

# 改进型 Sandia 方法在孤岛检测中的应用研究

张立园, 王硕禾, 宋海旺, 齐赛赛, 薛 霏

(石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**针对在主动频移类孤岛检测方法中负载性质对检测效果存在影响的问题,提出了一种改进型 Sandia 检测方法。通过检测公共耦合点(PCC)电压与逆变器输出电流的相位差来判断负载性质,从而进一步确定是否改变扰动方向,最后判断出孤岛的发生。仿真结果表明,提出的方法可以在各种负载性质下有效地检测出孤岛效应的发生,有效防止了负载性质对检测效果的影响。

**关键词:**分布式发电系统;孤岛检测;Sandia 法;FFT 谱分析法

**中图分类号:** TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2019)04-0081-08

## 0 引言

孤岛效应是当电网因发生故障导致跳闸不再进行供电时,分布式发电系统不能够及时检测到停电状态并切断电网,最后与周围的负载形成一个自给供电、不受外界控制的孤岛供电系统<sup>[1-3]</sup>。分布式发电系统的孤岛运行可能会给用户和电网的检修人员带来一定的危险,同时会使电压幅值和频率失去控制,可能会对电气设备造成损害<sup>[4-7]</sup>。因此分布式发电系统必须具备反孤岛的能力,故研究孤岛检测方法,具有十分重要的意义。

近些年来,不少专家和学者对孤岛检测的方法展开了研究。文献[8]中反孤岛的方法主要分为基于通信的反孤岛方法和本地反孤岛方法。基于通信的反孤岛方法包括电力线载波通信的方法和联锁跳闸的方法。本地反孤岛方法分为被动法和主动法,被动法是通过监测分布式发电装置与电网公共耦合点处的电压幅值或频率的波动来检测是否发生孤岛效应,包括过/欠压法、过/欠频法、电压电流谐波检测法等方法。主动法包括主动频率偏移法、基于阻抗测量的方法、基于功率扰动的方法等。Sandia 方法属于主动频移方法的一种。文献[9]采用自适应算法来调整正反馈参数,但其没有考虑负载阻抗对检测的影响;文献[10]在对负载性质判断时在有扰动和误差的情况下,很容易产生误判而不能按正常方向进行扰动。

本文研究了一种改进型 Sandia 方法,用 FFT 谱分析法检测 PCC 点电压与逆变输出电流相位差,并判断出负载性质,从而及时对扰动方向进行调整,在 Matlab/Simulink 仿真平台上建立分布式发电系统的模型,得到了理想的检测效果。

## 1 孤岛效应发生的机理

图 1 为分布式并网发电系统的功率流图。

电网正常连接时,分布式发电装置发出的有功功率是  $P$ 、无功功率是  $Q$ ,电网发出的有功功率是  $\Delta P$ ,无功功率是  $\Delta Q$ ,负载所要求的有功功率是  $P_{load}$ ,无功功率是  $Q_{load}$  在公共耦合点处功率流有以下规律

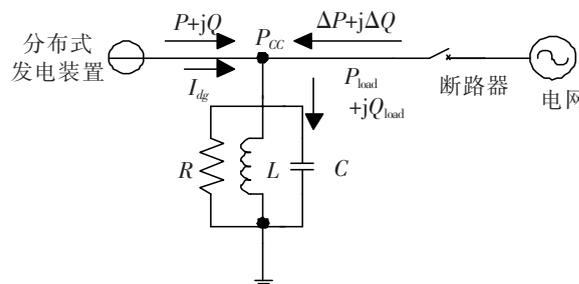


图 1 分布式并网发电系统的功率流图

收稿日期:2018-06-25 网络出版日期:- 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxzbzrb.20180625001

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1402.n.20191120.1354.014.html>

基金项目:石家庄铁道大学研究生实践基地资助项目(Z671180101);河北省大学生创新创业训练计划项目(201810107062)

作者简介:张立园(1994—),男,硕士研究生,主要从事新能源发电与控制技术方面的研究。E-mail:763304931@qq.com

张立园,王硕禾,宋海旺,等.改进型 Sandia 方法在孤岛检测中的应用研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2019,32(4):81-88.

