

# 基于下垂控制的孤岛检测方法及其改进策略

贺超, 王冕, 陈国柱

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对被动孤岛检测存在较大检测盲区, 传统主动检测算法会对输出电流造成有功或无功扰动的不足, 提出了一种基于下垂控制的孤岛检测方法。该方法将传统下垂控制器中的频率指令由常量改为逆变器并网点的实际频率。电网正常情况下, 该频率指令由于电网电压的箝位作用只有微小波动; 而当孤岛发生时, 受并网逆变器的调节作用影响, 会发生正反馈作用, 逆变器实际频率迅速发生偏移, 当检测到其超过限定范围时, 判定为发生孤岛现象。同时, 通过引入了反馈强度系数对该方法进行了改进, 并且给出了改进算法孤岛检测成功的边界条件。通过对含有 2 台并网发电逆变器的系统进行仿真, 验证了理论推导的正确性及所提出孤岛检测方法的有效性。

**关键词:** 下垂控制; 孤岛检测; 并网逆变器; 频率偏移

**中图分类号:** TM 646; TM 76

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.013

## 0 引言

孤岛效应是指电网失压时电源仍保持对失压电网中的某一部分线路继续供电的状态。非计划性孤岛现象会对人和设备造成严重危害<sup>[1-2]</sup>, 因此, 国内外对孤岛检测展开了广泛的研究。孤岛现象的检测方法主要可以分为三大类: 被动检测方法、主动检测方法和开关状态监测方法。目前并网逆变器的孤岛检测策略一般都采用被动式检测方法与一种主动式检测方法相结合的方式进行。

被动式检测方法的基本思想是根据电网失电后逆变器输出端电压的幅值、频率、相位或谐波含量的变化进行孤岛效应检测<sup>[3]</sup>, 具有简单、容易实现、对电能质量无影响等优点。但当逆变器输出功率与本地负载功率接近或平衡时, 此方法将失效, 因而存在较大的检测盲区<sup>[4]</sup>。

主动式孤岛检测方法通常采用人为对逆变器输出功率、频率或相位施加一定的扰动, 电网正常工作时, 由于电网的平衡作用, 检测不到这些扰动; 一旦电网出现故障, 逆变器输出的扰动将快速累积并超出允许范围, 从而检测到孤岛效应。主动式孤岛检测方法主要有有功电流扰动法<sup>[5]</sup>、无功电流扰动法<sup>[6-7]</sup>、谐波电流注入法<sup>[8]</sup>、谐波畸变率正反馈法<sup>[9-10]</sup>、电压正反馈法<sup>[11-14]</sup>、负序电压正反馈法<sup>[15]</sup>、滑模频率漂移法<sup>[16]</sup>、有源频率漂移法及其改进算法<sup>[17-23]</sup>、主动移相法<sup>[24]</sup>及其他方法<sup>[25-30]</sup>。以上所提及的主动式孤岛检测方法大多存在稳态运行时会对输出电能质量

产生影响的问题; 另外, 功率扰动法, 包括有功电流扰动法、无功电流扰动法、谐波电流注入法, 在多个系统并联时将不再适用; 电压正反馈法受输出功率、参数设计不当等因素影响会引起检测失败; 滑模频率偏移法和有源频率偏移法会因  $RLC$  负载谐振频率的干扰产生漏判的情况; 基于下垂特性锁相环的反孤岛策略<sup>[28-29]</sup>适应性受逆变器功率因数影响明显, 且存在较大盲区; 而其他方法也存在设计复杂、需要额外加入辅助电路等不足。

由于能够实现各个逆变器间的功率平衡, 下垂控制在并网逆变器发电等相关领域得到了广泛应用<sup>[31-32]</sup>。本文结合孤岛控制算法自身特点, 提出了一种基于下垂控制的孤岛检测算法及其改进策略, 其在稳态时对输出电能质量无影响, 同时适用于多逆变器并联应用。仿真结果验证了该算法的有效性。

