

并网逆变器孤岛控制技术

曹海燕, 田悦新

(石家庄经济学院信息工程学院, 河北 石家庄 050031)

摘要: 为解决传统孤岛保护控制存在孤岛检测盲区, 使得孤岛保护失效的问题, 提出基于频率正反馈扰动的孤岛保护控制方法, 既减小了传统有源孤岛保护控制对输出电能质量的影响, 又实现了无盲区的孤岛保护控制。对于大功率应用场合, 孤岛保护控制不再适用。因此, IEEE Std. 1547-2003 标准中提出孤岛运行控制的概念。针对标准要求提出基于工作模式切换的孤岛运行控制, 使得孤岛发生前后, 并网逆变器输出电压均满足用户负载运行要求。仿真结果验证了两种孤岛控制方案的正确性。

关键词: 并网逆变器; 孤岛检测; 孤岛保护; 孤岛运行

Islanding control for grid-connected inverters

CAO Hai-yan, TIAN Yue-xin

(Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Non-detection zone disables the conventional islanding protection. In order to solve the problem, a novel control solution based on the frequency positive feedback disturbance is proposed to achieve the effective islanding protection. Considering high power applications, it is not practical to apply the islanding protection control any more. Therefore, the concept of controlled islanding is proposed in IEEE Std. 1547-2003. This paper presents a novel controlled islanding based on the operation mode transfer, which maintains the voltage to keep critical loads in safe operation. The proposed islanding control solutions are verified by the simulation results.

Key words: grid-connected inverters; islanding detection; islanding protection; controlled islanding

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)09-0072-03

0 引言

并网逆变器(GCI)运行过程中可能出现孤岛运行状态, 孤岛运行将产生严重后果^[1]。因此, IEEE Std. 929-2000 标准中规定: GCI 必须具备孤岛检测及孤岛保护的功能。一旦电网停止供电, GCI 必须在 2 s 内检测到孤岛状态并停止向周围负载供电, 以消除孤岛带来的危害。然而, 当大功率 GCI 处于孤岛运行状态时, 按照上述 IEEE 标准要求, GCI 将停止向周围负载供电, 其结果很可能导致大面积停电。因此, IEEE Std 1547-2003 标准中规定^[2]: 大功率 GCI 可工作于孤岛运行状态。即使电网停止供电, 大功率 GCI 仍继续向周围负载供电, 以维持网络中的电压和频率满足负载运行要求。目前, 已有国外文献对孤岛控制进行相关报道, 但研究还未成熟^[3-4]; 而国内关于孤岛控制的相关文献相对较少。因此, 研究具有自主知识产权的 GCI 孤岛控制技术, 为用户提供安全可靠的用电环境具有现实意义。

GCI 孤岛控制可分为两类^[2]: 其一, 孤岛保护控制; 其二, 孤岛运行控制。本文在理论分析的基础上, 针对不同应用场合, 分别提出一种无检测盲区孤岛保护控制方法和一种高性能孤岛运行控制方法, 并进行了仿真研究。仿真结果验证了提出的孤岛控制的有效性。

1 孤岛保护控制

对于小功率的应用场合, GCI 常采用孤岛保护控制, 其基本原理为: GCI 首先检测出孤岛运行状态, 然后进行孤岛保护, 使 GCI 停止供电。因此, 孤岛保护控制的关键是 GCI 快速有效地检测到孤岛的发生。

常见的孤岛检测方法主要分为两类^[5]: 其一, 无源孤岛检测方法; 其二, 有源孤岛检测方法。无源孤岛检测方法存在较大检测盲区, 不能对孤岛进行快速有效的检测^[6]。有源检测方法可减小检测盲区, 但导致 GCI 输出电流恶化^[7]。因此, 本文提出

一种频率正反馈扰动孤岛检测方法, 在电网正常供电且不引入扰动 f_d 时, GCI 输出电流质量不会恶化。由于扰动周期间隔较长且持续时间较短, 因此扰动对输出电流影响较小。一旦电网掉电, 负载频率不再受电网控制, 引入的正反馈将使系统不稳定, 并加入扰动量, 用于打破可能出现的平衡状态, 进而使 GCI 在正反馈的作用下趋于不稳定, 当频率超出范围, GCI 将检测到孤岛的发生并进行孤岛保护。孤岛保护控制原理如图 1 所示。

