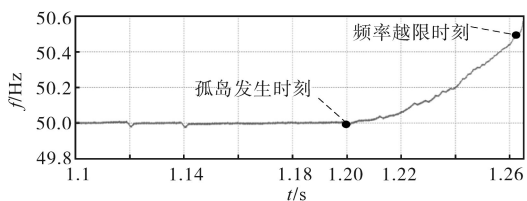


图8 SMS法在谐振频率50.1 Hz时的孤岛检测情况

Fig.8 The islanding detection of SMS method at 50.1 Hz resonance frequency

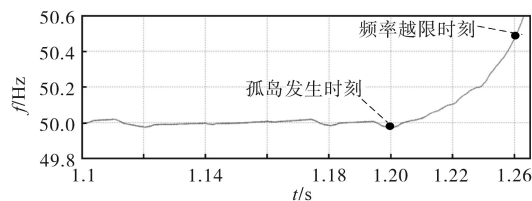


图9 改进法在谐振频率50.1 Hz时的孤岛检测情况

Fig.9 The islanding detection of the improved method at 50.1 Hz resonance frequency

由图8、图9可以看出:两种检测法在谐振频率为50.1 Hz时所对应的孤岛检测速度,SMS法在孤岛发生后0.062 s会检测到频率越限,而改进法在孤岛发生后0.04 s即可检测到频率越限。

#### 3.2 实验验证

为验证算法的有效性,搭建相应的孤岛检测实验平台,其中控制芯片选用DSP28335,功率器件选用IPM模块,三相电网电压有效值为79.5 V,频率50 Hz,直流母线电压260 V,采用LC滤波方式, $L_{\text{滤波}}=5 \text{ mH}$ , $C_{\text{滤波}}=10 \mu\text{F}$ ,负载电感 $L=20.5 \text{ mH}$ ,电容 $C=590 \mu\text{F}$ ,实际测试得到此时对应的负载谐振频率为50.05 Hz,负载电阻为可变电阻,通过调整可变电阻来改变负载品质因数 $Q_i$ ,测得 $Q_i$ 分别为2.54和3.16,将SMS算法和改进算法的扰动函数加入并网控制算法,利用PSIM生成相应DSP代码,实验得到波形如图10、图11所示。

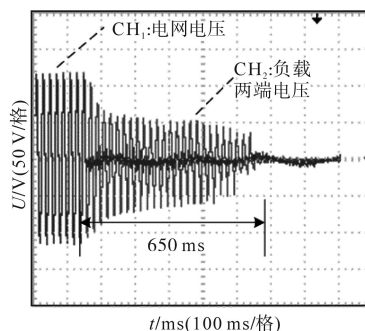


图10 SMS法, $Q_i=2.54$ 断电时孤岛检测波形

Fig. 10 SMS method,  $Q_i=2.54$  isolated island detection waveforms

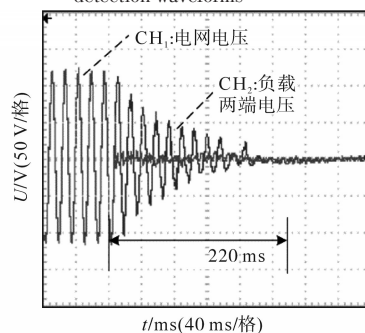


图11 改进法, $Q_i=2.54$ 断电时孤岛检测波形

Fig. 11 Improved method,  $Q_i=2.54$ , isolated island detection waveforms

图 10、图 11 分别为 SMS 法和改进法在  $Q_f=2.54$ , 断电时的孤岛检测情况,  $CH_1$  为电网  $u$  相电压波形,  $CH_2$  为  $u$  相负载两端电压波形, 可见  $CH_1$  突变为 0 时即为电网断电时刻, 由于频率还未越限, 逆变器仍然在工作, 因此负载两端仍有电压, 当频率越限时, 使逆变器输出断开, 负载电压降为 0。由图 10 和图 11 对比可以看出, SMS 法从孤岛发生至逆变器输出电压降为 0 需要约 650 ms, 而改进法仅需约 220 ms, 可见检测速度有了较大的提升。

图 12、图 13 分别为 SMS 法和改进法在  $Q_f=3.16$ , 断电时孤岛检测波形。

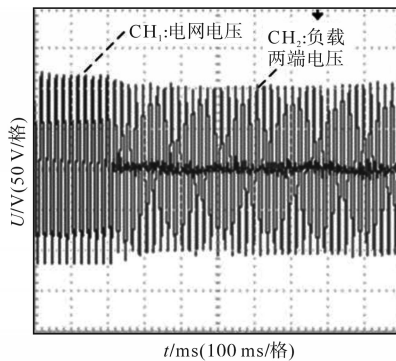


图 12 SMS 法,  $Q_f=3.16$  断电时孤岛检测波形

Fig.12 SMS method,  $Q_f=3.16$ , isolated island detection waveform

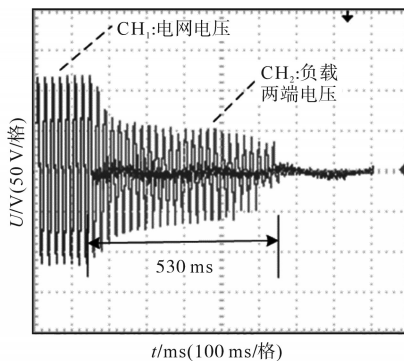


图 13 改进法,  $Q_f=3.16$  断电时孤岛检测波形

Fig.13 Improved method,  $Q_f=3.16$ , isolated island detection waveforms

由图 12 和图 13 对比可以看出, SMS 法在扰动系数为  $5^\circ$  时, 无法有效检测出孤岛状态, 而同情况下采用改进方法则可以有效检测出孤岛的

发生, 从孤岛发生至逆变器输出电压降为 0 需要约 530 ms。通过实验结果看出, 改进法较传统 SMS 法而言, 在实物平台上能够适应更加恶劣的检测情况, 同时也能保证检测速度。

## 4 结论

文章针对传统滑模频移法所存在的问题, 提出了一种新的改进算法, 利用改进函数的特点, 使得负载曲线与扰动曲线不会提前重合, 进而使得反馈作用可以有效产生, 提高检测速度, 同时使系统正常运行时检测算法所产生的扰动角 ( $\delta_{扰动}$ ) 明显减小, 从而降低了扰动对电能质量的影响。通过仿真和实验结果表明, 所提出的检测方法, 可以有效地提高检测速度和准确性。

### 参考文献

- [1] 张有兵, 穆森婕, 翁国庆, 等. 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.
- [2] 高蕾, 蒋平, 顾文, 等. 基于盲区判别的混合型孤岛检测方法[J]. 电力系统及其自化学报, 2017, 29(3): 74-78.
- [3] 余运俊, 张燕飞, 万晓凤. 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.
- [4] Velasco D, Trujillo CL, Garcera G, et al. Review of anti-islanding techniques in distributed generators[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(6): 1608-1614.
- [5] 鲍晓婷, 陈永强, 张超, 等. 一种改进的频率正反馈无功电流扰动孤岛检测研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(15): 25-30.
- [6] 李辉, 李肇汉, 郭忠涵. 微电网中改进主动频率式孤岛检测方法研究[J]. 电气传动, 2019, 49(1): 93-98.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 余运俊, 王鹤官, 范文奕. 基于滑模移频法的光伏发电并网系统孤岛检测混合算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(8): 32-37.
- [10] 刘芙蓉, 王辉, 康勇. 滑模频率偏移法的孤岛检测盲区分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 178-182.

收稿日期: 2019-07-16

修改稿日期: 2019-09-02