## 1 下垂控制原理

下垂控制<sup>[33]</sup>的基本原理可以描述为:

$$\begin{cases} \omega = \omega^* + m(P^* - P) \\ U = U^* + n(Q^* - Q) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\omega$  为逆变器输出角频率指令;  $\omega^*$  为逆变器空载输出电压角频率, 即电网基波角频率;  $P^*$  和  $P$  分别为逆变器有功功率指令和实际有功输出;  $U$  为逆变器输出电压幅值指令;  $U^*$  为电网基波电压幅值;  $Q^*$  和  $Q$  分别为逆变器无功功率指令和实际无功输出;  $m$  和  $n$  分别为下垂控制中逆变器输出电压的角频率和幅值下垂系数。

常规的下垂控制算法中,  $\omega^*$  为一个预先设定的常数, 代表理想电网基波角频率。下垂控制策略在具体实施中各有差异, 本文中基于下垂控制的并网逆变器单相等效控制框图如图 1 所示。其中, 电抗器与

收稿日期: 2014-05-22; 修回日期: 2014-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177147); 浙江省重点科技创新团队项目(2010R50021)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177147) and Zhejiang Key Science and Technology Innovation Group Program(2010R50021)

电容电流参考方向如图中箭头所示。本文中,通过虚线部分的采样电压计算输出端电压频率并实时传递给下垂控制器。

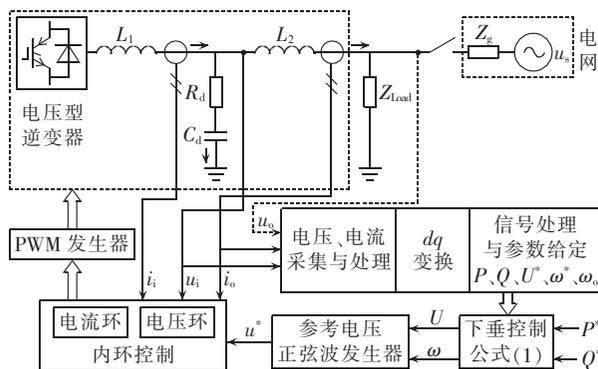


图 1 并网逆变器下垂控制单相等效原理图

Fig.1 Single-phase equivalent diagram of droop control for grid-connected converter

图中,  $u_s$  为电网电压;  $Z_g$  为电网阻抗;  $u_o$  为逆变器输出端电压;  $\omega_o$  为输出端电压角频率, 由锁相环检测输出端三相电压得到;  $L_1$ 、 $L_2$  和  $C_d$  组成逆变器输出 LCL 滤波器;  $R_d$  为阻尼电阻;  $i_i$  为电抗器  $L_1$  实际输出电流;  $i_o$  为逆变器输出电流。实际系统中, 在  $L_2$  和负载之间存在并网变压器, 此处没有画出。以滤波电容点电压和逆变器输出电流计算得到逆变器输出有功和无功功率。

控制器采取电压外环、电流内环的双闭环结构。  $Z_{load}$  为本地负载, 通常用 RLC 并联支路来等效。正常并网运行和脱网运行时, 并网逆变器均按照既定的角频率指令进行闭环工作。

## 2 孤岛检测方法改进

### 2.1 孤岛检测方法

结合下垂控制器自身的特点, 提出以下孤岛检测的方法。并网运行时令  $\omega^*$  等于  $\omega_o$ , 其中  $\omega_o$  为并网逆变器输出角频率, 受电网电压箝位, 不会有较大波动。当非计划孤岛发生时, 由于电网失电, 逆变器输出端电压对  $\omega_o$  的箝位作用消失, 此时逆变器输出频率会向某一方向偏移, 即下垂控制器的基准频率发生偏移, 当频率偏移超过预设值时, 检测到孤岛现象发生; 当要进行主动孤岛运行, 即计划性孤岛运行时, 下垂控制器不再采用  $\omega_o$  作为参考频率, 而是将  $\omega^*$  置为一个固定值, 来保证系统频率稳定。