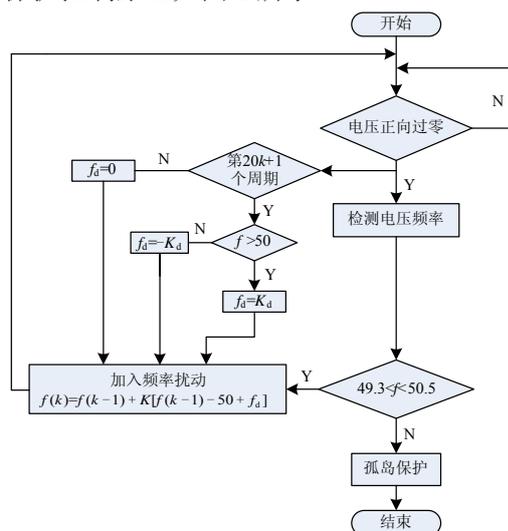


图 1 孤岛保护控制原理图

Fig.1 Schematics of islanding protection control

GCI 并网运行时处于电流控制模式。设第 k 周期 GCI 输出参考电流为:

$$I_{\text{ref}}(k) = I_m \sin[2\pi f(k)t] \quad (1)$$

则第 k 周期输出电流频率为:

$$f(k) = f(k-1) + K[f(k-1) - 50 + f_d] \quad (2)$$

$$f_d = \begin{cases} +K_d & f(k-1) > 50 \\ -K_d & f(k-1) \leq 50 \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_m 为 GCI 输出参考电流峰值; $f(k)$ 为第 k 周期的电压频率; K 为系数; f_d 为周期扰动量。初始值为 0, 每隔 1 s 将其设置为预设值。

综上, 基于频率正反馈扰动的 GCI 孤岛检测可以减小传统有源检测对 GCI 输出电流质量的影响, 且消除了检测盲区, 保证了 GCI 实现有效的孤岛保护控制。

2 孤岛运行控制

对于大功率的应用场合, GCI 常采用孤岛运行控制, 其基本原理为: GCI 处于孤岛运行状态后, 一旦检测到负载电压超出正常范围, 立即将 GCI 工

作模式由输出电流控制调整为输出电压控制, 以维持电压幅值和频率满足周围负载运行要求^[8]。与孤岛保护控制不同的是, 孤岛运行控制的关键是 GCI 实现高性能的输出电压控制。即使 GCI 处于孤岛运行状态, 如果 GCI 输出电压满足负载正常运行要求, GCI 仍可处于电流控制模式。一旦输出电压超出正常范围, GCI 将切换到电压控制模式, 以维持稳定的负载电压和频率。因此, 本文采用无源检测方法, 即电压幅值和频率检测。该方法可避免有源检测方法导致的 GCI 输出电流波形畸变, 从而保证了高性能的电压控制。

孤岛运行控制原理如图 2 所示。其中, 负载正常运行范围为: 电压幅值 0.88~1.1 p.u., 频率 49.3~50.5 Hz。算法中, 实时检测负载电压幅值和频率是否满足运行要求, 若满足, 则保持当前工作模式, 避免了 GCI 在两种工作模式间的频繁切换。

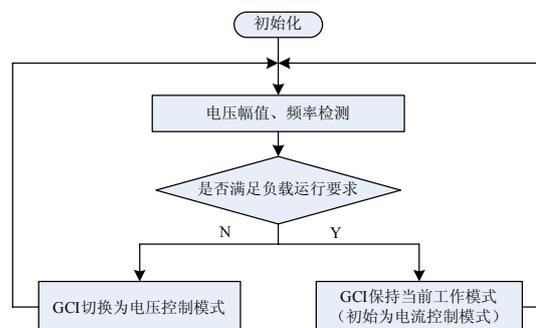


图 2 孤岛运行控制原理图

Fig.2 Schematics of controlled islanding

3 仿真结果

采用 Matlab/Simulink 分别对提出的孤岛保护控制和孤岛运行控制进行仿真验证。

孤岛保护控制仿真中, 设置电网电压 220 V/50 Hz, 单相 GCI 额定输出功率 1 kW, 根据 IEEE Std. 929-2000 标准中规定的最差情况^[1], 选择并联 RLC 负载分别为: $R=48 \Omega$, $L=61.1 \text{ mH}$, $C=165.87 \mu\text{F}$, 负载谐振频率为 50 Hz, 品质因数 $Q_r=2.5$ 。预设算法参数为: $K=3$, $K_d=0.2$ 。

图 3 为基于频率正反馈扰动的孤岛保护控制仿真结果。如图 3(a)所示, 仿真中设置 0.085 s 电网掉电, 孤岛发生。此时, 由于 GCI 输出功率和负载功率平衡, 即使 GCI 处于正反馈控制, 如图 3(b)所示, 负载电压幅值和频率仍保持不变, GCI 此时无法检测到孤岛的发生。仿真中设置 0.12 s 频率扰动 f_d 作用, 从图 3(c)可以看出, f_d 的引入打破了频率平衡状态, 并在正反馈作用下, 频率呈单调衰减趋势。约 0.1 s 后, 即 0.22 s 处, 频率超出正常运