$$P_{\text{load}} = P + \Delta P \quad (1)$$

$$Q_{\text{load}} = Q + \Delta Q \quad (2)$$

在电网切断后,分布式并网发电系统从原来的由分布式电源和电网一起供电到仅由分布式电源供电,分布式电源所发出的功率与负载所要求的功率之间的不匹配会引起电压幅值或频率的突然改变,可以检测公共耦合点处电压幅值和频率的变化来检测出孤岛。但如果分布式电源提供的功率与负载所需要的功率基本匹配,公共耦合点处的电压和频率变化将会很小,不能超出规定阈值,很难判断孤岛是否发生,就很有可能形成一个由分布式电源与负载构成的孤岛发电系统。

## 2 传统的主动频移式孤岛检测方法

主动频移式检测法的原理就是通过逆变器向电网加入形状稍微有一点改变的电流,使频率连续改变,通过不断地叠加使频率偏移超出阈值,以此检测孤岛的发生。

### 2.1 主动频率偏移(AFD)法

实现的原理是在逆变器输出电流过零点处周期性地加入小扰动,使并网的电流略微高于或低于电网电压频率,由于电压响应跟随失真的电流波形,会使电压频率超出阈值从而检测出来<sup>[11]</sup>。

逆变器输出的电流由于锁相环 PLL 的作用会跟踪公共耦合点电压每一个周期开始时刻的相位,当电流的波形到了过零点,而电压的波形还没有到过零点时,强制使电流保持在零点,等电压过零点后再一起进入到下半个周波。

在采用主动频移式孤岛检测法的并网系统中,扰动电流是连续地加入的。当电网正常连接时,公共耦合点电压频率被钳位到 50 Hz,而当孤岛发生后,PCC 点电压将由逆变器输出电流和负载共同决定。以本地负载为纯阻性为例,当电流过零点时,电压也会到达零点,即电压电流保持同频同相,则此时 PCC 点电压的频率将比上一个周期波形频率增大,一直到频率超过阈值,检测出来。

### 2.2 Sandia 法

Sandia 方法可以看作是对主动频率偏移方法的改进<sup>[12]</sup>。在 AFD 法中截断系数  $cf$  为定值,为了减小孤岛检测的盲区,可以加快频率的偏移即增加正反馈。在 Sandia 法中, $cf$  定义为逆变器输出端电压频率与电网电压频率偏差的函数,即

$$cf = \frac{2t_z}{t_u} \quad (3)$$

$$cf_j = cf_{j-1} + k\Delta\omega \quad (4)$$

式中, $cf_j$  为第  $j$  周期的截断系数; $cf_{(j-1)}$  为第  $j-1$  周期的截断系数; $k$  为同方向的加速增益; $\Delta\omega$  为逆变器输出端电压频率与电网电压频率的偏差。以下为 Sandia 方法在  $C_{\text{norm}}$ (标准化电容)、 $Q_{(f_0)}$ (品质因数)坐标系下的盲区公式

$$\frac{\tan\left(\frac{\pi}{2}cf_0 + \frac{\pi}{2}k \times 0.5\right)}{Q_{f_0}} - \frac{0.5}{f_0} + 1 < \Delta C_{\text{norm}} < \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2}cf_0 - \frac{\pi}{2}k \times 0.7\right)}{Q_{f_0}} + \frac{0.7}{f_0} + 1 \quad (5)$$

图 3、图 4 为  $cf_0$  取 0.02, $k$  取不同值时的盲区图,形状相同的 2 条线交点之后的区域为检测盲区,可见随着反馈增益  $k$  增大,盲区减小。

该方法的实质是强化了频率偏差,相对于 AFD 法,由于加入了正反馈,逆变器的输出会在电网断开后出现更大的频率偏差,这样就会使 NDZ(不可检测区)更小。但 Sandia 方法和 AFD 法一样,都存在负载阻抗角对检测结果的影响。

