

双频并网逆变器及其孤岛效应检测

侯世英, 虞元科, 嵇丽明, 刘早晨
(重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 提出一种用于分布式发电的双频并网逆变器, 该逆变器由 2 个标准三相桥级联而成, 其中一个桥工作在高频, 提高输出电流性能; 另一个桥工作在低频, 主要输出功率, 从而降低开关损耗, 提高系统效率。为了检测孤岛效应, 提出了基于 dq 变换和正反馈的新检测策略, 基于该策略, 提出了基于 dq 变换的电压正反馈和频率正反馈两种检测方法。两种方法具有无检测盲区、对电能质量影响小、检测速度快等优点。仿真结果表明, 该逆变器输出电流与电网电压同相, 总的谐波畸变率低, 向电网输出的电能质量高。

关键词: 双频并网逆变器; 孤岛效应检测; dq 变换; 正反馈; 分布式发电

中图分类号: TM61

文献标识码: A

Research on grid-connected dual frequency inverter and islanding detection

HOU Shi Ying, TUO Yuan Ke, JI Li Ming, LIU Zao Chen
(Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A novel grid-connected dual frequency inverter for distributed generation is proposed. The inverter consists of two cascaded standard three-phase bridges, one of the bridges works in high frequency to improve the performance of output current, the other works in low frequency to handle power thereby the switching losses can be reduced and the system efficiency can be improved. A new scheme based on dq transformation and positive feedback is provided to detect islanding. Based on the new scheme, methods of voltage positive feedback and frequency positive feedback by dq transformation are proposed in this paper. The proposed methods are showed to have no non-detection zone (NDZ) and little influence on power quality and fast acting. Simulation results show that the output current of the proposed inverter is in phase with network voltage, its total harmonic distortion is low and the electric energy output to power grid is of high quality.

Key words: grid-connected dual frequency inverter; islanding detection; dq transformation; positive feedback; distributed generation

随着社会生产的日益发展, 对能源的需求量不断增长, 全球范围内的能源危机也日益突出, 在近些年, 可再生能源引起了世界各国政府和能源专家的高度重视^[1]。目前, 全世界很多国家都采取了风力发电、光伏发电等分布式发电系统并网运行的措施。风力发电需要用整流器把风力发电机输出的交流电转换成直流, 再把直流逆变成交流。光伏发电也需要利用逆变器把直流转换成交流再并入电网, 并网逆变器是连接发电系统与电网的接口单元, 也是研究热点之一。其中研究新型拓扑与控制方法, 使输出电能质量高而同时又提高效率便成为了研究重点^[1-4]。

参考文献 [4-6] 所研究的传统的并网逆变器主拓扑采用三相全桥逆变器, 采用 PWM 控制技术使输出电流波形接近正弦, 但该逆变器的 6 个开关都工作在高频, 开关损耗大。为了减少开关损耗, 参考文献 [7] 采用软开关技术, 使逆变器工作在软开关状态, 但这会使得逆变电路复杂化。参考文献 [8] 采用多电平逆变技术改善输出电压质量, 减少了开关损耗, 但这又增加了电路结构和控制方式的复杂性, 同时由于主电路开关元件数量成倍地增长, 不仅增加了系统成本, 而且降低了系统的可靠性。本文引入了一种新型的三相双频并网逆变器拓扑结构。该逆变器由 2 个三相桥组成, 其

中 1 个三相桥工作在低频状态，主要输出功率；另 1 个三相桥工作在高频状态，决定输出电压波形质量^[9]。该拓扑结构使逆变器在保证输出电流波形质量的同时提高逆变器效率。逆变器输出电流能实时跟踪电网电压频率、相位和给定容量的变化，且电流总谐波畸变率小，能以单位功率因数向电网输电。

对于并网系统，可能出现的孤岛效应对系统的安全运行、线路工人的人身安全构成重大威胁，因此，所有并网逆变器必须具有防孤岛效应功能^[10]。孤岛效应检测主要分为被动式检测和主动式检测^[11-12]。被动检测方法在与逆变器输出功率平衡的负载情况下存在不可检测区，一些主动检测方法也存在不可检测区或者影响电能质量^[12-15]。本文提出一种新的基于 dq 变换和正反馈的孤岛效应检测策略，该方法不存在检测盲区，对输出电能质量的影响可以忽略。

