

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.03.002

一种改进型频率正反馈孤岛检测方法研究

张煜文, 李圣清, 吴文凤, 明 瑶, 马定寰

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对传统孤岛检测算法的检测时间较长问题, 提出一种改进型频率正反馈孤岛检测方法。即以缩短孤岛检测时间为目的, 在逆变器输出角频率时加入正反馈增益系数 A 和 B , 加快频率的偏移速率。探讨了 A 和 B 取不同值时逆变器输出电压角频率对应的反馈强度和检测效果。同时通过分析成功检测孤岛现象的临界条件, 确定了有效缩短检测时间的 A 、 B 值。仿真得出的结论与理论分析结果相符合, 从而验证了所提方法的有效性。

关键词: 孤岛检测; 下垂控制; 正反馈增益

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)03-0008-05

Research on an Improved Method of the Frequency Positive Feedback Islanding Detection

ZHANG Yuwen, LI Shengqing, WU Wenfeng, MING Yao, MA Dinghuan

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the flaw of a long detection time in traditional islanding detection algorithm, an improved frequency positive feedback islanding detection method has thus been proposed. The islanding detection time can be shortened by the addition of the positive feedback gain coefficient A and B to the inverter output angle frequency, followed by a tentative investigation on the feedback strength and detection effects of inverter output voltage angle frequency corresponding to different values of A and B . Meanwhile, an analysis has been made of the critical condition for a successful detection of the islanding phenomenon, thus obtaining A and B values of effective detection time. The simulation results are consistent with the theoretical analysis results, which verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: island detection; droop control; positive feedback gain

1 研究背景

孤岛现象, 是指由于人为因素或者非人为因素引起电网失压时, 分布式发电系统给线路负载供电的现象^[1-5]。孤岛状态下, 若不采取一定的保护措施, 逆

变器的频率、电压等参数波动较大, 可能导致电网崩溃, 因此, 较多科研工作者对孤岛检测采取的保护措施展开了深入研究。如钟诚等^[6]提出一种基于周期性无功电流扰动的孤岛检测方法, 即通过注入周期性无功电流扰动, 检测分布式电源侧的电压和频率在小

收稿日期: 2018-04-03

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ5009), 湖南省教育厅开放基金资助项目(15k036)

作者简介: 张煜文(1993-), 男, 湖北武汉人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为微电网控制技术,

E-mail: yuwen-zhang@foxmail.com

幅度脉动中的特征量变化, 进而判断是否产生孤岛现象。但此方法因注入了无功电流扰动, 所以会使得分布式电源在正常并网运行时的功率因素有所降低。丁浩等^[7]提出了一种基于自适应有功电流扰动的孤岛检测算法, 该算法消除了频率偏移法带来的谐波, 提高了输出功率因数, 能够自适应地加入触发孤岛保护的最小有功扰动电流, 但是针对不可控微小电源, 需要另外增添能量管理控制系统, 控制算法变得更为复杂。文献 [8-9] 提出了基于模糊控制的主动移相式孤岛检测方法, 解决了传统的主动式孤岛检测方法在分布式发电系统并网运行时对电能质量影响较大和在孤岛时存在检测盲区的问题, 但是其截断系数 cf 和反馈系数 k 难以确定, 并且算法较为复杂, 在实际工程应用中不易实现。

由于传统的下垂控制方程受逆变器输出阻抗的影响较大, 并且当输出阻抗呈感性时, 逆变器输出的有功功率仅与角频率有关, 而无功功率只和幅值有关^[10-11]。因此, 本文针对传统孤岛检测算法检测时间较长的问题, 提出一种改进型频率正反馈孤岛检测方法, 在逆变器输出角频率时加入正反馈增益系数 A 和 B , 以期能够增强逆变器输出电压角频率的反馈强度和检测效果。同时, 探讨了成功检测到孤岛现象的临界条件, 仿真结果表明, 所提出的方法能明显减少检测时间。

2 基于下垂控制的孤岛检测方法原理

在分布式电源正常并网运行时, 逆变器的输出角频率会受到大电网的箝位作用, 导致其只会小范围内脉动而不会产生较大波动。在非人为因素引起的孤岛现象发生后, 电网对逆变器输出角频率的箝位作用消失, 因而逆变器的输出角频率会发生偏移。当逆变器的输出角频率偏移达整定值时, 就可以判定为发生了孤岛现象。

