

三相并网逆变器有源孤岛检测方法研究

顾和荣, 赵清林, 伞国成, 邬伟扬

(燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 孤岛保护是并网逆变器的必备功能, 快速孤岛检测是孤岛保护的关键。根据三相系统含有负序分量的特点, 采用有源负序扰动法进行三相并网逆变器的孤岛检测。孤岛发生后, 有源扰动导致电压负序分量发生明显变化, 因此可以通过提取负序分量幅值判断孤岛的发生。根据 IEEE Std. 929-2000 标准规定的测试电路对有源负序扰动法进行仿真分析。仿真结果验证了提出方案的有效性。

关键词: 三相并网逆变器; 孤岛检测; 有源负序扰动; 负序分量提取

Active islanding detection for three-phase grid-connected inverters

GU He-rong, ZHAO Qing-lin, SAN Guo-cheng, WU Wei-yang

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Islanding protection is an indispensable function of the grid-connected inverters, where the fast islanding detection is a key issue. Based on features of negative sequence components in the three-phase system, an islanding detection method based on the active negative sequence component disturbance (ANS-CD) is proposed. It can lead to the significant variations of the voltage negative sequence component after islanding. Therefore, islanding is confirmed judging by the negative sequence component amplitude. Simulations are performed according to IEEE Std.929-2000, and results verify the effectiveness of the ANS-CD.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50837003) and National Natural Science Foundation of Hebei Province(No.E2008000801).

Key words: three-phase grid-connected inverters; islanding detection; active negative sequence component disturbance; negative sequence component extraction

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)12-0044-04

0 引言

基于太阳能、风能等可再生能源的分布式发电技术是近年来国内外的研究热点。风力发电、光伏发电等分布式系统常采用逆变器作为并网接口, 通过适当控制实现并网发电。然而, 并网逆变器运行时存在孤岛现象。孤岛现象是指电网断电后, 逆变器仍然持续供电, 从而形成一个电力公司无法控制的局域供电网络^[1]。逆变器处于孤岛运行时会对检修人员和用户设备产生严重危害。因此, 快速有效的孤岛检测是并网逆变器的必备功能之一^[1]。

孤岛检测方法一般分为无源方法和有源方法两类^[2,3]。无源方法检测电压的电气特性, 包括电压幅值、频率、相位、谐波畸变率等。其特点为原理简

单容易实现, 对电能质量无影响等, 但存在较大检测盲区 NDZ(Non detection zone)^[2]。有源方法注入扰动量, 如电流幅值扰动、频率扰动、功率扰动等, 然后检测电压幅值和频率是否超出正常工作范围判断孤岛的发生。有源方法在一定程度上可以减小 NDZ, 但过大的有源扰动将导致电能质量下降^[3]。

目前, 国内对并网逆变器孤岛检测的研究集中在单相系统中, 而对三相逆变器孤岛检测技术研究较少。因此, 本文以三相并网逆变器为研究对象, 根据三相系统中含有负序分量的特点, 采用有源负序分量扰动法 ANS-CD(Active negative sequence component disturbance)进行孤岛检测。

1 三相逆变器孤岛检测

1.1 有源负序分量扰动 ANS-CD 原理

图 1 为孤岛检测电路的原理图。其中, 并网逆变器输出端连接电网于公共耦合点 PCC, 负载采用

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50837003); 河北省自然科学基金资助项目(E2008000801)

RLC 并联形式, 通过切断开关 S 来模拟孤岛的发生。

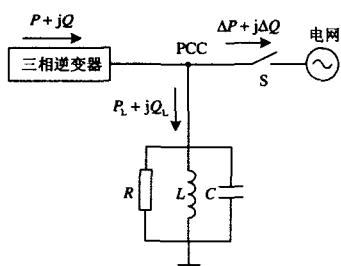


图 1 孤岛检测原理图

Fig.1 Schematic diagram of islanding detection

三相并网逆变器 dq 轴控制模型如图 1 所示^[4], 根据图 1 可得逆变器状态方程式(1)。由于 dq 轴解耦, 因此 d 轴模型和 q 轴模型均可由图 2 表示。

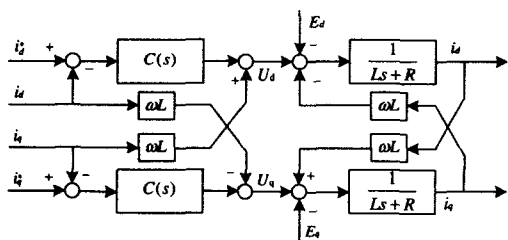


图 2 三相并网逆变器 dq 轴模型

Fig.2 Model of three-phase grid-connected inverter

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} U_d - E_d \\ U_q - E_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