本文提出的基于下垂控制环的孤岛检测方法, 其原理可简单地用图 2 进行描述。图 2 为改进后的下垂控制有功-频率环, 图中将参考电压的幅值进行了简化与忽略。有功功率  $P$  为负载阻抗  $Z_{load}$ 、输出电压幅值  $U$  和输出电压角频率  $\omega_o$  的函数。可以看出, 与传统的闭环控制不同, 其输入指令跟随输出变化,

可以理解其为一个准正反馈系统。

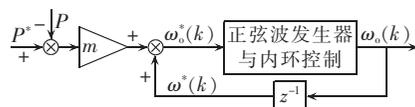


图 2 孤岛检测原理图

Fig.2 Schematic diagram of islanding detection

假设系统可以实现无静差控制, 即输出电压幅值为  $U^*$ , 输出角频率  $\omega_o(k) = \omega_o^*(k)$ , 则逆变器输出的有功功率在电网失电前后之差可以表示为:

$$\Delta P = P^* - U^{*2}/R \quad (2)$$

再结合图 2, 可以得到:

$$\omega_o(k) = \omega^*(k) + m\Delta P = \omega_o(k-1) + m\Delta P \quad (3)$$

电网失电后有功变化  $\Delta P$  会影响逆变器输出电压的角频率。理想情况下, 即系统可以实现无差控制与检测时, 逆变器输出端电压的角频率  $\omega_o(k) = \omega_o(k-1) + m\Delta P$ , 当有功变化为零时, 系统输出电压角频率不会发生变化, 即孤岛检测的盲区。

### 2.2 孤岛检测改进算法

从以上理论分析可见, 当逆变器输出有功功率和本地负载消耗有功功率较接近时, 发生孤岛现象时, 逆变器输出频率的正反馈作用将会减弱, 这将导致孤岛检测时间变长。为此, 对提出的孤岛检测方法进行改进, 加强其正反馈作用, 进而缩短检测时间。

图 3 为改进的孤岛检测方法原理图。对图 2 中输出频率的反馈部分做了改进。

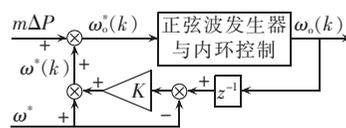


图 3 孤岛检测改进方法

Fig.3 Improved method of islanding detection

同样地, 假定控制系统是理想的, 可以得到电网失电后输出电压角频率表达式。可以看出, 反馈强度系数  $K$  可以改变输出电压角频率的反馈强度。根据图 3, 得到输出电压角频率表达式如下:

$$\omega_o(k) = \omega^*(k) + m\Delta P = (\omega_o(k-1) - \omega^*)K + \omega^* + m\Delta P \quad (4)$$

根据式(4)分析可知, 系数  $K$  大小不同, 则检测的效果也会有所不同, 具体如下:

- $K < 0$  时, 为负反馈, 无法实现孤岛检测;
- $K = 0$  时, 退化为传统下垂控制策略;
- $0 < K < 1$  时, 较之前的检测算法频率正反馈作用要弱, 不利于缩短检测时间;
- $K = 1$  时, 退化为改进前的检测算法;
- $K > 1$  时, 加强了正反馈效果, 可加速检测速度。

可以看出,  $K$  越大, 其检测速度越快, 但受到控制器响应速度的影响, 检测时间不可能无限快。且过大的  $K$  值, 会引起在正常并网运行时由于电网电压频率波动及频率检测的误差引入较大的偏差, 不利

