

不平衡情况下基于电压正反馈的孤岛检测方法

王晓刚, 肖立业

(中国科学院电工研究所, 北京 100190)

摘要: 针对各种基于正反馈的孤岛检测方法不适用于电网电压不平衡的问题, 提出一种新颖的基于电压正反馈的孤岛检测方法, 将公共连接点电压的负序分量调换相序并进行派克变换得到的 q 轴电压作为反馈量。仿真结果表明, 该方法在电网电压不平衡时不影响并网逆变器的正常运行, 在电网断电后能准确迅速地识别孤岛, 该方法还适用于电网电压平衡的情况, 在 IEEE Std.1547 定义的最恶劣情况下也能实现正确检测, 不存在检测盲区, 且能识别伪孤岛。

关键词: 孤岛检测; 正反馈; 反馈控制; 电压不平衡; 逆变器; 控制

中图分类号: TM 71

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.015

0 引言

三相并网逆变器是新能源发电系统和微电网与大电网的接口, 实现能量的传递。在并网逆变器运行时, 必须考虑电网断电形成的孤岛状态, 在孤岛状态发生后, 新能源发电系统必须迅速停止运行, 微电网则停止与大电网的能量传输切换至孤岛运行模式, 否则将对电气设备和人员造成潜在危害^[1-3]。

常见的孤岛检测方法分为开关状态检测法、被动检测法和主动检测法三大类。被动检测法对电能质量没有影响, 是一类非破坏性的检测方法, 但检测盲区较大^[4-7]; 开关状态检测法和主动检测法检测盲区小, 但缺点也十分明显^[8-14], 例如绝大部分主动检测法对电能质量有负面影响。

基于正反馈的检测法是一类新颖的主动检测法^[15-18], 其特点是在并网逆变器的控制系统中引入正反馈, 电网正常时正反馈不起作用, 孤岛发生时某个电量被放大从而检测出孤岛, 优点是检测盲区小甚至没有检测盲区。文献^[16]提出一种基于无功电流和频率的正反馈孤岛检测方法, 但正反馈系数与频率之间存在关联, 使正反馈系数变化不易处理。文献^[17]将公共连接点电压的负序分量作为正反馈量, 文献^[18]提出一种基于负序功率正反馈的孤岛检测方法, 但这 2 种方法在电网电压不平衡时均不适用, 因为电压不平衡时负序电压不为 0, 而负序功率一旦因电压的波动变得大于 0 后将使并网逆变器输出电流也不平衡, 使负序功率被进一步正反

馈放大, 这 2 种情况均使并网逆变器无法正常运行。针对该问题, 本文提出一种新颖的基于电压正反馈的孤岛检测方法, 将公共连接点(PCC)电压负序的分量调换相序并进行派克变换得到的 q 轴电压作为反馈量, 在电网未断电但电压不平衡时, 该电压为 0, 只有当电网断电后, 该电压才产生并被放大, 据此可判断孤岛的发生。仿真结果表明所提方法不仅能实现电网电压不平衡时的孤岛检测, 也适用于电网电压平衡的情况, 还能区分伪孤岛, 是一种无盲区、非破坏性、适应性强的孤岛检测方法。

1 电网电压不平衡情况下的并网逆变器控制策略

电网电压不平衡时, 并网逆变器通常采取抑制输出电流负序分量的控制策略, 控制框图如图 1 所示。

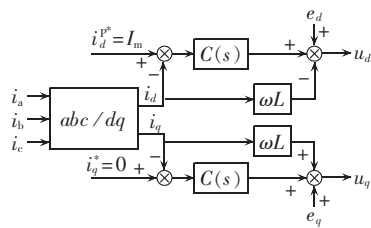


图 1 抑制输出电流负序分量的并网逆变器控制框图
Fig.1 Block diagram of grid-connected inverter control to suppress output negative-sequence current

其原理简述如下: 为抑制输出负序电流, 令 d 轴和 q 轴电流的参考值分别为 $i_d^* = i_d^* = I_m$ 和 $i_q^* = 0$, 即 d 轴参考电流为与正序电流对应的直流量。 i_d^* 和实际输出电流 d 轴分量 i_d 相减, i_q^* 和实际输出电流的 q 轴分量 i_q 相减, 2 个误差输入至 2 个电流控制器 $C(s)$, d 轴和 q 轴解耦以后, 分别再与 d 轴和 q 轴电网电压相减。