1 并网系统模型与控制

传统三相并网逆变器由标准的三相桥组成，电路中的 6 个开关器件工作在高频、大电流状态下，如果对输出电流性能要求提高，开关频率就相应提高，开关损耗也增大。文中提出双频三相并网逆变器如图 1 所示，它在传统的并网逆变器上附加上了 1 个由 $L_{ca} \sim L_{cb}$ 、 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 构成的三相桥，该三相桥工作在低频，流过电路处理的大部分电流，原三相桥工作在高频，仅处理电流波动的部分功率。分析时，附加的三相桥可以分离成 3 个半桥来分析，流过低频三相半桥臂的电流分别跟踪相应的高频桥臂电流，例如开关 S_{1a} 、 S_{4a} 组成的半桥输出电流 $i_{L_{ca}}$ 跟踪滤波电感电流 i_a 。这样流过高频开关 $S_1 \sim S_6$ 的电流大大减小，虽然流过开关 $S_{1a} \sim S_{6a}$ 的电流很大，但是它们运行在低频，从而在输出同等电流质量的同时提高了效率，增大输出功率等级。从仿真结果可以看出，输出电流能与电网电压同频同相，而且总的谐波畸变率很小。

对 2 个标准三相桥，高频电感电流和低频电感电流

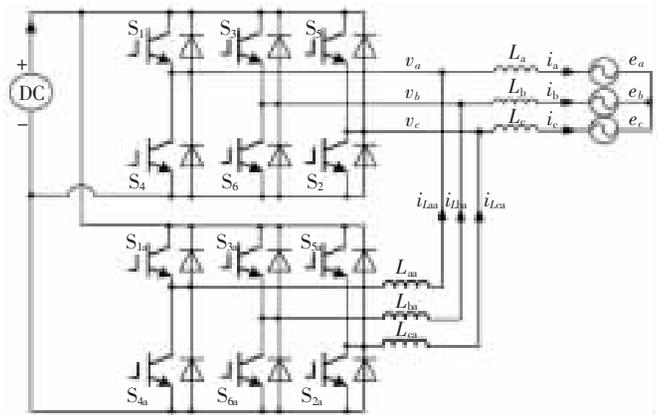


图 1 双频并网逆变器

同时可控，低频部分采用近似恒频滞环控制，控制低频电感电流跟踪高频电感电流。高频部分应用 dq 变换，对有功、无功电流分量实行解耦控制，控制电感电流与电网电压同频同相。

对于高频部分：设三相电路各相电压和电流的瞬时值分别为 e_a, e_b, e_c 和 i_a, i_b, i_c ，通过 dq 变换，可以将它们变换到同步旋转的 dq 坐标系上，其变换关系可用下式表示：

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， x 表示相应的电压电流变量， θ 表示 d 轴与 a 轴的夹角。则三相并网逆变器的 dq 模型可以描述为：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， e_d, e_q 为电网电压矢量的 d、q 分量； v_d, v_q 为逆变器输出电压矢量的 d、q 分量； i_d, i_q 为逆变器输出电流矢量的 d、q 分量。

设计并网逆变器控制方程为：

$$\begin{cases} v_d = -(K_p + \frac{K_I}{s})(i_d^* - i_d) - \omega L i_q + e_d \\ v_q = -(K_p + \frac{K_I}{s})(i_q^* - i_q) + \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (3)$$

式中， K_p, K_I 为电流调节器比例增益与积分增益； i_d^*, i_q^* 为电流给定值。

定义新变量： $u_d = v_d + \omega L i_q - e_d$ ； $u_q = v_q - \omega L i_d - e_d$ ，则式(3)可以写成：

$$\begin{cases} u_d = -(K_p + \frac{K_I}{s})(i_d^* - i_d) \\ u_q = -(K_p + \frac{K_I}{s})(i_q^* - i_q) \end{cases} \quad (4)$$