本文针对传统孤岛检测算法检测时间较长的问题, 提出采用基于下垂控制的孤岛检测方法, 其等效电路框图如图 1 所示。图中, ω_{inv} 为逆变器的输出角频率, φ 为逆变器的初相角, P 、 P^* 分别为逆变器实际输出的有功功率及有功功率的参考值, U 、 U^* 分别为逆变器的输出电压幅值和电网电压基波幅值, Q 、 Q^* 分别为逆变器实际输出的无功功率及无功功率的参考值, u_{inv} 为逆变器输出的瞬时电压, i_{inv} 为逆变器输出的瞬时电流, Z_{load} 为负载阻抗, PCC 为公共耦合点, s 为系统开关。

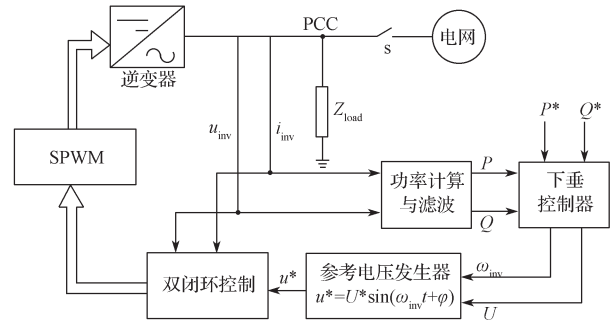


图 1 下垂控制的等效电路框图

Fig. 1 Equivalent block diagram of the droop control

基于下垂控制的孤岛检测方法的检测原理见图 2。图中 k_p 为逆变器有功下垂系数, Z^{-1} 表示滞后一个周期。其中, 逆变器实际输出的有功功率 P 是逆变器输出的电压幅值 U 和逆变器的输出角频率 ω_{inv} 以及负载阻抗 Z_{load} 的函数, 参考角频率 $\omega_{inv}^*(k)$ 是跟随逆变器输出角频率 $\omega_{inv}(k)$ 的变化而改变的。当逆变器的输出角频率 ω_{inv} 偏移达整定值时, 就可以判断为检测到孤岛现象。

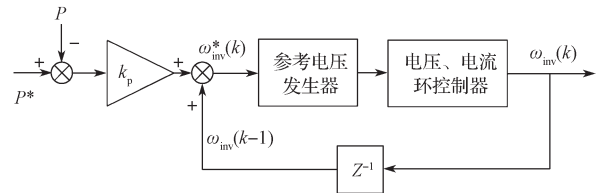


图 2 基于下垂控制的孤岛检测原理图

Fig. 2 Schematic diagram of island detection based on droop control

3 增强型正反馈孤岛检测方法

理想情况下系统不存在相位差, 逆变器的输出角频率参考值与逆变器输出角频率之值相等, 即 $\omega_{inv}^*(k) = \omega_{inv}(k)$ 。当发生非计划孤岛后, 逆变器输出的有功功率 P 和没有发生孤岛前的有功功率间的差值如式 (1) 所示:

$$\Delta P = P^* - U^2/R. \quad (1)$$

根据图 2 可以得到:

$$\omega_{inv}(k) = \omega_{inv}(k-1) + k_p \Delta P, \quad (2)$$

$$\omega_{inv}(k-1) = \omega_{inv}(k) Z^{-1}. \quad (3)$$

由公式 (2) 可以得知, 逆变器的输出角频率 $\omega_{inv}(k)$ 会受到孤岛现象发生前后的有功功率变化 ΔP 的影响。

发生孤岛现象后, 若逆变器输出的有功功率 P 和公共耦合点 PCC 处负载阻抗 Z_{load} 吸收的有功功率相差不大, 则根据式 (1) 可知 ΔP 很小, 会导致频率偏移速度变慢, 孤岛检测时间延长。因此, 本文

提出一种改进型频率正反馈孤岛检测方法，在正反馈的基础上加入反馈增益系数 A 和 B ，用以改变逆变器输出电压角频率的反馈强度，加速频率偏移速度，进而缩短孤岛检测时间。图 3 所示为加入正反馈增益系数的孤岛检测方法原理图。