采用上述控制方法后, 输出电流的负序分量得到抑制, 即 $i_d^N = i_q^N = 0$ 。

收稿日期: 2014-06-04; 修回日期: 2015-02-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51205073); 广州市科技计划项目(2013J4100017); 广州市属高校科研计划项目(2012A034)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51205073), Science and Technology Program of Guangzhou(2013J4100017) and Scientific Research Projects of Guangzhou City College(2012A034)

2 电压正反馈孤岛检测原理

2.1 基本原理

为了在电网电压不平衡情况下仍然能检测孤岛状态,采用图 2 所示的基于电压正反馈的新型孤岛检测方法。图中 $u_{pa}、u_{pb}、u_{pc}$ 为 PCC 电压, $F(U_q^-)$ 为电压正反馈函数。

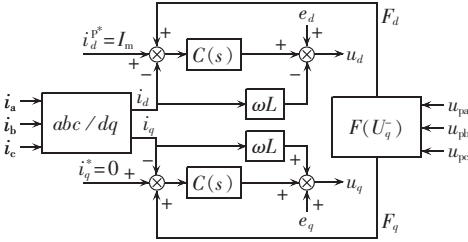


图 2 带电压正反馈的并网逆变器控制框图

Fig.2 Block diagram of grid-connected inverter control with voltage positive feedback

电网电压不平衡时 PCC 电压等于电网电压,其表达式为:

$$\begin{bmatrix} u_{pa} \\ u_{pb} \\ u_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^p \sin(\omega t) \\ U_m^p \sin(\omega t - 120^\circ) \\ U_m^p \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_m^N \sin(\omega t) \\ U_m^N \sin(\omega t + 120^\circ) \\ U_m^N \sin(\omega t - 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, U_m^p 和 U_m^N 分别为正序电压分量和负序电压分量的幅值。

将三相电网电压输入至 $F(U_q^-)$ 后,首先经负序电压提取环节得到三相负序电压:

$$\begin{bmatrix} u_a^N \\ u_b^N \\ u_c^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^N \sin(\omega t) \\ U_m^N \sin(\omega t + 120^\circ) \\ U_m^N \sin(\omega t - 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2)$$

将 b、c 相电压调换顺序,对 $[u_a^N \ u_c^N \ u_b^N]^T$ 进行派克变换并将 q 轴电压有效值 U_q^- 乘以正反馈系数 K 和 2 倍频的三角函数后得到 $F(U_q^-)$ 的输出如式 (3) 所示。

$$\begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K U_q^- \cos(2\omega t) \\ -K U_q^- \sin(2\omega t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

并网逆变器实际输出电流为:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m + F_d \\ 0 + F_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m + K U_q^- \cos(2\omega t) \\ -K U_q^- \sin(2\omega t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式 (4) 经过派克逆变换并利用三角函数化简,得到并网逆变器输出电流在三相静止坐标下的表达式为:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m \sin(\omega t) + K U_q^- \sin(\omega t + 180^\circ) \\ I_m \sin(\omega t - 120^\circ) + K U_q^- \sin(\omega t - 60^\circ) \\ I_m \sin(\omega t + 120^\circ) + K U_q^- \sin(\omega t + 60^\circ) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I_m - K U_q^-) \sin(\omega t) \\ \sqrt{I_m^2 + (K U_q^-)^2 + K I_m U_q^-} \sin(\omega t + \theta_b) \\ \sqrt{I_m^2 + (K U_q^-)^2 + K I_m U_q^-} \sin(\omega t + \theta_c) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\tan \theta_b = -\frac{\sqrt{3} (I_m + K U_q^-)}{I_m - K U_q^-}$$

$$\tan \theta_c = \frac{\sqrt{3} (I_m + K U_q^-)}{I_m - K U_q^-}$$

当并网运行时, PCC 电压由电网决定。当电网电压不平衡时, $F(U_q^-)$ 中的负序电压提取环节能提取出负序电压,但 b、c 相的负序电压调换顺序后得到的 $[u_a^N \ u_c^N \ u_b^N]^T$ 为正序电压,即使电网电压不平衡,派克变换后 q 轴的输出 U_q^- 仍等于 0。由式 (5) 可知,并网逆变器的输出电流为三相正序电流,正反馈对电能质量没有影响。