控制原理图如图 2 所示。为了使逆变器输出电流能与电网电压同频同相，实现以单位功率因数向电网输

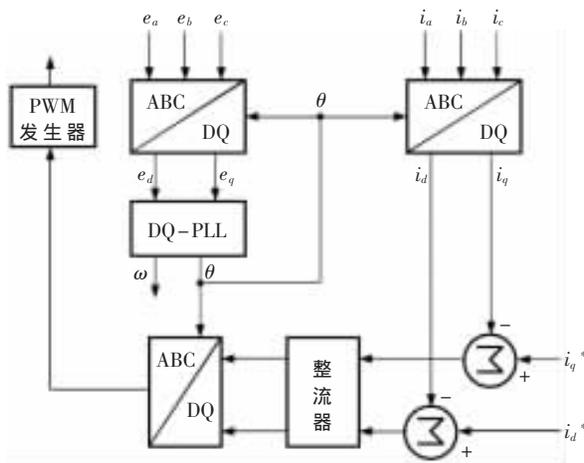


图 2 高频桥控制电路

电,因此电流给定值 $i_q^*=0$, 电流给定值 i_d^* 决定逆变器输出功率大小。

低频部分采用近似恒频滞环控制,使得低频电感电流跟踪高频电感电流,其控制电路如图 3 所示。

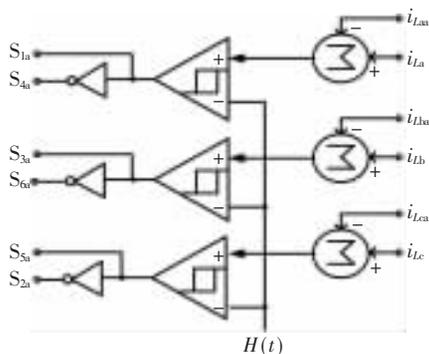


图 3 低频桥控制电路

2 基于 dq 变换和正反馈的孤岛效应检测策略

2.1 检测策略的提出

在同步旋转 dq 坐标系中,三相并网逆变器输出的有功功率和无功功率可以表示为:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q) \\ Q = \frac{3}{2}(v_d \cdot i_q - v_q \cdot i_d) \end{cases} \quad (5)$$

并网电压波形为理想正弦时, $v_q=0$, 式(5)可以写成:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}v_d \cdot i_d \\ Q = \frac{3}{2}v_d \cdot i_q \end{cases} \quad (6)$$

本文提出一种新的基于 dq 变换和正反馈的孤岛效应检测策略,这里假定负载为 RLC 负载,其有功功率 P_{load} 、无功功率 Q_{load} 、电压 v 和电网角频率 ω 的关系为:

$$\begin{cases} P_{load} = v^2/R \\ Q_{load} = v^2(\omega C - 1/\omega L) \end{cases} \quad (7)$$

式中, R 为负载电阻, L 为负载电感, C 为负载电容。

基于式(6)和式(7),在逆变器的高频控制部分可以建立 2 个正反馈,即 1 个电压反馈和 1 个频率反馈。

2.2 电压正反馈孤岛效应检测策略

电压正反馈孤岛效应方案如图 4 所示,当检测计算出并网逆变器输出电压 d 轴分量 v_d 增加时,由于正反馈,逆变器输出 d 轴电流 i_d 增加,结合式(6)和式(7),逆变器输出有功功率 P 与输出电压 V 增加。当电压增加到超出正常范围时,孤岛效应就被检测出来。同理,当电压减少时便向反方向变化。正反馈通路由带通滤波器 BPF (Band-Pass Filter)、增益 (Gain) 和限幅 (Limiter) 组成。并网逆变器输出电压 d 轴分量 v_d 通过正反馈通路形成 Δi 叠加到电流给定值 i_d^* 。

