

# 主动偏移技术在光伏并网发电系统孤岛检测中的应用

## Application of Automatic Shift Method on Islanding Detection of Grid-Connected PV System

华中科技大学 王志峰 刘芙蓉 段善旭 Email:wzfhust@sina.com

Huazhong University of Science and Technology Wang zhifeng, Liu furong, Duan shanxu

**摘要:** 结合光伏并网逆变器的并网控制过程, 提出一种结合主动频率偏移和相位偏移的反孤岛检测方法, 介绍了该方法的原理和实现过程, 并结合 IEEE Std.2000-929 标准中的技术规范对仿真模型进行了分析, 验证了该方法的有效性。

**Abstract :** Anti-islanding control method—combines the positive feedback Active Frequency Drift and Automatic Phase Shift, was proposed according to the control course of Grid connected Inverter . The theory and process of it in detail was introduced and tested by IEEE Std.2000-929.The simulation results showed that the Automatic Shift Method is feasible .

**关键词:** 太阳能; 孤岛检测; 并网逆变器; 主动频率; 主动相移

**Keywords :** solar energy; islanding detection; grid—connected inverter; active frequency drift; automatic phase shift.

### 1 前言

所谓孤岛现象<sup>[1]</sup>是指: 当电网供电因故障事故或停电维修而跳脱时, 各个用户端的分布式并网发电系统(如: 光伏发电、风力发电、燃料电池发电等)未能即时检测出停电状态而将自身切离市电网络, 而形成由分布电站并网发电系统和周围的负载组成的一个自给供电的孤岛, 如图 1 所示:

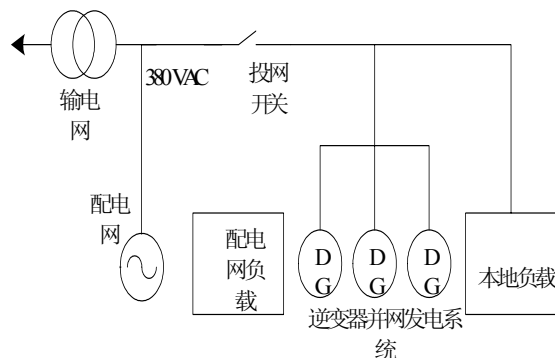


图 1 孤岛问题研究电网拓扑结构

孤岛一旦产生将会危及电网输电线路维修人员的安全; 影响配电系统上的保

护开关的动作程序, 冲击电网保护装置; 影响传输电能质量, 电力孤岛区域的供电电压与频率将不稳定; 当电网供电恢复后会造成的相位不同步; 单相分布式发电系统会造成系统三相负载欠相供电。因此对于一个并网系统必须能够进行反孤岛效应检测。

### 2 孤岛检测标准

#### 2.1 电压和频率触发标准

根据专用标准 IEEE Std.2000-929<sup>[2]</sup>和UL1741规定, 所有的并网逆变器必须具有反孤岛效应的功能, 同时这两个标准给出了并网逆变器在电网断电后检测到孤岛现象并将逆变器与电网断开的时间限制, 如表1.

#### 2.2 孤岛分析模型

此外, IEEE Std.2000-929还给出一套标准的孤岛测试模型<sup>[3]</sup>。具体的反孤岛逆变器测试电路如图2所示, 测试电路主要由电网, RLC负载和并网逆变器以及电网隔离开关组成, 检测点在电网隔离开关和负

载开关之间，其中在选择RLC参数时牵涉到电路的品质因数Q值的选取问题<sup>[4]</sup>，过高的Q值使电路有朝着并保持于谐振频率处工作的趋势。在使用相位或频率扰动反孤岛检测时，Q值越高，相应的漂移量越小。

因此在进行反孤岛测试时，太小或太大的Q值都是不实际和不可取的。IEEE P929工作组成员和十几位电网工程师经过讨论认为选取Q=2.5符合电网的实际情况。

表1 IEEE Std.2000-929/UL1741 对孤岛效应最大检测时间的限制

状态	断电后电压幅值	断电后电压频率	允许的最大检测时间
A	0.5Vnom	Fnom	6个周期
B	0.5Vnom<V<0.880.5Vnom	Fnom	2秒
C	0.88Vnom≤V≤1.10Vnom	Fnom	2秒
D	1.10Vnom<V<1.37Vnom	Fnom	2秒
E	1.37Vnom≤V	Fnom	2个周期
F	Vnom	F<Fnom-0.7Hz	6个周期
G	Vnom	F> Fnom+0.5Hz	6个周期

- ① Vnom 指电网电压幅值的正常值,仿真中取交流220V(有效值).
- ② Fnom 指电网电压频率的正常值,仿真中取 60Hz.

