

基于抗干扰六点测频法的主动频移孤岛检测

应展烽¹, 陈运运¹, 田亚生², 吴军基¹, 冯凯¹

(1. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 江苏省电力公司 扬州供电公司, 江苏 扬州 225009)

摘要: 主动频移法中频率检测的可靠性受电网中干扰影响, 易错误地将干扰情况判断为孤岛效应发生的情况。为了能避免孤岛效应误判现象的发生并快速检测出孤岛, 提出了主动频移孤岛检测中的抗干扰六点测频法, 该方法通过对最优检测点间隔进行估计和频率奇异点的剔除, 抑制了电网中干扰。根据 IEEE Std929—2000 规定的最严重情况进行孤岛测试仿真研究, 仿真结果表明, 所提方法具有防孤岛误判、响应快速、无检测盲区等优点。

关键词: 主动频移; 频率检测; 孤岛误判; 抗干扰六点测频法

中图分类号: TM 743

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.013

0 引言

光伏发电以其清洁、易维护、无需生产原料等优势而逐渐展现出无比广阔的应用前景和发展空间, 越来越多的光伏并网逆变器被投入使用。孤岛检测^[1-4]是光伏并网逆变器所必备的功能, 主动频移法^[5-6]是主动式孤岛检测方法中最常用的方法, 频率检测是主动频移法^[7-10]中必不可少的一个环节^[11-12]。

频率检测可靠性易受电网中干扰(如在工程测试过程中, 各种因素的影响使得待测信号不可避免地受到不同程度的噪声污染; 在仿真中断路器的突然动作会给电压波形带来大量的高次谐波)的影响, 而将干扰情况误判为孤岛效应发生的情况, 从而将光伏并网发电系统切离电网^[13-14]。近几年来, 该问题受到了国内外研究人员的关注, 由于孤岛效应信号与非孤岛效应信号具有相似的时域, 故有必要深入研究信号的内在特征从而在一定程度上识别出孤岛和电网中干扰。加拿大曼尼托巴大学 Lidula N. 利用小波变换提取瞬时相电流信号不同频带的小波变换系数能量作为特征向量, 然后分别采用决策树、神经网络和支持向量机等模式识别技术来实现孤岛效应检测^[15]。虽然该方法是一种孤岛检测新技术且能快速检测出孤岛, 但其特征向量采用了小波能量系数, 故易受噪声的影响。西班牙坎塔布里亚大学 Pigazo A. 通过提取 PCC 处的电压幅值及其频率 2 个信号, 利用小波变换取得其系数绝对值并与设定的电压幅值及其频率的阈值进行比较, 当 2 个值同时超出阈值时, 即认为发生了孤岛效应, 否则判定为电网中干扰^[16]。但该阈值是依靠经验或实验设定的, 该判据不一定可信。

基于上述问题, 本文提出了一种主动频移孤岛检测中的抗干扰六点测频法, 它不同于前面的识别孤

岛和电网中干扰的原理, 而是从抑制电网中干扰的新角度来实现孤岛检测, 国内外还没有学者对此进行研究。该方法在一定程度上抑制了电网中干扰, 从而有效避免了孤岛效应误判现象的发生, 同时能够快速检测出孤岛。

1 六点测频法的基本原理和误差机理

1.1 六点测频法的基本原理

设光伏发电系统与电网连接处(即 PCC 处)无畸变的电压信号表达式为:

$$s(t) = A_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

其中, $\omega = 2\pi f$, f 为 $s(t)$ 的真实频率。

以采样频率 f_s 对电压信号 $s(t)$ 等间隔采样。在采样序列中, 以 n 个采样点间隔分别提取 3 组连续检测点 $s_i, s_{i-1}, s_{i-n}, s_{i-n-1}, s_{i-2n}, s_{i-2n-1}$ (n 是变量, 则相邻 2 组检测点的周期为 n/f_s) 如下:

$$s_i = A_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$s_{i-1} = A_m \sin(\omega t + \varphi - \omega/f_s)$$

$$s_{i-n} = A_m \sin(\omega t + \varphi - \omega n/f_s)$$

$$s_{i-n-1} = A_m \sin[\omega t + \varphi - \omega(n-1)/f_s]$$

$$s_{i-2n} = A_m \sin(\omega t + \varphi - 2\omega n/f_s)$$

$$s_{i-2n-1} = A_m \sin[\omega t + \varphi - \omega(2n-1)/f_s]$$

设:

$$q_n(i) = s_i(s_{i-n} + s_{i-n-1}) + s_{i-n}(s_i + s_{i-1}) \quad (2)$$

$$p_n(i) = s_i(s_{i-n} + s_{i-2n-1}) + s_{i-2n}(s_i + s_{i-1}) \quad (3)$$

根据三角变换, 可求解得到真实频率 f :

$$f = \arccos\{p_n(i)/[2q_n(i)]\}f_s/(2\pi n) \quad (4)$$

其中, $q_n(i) \neq 0$ 。

1.2 六点测频法的误差机理

六点测频法理论上要求 PCC 处电压信号是没有畸变的, 而电网中干扰往往会使其受到影响, 产生偏差, 进而给检测点带来偏差, 且严重影响式(4)的测频精度, 甚至使其结果无效, 因此对六点测频法的

误差机理进行深入研究显得十分必要。

设 PCC 处电压信号的频率函数为 $f=y(x)$, 若 x 由于受到电网中干扰影响而产生小偏差 Δx , 则 f 将受到 Δx 的影响而产生误差 Δf 。根据一阶导数的离散线性求解公式, f 的一阶导数可近似表示成:

$$f' \approx \Delta f / \Delta x \quad (5)$$

即:

$$|\Delta f| \approx |f'| |\Delta x| \quad (6)$$

因 $|\Delta x|$ 是一个不可预知且随机的变量, 且在实际工程中, $|\Delta x|$ 的值一般较小, 故 $|\Delta f|$ 主要由 $|f'|$ 决定。

进一步, 由式(4)可得到:

$$|f'| = \left| \frac{f_s}{2\pi n \sin(2\pi n f / f_s)} \right| \quad (7)$$

故在 f_s (本文取 $f_s=3.2$ kHz) 已知的条件下, $|f'|$ 的大小受 PCC 处电压信号的真实频率 f 及 n 的影响。即如果检测点受电网中干扰影响而产生偏差, 六点测频法的结果误差大小与 PCC 处电压信号的频率、相邻 2 组检测点之间的间隔有着紧密关系。

2 最优检测点间隔估计和频率奇异点剔除

2.1 最优检测点间隔估计

由六点测频法的误差机理可知, 合理选取相邻检测点的间隔可抑制电网中干扰对测频精度的影响。PCC 处电压信号的频率 f 是需求解的量, 故难以精确求解出 $|f'|$ 。幸运的是, 光伏并网发电系统并网运行时, PCC 处电压信号的频率允许偏差应符合 GB/T 19939—2005 并网技术要求的规定, 即 f 取值范围是 50 ± 0.5 Hz, 故通过编程求解出 n 的取值范围为 $1 \leq n \leq f_s / [2 \times (50 + 0.5)]$ 。

结合本文 $f_s=3.2$ kHz 和 n 的取值范围可以得到 $|f'|$ 与 n 的关系曲线如图 1 所示。

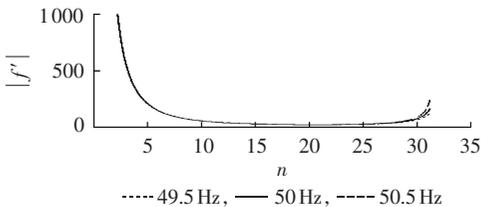


图 1 $|f'|$ 与 n 的关系曲线

Fig.1 Relationship between $|f'|$ and n

由图 1 可知, 在 $1 \leq n \leq 31$ 时, $|f'|$ 的值先快速大幅地降低, 然后再慢速小幅地上升, 则 $|f'|$ 一定存在一个极小值点。经求解可得: 当 $n=20$ 时, $|f'|$ 取得极小值, 故采用 $n=20$ 作为最优检测点间隔。