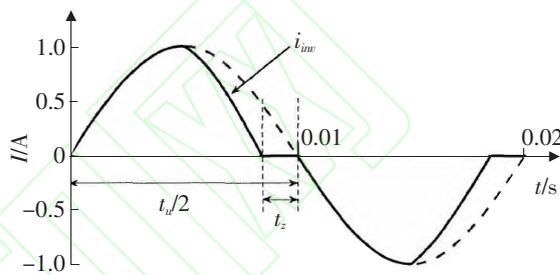


图 2 主动频率偏移法孤岛检测原理图

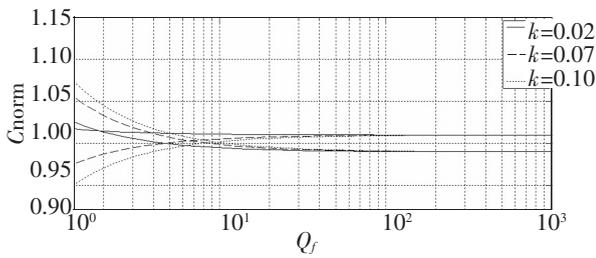


图 3 Sandia 法的盲区图

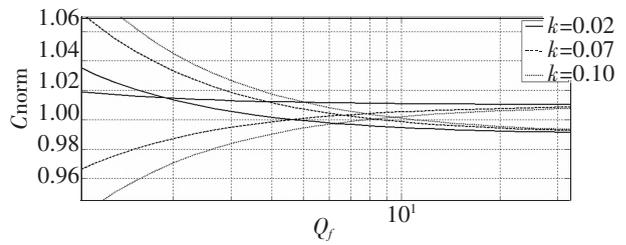


图 4 Sandia 法的盲区图(局部放大)

### 3 改进型的 Sandia 方法

#### 3.1 基本原理

在分布式并网系统中,对于并联 RLC 负载,断网后新稳态时负载阻抗角为

$$\theta = \arctan \left[ R \left( \frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \right] \quad (6)$$

图 5 是谐振频率为 50 Hz 的 RLC 并联负载的相频特性曲线。

由图 5 可知,频率为 50 Hz 时的负载阻抗角为 0,小于 50 Hz 时的负载阻抗角为正值,大于 50 Hz 时负载

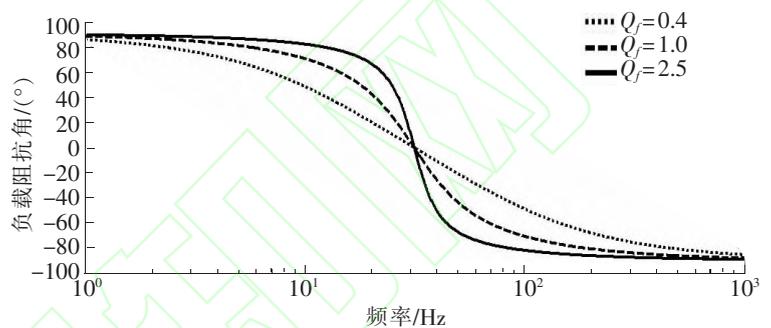


图 5 负载相频特性曲线

阻抗角为负值。比较图中曲线可知,负载的品质因数变得越大时,负载阻抗角随频率的变化越明显。而在真正的检测中,频率大于 50 Hz 时,一般采用加入正向扰动使频率向上增加来使频率偏移,而此时 RLC 并联负载的负载阻抗角为负值,可以看作容性负载,容性的负载在频率增加过程中有减缓其向上的作用,且  $Q_f$  越大,这种作用也越明显,检测失败的可能性就越大。而当频率小于 50 Hz 时,一般加入反向扰动使频率向下减小来使频率偏移,而 RLC 并联负载的负载阻抗角为正值,可以看作感性负载,感性的负载在频率减小的过程中有减缓其向下的作用,且  $Q_f$  越大,这种作用也越明显<sup>[13]</sup>。

在 50 Hz 附近,变化最明显,故在 RLC 并联谐振,而且谐振的频率与电网的频率相同或者相近时,孤岛最不容易检测。

当负载为偏容性负载,在电网未切断时,由于电网电压的钳制作用,公共耦合点电压的频率保持在 50 Hz。电网切断后,若电流加入正向扰动,频率逐渐增加,但容性负载的电流超前电压,将使电压过零点被推迟,若频率向上增加的效果与负载阻抗角的延迟作用刚好抵消,则电压过零点的时刻不变,即电压频率未达到设定阈值,孤岛检测失败。

同理,偏容性负载情况下,若电流加入反向扰动使频率递减,偏感性负载下若电流加入正向扰动使频率递增,将会加快频率的偏移,使孤岛效应更易被检测出来。

针对 Sandia 方法中负载抵消问题,若能测得负载的阻抗角,就可以判断出负载性质,从而选择是保持原有扰动方向还是向相反方向扰动。通过测量 PCC 点电压和逆变器输出电流的相位差,其相位差在断网后实际上等于本地负载阻抗角<sup>[14]</sup>。因为在电网连接时,由于电网的作用,其 PCC 点电压频率会保持在 50 Hz,而在电网断开后,频率会发生偏移,此时通过测量得出的相位差判断负载性质,从而做出反应。