行范围, GCI 检测到孤岛并动作, 如图 3 (d) 所示, GCI 停止工作, 实现了孤岛保护控制。从仿真结果可以看出, 在最差情况下, f_d 作用后约五个周期就能检测到孤岛的发生, 满足 IEEE Std. 2000-929 标准的规定^[1]。

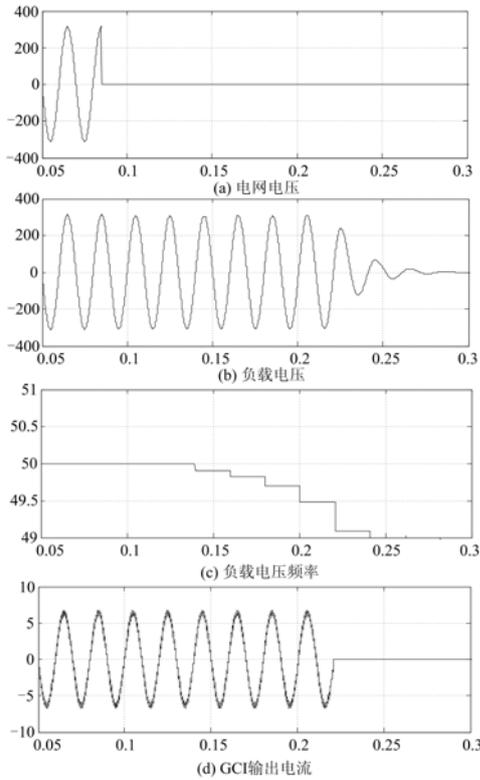


图 3 孤岛保护控制仿真结果

Fig.3 Simulation results for islanding protection

孤岛运行控制仿真中, 设置电网电压 380 V/50 Hz, 三相 GCI 额定输出功率 100 kW, 并联 RLC 负载为: $R=1.25 \Omega$, $L=60 \text{ mH}$, $C=160 \mu\text{F}$ 。

图 4 为孤岛运行控制仿真结果。如图 4(a)所示, 由于仿真中设置电网电压含 5 次负序谐波, 因此, 负载电压出现不平衡现象。在 0.105 s 处电网停止供电, 三相 GCI 处于孤岛运行状态。如图 4(b)所示, 由于 GCI 输出功率和负载功率不匹配, 导致负载电压幅值和频率发生变化。如图 4(c)所示, 0.108 s 处, 锁相环检测出负载电压幅值频率超出正常运行范围, 根据图 2 提出的控制方法, 三相 GCI 工作模式将由电流控制切换到电压控制, 如图 4(b)和 4(d)所示, 此时负载电压和 GCI 输出电流均处于调整状态, 无过大电流电压冲击, 基本实现工作模式平滑切换。从图 4(c)可以看出, 约 1.5 个工频周期后, 三相 GCI 电压控制进入稳态, 实现了稳定的孤岛运行控制, 满足了用户负载运行要求。

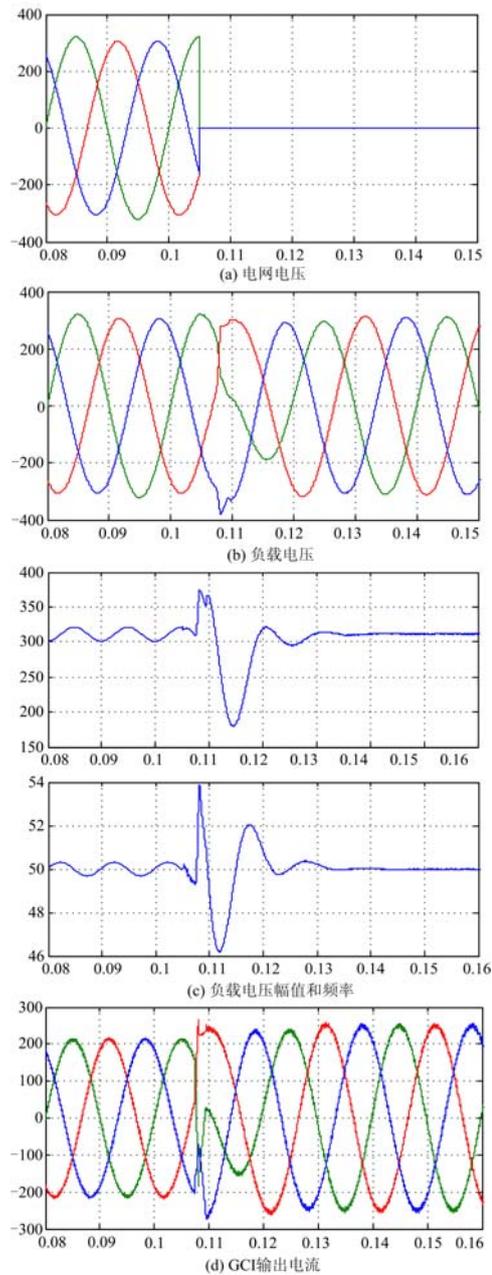


图 4 孤岛运行控制仿真结果

Fig.4 Simulation results for controlled islanding

4 结论

本文针对小功率并网逆变器的应用场合, 提出基于频率正反馈扰动的孤岛检测方法, 实现了无检测盲区孤岛保护控制; 针对大功率并网逆变器的应用场合, 提出基于工作模式切换的孤岛运行控制, 满足了用户负载正常运行要求。根据 IEEE Std. 1547-2003 标准对提出的方法进行测试。仿真结果验证提出方法的有效性。