2.2 频率奇异点剔除

由于 $|\Delta x|$ 是一个不可预知且随机的变量, 虽然加入了干扰抑制措施, 也不可能彻底消除六点测频法的结果误差。本文为了进一步提高六点测频法的

精度, 通过算法将六点测频法的结果序列中可能产生的少量由于 $|\Delta x|$ 值过大造成的频率结果奇异点剔除。其原理如下: 设 f_i 为 PCC 处电压信号在 s_i 处测得的频率, f_{i-1} 为 s_{i-1} 处测得的频率, 如果式(8)所示的频率奇异点判据成立, 则应该将 f_i 剔除。

$$\left| \frac{f_i - f_{i-1}}{f_{i-1}} \right| > \sigma \quad (8)$$

其中, σ 为频率奇异点判据的阈值, 通常可以设定为 0.002。

上述判据的优点是简单快速, 缺点是精度不高。在 PCC 处电压信号的频率波动幅值较大时, 误判可能增多。但因为频率奇异点剔除前的结果序列是已经采用了干扰抑制措施得到的, 波动已被大幅减小, 因此采用上述频率奇异点判据是合理的。

3 仿真研究及结果

3.1 六点测频法实例仿真

本文利用 MATLAB 软件对六点测频法的误差机理和干扰抑制的有效性进行仿真验证。设 PCC 处受电网中干扰影响的基波电压信号表达式为:

$$s(t) = 220\sqrt{2} \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{3}\right) + \Delta e(t) \quad (9)$$

其中, $\Delta e(t)$ 为电网中干扰引起的误差信号, 包含总谐波畸变率约为 0.45% 的 3、5、7 次谐波和信噪比约 30 dB 的噪声, 其幅值约为不受电网干扰影响的基波电压信号幅值的 1%, 波形如图 2 所示。

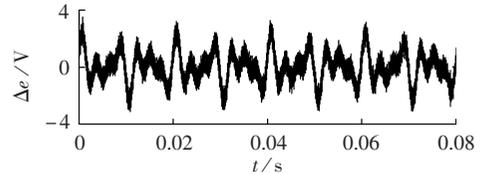


图 2 误差信号波形

Fig.2 Waveform of error signal

以 $f_s=3.2$ kHz 对 $f=50$ Hz 的 $s(t)$ 采样 192 个点, 由式(4)可以求解出每个点对应的频率值。为保证结果序列的完整性, 假设不同 n 条件下的频率求解均从 $s(t)$ 的第 2 个周期开始, 在 MATLAB 软件中利用 S-Function 模块编制六点测频法进行仿真, 图 3 为 $f=50$ Hz 且不同 n 条件下的频率曲线(从上至下 n 分别为 1、5、10、15、20、25、30)。由图 3 可知, 在同一信号频率 f 条件下, 由于受电网中干扰引起的误差信号的影响, 曲线均产生了不同程度的波动。

为定量研究不同 n 条件下的频率曲线波动大小, 采用平均相对误差 e_{av} 来进行描述, 即:

$$e_{av} = \frac{\sum_{i=1}^N |f_i - f|}{Nf} \times 100\% \quad (10)$$

其中, N 为样本总数, f 为 $s(t)$ 的真实频率, f_i 为检测

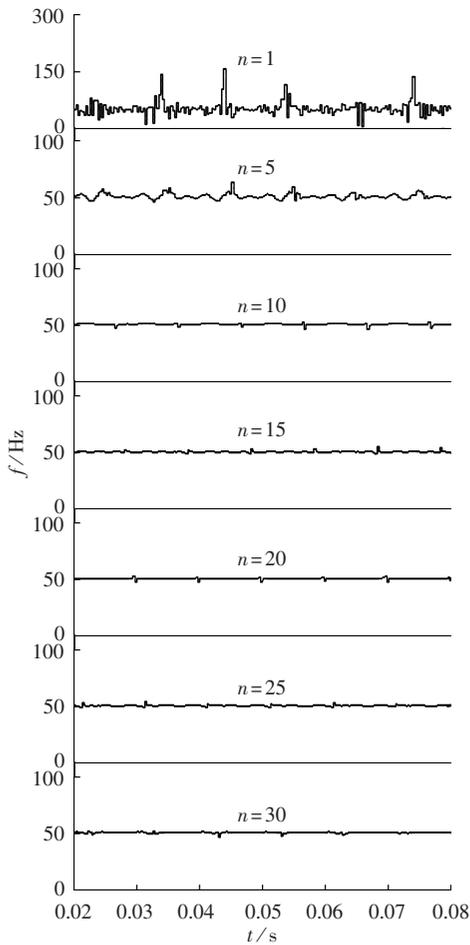


图 3 测频结果曲线

Fig.3 Results of frequency detection

点 s_i 处求解得到的频率。故若 e_{av} 越大,则六点测频法得到的频率曲线的波动就越明显。表 1 为不同 n 条件下的频率曲线的 e_{av} 。

表 1 不同 n 值下的 e_{av} Tab.1 e_{av} under different n

n	$e_{av}/\%$	n	$e_{av}/\%$
1	36.94	20	0.89
5	12.32	25	1.19
10	2.46	30	2.62
15	1.26		