当微电网由并网运行转为孤岛运行后, PCC 电压为三相负载电压,由控制策略和所采用的电压正反馈孤岛检测方法决定。在孤岛状态被检测出之前,并网逆变器仍采用图 2 所示的控制策略,因此输出电流表达式仍为式 (5), PCC 电压为:

$$\begin{bmatrix} u_{pa} \\ u_{pb} \\ u_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a Z_a \\ i_b Z_b \\ i_c Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |Z_a| (I_m - K U_q^-) \sin(\omega t + \theta_{za}) \\ |Z_b| \sqrt{I_m^2 + (K U_q^-)^2 + K I_m U_q^-} \sin(\omega t + \theta_b + \theta_{zb}) \\ |Z_c| \sqrt{I_m^2 + (K U_q^-)^2 + K I_m U_q^-} \sin(\omega t + \theta_c + \theta_{zc}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$|Z_i| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_i}\right)^2 + \left(\omega C_i - \frac{1}{\omega L_i}\right)^2}}$$

$$\theta_{zi} = \arctan \frac{R_i (1 - \omega^2 L_i C_i)}{\omega L_i}$$

其中, $i=a, b, c$; $|Z_i|$ 、 θ_{zi} 分别为三相负载阻抗的模和阻抗角。

孤岛运行状态开始的瞬间,系统中会产生一定的 U_q^- ,经正反馈放大后, U_q^- 被持续且迅速地放大。通过检测 U_q^- 是否在规定时间内超过阈值即能判断孤岛状态的发生。 $F(U_q^-)$ 主要部分的框图如图 3 所示,第 1 部分 abc/dq 变换模块、第 2 部分低通滤波器 (LPF) 和第 3 部分 dq/abc 变换模块共同实现负序电压检测。PCC 电压中的负序分量经 abc/dq 变换后含有 2 倍频谐波,低通滤波器的作用是滤除这部分谐波。

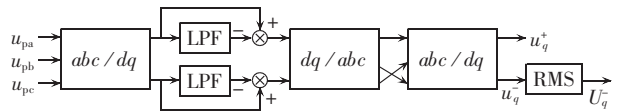


图 3 $F(U_q^-)$ 的原理框图

Fig.3 Schematic diagram of $F(U_q^-)$

以上孤岛检测方法基于图 1 所示的电流控制策略,若采用功率控制策略,可将电流单环控制修改为功率和电流的双环控制,功率外环的输出作为电流内环的电流参考值,从而使本文的孤岛检测方法得以适用。

2.2 低通滤波器非理想特性的影响以及 U_q^- 的限幅

用于检测负序电压的低通滤波器存在滤波精度和响应速度之间的矛盾,截止频率越低,滤波精度高但响应速度慢,反之则滤波精度低但响应速度快。对于孤岛检测,响应速度不能太慢,因此需折中选择低通滤波器的截止频率,这就使滤波后的 2 倍频谐波必然有一定残留,即 $[u_a^N \ u_c^N \ u_b^N]^T$ 变换后得到的 u_q^- 不为 0, u_q^- 的均方根(RMS)值也不为 0。并网模式下并且电网电压不平衡时 U_q^- 也不为 0,由式(5)可知,输出电流的质量将受到影响。解决方法是根据 U_q^- 的大小决定正反馈是否起作用,当 U_q^- 小于某一设定值 δ_1 时,令 $U_q^-=0$,即正反馈不起作用。

为了防止正反馈过程中并网逆变器输出电流和输出电压过大,还需对 U_q^- 进行限幅处理,设定 U_q^- 的上限为 δ_2 。 δ_1 和 δ_2 的设计与低通滤波器的参数以及孤岛检测时间的要求有关,低通滤波器的截止频率越低,低通滤波效果越好, δ_1 可相应设置得小一些, δ_2 也可设置得小一些, PCC 电压波动时,并网逆变器输出电流含有的负序分量也较小,但电流畸变的持续时间会增加。相反,低通滤波器的截止频率越高, δ_1 和 δ_2 也要设置得大一些, PCC 电压波动时,电流畸变的程度增加,但持续时间会缩短。因此 δ_1 和 δ_2 应折中选择。