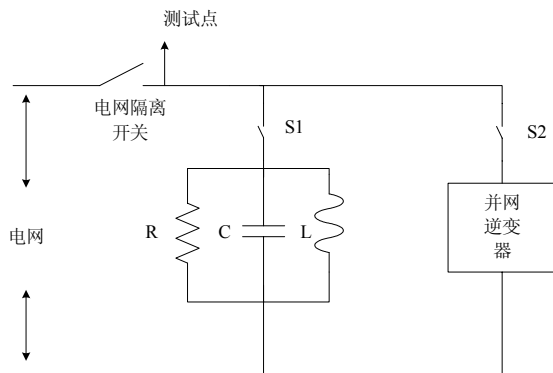


图2 反孤岛逆变器测试电路

### 3 孤岛检测方法

孤岛检测方法分为两类:第一类称为被动检测,即通过观察电网的电压、频率以及相位的变化来判断有无孤岛产生。第二类为主动检测,如频率、相位偏移和输出功率变化测量等。如果光伏系统供电量与电网负载需求相差较大,在孤岛产生后,负载端的电压及频率会发生较大的变动,此时可以利用被动式的检测方法来检测。若光伏系统供电量与负载需求匹配或差别不大时,则在孤岛产生以后,负载端的电压及频率变化量很小,被动式的检测方法就会

失效,为此,必须采用主动式的检测方法。例如主动频率偏移法<sup>[5]</sup>(AFD),就是通过偏移市电电压采样信号的频率来作为逆变器的输出电流频率,造成对负载端电压频率的扰动,即由频率保护电路来检测出孤岛现象。电流控制量为:

$$I = I^* \sin\{2\pi(f_{k-1} + \Delta f)(time - T_1)\} \quad (1)$$

其中,  $f_{k-1}$  为上一周期电压频率值,

$\Delta f$  为频率偏移量,  $time$  为系统时间,  $T_1$  为负载电压正弦波正向穿越零点时间。

对于功率因数为 1 的光伏并网系统,当孤岛产生以后,负载电压与电流的相位差  $\varphi$  由并联 RLC 电路参数和频率  $f$  决定:

$$\varphi = -\tan^{-1}\left(R(2\pi fC - \frac{1}{2\pi fL})\right) \quad (2)$$

如图 3 所示,在孤岛产生以后,稳定频率 60Hz 时,负载电压落后电流相位角为  $-16.72^\circ$ ,采用主动频率偏移后,输出电流起始角保持为 0,减小逆变器输出电流频率从而负载端电压频率相应变小,总终导致频率保护电路动作。但是,随着电流频率的减小,负载曲线的  $\varphi$  角也越来越

小，对于一定的负载，在频率保护电路动作之前，负载  $\varphi$  角可能已经为 0，从而到达谐振频率处即负载稳定工作点，AFD 检测失效。

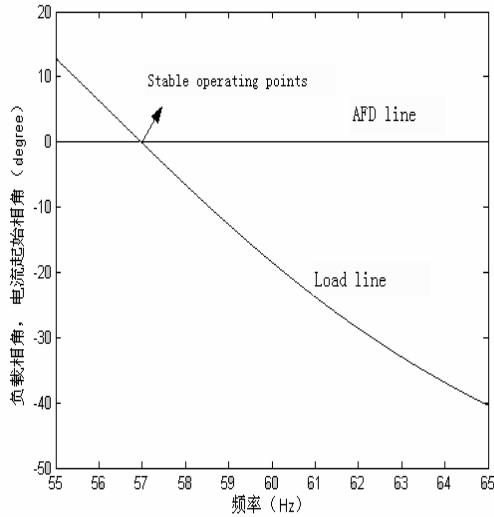


图 3 AFD 稳定工作点 (R=14.4Ω L=12.8mH C=610μF)

主动相位偏移法<sup>[6]</sup> (APD),即通过改变输出电流起始相位来达到改变输出电压频率的目的.而对于特定的纯阻性负载,输出电流起始相位的变化不会改变输出电压的频率,频率保护电路不会动作,使得检测失效.