于系统的稳定。因而需要根据具体情况设定  $K$  值。

另外,需要注意的是,实际电网不会保持某一频率恒定不变,因而可以在程序中每隔一段时间(如 1 min)对图 3 和式(4)中的电网角频率  $\omega^*$  进行更新,当检测到的电网频率在电网标准正常范围之内时,用新值更新,而当超出正常范围时,保持上一个值不变;或者将逆变器输出端电压进行滑模平均,得到的结果在限定范围内时,设定为  $\omega^*$  值。

### 3 检测成功边界条件

根据式(4)可得:

$$\omega_0(z) = [m\Delta P + (1-K)\omega^*] / (1-Kz^{-1}) \quad (5)$$

特殊地,当  $K=1$  时,即为检测方法改进前的传递函数。系统特征方程为:  $z=1$ 。其不稳定的条件为:

$$K > 1 \quad (6)$$

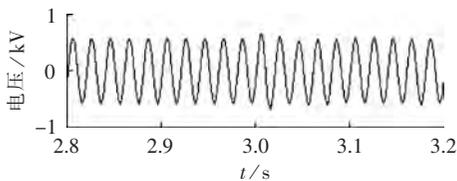
因此,当满足  $K > 1$  时才可以使系统输出电压频率不稳定,即可以提供检测到孤岛现象发生的条件。同样地,  $K$  值越大越不容易稳定,频率偏移也就越快,即所需的孤岛检测时间越短。

### 4 仿真验证

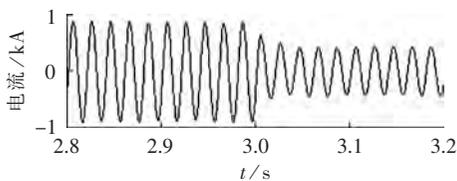
为了验证本文所提出的孤岛检测方法及其改进方案,在含有 2 台并网发电逆变器的系统中进行仿真验证,其中单台逆变器容量为  $720 \text{ kV}\cdot\text{A}$ ,电网线电压有效值为  $690 \text{ V}$ ,基波频率  $f_s=50 \text{ Hz}$ ,逆变器数量为 2 台,直流母线额定电压  $U_d=1100 \text{ V}$ ,LCL 滤波器中  $L_1=300 \mu\text{H}$ ,  $L_2=180 \mu\text{H}$ ,  $C_d=190 \mu\text{F}$ ,  $R_d=0.1 \Omega$ ,下垂控制系数  $m=3 \times 10^{-6}$ ,  $n=1 \times 10^{-4}$ 。

设定  $t=3 \text{ s}$  时发生孤岛,负载阻抗为  $0.67 \Omega$ 。图 4 为未采用任何孤岛检测算法时输出电压、电流波形。输出电压幅值在孤岛发生时会有暂态的微小波动;孤岛运行时输出电流发生变化,由负载特性决定。

2 台逆变器采用控制算法相同,输出波形基本一



(a) 逆变器输出电压



(b) 逆变器输出电流

图 4 未采用孤岛检测方法时相关波形

Fig.4 Waveforms of inverter without islanding detection

致,因而只给出了其中一台逆变器相关波形。

图 5 为未采用孤岛检测方法时输出电压的频率。频率的静态工作点发生偏移,但仍未超过相关标准,且能够稳定在某一频率点附近。这是传统下垂控制算法的优势,即能够实现并网到孤岛的平稳切换,然而也正是如此,使其不能对孤岛现象做出检测。

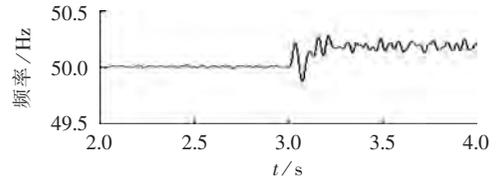


图 5 未采用孤岛检测方法时逆变器输出电压频率

Fig.5 Voltage frequency of inverter without islanding detection

加入孤岛检测算法,在不同负载特性下进行仿真验证。

图 6 为负载阻抗为  $0.67 \Omega$ ,即轻载时,不同反馈强度系数  $K$  下,逆变器的输出电压频率图。可见,在孤岛发生之前,逆变器输出频率保持在电网频率;孤岛发生后,随着反馈强度的增大,即  $K$  值的增大,频率偏移速度变快,相应地,在设定相同频率阈值的情况下所需要的孤岛检测时间越短。特别地,图中  $K=0.5$  时,无法检测到孤岛现象,这是由于其不满足式(7)所给出的检测成功的边界条件所造成的。