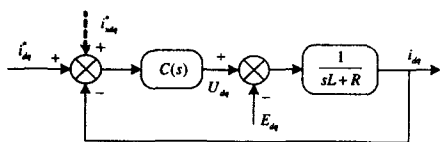


图 3 电流控制模型

Fig.3 Model of current control

如图 2 所示, 在 dq 轴加入扰动量式(2)后, 可得并网逆变器参考电流如式 (3) 所示。

$$\begin{bmatrix} i_{d1}^* \\ i_{q1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x \sin(628t) \\ i_x \cos(628t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d^* + i_x \sin(628t) \\ i_q^* + i_x \cos(628t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

经过坐标变换可得 abc 坐标系参考电流为:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d^* + i_x \\ i_b^* + i_b \\ i_c^* + i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_m \sin(314t) + i_x \sin(314t) \\ i_m \sin(314t - 120^\circ) + i_x \sin(314t + 120^\circ) \\ i_m \sin(314t + 120^\circ) + i_x \sin(314t - 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (4)$$

如图 1 所示, 三相逆变器并网运行时, 公共耦合点 PCC 电压为电网电压, 理想情况下为:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 311 \sin(314t) \\ 311 \sin(314t - 120^\circ) \\ 311 \sin(314t + 120^\circ) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a^+ \\ U_b^+ \\ U_c^+ \end{bmatrix} \quad (5)$$

切断 S 电网断电, 孤岛发生后, PCC 电压为:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a i_a \\ Z_b i_b \\ Z_c i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a i_a^+ + Z_a i_a^- \\ Z_b i_b^+ + Z_b i_b^- \\ Z_c i_c^+ + Z_c i_c^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a^+ + U_a^- \\ U_b^+ + U_b^- \\ U_c^+ + U_c^- \end{bmatrix} \quad (6)$$

因此, 加入有源负序电流扰动后, 可以通过检测电压负序分量来判断孤岛的发生。

1.2 负序分量提取

根据上文可知, 判断孤岛的关键之一在于提取 PCC 电压负序分量。根据对称分量法可知, 三相电压矢量 $U_{abc} = [U_a \ U_b \ U_c]^T$ 可分解为正序、负序和零序。其中, 正序分量为

$$U_{abc}^+ = [U_a^+ \ U_b^+ \ U_c^+]^T = [T] U_{abc} \quad (7)$$

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (8)$$

$\alpha\beta$ 坐标系电压矢量为:

$$U_{\alpha\beta} = [U_\alpha \ U_\beta]^T = C_{32} U_{abc} \quad (9)$$

$$C_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(7)~(10)联立可得 $\alpha\beta$ 坐标系电压正序分量:

$$U_{\alpha\beta}^+ = C_{32} U_{abc}^+ = C_{32} [T] U_{abc} = C_{32} [T] C_{23} U_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} U_{\alpha\beta} \quad q = e^{-j\pi/2} \quad (11)$$

$\alpha\beta$ 坐标系电压负序分量为:

$$U_{\alpha\beta}^- = U_{\alpha\beta} - U_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} U_{\alpha\beta} \quad q = e^{-j\pi/2} \quad (12)$$

式(11)、(12)中, q 为旋转因子, 表示相移 90° 。

本文采用 $G(s) = \frac{1.5 \times 314^2}{s^2 + 1.5 \times 314s + 314^2}$ 实现 q , 其波特图如图 4 所示。从图中可以看出, 在正序和负序频率 50 Hz 附近 $G(s)$ 幅频特性为 1 p.u., 相频特性为 -90° , 满足 q 要求。

正序和负序分量提取之后需要确定其幅值和频率。本文采用锁相环提取 PCC 电压正序分量和负序

分量的幅值和频率信息。锁相环原理如图 5 所示。

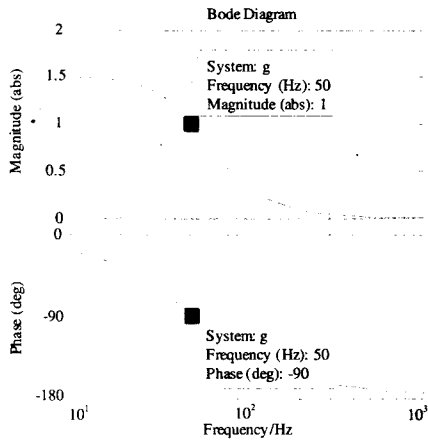


图 4 $G(s)$ 波特图

Fig.4 Bode diagram of $G(s)$

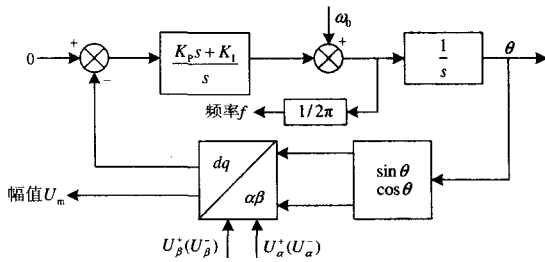


图 5 锁相环原理图

Fig.5 Schematic diagram of phase locked loop

1.3 负序扰动量标准

GB/T15543-1995 标准中规定三相电压不平衡度 ε 为负序分量与正序分量的百分比, 即:

$$\varepsilon = \frac{\text{负序分量}}{\text{正序分量}} \times 100\% \quad (13)$$

GB/T15543-1995 规定电力系统公共耦合点 PCC 正常工作电压不平衡度允许值为 2%, 短时不超过 4%。因此, 电网电压正常情况下电压不平衡度小于 4%。本文设置有源负序电流扰动量为额定正序电流的 4%, PCC 电压负序分量上限值为正序分量的 4%。一旦电网断电, 若三相并联 RLC 负载平衡, 则根据式(6)可知 PCC 电压负序分量增加至 4%, 达到上限值, 从而检测到孤岛的发生。

1.4 电流控制器设计

根据上文分析和式(6)可知, 电流控制存在误差将影响孤岛检测的有效性。传统基于同步旋转坐标系的 PI 控制对负序分量难以实现理想的控制效果, 存在稳态误差。文献[5]采用正序、负序双同步旋转坐标系 PI 控制方案实现了正序和负序分量的零稳态误差控制。然而其结构复杂计算量大。为了解决该问题, 借鉴内模控制思想对负序分量进行控制。

内模原理指出^[6]: 若要求一个反馈控制系统具有良好的跟踪指令以及抵消扰动影响的能力, 并且这种对误差的调节过程结构是稳定的, 则在反馈控制环路内部必须包含一个描述外部输入信号指令信号和扰动信号动力学特性的数学模型, 该数学模型就是所谓的“内模”(internal model)。由于同步旋转坐标系下正序分量为直流量, 其(标么值)内模为 $\frac{1}{s}$, 因此 PI 可以实现正序分量的零稳态误差控制。同理, 同步旋转坐标系下负序分量为交流量, 其频率为基波频率 ω 的 2 倍, 其内模为 $\frac{s}{s^2 + 4\omega^2}$ 。因此, 根据内模原理可得正序、负序电流控制器如下:

$$C(s) = k_p + \frac{k_{ip}}{s} + \frac{k_{in}s}{s^2 + 4\omega^2} \quad (14)$$

2 仿真实验

本文采用 Matlab 对有源负序分量扰动法进行仿真分析, 根据 IEEE Std.929-2000 标准中定义的最恶劣情况(worst case)进行验证^[1]。具体参数如下: 三相电网电压 380 V/50 Hz, 逆变器额定功率 3 kW, 直流母线电压 800 V, 并网接口电感 5 mH, 开关频率 10 kHz, 并联 RLC 负载额定功率 3 kW ($R=48 \Omega$, $L=61.1 \text{ mH}$, $C=165.87 \mu\text{F}$), 仿真结果如图 6 所示。

图 6(a)为电网电压波形, 图 6 (b) 为公共耦合点 PCC 电压波形。仿真中设置 0.065 s 时电网断电, 电网电压为 0。其后并网逆变器仍向负载供电, 此时 PCC 电压出现不平衡, 该现象可由式(6)解释: 三相逆变器输出电流中的负序分量导致 PCC 电压中同样含有负序分量, 从而造成 PCC 三相电压不平衡。

图 6 (e) ~ (f) 为根据式(11)和图 5 提取的 PCC 电压正序分量信息。可以看出, 0.065 s 孤岛前后正序分量基本不变。该现象可由式(6)和 IEEE Std.929-2000 的测试标准解释: 并网逆变器输出正序功率和负载功率匹配。

图 6 (c) 为根据式(12)提取的 PCC 电压负序分量 $U_{\alpha\beta}$ 波形, 说明孤岛后 PCC 电压中出现负序分量。图 6 (d) 为根据图 5 提取的负序分量幅值。由于负序电流的扰动导致负序分量明显上升, 在 0.203 s 左右幅值增至额定正序电压的 4%, 达到上限值, 从而检测到孤岛的发生, 三相逆变器停止工作, 实现孤岛保护, 如图 6 (g) 所示。

根据以上仿真结果可知, 在 IEEE Std.929-2000 标准中定义的最恶劣情况下, 有源负序分量扰动法

ANSCD 仍可以检测到孤岛的发生, 检测时间为 $(0.203-0.065)s=0.138s$, 远低于 IEEE Std.929-2000 标准中规定 $2.000s$ 的标准^[1]。