具体做法如下:刚开始任意给其一个扰动的方向,而在电网断开后,PCC 点电压频率会从 50 Hz 偏移,设置一个阈值 0.005,当超出此阈值时用测量出的 PCC 点电压和逆变器输出电流的相位差来判断负载性质。判断出负载性质后,若与扰动方向一致(比如:扰动为正向,负载为偏感性),则会选择按原来方向继续扰动。若不一致,则加入反方向扰动。具体流程如图 6 所示。

#### 3.2 FFT 谱分析法

改进型 Sandia 法由于需要测出 PCC 点电压和逆变器输出电流之间的相位差。

过零检测方法是数字化的测量中使用硬件实现的比较传统的检测方法,考虑到噪声、谐波的干扰等一些因素会对测量的准确性和结果产生很大的影响,故这种方法并没有用于检测高精度的相位差。基于自适应带通滤波器和测量信道交换技术的相位差测量方法虽能消除部分噪声或谐波等因素的干扰,但它只适用于测量低频信号的相位差。由于以上方法所存在缺点,运用基于 FFT 谱分析法<sup>[15]</sup>来检测电压、电流信号的相位差。

FFT 谱分析法就是对满足狄里赫利条件的信号进行傅里叶级数分析,获得输入信号的基波参数。假设在一个周期内周期信号的傅里叶级数展开式为

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (7)$$

式中,  $a_0$  是直流分量;  $a_n$  是谐波分量;  $\varphi_n$  是各谐波的相位角。对输入信号做  $nT$  的周期采样, 点数为  $N$  的样本做 DFT

$$x(k) = \text{DFT}[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp\left[-j \frac{2\pi}{N} kn\right] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left[ \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] = \text{Re}[x(k)] + j \text{Im}[x(k)] \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (8)$$

则基波相位为

$$\theta_k = \arctan\left\{ \frac{\text{Im}[x(k)]}{\text{Re}[x(k)]} \right\}, k = \frac{f_0 N}{f_s} + 1 \quad (9)$$

式中,  $f_0$  是基波频率;  $f_s$  是采样频率;  $N$  是点数。对 2 个信号分别求相位角后可得到相位差。

### 4 仿真建模与结果分析

在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型,图 7 为分布式发电并网模型,图 8 为锁相、移频、逆变器控制模型。直流侧电压 400 V,电网电压为 220 V、频率 50 Hz,仿真时间 0.5 s,且在 0.1 s 断开电网。改进 Sandia 法中参数均选  $c f_0 = 0.05, k = 0.07$ 。