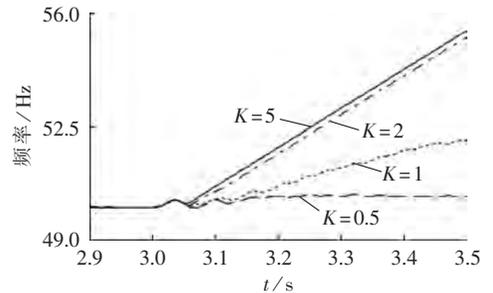


图 6 轻载时不同系数  $K$  下逆变器输出电压频率

Fig.6 Voltage frequency of inverter with light load for different values of coefficient  $K$

逆变器输出电压、电流与未采用孤岛检测算法时基本一致,此处不再给出。

将阻性负载阻抗改为  $0.29 \Omega$ ,此时负载消耗有功大于逆变器额定输出有功功率,逆变器输出电压频率如图 7 所示。可以看出,此时频率偏移方向与轻载时正好相反。

将阻性负载阻抗改为  $0.33 \Omega$ ,此时逆变器输出功率与负载消耗功率相匹配,其他条件不变,仿真结果如图 8 所示。可以看出,相对于负载功率较大的情况,当功率匹配时,在  $K$  值较小时(图中  $K=1$  和  $K=0.5$  时),频率偏移速度显著减慢;而采用改进策略时,即选取较大的  $K$  值,频率偏移速度变化不大。

采用  $RLC$  负载进行仿真,设定负载谐振频率点

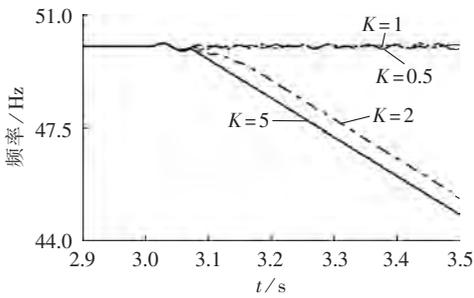


图 7 逆变器额定有功功率小于负载消耗时输出电压频率

Fig.7 Output voltage frequency when rated inverter power is smaller than load

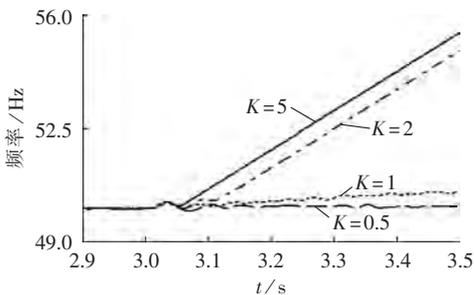


图 8 逆变器功率和负载功率匹配时逆变器电压频率

Fig.8 Voltage frequency when inverter power matches load power

为  $f_0 = 50 \text{ Hz}$  ( $L = 500 \mu\text{H}$ ,  $C = 20.26 \text{ mF}$ ), 反馈强度系数  $K = 5$  不变。图 9 为系统在不同的负载品质因数 (品质因数  $Q = R\sqrt{C/L}$ ) 情况下的仿真结果。可以看出, 品质因数的变化会影响该算法的检测速度, 但即使  $Q > 2.5$ , 也可以成功实现孤岛检测。