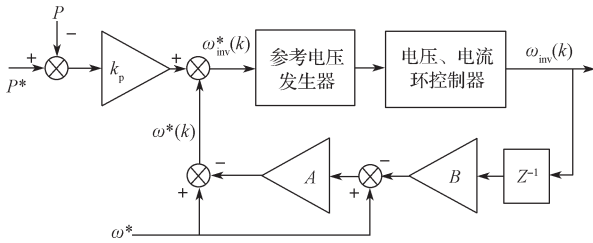


图 3 加入正反馈增益的孤岛检测原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the isolated island detection with positive feedback gain

由图 3 可知，发生孤岛现象后，逆变器输出电压的角频率 $\omega_{inv}(k)$ 为

$$\omega_{inv}(k) = \omega^* - A(\omega^* - B\omega_{inv}(k-1)) + k_p \Delta P \quad (4)$$

由式 (4) 可知，当增益系数 A 和 B 取不同值时，逆变器输出电压角频率 $\omega_{inv}(k)$ 的值也随之改变，产生不同的检测效果，如表 1 所示。

表 1 不同增益系数时的检测效果

Table 1 Detection results with different gain coefficients

条件	检测效果
$A < 0, B < 0$	加大正反馈强度，能够减少孤岛检测时间
$A < 0, B = 0$	加大正反馈强度，但反馈强度比上一种弱
$A < 0, B > 0$	$\omega^* - B\omega_{inv}(k-1) < 0$ 时是负反馈，无法检测到孤岛， $\omega^* - B\omega_{inv}(k-1) > 0$ 时是正反馈，但是反馈强度弱
$A = 0, B$ 任意	变成传统的下垂控制孤岛检测方法
$0 < A \leq 1, B$ 任意	反馈强度弱，孤岛检测时间减少不明显
$A > 1, B < 0$	$B\omega_{inv}(k-1) + k_p \Delta P < 0$ 时是负反馈，无法检测到孤岛； $B\omega_{inv}(k-1) + k_p \Delta P > 0$ 时是正反馈，但是反馈强度弱
$A > 1, B \geq 0$	是负反馈，无法检测到孤岛现象的发生

由表 1 中描述可知，当增益系数 A 和 B 都小于零时，其检测效果比其他条件下的要好。且 A 和 B 的值越小，增益强度越大，检测时间越短。但是当增益强度过大时，会造成非孤岛情况下的电网频率波动，使得整个系统不稳定。所以需要根据实际情况确定增益系数 A 和 B 的值。

根据式 (3) 和 (4) 可以得知：

$$\omega_{inv}(k) = \frac{(1-A)\omega^* + k_p \Delta P}{1-ABZ^{-1}} \quad (5)$$

当系统稳定时， $\omega_{inv}(k-1) = \omega_{inv}(k)$ ，此时 $Z^{-1} = 1$ 。当 $AB > 1$ 时，会使系统处于不稳定状态，因此可以将其作为能否检测到孤岛的临界条件。发生孤岛现象

后，逆变器的输出角频率会发生偏移， AB 的值越大，频率偏离的速度越快，因而检测到孤岛现象需要的时间越短。

4 仿真分析

为了验证本文所提出的基于下垂控制的增强型正反馈增益孤岛检测方法的有效性，在 Matlab7.1/Simulink 仿真平台搭建了系统模型，并在含有 2 台并网逆变器的系统中进行仿真验证，部分仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

Table 2 Simulation parameter setting

参数	取值	参数	取值
电网电压幅值 /V	1 000	k_p	1
电网频率 /Hz	50	k_q	1 000
负载谐振频率 /Hz	50.5	品质因数 Q	2.5
逆变器开关频率 /kHz	20		

当 $A = -2, B = 1$ 时，不满足检测到孤岛现象发生的条件，且 $\omega^* - B\omega_{inv}(k-1) < 0$ ，此时是负反馈，因此无法检测到孤岛，断路器没有切断并网电流，公共耦合点电压略有降低。公共耦合点 PCC 的电压和并网电流的仿真波形如图 4 所示。