#### 4 主动偏移法

针对以上分析,作者提出,在进行主动频率偏移的同时,结合主动相位偏移法,在每个电压周期同时对输出电流的频率和起始相位进行偏移,从而对孤岛进行有效而迅速的判定.该方法在端电压的每个正向过零点,计算上一电压周期的频率值

$f_{k-1}$ , 根据这个频率  $f_{k-1}$  计算逆变器输出

电流的起始相角  $\theta_{APS}[k]$ , 频率加入如式

(1) 所示的偏移量.当负载电压频率随电流起始相位角  $\theta_{APS}[k]$  变化后,进一步增加输出电流相角偏移,以达到使输出电压频

率加速变化,从而使保护电路动作,检测出孤岛.流程图如图 4 所示:

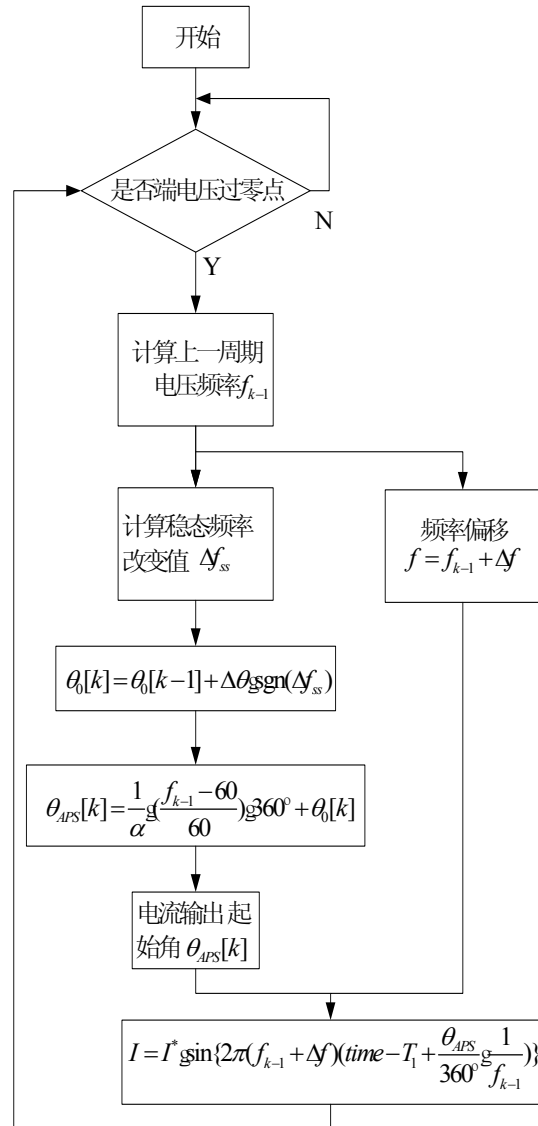


图 4 主动偏移流程图

输出电流指令值为:

$$I = I^* \sin\{2\pi(f_{k-1} + \Delta f)(time - T_1 + \frac{\theta_{APS}}{360} \frac{1}{f_{k-1}})\}$$

其中:

$$\theta_{APS}[k] = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{f_{k-1} - 60}{60} \right) 360^\circ + \theta_0[k] \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为相角调节因子,  $\theta_0[k]$  为附加的相角改变.在系统端电压频率保护前,附加相角将根据下式变化:

$$\theta_0[k] = \theta_0[k-1] + \Delta\theta_s \text{sgn}(\Delta f_{ss}) \quad (4)$$

(2) 及 (3) 式中，

$\Delta\theta$  定值 (仿真中取  $10^\circ$ )

$\Delta f_{ss} \quad \Delta f_{ss} = f_{k-1} - f_{k-2}$

$\theta_0[k]$  初值为 0

$$\text{sgn}(\Delta f_{ss}) = \begin{cases} 1, \Delta f_{ss} > 0 \\ 0, \Delta f_{ss} = 0 \\ -1, \Delta f_{ss} < 0 \end{cases}$$

若稳定工作频率从 60 变化到 59，附加的相角变化量  $\theta_0[k]$  及频率偏移量  $\Delta f$  将打破此稳定工作点。对于一个相位滞后的负载系统， $\theta_0$  的幅值会变的越来越大，

$\theta_{APS}$  也会越来越大，因此输出电流基波的起始相角也越来越大，输出电压频率变化直至频率保护电路动作；对于纯阻性负载，相位偏移检测失效，但频率偏移可以使输出电压频率变化直至频率保护电路动作。

## 5 仿真结果与分析

借鉴国际通用的光伏并网系统标准 IEEE Std.2000-929, 测试步骤如下:

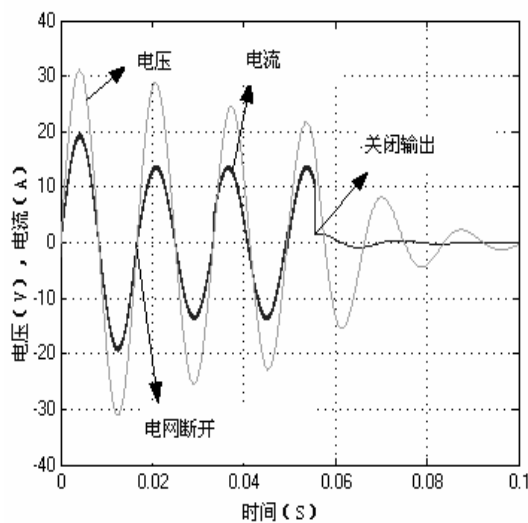


图 5 100% 负载条件电压电流波形

1) 设计逆变器的输出功率  $P_{inv} = 3000W$ .  
2) 并网逆变器为单位功率因数逆变器 所以  $Q_{inv} = 0$ .

3) 调整负载 RLC 参数值,使线路的品质因数  $Q = 2.5$

4) 调整逆变器的输出功率,针对每次调整参数进行孤岛检测,记录孤岛检测时间. 仿真模型仅设置频率保护,在 0.0167s 处断开电网, 电网稳态频率取 60Hz,  $\Delta\theta$  取 10,  $\alpha$  取 2,  $\Delta f$  取 0.01。测试结果分析如下:

1) 100%负载条件,即  $P_{inv} = 3000W$  时,断开电网后,从图 5(电压取 1/10)和图 6 可以看出负载端电压幅值和频率均发生了变化,电压幅值减小,频率增大;在 0.0575s 处,电压频率越限,频率保护动作,关闭逆变器输出,总的检测时间为:

$$0.0575 - 0.0167 = 0.0408s$$

小于 6 个周期,满足孤岛检测标准.

2) 75%负载条件,即  $P_{inv} = 2250W$  时,断开电网后,从图 7 和图 8 可以看出负载端电压幅值和频率均发生了变化,电压幅值减小,频率增大;在 0.0563s 处,电压频率越限,频率保护动作,关闭逆变器输出,总的检测时间为:

$$0.0563 - 0.0167 = 0.0396s$$

小于 6 个周期,满足孤岛检测标准.