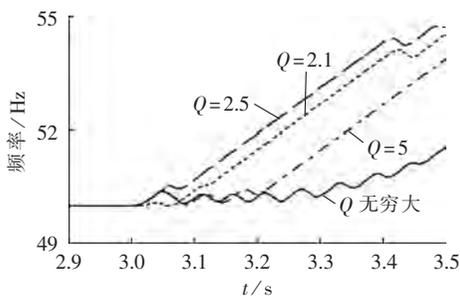


图 9 不同负载品质因数时逆变器电压频率

Fig.9 Voltage frequency for different load quality factors

在发生孤岛现象和系统检测到孤岛的时间段内, 由于输出频率的偏移, 检测算法会对逆变器下垂控制的控制效果产生一定影响, 但并不影响稳态运行。需要特别说明的是, 当系统需要进行主动孤岛运行时, 只需在程序检测到孤岛现象发生后将反馈强度系数  $K$  置为 0, 控制器即转化为传统的下垂控制策略, 可以实现平稳过渡到孤岛运行。这样本文所提出的控制方案就可以兼顾系统的计划孤岛运行和非计划孤岛现象快速检测, 大幅提高系统的灵活度和可靠性。

## 5 结论

针对现有主动孤岛检测算法普遍会降低并网运行电能质量的问题, 本文提出了一种基于下垂控制的孤岛检测方法及其改进策略。理论分析和仿真结果证明, 其在稳态运行时不会对电能质量造成影响。依据给出的检测成功的边界条件, 合理设定反馈强度, 可以在各种负载条件下无盲区地实现孤岛检测并改变检测所需时间。当局部电网存在多个分布式能源系统时, 只要均采用此孤岛检测手段, 不同系统检测效果不会相互影响。

## 参考文献:

- [1] IEEE. IEEE Std929-2000 IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic(PV) systems[S]. New York, USA:IEEE, 2000.
- [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] JERAPUTRA C, ENJETI P. Development of a robust anti-islanding algorithm for utility interconnection of distributed fuel cell powered generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5):1163-1170.
- [4] YE Z, KOLWALKAR A, ZHANG Y, et al. Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5):1171-1176.
- [5] 杨秋霞, 赵清林, 郭小强. 三相光伏并网逆变器电流扰动孤岛检测建模及分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4):45-49.  
YANG Qiuxia, ZHAO Qinglin, GUO Xiaoqiang. Modeling and analysis of current-disturbance based islanding detection for three-phase photovoltaic grid-connected inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4):45-49.
- [6] 刘文华, 焦阳, 宋强, 等. 三相光伏发电系统瞬时电流控制及其孤岛检测技术[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2011, 51(3):345-350.  
LIU Wenhua, JIAO Yang, SONG Qiang, et al. Instantaneous current control and islanding detection for a three-phase grid connected photovoltaic generation system[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2011, 51(3):345-350.
- [7] 杨滔, 王鹿军, 张冲, 等. 基于无功电流-频率正反馈的孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14):193-199.  
YANG Tao, WANG Lujun, ZHANG Chong, et al. A novel islanding detection method based on positive feedback between reactive current and frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14):193-199.
- [8] 张琦, 孙向东, 钟彦儒, 等. 用于分布式发电系统孤岛检测的偶次谐波电流扰动法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7):112-119.  
ZHANG Qi, SUN Xiangdong, ZHONG Yanru, et al. Even harmonic current disturbing method for islanding detection in the distributed power generation systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7):112-119.
- [9] 马静, 米超, 王增平. 基于谐波畸变率正反馈的孤岛检测新方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1):47-50, 65.  
MA Jing, MI Chao, WANG Zengping. A novel islanding detection