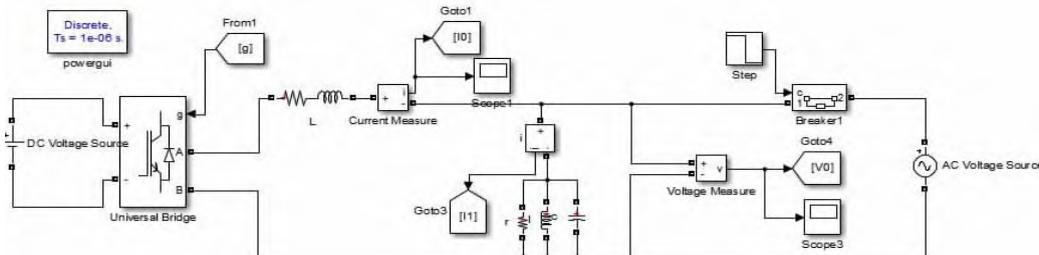


图 7 分布式发电并网模型

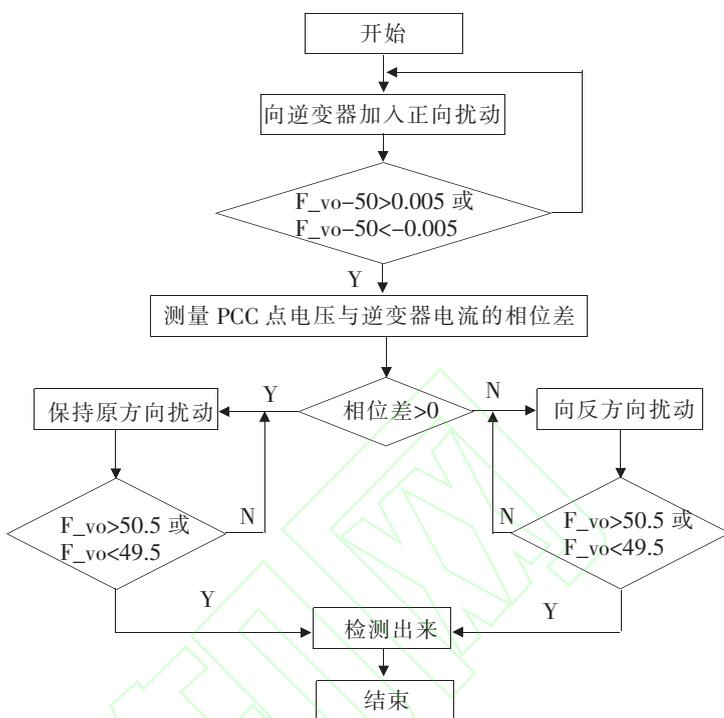


图 6 改进型 Sandia 法流程图

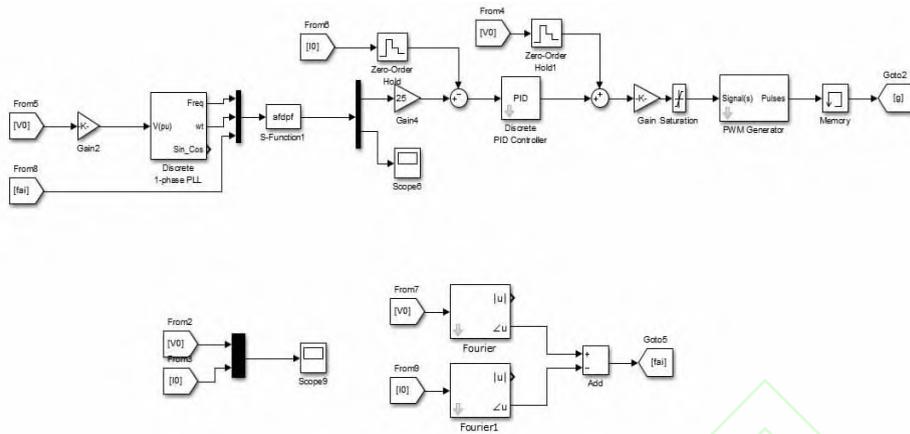


图 8 锁相、移频、逆变器控制模型

选择品质因数  $Q_f \approx 2.5$  且使有功、无功功率基本匹配的负载,分别使用传统的 Sandia 方法和改进 Sandia 方法检测。

图 9 中(a)(b)(c)为传统方法检测,(d)(e)(f)为改进型方法检测。从表 1 和图 9 可以看出,采用传统 Sandia 法,当初始给正向扰动时,负载由感性变为容性时,检测时间会增加,当容性增大时,抵消作用明显,检测不出;但当采取改进型的 Sandia 法,电网断开、判断出负载性质后,若为感性负载不改变方向,若为容性负载改变扰动方向,使检测时间缩短。