2.3 孤岛检测时间的整定

选择 δ_1 作为孤岛检测的阈值。孤岛发生后,若 U_q^- 大于阈值的持续时间超过整定时间 t_z ,就可判定孤岛发生。但是,在低电压穿越、并网点下游线路发生故障、保护切除故障以及负荷发生较大变化等并网状态的暂态过程中,均会使 U_q^- 超过阈值,持续 t_c 后再降至阈值以下,并最终降为 0。为了避免误判,应该使 $t_z > t_c$ 。IEEE Std.929—2000 标准规定了孤岛检测的最小时间,因此应尽量减小 t_z ,而减小 t_z 的途径是减小 t_c 。并网状态的暂态过程中 U_q^- 增加的原因是低通滤波器存在建立时间 t_{set} , t_{set} 决定了 t_c ,因此通过合理设计低通滤波器,减小 t_{set} ,也就缩短了孤岛检测时间。正反馈系数 K 只影响并网逆变器的输出电流,对 t_z 的整定没有影响。

3 仿真分析

本文在 Simulink 环境下搭建了采用图 2 所示控制策略的三相并网逆变器模型。仿真中所采用的参数为:三相电网电压的额定幅值为 311 V, LC 滤波器参数 $L=3 \text{ mH}$, $C=1000 \text{ }\mu\text{F}$, 正序有功电流的设定值 $i_d^*=I_m=50 \text{ A}$, 正序无功电流的设定值 $i_q^*=0 \text{ A}$, 电流控制器 $C(s)$ 采用经典 PI 控制器,比例系数 $k_p=30$,积分系数 $k_i=100$,电压正反馈系数 $K=5$,低通滤波器的截止频率设为 20 Hz , $\delta_1=0.7 \text{ V}$, $\delta_2=1 \text{ V}$ 。

首先对电网电压不平衡时的情况进行仿真,仿真结果如图 4 所示。在 0.15 s 之前,电网电压不平衡,在幅值为 311 V 的三相正序电压上叠加了幅值为 60 V 的负序电压,此时 PCC 电压由电网电压决定, U_q^- 始终小于 δ_1 ,因此 U_q^- 被设定为 0,正反馈不起作用,并网逆变器输出电流仅含有正序分量,幅值为 50 A ,负序分量被抑制。 0.15 s 电网断电,因为电网电压的突变产生一定的 U_q^- ,在正反馈的作用下, U_q^- 被不断放大,很快达到限幅模块的上限 $\delta_2(1 \text{ V})$,并且此后一直维持为 1 V ,从而正确检测出孤岛。在这一过程中,并网逆变器输出电流的参考值叠加了电压正反馈函数的输出 F_d 和 F_q ,因此实际输出电流含有一定的负序分量, PCC 电压(并网逆变器输出电压)也含有一定的负序分量,由式(6)可知,三相电流中 a 相的幅值偏小,而 b 相和 c 相电流相等且偏大,对电能质量有一定影响,但通过合理设计低通滤波器参数以及 δ_1 和 δ_2 ,负序分量被限制在可接受的范围内,电能质量没有受到破坏,基于电压正反馈孤岛检测方法是破坏性的。

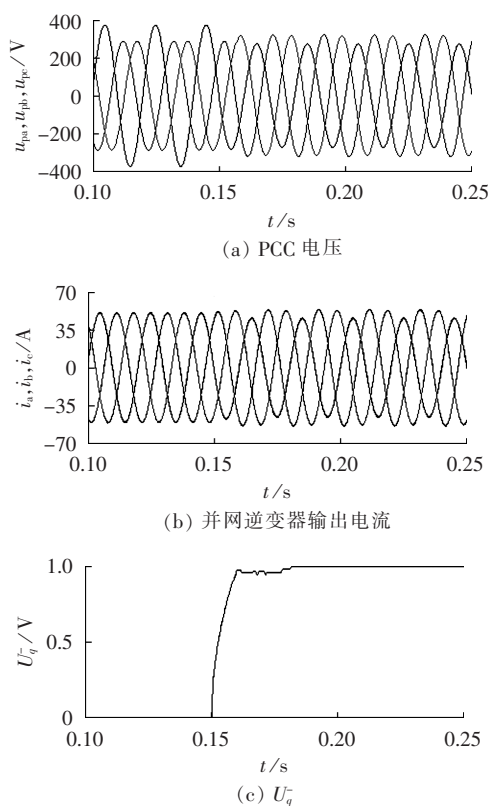


图 4 电网电压不平衡时的仿真结果

Fig.4 Simulative results for unbalanced grid voltage

然后考察所提方法是否适用于电网电压平衡的情况,此外还将本地负荷功率设置为与并网逆变器输出功率相等,这是 IEEE Std.1547 标准所定义的最恶劣情况,这样设置的目的是为了同时考察所提孤岛检测方法是否能无盲区地实现孤岛检测。仿真结果如