- method based on positive feedback of voltage harmonic distortion[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(1):47-50,65.
- [10] MASSOUD A,AHMED K,FINNEY S,et al. Harmonic distortion-based island detection technique for inverter-based distributed generation[J]. Renewable Power Generation, IET,2009,3(4):493-507.
- [11] HUNG G,CHANG C,CHEN C. Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2003,18(1):169-173.
- [12] 刘芙蓉,康勇,段善旭,等. 电压正反馈式孤岛检测方法的边界条件及改进算法[J]. 电工技术学报,2012,27(3):247-251.  
LIU Furong,KANG Yong,DUAN Shanxu,et al. Boundary conditions of voltage shift techniques for islanding detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(3):247-251.
- [13] DU Pengwei,YE Zhihong,APONTE E E,et al. Positive-feedback-based active anti-islanding schemes for inverter-based distributed generators:basic principle,design guideline and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(12):2941-2948.
- [14] KIM S K,JEON J H,CHOI H K,et al. Voltage shift acceleration control for anti-islanding of distributed generation inverters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4):2223-2234.
- [15] 郭小强,邹伟扬. 微电网非破坏性无盲区孤岛检测技术[J]. 中国电机工程学报,2009,29(25):7-12.  
GUO Xiaoqiang,WU Weiyang. Non-devastating islanding detection for microgrids without non detection zone[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(25):7-12.
- [16] 刘芙蓉,王辉,康勇,等. 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.  
LIU Furong,WANG Hui,KANG Yong,et al. Non-detection zone of slip-mode frequency shift method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(2):178-182.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 邓燕妮,桂卫华. 一种低畸变的主动移频式孤岛检测算法[J]. 电工技术学报,2009,24(4):219-223.  
DENG Yanni,GUI Weihua. An improved active frequency-drift method for islanding detection with low harmonics distortion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(4):219-223.
- [20] 任碧莹,孙向东,钟彦儒,等. 用于单相分布式发电系统孤岛检测的新型电流扰动方法[J]. 电工技术学报,2009,24(7):157-163.  
REN Biying,SUN Xiangdong,ZHONG Yanru,et al. A novel current-disturbing method for islanding detection in single-phase distributed power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(7):157-163.
- [21] 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.
- [22] 张学广,王瑞,刘鑫龙,等. 改进的主动频率偏移孤岛检测算法[J]. 电力系统自动化,2012,36(14):200-204,209.  
ZHANG Xueguang,WANG Rui,LIU Xinlong,et al. Improved active frequency drift anti-islanding algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(14):200-204,209.
- [23] YAFAOUI A,WU B,KOURO S. Improved active frequency drift anti-islanding detection method for grid connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(5):2367-2375.
- [24] 刘芙蓉,康勇,王辉,等. 主动移相式孤岛检测的一种改进的算法[J]. 电工技术学报,2010,30(3):172-176.  
LIU Furong,KANG Yong,WANG Hui,et al. An improved active phase-shift method for islanding detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,30(3):172-176.
- [25] 李军,黄学良,陈小虎,等. 基于分压器原理的孤岛检测技术在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(34):15-21.  
LI Jun,HUANG Xueliang,CHEN Xiaohu,et al. Islanding detection method based on voltage divider for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(34):15-21.
- [26] 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.
- [27] 朱珂,卢晓惠,于青,等. 基于可控短路技术的系统阻抗测量方法在孤岛检测中的应用[J]. 电力系统自动化,2013,37(2):119-124.  
ZHU Ke,LU Xiaohui,YU Qing,et al. A novel method of impedance measurement used in islanding detection based on controllable short-circuit technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(2):119-124.
- [28] KAN J,LI N,YAO Z,et al. Anti-islanding performance of grid-connected inverters based on frequency droop PLL[C]//2012 7th International Power Electronics and Motion Control Conference(IPEMC). Harbin,China:[s.n.],2012:2129-2133.
- [29] 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,LU 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.
- [30] VELASCO D,TRUJILLO C,GARCERA G,et al. An active anti-islanding method based on phase-PLL perturbation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(4):1056-1066.
- [31] 范元亮,苗轶群,江全元,等. 基于下垂控制结构的微电网机组

控制设计[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 125-130.

FAN Yuanliang, MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, et al. Generator control design based on droop control architecture for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 125-130.

[32] 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): 59-65.

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): 59-65.