综合图 3 和表 1 可以得到以下结论:

a. 当 $n=20$ 时, e_{av} 最小,即频率曲线的波动最小,这与 2.1 节中的结论一致。

b. 当 $n \neq 20$ 时, e_{av} 增大,频率曲线波动增大或频率奇异点增多,特别是在 $n=1 \sim 5$ 条件下, e_{av} 极大,大部分测频结果已经不可信,而在其他 n 条件下,大部分测频结果较准确,仅存在极少数因 $\Delta e(t)$ 过大引起的频率奇异点。

上述结论证明了六点测频法的误差机理分析的正确性和受电网中干扰影响条件下进行最优检测点间隔估计的有效性和必要性。

为进一步提高六点测频法在受电网中干扰影响

情况下的精度,采用式(8)对 $n=20$ 时的频率曲线进行奇异点剔除,得到如图 4 所示的频率曲线,其平均频率经计算为 49.967 Hz, e_{av} 为 0.19%,相比频率奇异点剔除前显著降低,精度得到了较大提高,证明了进行频率奇异点剔除的有效性。

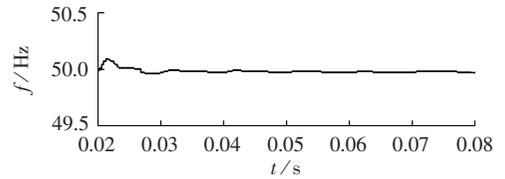


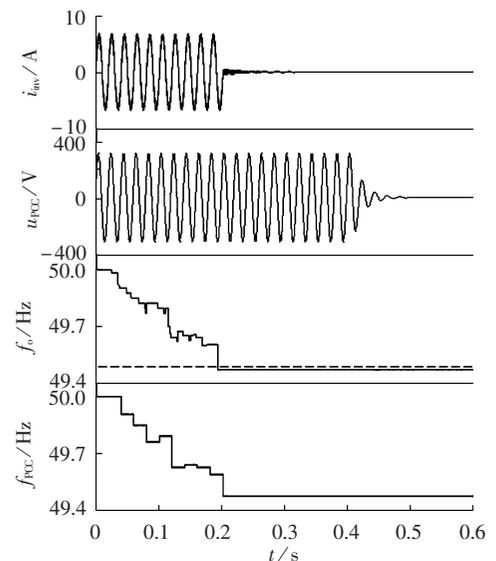
图 4 频率奇异点剔除后的频率曲线

Fig.4 Frequency curve after singularity elimination

3.2 主动频移法中的抗干扰六点测频法仿真

为验证所提主动频移孤岛检测抗干扰方法的有效性,本文基于电流型光伏并网发电原理,采用 MATLAB/Simulink 软件搭建了 1 kW 单相光伏并网发电系统仿真模型,并对其孤岛检测性能进行仿真。仿真参数如下:电网电压为 220 V/50 Hz;设定单相全桥逆变器功率为 1 kW,为使系统有功功率匹配,负载电阻 $R=220^2/1000=48.4$ (Ω);为模拟 IEEE Std929—2000^[17]规定的最严重孤岛状况(负载品质因数为 2.5,谐振频率为 50 Hz),可计算得到电感 $L=61.625$ mH,电容 $C=164.416$ μ F;斩波因子初始值 $c_0=0.05$,加速增益 $K=0.065$;过/欠频保护动作阈值为 50 ± 0.5 Hz。

图 5、图 6 和图 7 分别为 $n=4$ 、 $n=8$ 和 $n=20$ 时,大电网在 0.4 s 断开条件下,基于抗干扰六点测频法的正反馈有源频率偏移(AFDPF)孤岛检测仿真波形,图中分别给出了逆变器输出电流 i_{inv} 、PCC 处电压 u_{PCC} 、抗干扰六点测频法的输出频率 f_o 及 PCC 处电压的频率 f_{PCC} 。