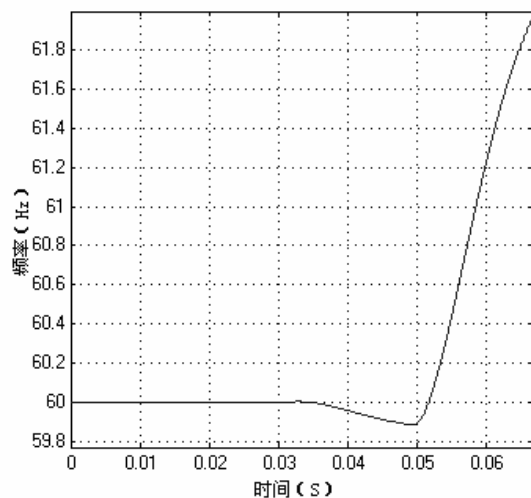


图 6 负载电压频率

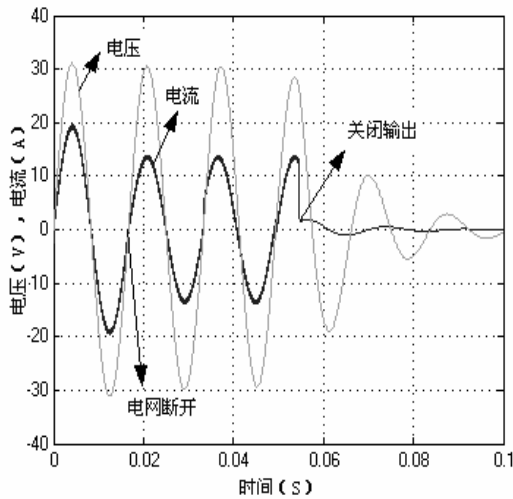


图 7 75% 负载条件电压电流波形

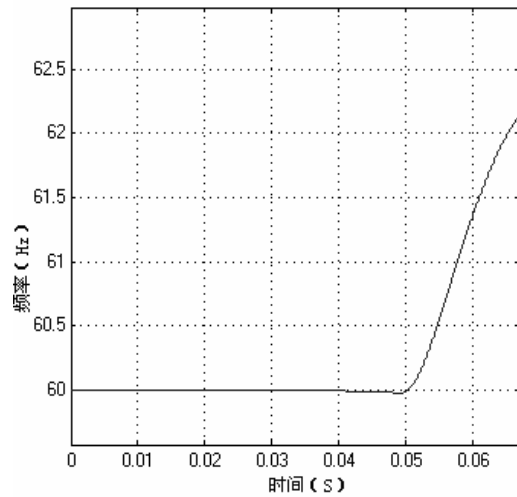


图 8 负载电压频率

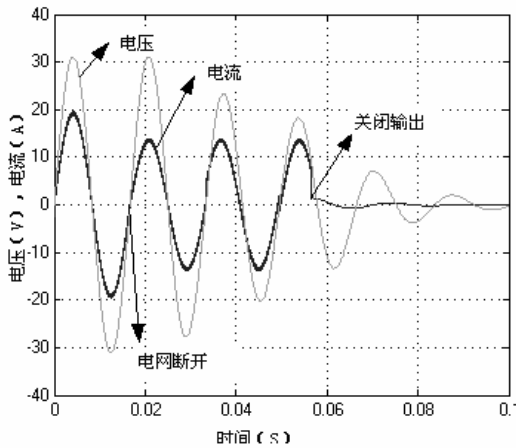


图 9 125% 负载条件电压电流波形

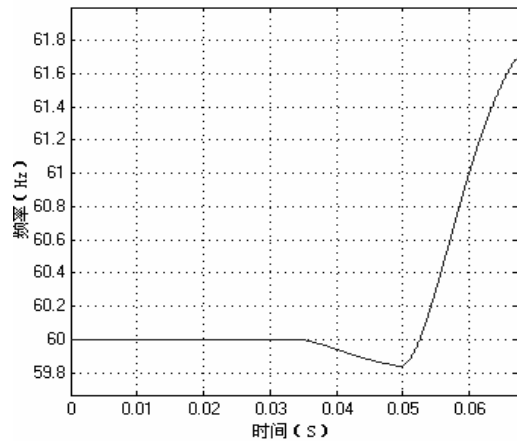


图 10 负载电压频率

3) 125%负载条件,即  $P_{inv} = 3750W$  时,断开电网后,从图 9 和图 10 可以看出负载端电压幅值和频率均发生了变化,电压幅值减小,频率增大;在 0.0551s 处,电压频率越限,频率保护动作,关闭逆变器输出,总的检测时间为:

$$0.0551 - 0.0167 = 0.0384s.$$

小于 6 个周期,满足孤岛检测标准.

## 6 结语

仿真结果验证了在不同负载条件下,主动偏移能够在规定时间内有效检测出孤岛.如果电网稳态频率发生波动,输出电流的起始相角变化也不会很大,对于一个

0.5Hz 的波动,由 (3) 式可知相位的偏移仅有  $1.5^\circ$ ,对系统供电质量影响不大.本方法同样适用于其他采用逆变器并网的分布式供电系统中.

## 7 致谢

本文得到台达电力电子技术科教发展基金 (DREK200501) 的资助,特此致谢!

## 参考文献

- [1] 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究.合肥工业大学博士论文,2003,78-85.
- [2] IEEE Std 929—2000 · IEEE Recommended

- Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems[S].
- [3] John Stevens · development and testing of an approach to anti-islanding in utility-interconnected photovoltaic systems [R] · Photovoltaic System Applications Department, Sandia National Laboratories · 2000 ·
- [4] Hudson R M · Implementation and testing of anti-islanding algorithms for IEEE 929-2000 compliance of single phase photovoltaic inverters[J] · Photovoltaic Specialists Conference · 2002 · 3 : 1414—1419.
- [5] Ropp M E, Begovic M, Rohatgi A. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention [J]. IEEE Trans. On Energy Conversion, 1999, 14 (3): 810-816.
- [6] Hung Guo-Kiang, Chang Chih-Chang, Chen Chern-Lin. Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters [J]. IEEE Trans. On Energy Conversion, 2003, 18(1): 169-173.

#### 作者简介

王志峰(1981-),男,硕士研究生,研究方向:光伏逆变器并网及其相关技术.

段善旭(1970-),男,博士,教授,博导,研究方向:新能源技术与电能质量控制