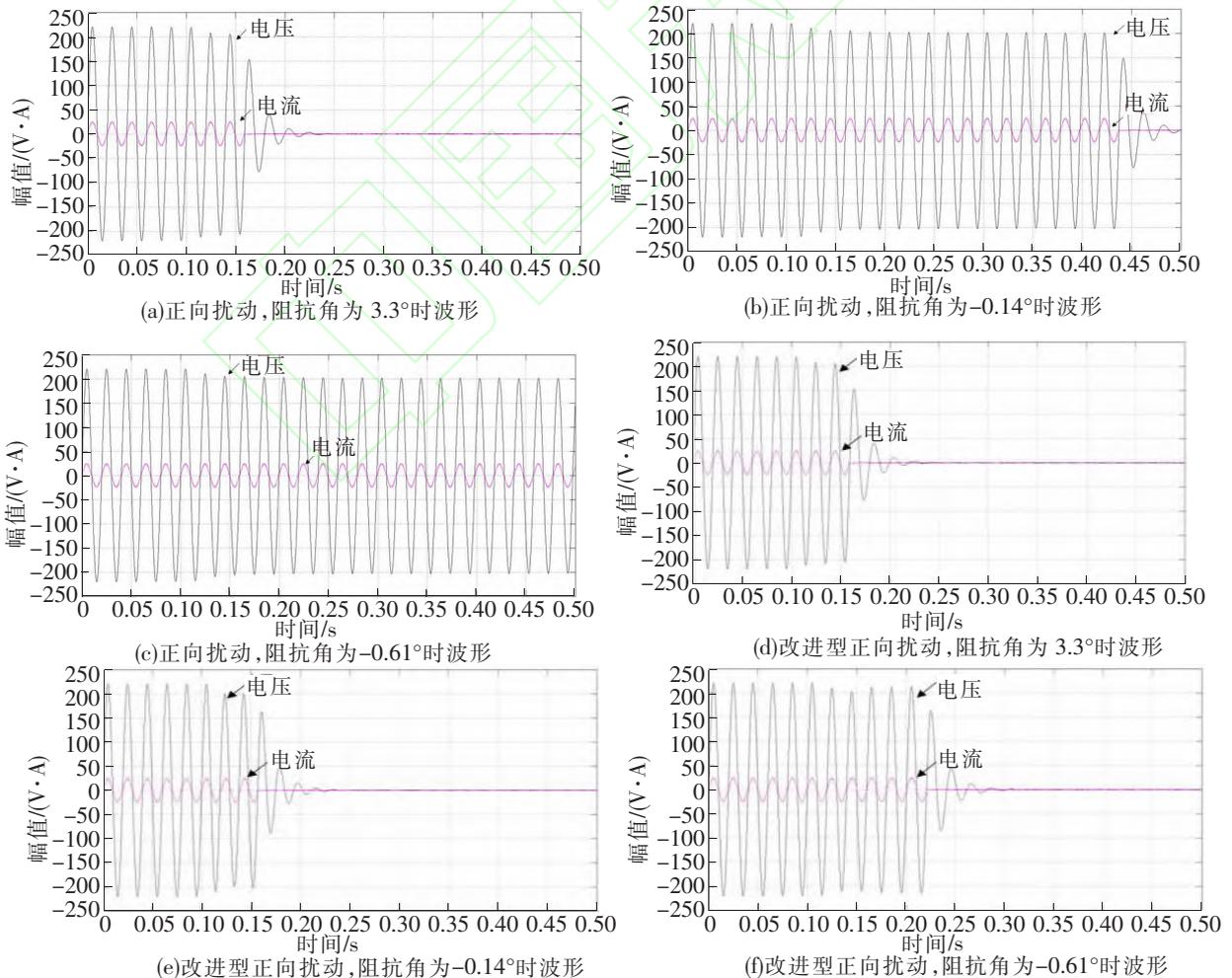


图 9 初始为正向扰动时的波形图

表 1 初始为正向扰动时检测情况

| 检测方法        | 所加负载性质(阻抗角) | 初始扰动方向 | 是否判断 | 检测出时间/s |
|-------------|-------------|--------|------|---------|
| 传统 Sandia 法 | 偏感性(3.3°)   | 正向     | 否    | 0.159 6 |
|             | 偏容性(-0.14°) | 正向     | 否    | 0.437 5 |
|             | 偏容性(-0.61°) | 正向     | 否    | 未检测出    |
| 改进 Sandia 法 | 偏感性(3.3°)   | 正向     | 是    | 0.159 6 |
|             | 偏容性(-0.14°) | 正向     | 是    | 0.157 6 |
|             | 偏容性(-0.61°) | 正向     | 是    | 0.220 7 |

图 10 中(a)(b)(c)为传统方法检测,(d)(e)(f)为改进型方法检测。从表 2 和图 10 可以看出,当初始给反向扰动时,负载由容性变为感性时,检测时间会增加,当感性增大时,抵消作用明显,检测不出;但当采取改进型的 Sandia 法,电网断开、判断出负载性质后,若为容性负载不改变方向,若为感性负载改变扰动方向,使检测时间缩短。

由仿真结果可看出,当扰动方向与负载性质相同时,采用哪种方法都不影响检测结果。而当扰动方向与负载性质相反时,若不判断负载性质采用传统 Sandia 方法,则会使检测时间增加甚至导致检测不出,而若采取改进的 Sandia 法,判断了负载性质,并及时改变扰动方向,则最终可以检测出来。