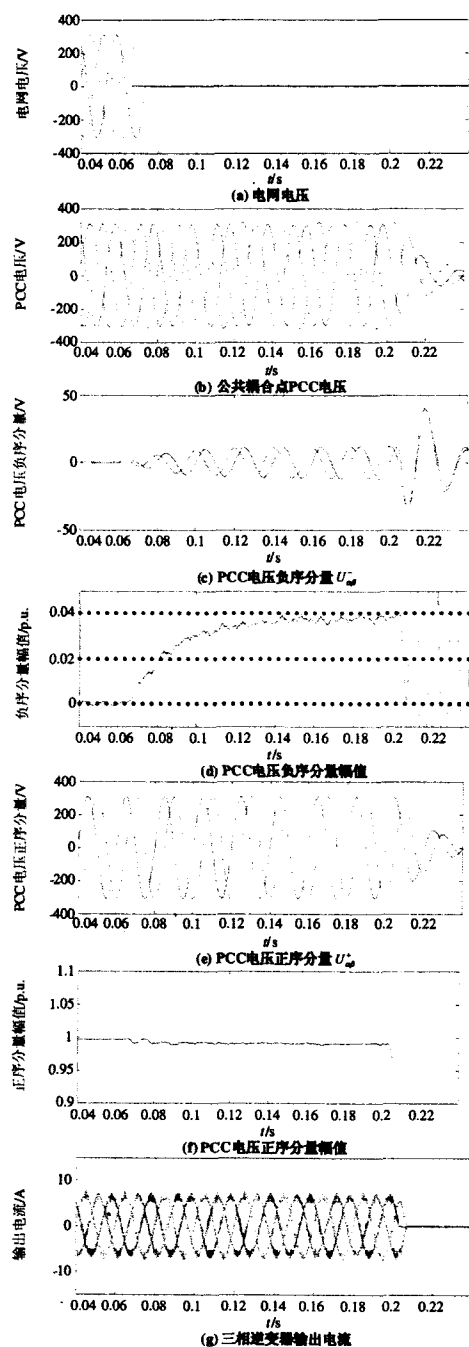


图6 仿真结果

Fig.6 Simulation results

实际应用中还存在三点问题:

(1) IEEE Std.929-2000 未规定负载不平衡 IL (Imbalanced Load) 时的孤岛测试标准, 而实际应用中却存在 IL 情况。根据式(6)可知 IL 情况下负序

分量将有所变化。单从负序电流考虑, 可能出现与 IL 同时作用降低 PCC 负序电压幅值的情况; 但考虑到正序电流, 其与 IL 作用将增大 PCC 负序电压幅值。因此, IL 情况下 ANSCD 仍然有效。

(2) 为了减小负序分量对电能质量的影响, 可减小负序电流含量, 如从 4%降低到 2%。

(3) 电网电压的暂态波动或短时电压不平衡现象会导致负序分量幅值超出上限值。为了避免误动作, 此时可采用延时一段时间后再检测负序分量幅值的方法, 延时选取时间依据 IEEE Std. 929-2000^[1]。

3 结论

本文利用三相系统中存在负序分量的特点, 采用有源负序分量扰动法 ANSCD 进行孤岛检测, 通过判断公共耦合点电压负序分量的幅值确定孤岛的发生。此外, 文中还给出一种正序分量、负序分量控制及其幅值、频率信息的提取方法, 分析了 ANSCD 实际应用中的问题并提供了相应的解决方案。最后, 根据 IEEE Std.929-2000 标准规定最恶劣情况进行了孤岛检测仿真分析, 仿真结果表明 ANSCD 可以实现快速有效的孤岛检测。

参考文献

- [1] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems[S]. IEEE Std 929-2000.
- [2] Francesco De Mango, Marco Liserre, Antonio Dell'Aquila, et al. Alberto Pigazo Overview of Anti-islanding Algorithms for PV Systems, Part I: Passive Methods[A]. In: Proceedings of EPE-PEMC[C]. Portoroz, Slovenia: 2006.1878-1883.
- [3] Francesco De Mango, Marco Liserre, Antonio Dell'Aquila. Overview of Anti-islanding Algorithms for PV Systems, Part II: Active Methods[A]. Proceedings of EPE-PEMC[C]. Portoroz Slovenia: 2006.1884-1889.
- [4] Vladimir Blasko, Vikram Kaura. A New Mathematical Model and Control of a Three-phase AC-DC Voltage Source Converter[J]. IEEE Trans Power Electron, 1997.116-123.
- [5] Song H S, Nam K. Dual Current Control Scheme for PWM Converter Under Unbalanced Input Voltage Conditions[J]. IEEE Trans Ind Electron, 1999,46(5): 53-59.
- [6] Fukuda S, Yoda T. A Novel Current-tracking Method for Active Filters Based on a Sinusoidal Internal Model[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2001,37(3):888-895.

收稿日期: 2008-07-24; 修回日期: 2008-10-06

作者简介:

顾和荣(1964-), 男, 教授, 研究方向为分布式发电系统并网控制技术、电能质量控制技术等。E-mail: ydghr@ysu.edu.cn