图 5 电网断电且 $n=4$ 时的仿真波形Fig.5 Simulative waveforms when grid is blackout and $n=4$

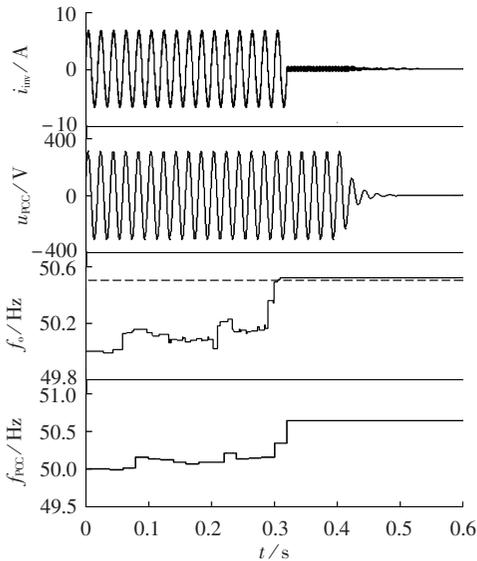


图6 电网断电且 $n=8$ 时的仿真波形
Fig.6 Simulative waveforms when grid is blackout and $n=8$

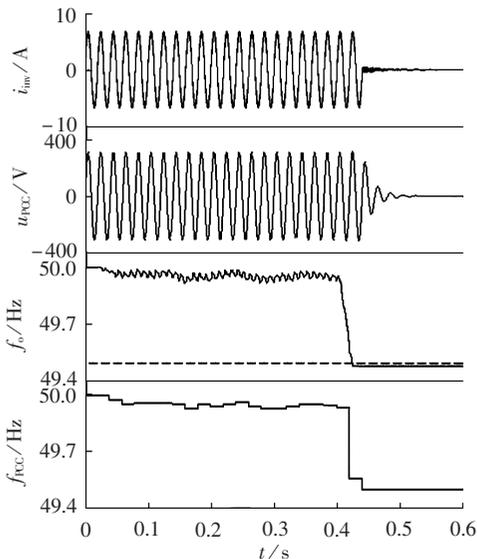


图7 电网断电且 $n=20$ 时的仿真波形
Fig.7 Simulative waveforms when grid is blackout and $n=20$

对比图5—7的仿真波形可知, $n=4$ 时,由于抗干扰六点测频法模块中未采用抗干扰能力最佳的 n 值,故在0.2s时的频率检测结果已经提前低于49.5 Hz(为了更明显地观察本文方法的测频结果,抗干扰六点测频法模块在检测到频率超出 50 ± 0.5 Hz范围时就保持输出不变),逆变器输出电流立即变为零,但PCC处电压在大电网断开后才衰减至零,这说明发生了孤岛效应误判; $n=8$ 时,频率检测结果在0.32s时便已提前高于50.5 Hz,同样发生了孤岛效应误判;而 $n=20$ 时,由于抗干扰六点测频法模块中采用抗干扰能力最佳的 n 值,抗干扰六点测频法模块的输出频率结果不会因电网中干扰导致过大偏差。当0.4s大电网断电时,电网的巨大平衡作用消

失,AFDPF模块的频率偏移扰动开始叠加,故抗干扰六点测频法模块在0.426s时检测到频率低于49.5 Hz,而由于AFDPF模块仅在每个周期的开始阶段检测一次频率是否超出 50 ± 0.5 Hz范围,故PCC处电压频率在0.44s时低于49.5 Hz,此时欠频保护动作,使逆变器停止运行,逆变器输出电流立即变为零,PCC处电压开始衰减至零。这说明由于采用了抗干扰能力最佳的 n 值,在大电网断电之前,即使电网中存在干扰,AFDPF模块也不会发生误判现象,电网断电后,也能准确及时地检测出孤岛。