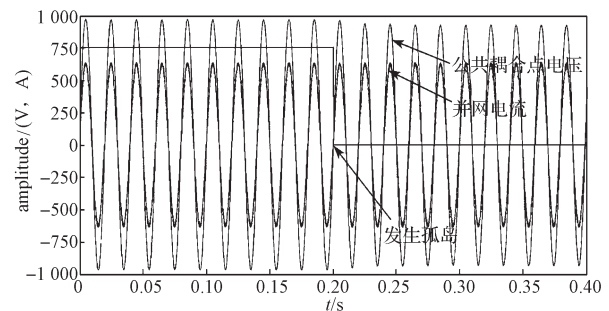


图 4 孤岛检测失败的仿真波形

Fig. 4 Simulation waveforms of isolated island detection failure

当 $A = 0, B$ 为任意值时，即在传统的下垂控制方法下，公共耦合点 PCC 处的电压和并网电流的仿真波形如图 5 所示。

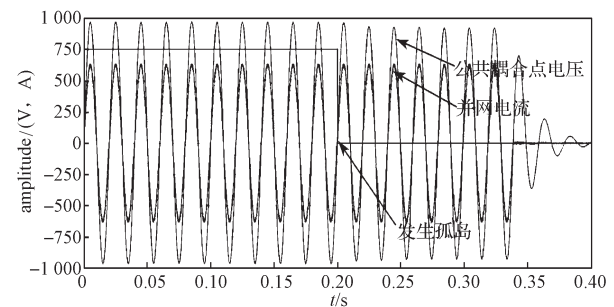


图 5 传统的下垂控制孤岛检测的仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms of traditional droop control in island detection

由图5可以得知,当 $A=0$ 、 B 为任意值时,电网在0.2 s时断开,PCC点处的电压有所下降,由于没有反馈增益效果,所以检测时间较长,约在0.34 s时检测到孤岛现象的发生,并开启孤岛保护。由于是RLC类型的负载,因此在并网电流为零后,PCC处的电压需要经过一段时间才衰减到零。可以看出,整个检测时间长度为0.14 s左右,满足GB/T 29319—2012中对孤岛效应的电压检测时间要求^[12]。

当 $A=-2.5$ 、 $B=-1$ 时,正反馈增益效果较弱,公共耦合点PCC处的电压和并网电流的仿真波形如图6所示。

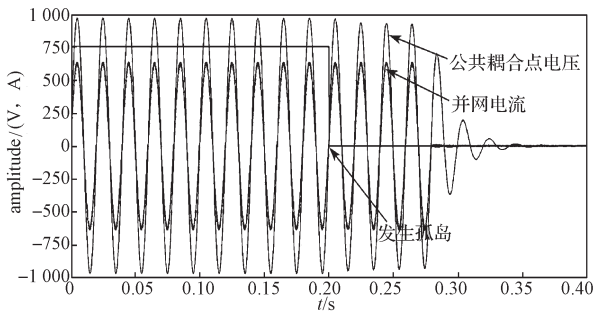


图6 正反馈增益效果较弱时的仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms with weak positive feedback gain effect

由图6可以得知,当 $A=-2.5$ 、 $B=-1$ 时,电网也在0.2 s时断开,PCC点处的电压有所下降,由于正反馈增益效果不强,所以可以看到检测到孤岛所用的时间虽然比传统方法的有所减少,但是还有继续减少的空间。从图6中可看出,系统约在0.285 s时检测到孤岛现象的发生,并开启孤岛保护。可以发现,整个检测时间长度约为0.085 s,满足GB/T 29319—2012对孤岛效应的电压检测时间要求。

当 $A=-5$ 、 $B=-1$ 时,正反馈增益效果较大,此时公共耦合点PCC处的电压和并网电流的仿真波形如图7所示。

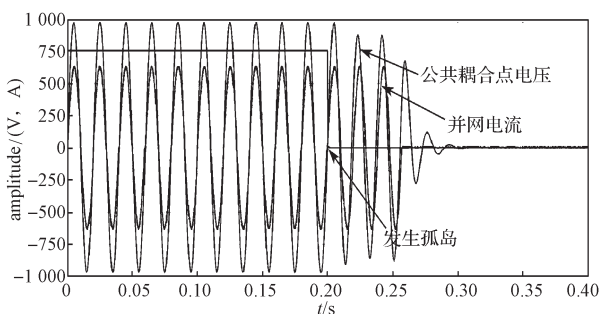


图7 正反馈增益效果较强时的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms with strong positive feedback gain effect

由图7可以得知,当 $A=-5$ 、 $B=-1$ 时,电网也在

0.2 s时断开,此条件下公共耦合点PCC处的电压有所下降,但因正反馈增益效果较强,约在0.255 s时检测到孤岛现象的发生,并开启孤岛保护,所以可得知此条件下检测到孤岛所用的时间明显比前两种方法的短。且可以发现,整个检测时间长度约为0.055 s,满足GB/T 29319—2012对孤岛效应的电压检测时间要求。