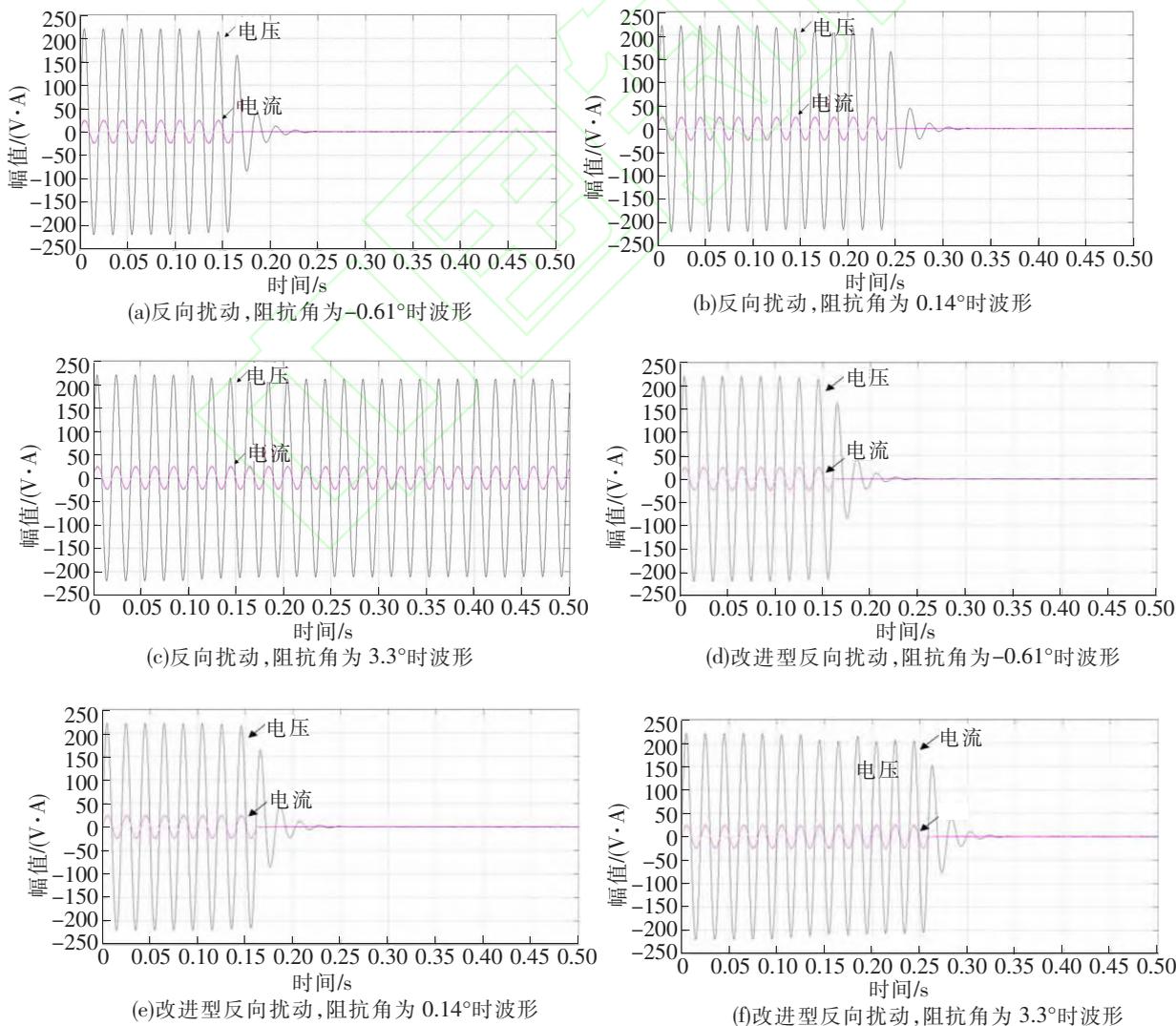


图 10 初始为反向扰动时的波形

表 2 初始为反向扰动时检测情况

| 检测方法        | 所加负载性质(阻抗角) | 初始扰动方向 | 是否判断 | 检测出时间/s |
|-------------|-------------|--------|------|---------|
| 传统 Sandia 法 | 偏容性(-0.61°) | 反向     | 否    | 0.160 6 |
|             | 偏感性(0.14°)  | 反向     | 否    | 0.241 1 |
|             | 偏感性(3.3°)   | 反向     | 否    | 未检测出    |
| 改进 Sandia 法 | 偏容性(-0.61°) | 反向     | 是    | 0.160 6 |
|             | 偏感性(0.14°)  | 反向     | 是    | 0.161 0 |
|             | 偏感性(3.3°)   | 反向     | 是    | 0.259 0 |

## 5 结论

针对主动频移类孤岛检测方法中负载性质对检测结果存在影响的问题,提出了一种改进的 Sandia 方法,最后通过不同的扰动方向以及给出不同负载参数进行验证,得出结论如下:

(1)分析了在主动频移类孤岛检测方法中存在的负载性质不同对检测结果的影响,并且仿真验证了当扰动方向与负载性质不一致确实会使检测时间加长甚至导致检测不出。

(2)提出了改进的 Sandia 方法并且可以实现对负载性质的判别,根据初始扰动的方向,判断是否需要改变方向,克服了主动频移式方法中负载相位角的抵消作用,有效防止了负载性质对检测结果的影响。