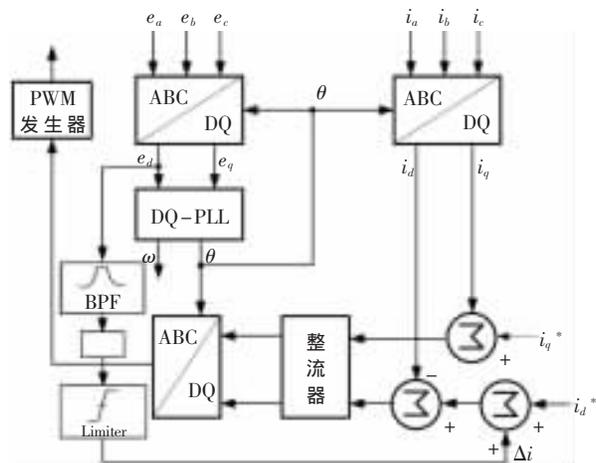


图 4 电压正反馈控制原理

2.3 频率正反馈孤岛效应检测策略

频率正反馈孤岛效应检测方案如图 5 所示,当检测计算出并网逆变器输出电压频率增加时,由于正反馈,逆变器输出 q 轴电流 i_q 增加,结合式(6)和式(7),逆变器输出无功功率 Q 与输出电压频率增加。当频率增加到超出正常范围时,孤岛效应就被检测出来。同理,当频率减少时便向反方向变化。

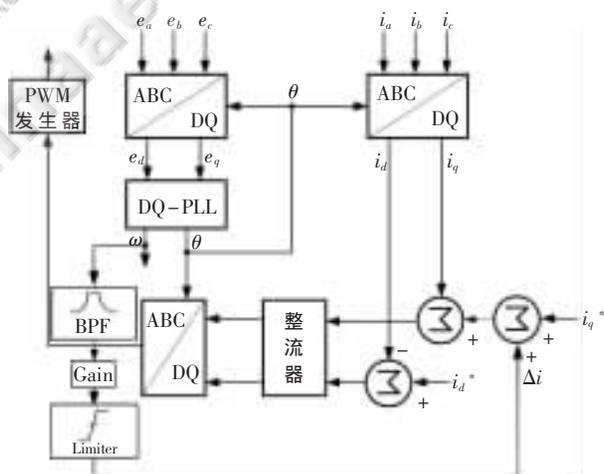


图 5 频率正反馈控制原理

3 仿真结果

为了验证电路的可行性及其性能,采用 MATLAB7.0 的 Simulink 软件包分别对双频并网逆变器与单个高频并网逆变器进行仿真分析。仿真参数如下:输入直流电压 $V_{dc}=700$ V,电网电压有效值 $E_a=E_b=E_c=220$ V,低频部分电感 $L_{La}=L_{Lb}=L_{Lc}=0.8$ mH,高频部分电感 $L_a=L_b=L_c=2$ mH,电网电压频率 $f_s=50$ Hz。高频桥开关频率 10 kHz,低频桥开关频率约 2 kHz。负载品质因数取 $Q_l=1.8$,逆变器额定输出功率 $P=100$ kW,电网在 0.12 s 断电。并网逆变器输出电流很好地跟踪了电网电压,如图 6 和图 7 所示,双频并网逆变器的输出电流性能几乎与单