图 5 所示,0.15 s 之前电网电压平衡,0.15 s 电网断电,此后的各波形与电网电压不平衡时的波形相似,孤岛状态被正确地检测出来,所提方法不存在检测盲区。

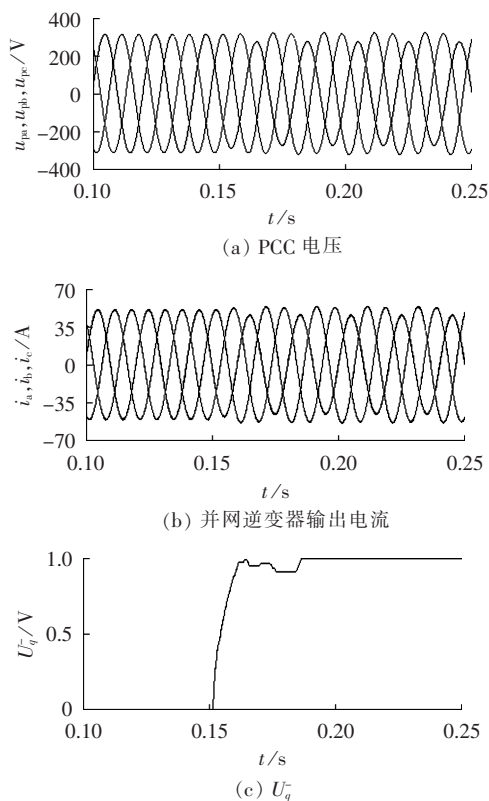


图 5 电网电压平衡时的仿真结果

Fig.5 Simulative results for balanced grid voltage

最后考察所提方法是否能正确区分伪孤岛。当电网电压跌落至正常电压的 15% 时,要求风力发电机组能够维持正常并网运行 625 ms 的低压穿越能力。此时要求孤岛检测方法能正确区分出这种伪孤岛。仿真结果如图 6 所示,0.15 s 时电网电压突然降至额定电压的 15%, U_q^* 迅速增加到 1 V,但在 0.223 s 左右重新降至 0,并在此后始终维持为 0,从而判断

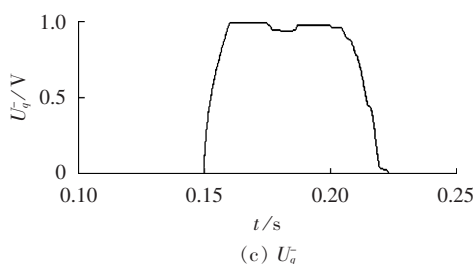
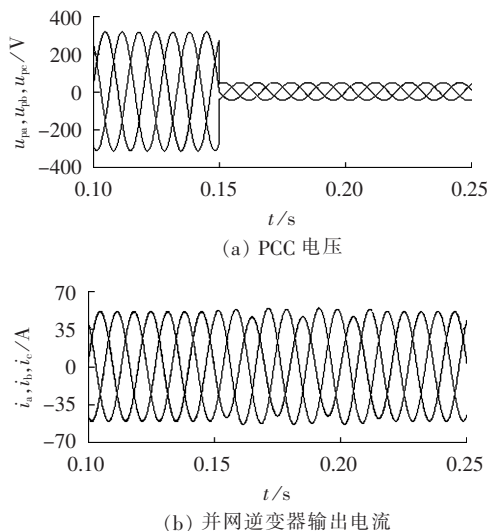


图 6 伪孤岛的仿真结果

Fig.6 Simulative results for false islanding

该情况属于伪孤岛。

4 结论

针对各种基于正反馈的孤岛检测方法不适用于电网电压不平衡的问题,提出一种新颖的基于电压正反馈的孤岛检测方法,将 PCC 电压的负序分量调换相序并进行派克变换得到的 q 轴电压作为反馈量。仿真结果证明了所提方法的正确性和有效性。本文所提的孤岛检测方法有以下特点:电网电压不平衡和平衡情况下均适用,适应性强;检测速度快,检测时间符合 IEEE Std.929—2000 的规定;没有检测盲区;对电能质量没有破坏性;能正确识别伪孤岛。所提方法弥补了现有孤岛检测方法的不足,具有较强的实际意义。

参考文献:

- [1] LAAKSONEN H. Advanced islanding detection functionality for future electricity distribution networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 28(4): 2056-2064.
- [2] KUNTE R S, GAO Wenzhong. Comparison and review of islanding detection techniques for distributed energy resources[C]//40th North American Power Symposium. Calgary, Canada: IEEE Power Electronics Society (PELS), 2008: 1-8.
- [3] 王旭东, 林济铿, 李胜文, 等. 电力孤岛划分研究综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 125-135.
WANG Xudong, LIN Jikeng, LI Shengwen, et al. Review of research on island partition in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 125-135.
- [4] SOO-HYOUNG L, JUNG-WOOK P. New islanding detection method for inverter-based distributed generation considering its switching frequency[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2010, 46(5): 2089-2098.
- [5] VAHEDI H, GHAREHPETIAN G B, KARRARI M. Application of doffing oscillators for passive islanding detection of inverter-based distributed generation units[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2012, 27(4): 1973-1983.
- [6] NAJY W K A, ZEINELDIN H H, ALABOUDY A H K, et al. A Bayesian passive islanding detection method for inverter-based distribution generation using ESPRIT[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(4): 2687-2696.
- [7] MAHAT P, ZHE CHEN, BAK-JENSEN B. A hybrid islanding detection technique using average rate of voltage change and real power shift[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(2): 764-771.

- [8] 应展烽,陈运运,田亚生,等. 基于抗干扰六点测频法的主动移频孤岛检测[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):72-76.
YING Zhanfeng, CHEN Yunyun, TIAN Yasheng, et al. Active frequency shift islanding detection based on anti-interference six-point frequency detection algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 72-76.
- [9] HERMANDEZ-GONZALEZ G, IRAVANI S. Current injection for active islanding detection of electronically-interfaced distributed resources[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1698-1705.
- [10] REIGOSA D D, BRIZ F, CHARRO C B, et al. Active islanding detection using high-frequency signal injection[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2012, 48(5): 1588-1597.
- [11] SAMUI A, SAMANTARAY S R. New active islanding detection scheme for constant power and constant current controlled inverter-based distributed generation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(7): 779-789.
- [12] KARIMI H, YAZDANI A, IRAVANI R. Negative-sequence current injection for fast islanding detection of a distributed resource unit[J]. IEEE Trans Power Electr, 2008, 23(1): 298-307.
- [13] 李军, 黄学良, 陈小虎. 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. Islanding detection method based on voltage divider for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 15-21.
- [14] 郑昕昕, 肖岚, 田洋天, 等. SVPWM 控制三相并网逆变器 AFD 孤岛检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 11-17.
ZHENG Xinxin, XIAO Lan, TIAN Yangtian, et al. An AFD islanding detection method for SVPWM three-phase grid connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 11-17.
- [15] WANG Xiaoyu, FREITAS W, XU W. Dynamic non-detection zones of positive feedback anti-islanding methods for inverter-based distributed generators[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(2): 1145-1155.
- [16] 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.
- [17] 郭小强, 邬伟扬. 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.
- [18] 马静, 米超, 夏冰阳, 等. 基于负序功率正反馈的孤岛检测新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 191-195.
MA Jing, MI Chao, XIA Bingyang, et al. A novel islanding detection method based on negative-sequence power positive feedback[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 191-195.

作者简介:



王晓刚

王晓刚(1976—),男,吉林长春人,副教授,博士后,研究方向为新能源发电和微电网技术(**E-mail**: icewxg@163.com);

肖立业(1966—),男,湖南衡阳人,博士研究生导师,研究员,博士,研究方向为电工理论与新技术(**E-mail**: xiao@mail.iee.ac.cn)。

Islanding detection method based on voltage positive feedback in unbalance condition

WANG Xiaogang, XIAO Liye

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: Since the conventional islanding detection methods based on positive feedback are not suitable for the grid-voltage unbalance condition, a method of islanding detection based on the q -axis voltage positive feedback is proposed, which is obtained by the phase-sequence change and Park transform of the negative sequence voltage at the common coupling point. Simulative results show that, the normal operation of grid-connected inverter in the grid-voltage unbalance condition is not affected and the islanding is detected correctly and quickly. It is also suitable for the condition of balanced grid-voltage and both true islanding and false islanding can be correctly detected in the most severe conditions defined by IEEE Std.1547, without any undetectable zone.

Key words: islanding detection; positive feedback; feedback control; voltage unbalance; electric inverters; control