[33] 关雅娟, 郭伟扬, 郭小强. 微电网中三相逆变器孤岛运行控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 52-60.

GUAN Yajuan, WU Weiyang, GUO Xiaoqiang. Control strategy

for three-phase inverters dominated microgrid in autonomous operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(33): 52-60.

#### 作者简介:



贺超

贺超(1986—), 男, 河北昌黎人, 博士, 主要从事电能质量控制及大功率变流器驱动研究(E-mail: the\_day@126.com);

王冕(1990—), 男, 贵州印江人, 博士研究生, 主要从事新能源发电研究;

陈国柱(1967—), 男, 湖北鄂州人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事电力电子装置及其数字控制研究(E-mail: gzchen@zju.edu.cn)。

## Islanding detection based on droop control and its improvement strategy

HE Chao, WANG Mian, CHEN Guozhu

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** As the methods of passive islanding detection have large undetectable zone and the traditional methods of active islanding detection may cause the active or reactive power disturbance to output current, a method of islanding detection based on the droop control is proposed, which takes the actual frequency at PCC (Point of Common Coupling), instead of a constant in traditional droop control, as the frequency reference. When grid is normal, this frequency reference varies little due to the clamping effect of grid voltage; when an islanding occurs, it shifts quickly due to the positive feedback adjustment effect of the grid-connected inverter, based on which, an islanding is thus detected when the frequency reference exceeds a limit. A feedback strength coefficient is introduced to improve the proposed method and the boundary conditions of successful islanding detection are given. Simulation is carried out for a system with two grid-connected inverters to verify the correctness of theoretical derivation and the validity of the proposed method.

**Key words:** droop control; islanding detection; grid-connected inverter; frequency shift

(上接第 63 页 continued from page 63)

WANG Xuejun, GUO Yajun. Analyzing the consistency of comparison matrix based on G1 method[J]. Chinese Journal of Management Science, 2006, 14(3): 65-70.

[23] 邱苑华. 管理决策熵学及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 168-172.

[24] 王中兴, 张绍林, 刘雁. 基于主客观加权属性值一致化的组合赋权法[J]. 广西科学, 2007, 14(3): 247-249.

WANG Zhongxing, ZHANG Shaolin, LIU Yan. A synthetic approach to determine weights based on the identify of subjective and objective weighted attribute value[J]. Guangxi Sciences, 2007, 14(3): 247-249.

#### 作者简介:



徐箭

徐箭(1980—), 男, 湖北咸宁人, 副教授, 博士, 主要从事电力系统电压稳定分析与控制、大规模风电并网分析与控制等研究工作(E-mail: xujian@whu.edu.cn);

张华坤(1990—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统电压稳定(E-mail: hkzhangwhu@163.com);

孙涛(1977—), 男, 山东郓城人, 博士研究生, 主要研究方向为电力建设和运营。

## Optimal selection of UHVDC connection mode to multi-infeed HVDC system

XU Jian<sup>1</sup>, ZHANG Huakun<sup>1</sup>, SUN Tao<sup>1</sup>, WANG Tian<sup>1</sup>, JIANG Yibo<sup>1</sup>, LIN Changqing<sup>2</sup>

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** The connection mode of UHVDC to multi-infeed HVDC system is researched and an evaluation index system is established to comprehensively assess the influence of different factors on the connection mode, such as network loss, static safety, multi-infeed short circuit ratio, etc. An optimal selection method based on the optimal combination weight is proposed and the combination weight optimization model based on the unification of subjectively and objectively weighted attributes is built, based on which, the candidate modes are quantitatively evaluated by the relative similarity degree to realize the optimal selection. This method is employed to select the optimal connection mode of West Mongolia-Wuhan UHVDC to Central China Power Grid and the hierarchical connection mode is selected.

**Key words:** multi-infeed; DC system; UHVDC power transmission; connection mode; optimal combination weight; evaluation; relative similarity degree; optimization