(下转第 91 页 continued on page 91)

“放电安时数”等数据,并以报表形式显示放电过程中记录的蓄电池组电压数据。通过每 5 min 记录的蓄电池组电压数据,PC 端软件可直观地以曲线形式反映出蓄电池电压的变化过程,如图 8 所示,便于操作人员的监控与分析工作。



图 8 放电过程蓄电池组电压曲线

Fig.8 The volt waveform of the battery's discharge

5 总结

蓄电池放电装置是蓄电池应用中不可缺少的一种设备。鉴于节能减排概念的深入人心和大容量蓄电池组的广泛应用,研制出了一种大容量智能型能馈式蓄电池放电装置。该放电装置放电过程自动控制,并自动记录相关放电数据,实现了无人值守,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 李立伟, 邹积岩. 蓄电池放电能量并网装置[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (6): 81-83.
LI Li-wei, ZOU Ji-yan. An Instrument for Connecting the

Discharge Energy of Battery to Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (6): 81-83.

- [2] 姚为正, 潘三博, 李正力, 等. 正弦波逆变蓄电池回馈放电装置的设计[J]. 电力电子技术, 2002, 36 (2): 10-12.
YAO Wei-zheng, PAN San-bo, LI Zheng-li, et al. Design of Battery Discharge Device Feeding Energy Back with Sine Wave Inverter[J]. Power Electronics, 2002, 36 (2): 10-12.
- [3] 林征宇, 吴建德, 何湘宁. 基于DSP带同步锁相的逆变器控制[J]. 电力电子技术, 2001 (2): 24-25.
LIN Zheng-yu, WU Jian-de, HE Xiang-ning. DSP-Based Control Strategy for Single-phase Inverters with Synchronous Phase Locked Loop[J]. Power Electronics, 2001 (2): 24-25.
- [4] Liu Hyo L, Choi Nam S, Cho Gyu H. DSP Based Space Vector PWM for Three-level Inverter with DC-link Voltage Balancing[A]. in: IEEE-IECON[C]. 1991.
- [5] Astrom K J, Hagglund, et al. PID Controllers, Theory, Design, and Tuning Instrument[J]. Society of America, 1995.

收稿日期: 2009-06-20; 修回日期: 2009-08-07

作者简介:

米高祥 (1981-), 男, 硕士, 研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: migaoxiang@xjgc.com

陈世锋 (1982-), 男, 硕士, 研究方向为电力电子与电力传动;

张建兴 (1976-), 男, 工程师, 研究方向为电力电子与电力传动。

(上接第 74 页 continued from page 74)

参考文献

- [1] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems[S]. IEEE Std. 929-2000.
- [2] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems[S]. IEEE Std. 1547-2003.
- [3] Senroy N, Heydt G T. A Conceptual Frame-Work for the Controlled Islanding of Interconnected Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2006, 21(2): 1005-1006.
- [4] LI Yun-wei, Vilathgamuwa D M, Chiang Loh Poh. Microgrid Power Quality Enhancement Using a Three Phase Four-wire Grid Interfacing Compensator[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(6): 1707-1719.
- [5] Jeraputra C, Enjeti P. Development of a Robust Anti-Islanding Algorithm for Utility Interconnection of Distributed Fuel Cell Powered Generation[J]. IEEE Trans

on Power Electronics, 2004, 19 (5): 1163-1170.

- [6] Ye Z H, Kolwalkar A, Zhang Y, et al. Evaluation of Anti-islanding Schemes Based on Non Detection Zone Concept[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1171-1176.
- [7] Ropp M, Begovic M, Rohatgi A, et al. Determining the Relative Effectiveness of Islanding Detection Methods Using Phase Criteria and Non Detection Zones[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2000, 15 (3): 290-296.
- [8] Lopes J A P, Moreira C L, Madureira A G. Defining Control Strategies for Microgrids Islanded Operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.

收稿日期: 2009-03-03; 修回日期: 2009-05-21

作者简介:

曹海燕 (1973-), 女, 副教授, 研究方向为电力电子技术应用、测试计量技术等。E-mail: beastles@126.com