综观图4~7可以发现,正反馈效果增强时,检测到孤岛现象发生的时间明显缩短。以上仿真结果与理论分析结果相符合,表明本文提出的基于下垂控制的增强型正反馈增益孤岛检测方法有效可行,能够明显缩短孤岛检测时间。

5 结论

根据上述理论分析和仿真研究结果,可以得出如下结论:

1) 在基于下垂控制的孤岛检测方法中加入正反馈增益,可以改变输出电压角频率的反馈强度,加速频率偏移,进而缩短孤岛检测时间;

2) 增益强度系数 A 、 B 的乘积大于1时才会使系统处于不稳定状态,因此可以将其作为能否检测到孤岛现象的临界条件。

参考文献:

- [1] 王成山,高菲,李鹏,等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.
WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, et al. Control Strategy Research on Low Voltage Microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 2-8.
- [2] 唐昆明,王俊杰,张太勤. 基于自适应下垂控制的微电网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 68-74.
TANG Kunming, WANG Junjie, ZHANG Taiqin. Research on Control Strategy for Microgrid Based on Adaptive Droop Control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 68-74.
- [3] POH C L, LEI Z, FENG G. Compact Integrated Energy Systems for Distributed Generation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1492-1502.
- [4] 阚加荣,罗运虎,谢少军,等. 基于下垂特性锁相环的反孤岛性能分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 165-170.
KAN Jiarong, LUO Yunhu, XIE Shaojun, et al. Analysis with Anti-Islanding Performance of Grid-Connected Inverters Based on Drooped PLL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013,

- 28(4): 165-170.
- [5] 梁建钢, 金新民, 吴学智, 等. 基于下垂控制的微电网变流器并网运行控制方法改进[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 59-64.
LIANG Jiangan, JIN Xinmin, WU Xuezhi, et al. Improved Grid-Connection Operation of Microgrid Converter Based on Droop Control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 59-64.
- [6] 钟 诚, 井天军, 杨明皓. 基于周期性无功电流扰动的孤岛检测新方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 270-276.
ZHONG Cheng, JING Tianjun, YANG Minghao. A New Islanding Detection Method with Periodic Reactive Current Disturbance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 270-276.
- [7] 丁 浩, 魏艳君, 漆汉洪, 等. 基于自适应有功电流扰动的孤岛检测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 294-299.
DING Hao, WEI Yanjun, QI Hanhong, et al. A Novel Islanding Detection Based on Adaptive Active Current Disturbance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 294-299.
- [8] 郑 涛, 袁 飞, 王艳萍, 等. 基于模糊控制的快速无盲区的频移式孤岛检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 38-43.
ZHENG Tao, YUAN Fei, WANG Yanping, et al. A Fast Frequency Drifts Islanding-Detecting Method Without Non-Detecting Zone Based on Fuzzy Control[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 38-43.
- [9] 方小妹, 宋树祥, 蒋品群, 等. 基于模糊控制的新型主动移相式孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 42(20): 19-24.
FANG Xiaomei, SONG Shuxiang, JIANG Pinqun, et al. A Novel Active Phase-Shifting Islanding Detection Method Based on Fuzzy Control[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 19-24.
- [10] 张 平, 石健将, 李荣贵, 等. 低压微网逆变器的“虚拟负阻抗”控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1844-1852.
ZHANG Ping, SHI Jianjiang, LI Ronggui, et al. A Control Strategy of “Virtual Negative” Impedance for Inverters in Low-Voltage Microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1844-1852.
- [11] 张宸宇, 梅 军, 郑建勇, 等. 一种适用于低压微电网的改进型下垂控制器[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 53-59.
ZHANG Chenyu, MEI Jun, ZHENG Jianyong, et al. Improved Droop Controller for Low-Voltage Microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 53-59.
- [12] 吴盛军, 徐青山, 袁晓冬, 等. 光伏防孤岛保护检测标准及试验影响因素分析[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 924-931.
WU Shengjun, XU Qingshan, YUAN Xiaodong, et al. Anti-Islanding Detection Standards for Distributed PV Power Generations and Analysis on Factors Influencing Non-Detection Zone of Islanded PV Generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 924-931.

(责任编辑: 廖友媛)