## 参 考 文 献

- [1]Guo Y, Li K, Laverty D, M. A statistical process control approach for automatic anti-islanding detection using synchrophasors[C]. [S. l.]:[s. n.], 2013:1-5.
- [2]周晨,徐华电,刘欢,李春来.分布式并网发电系统孤岛检测方法研究[J].电源学报,2017,15(1):125-131.
- [3]吴志鹏.分布式光伏发电系统的控制和孤岛检测故障[D].上海:华东理工大学,2014.
- [4]高蕾.逆变并网型光伏系统的孤岛检测方法研究[D].南京:东南大学,2015.
- [5]赵子琼.分布式光伏发电系统孤岛检测技术的研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [6]赵杰.光伏发电并网系统的相关技术研究[D].天津:天津大学,2012.
- [7]程启明,王映斐,程尹曼,汪明媚.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.
- [8]赵峰,蒺代其.分布式电源并网系统远程孤岛检测方法的研究[J].电源技术,2014,38(3):586-589.
- [9]周诗嘉,陆格文,黎涛,罗隆福.自适应主动频率偏移孤岛检测新方法[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(2):78-82.
- [10]杨新华,孙艳军,汪龙伟,委晓翠.改进型正反馈主动频移孤岛检测方法的仿真研究[J].电气自动化,2015,37(2):47-50.
- [11]杨富磊.分布式并网发电系统的孤岛检测方法研究[D].吉林:东北电力大学,2016.
- [12]张兴,曹仁贤.太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [13]周洁.分布式并网发电系统孤岛检测方法研究[D].南京:南京邮电大学,2013.
- [14]谢东.分布式发电多逆变器并网孤岛检测技术研究[D].合肥:合肥工业大学,2014.
- [15]路艳洁,席志红,王姜铂.FFT法与数字相关法在相位测量上的比较[J].信息技术,2007,12(4):105-108.

## Application of Improved Sandia Method in Island Detection

Zhang Liyuan, Wang Shuohe, Song Haiwang, Qi Saisai, Xue Fei

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the load property has an effect on the detection effect in the active frequency shifting islanding detection method, an improved Sandia detection method is proposed. By detecting the phase difference between the voltage of the public coupling point (PCC) and the output current of the inverter, the nature of the load is judged, thereby further determining whether to change the direction of the disturbance, and finally judging the occurrence of the island. The simulation results show that the proposed method can effectively detect the occurrence of the island effect under various load properties and effectively prevent the influence of the load nature on the detection effect.

**Key words:** distributed generation system; island detection; Sandia method; FFT spectral analysis

(上接第 45 页)

- [9] D L Donoho. Denoising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [10] 赵奎, 黄高明. 基于二次小波降噪的 FastICA 盲源分离研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(6): 36-40.
- [11] 王杏. 带噪混叠语音信号盲分离方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [12] 孟宗, 马钊, 刘东, 等. 基于小波半软阈值消噪的盲源分离方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(3): 337-342.
- [13] 钟丽莉, 熊兴中. 基于峭度的独立分量算法的性能分析研究[J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2014, 27(4): 43-47.
- [14] 王志阳, 陈进, 肖文斌, 等. 基于约束独立成分分析的滚动轴承故障诊断[J]. 振动与冲击, 2012, 31(9): 118-122.
- [15] 张杰, 张周锁, 朱冠汶, 等. 多元消减约束独立分量分析及其在振源贡献量计算中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 57-73.

## Research on Gear Fault Diagnosis Based on Wavelet Threshold and Constrained Independent Component Analysis

Han Boyue, Hao Rujiang, An Xuejun

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In order to use the vibration signal to diagnose the gear fault under the strong noise accurately, an algorithm based on the combination of wavelet threshold and constrained independent component analysis (CICA) is proposed. Firstly, the input signal is pre-processed by wavelet threshold denoising method to improve the signal-to-noise ratio of the input signal. Then, the reference signal is established based on the characteristic frequency of the gear, the signal after noise reduction is used as the input channel signal of CICA, the gear fault signal is effectively separated by CICA, and the fault characteristic is identified. In order to verify the effectiveness of the algorithm, the simulation and experimental results show that the algorithm can effectively extract the gear fault signal and realize the gear fault diagnosis.

**Key words:** wavelet threshold; constrained independent component analysis; noise reduction; gear fault diagnosis