4 结论

本文研究了电网中干扰对主动频移法产生的影响,针对孤岛效应误判问题,提出了主动频移孤岛检测中的抗干扰六点测频法。通过对最优检测点间隔进行估计和频率奇异点的剔除,该方法可有效避免在孤岛效应检测中因电网中干扰对主动频移法产生不利影响从而导致的孤岛效应误判现象,提高了孤岛检测的可靠性,且能够准确快速地检测出孤岛,具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 侯梅毅,高厚磊,刘炳旭,等. 基于相位偏移的孤岛检测新方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):22-26.
HOU Meiyi,GAO Houlei,LIU Bingxu,et al. Islanding detection method based on phase shift[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):22-26.
- [2] 李军,黄学良,陈小虎,等. 基于双重判据的微电网快速孤岛检测技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):38-42.
LI Jun,HUANG Xueliang,CHEN Xiaohu,et al. Detection of islanded microgrid based on double criterions[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):38-42.
- [3] 贺眉眉,李华强,陈静,等. 基于离散小波变换的分布式发电孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):103-108.
HE Meimei,LI Huaqiang,CHEN Jing,et al. Multi-fault restoration based on RPI and BCC for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):103-108.
- [4] 袁玲,郑建勇,张先飞. 光伏发电并网系统孤岛检测方法的分析与改进[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):72-75.
YUAN Ling,ZHENG Jianyong,ZHANG Xianfei. Analysis and improvement of islanding detection method for grid-connected photovoltaic inverters[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(21):72-75.
- [5] 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.
- [6] 刘芙蓉,康勇,段善旭,等. 主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J]. 中国电机工程学报,2008,28(1):95-99.

- LIU Furong, KANG Yong, DUAN Shanxu, et al. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1):95-99.
- [7] ROPP M E, BEGOVIC M, ROHATGI A. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3):810-816.
- [8] JUNG Y, CHOI J, YU B, et al. A novel active frequency drift method of islanding prevention for the grid-connected photovoltaic inverter[C]//IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference. Recife, Brazil: IEEE, 2005:1915-1921.
- [9] LOPES L A C, SUN Huili. Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1):171-180.
- [10] LIU Fangrui, LIN Xinchun, KANG Yong, et al. An active islanding detection method grid-connected converters[C]//3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Singapore: IEEE, 2008:734-737.
- [11] 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, 2010:88-90.
- [12] TUNLASAKUN K, KIRTIKARA K, THEPA S, et al. A micro-controller based islanding detection for grid-connected inverter[C]//The 47th Midwest Symposium on Circuits and Systems. Hiroshima, Japan: IEEE, 2004:267-269.
- [13] 朱艳伟, 石新春, 李鹏. 多分辨率奇异谱熵和支持向量机在孤岛与扰动识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7):64-70.
- ZHU Yanwei, SHI Xinchun, LI Peng. Classification of islanding and grid disturbance based on multi-resolution singular spectrum entropy and SVM[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7):64-70.
- [14] 孙瑜, Math Bollen, Graham Ault, 等. 孤岛状态下含分布式电源的配电系统可靠性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23):77-81.
- SUN Yu, Math Bollen, Graham Ault, et al. Reliability analysis of islanded distribution systems with distributed energy resources[J]. Power System Technology, 2008, 32(23):77-81.
- [15] LIDULA N, PERERA N, RAJAPAKSE A D. Investigation of a fast islanding detection methodology using transient signals [C]//Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009:1-6.
- [16] PIGAZO A, LISERRE M, MASTROMAURO R A. Wavelet-based islanding detection in grid-connected PV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11):4445-4455.
- [17] IEEE. IEEE Std929-2000 IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic systems[S]. [S.l.]:IEEE Computer Society, 2000.

作者简介:

应展烽(1982-),男,浙江台州人,讲师,博士后,主要从事可再生能源并网技术及电网频率控制方面的研究工作(E-mail: yingzhanfeng@163.com);

陈运运(1987-),男,江西抚州人,助理工程师,硕士,主要从事设备管理方面的工作(E-mail: cyy19870104@yahoo.cn);

吴军基(1955-),男,河南南阳人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统及其自动化、弹道测试及现代数据采集与处理等方面的研究工作。

Active frequency shift islanding detection based on anti-interference six-point frequency detection algorithm

YING Zhanfeng¹, CHEN Yunyun¹, TIAN Yasheng², WU Junji¹, FENG Kai¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. Yangzhou Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The frequency detection reliability of active frequency shift method is easily influenced by the grid interferences, which may be wrongly taken as the occurrence islanding effect. The anti-interference six-point frequency detection algorithm is adopted in the active frequency shift method to avoid such misjudgement and quickly detect islanding, which applies the optimal interval of detection point and eliminates the frequency singularity to suppress the grid interference. The simulative research of islanding detection is performed according to the worst conditions stipulated by IEEE Std929-2000 and results show that, with fast response, the proposed method prevents the misjudgement and has no nondetection zone.

Key words: active frequency shift; frequency detection; islanding misjudgement; anti-interference six-point frequency detection algorithm