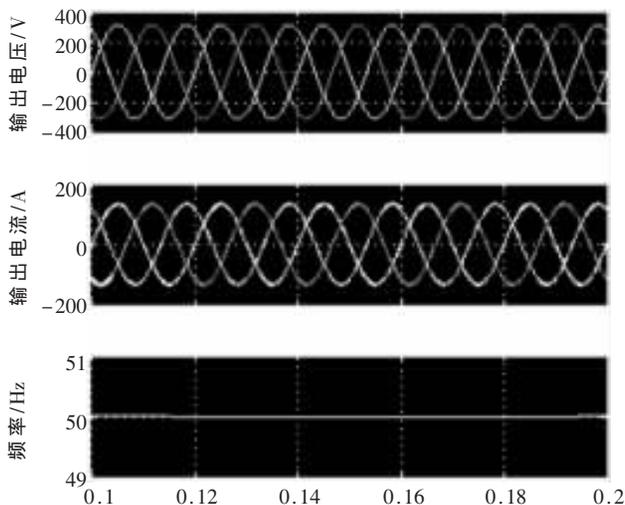


图6 标准三相桥并网逆变器的仿真结果

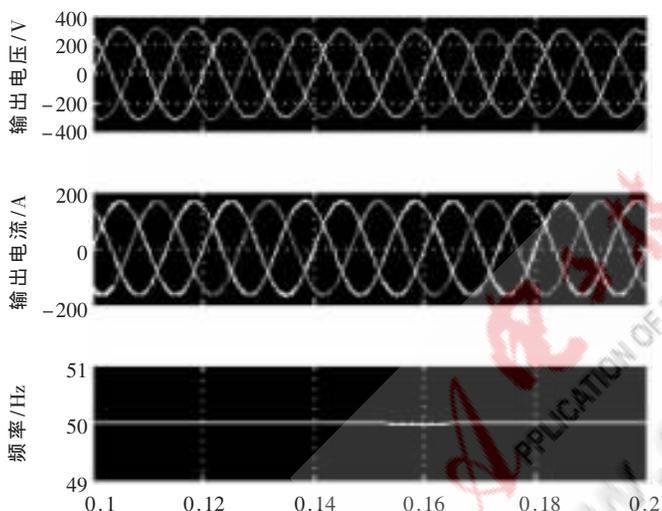


图7 双频并网逆变器的仿真结果(10 kHz, 2 kHz)

个高频并网逆变器性能相同。从图8和图9可以看出,双频并网逆变器的低频桥输出电流 i_{ls} 很好地跟踪了高频桥的输出电流 i_h , 从而使高频桥处理的电流大大减小。如图9所示,流过高频开关的电流小,流过低频开关的电流相对较大,并保持输出电流不变,则系

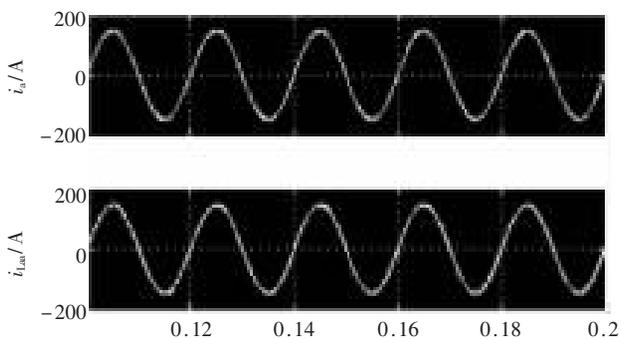


图8 双频并网逆变器的a相电感电流

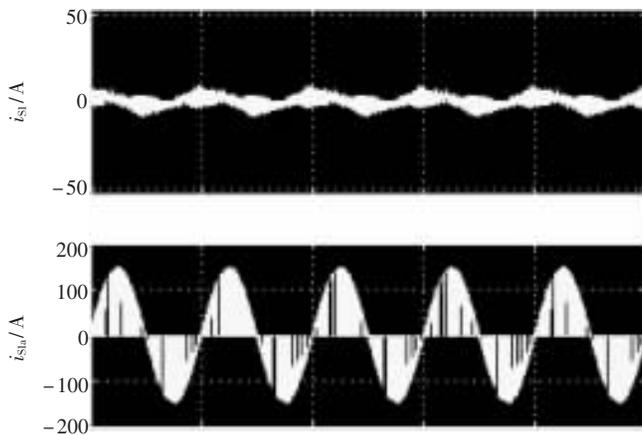


图9 双频并网逆变器开关 S_1 和 S_{1a} 的电流

统整体的开关损耗就会降低,从而在保证系统性能的前提下提高了系统的效率。

由于并网逆变器输出功率与负载功率平衡,未加入孤岛效应检测策略时,如图10所示,逆变器输出电压及其频率波动在正常范围内。加入电压正反馈孤岛效应检测策略后,如图11所示,在0.12 s 孤岛效应发生后,由于正反馈的作用,电压平衡被打破,逆变器输出电压幅值在2个工频周期内偏离了正常范围,孤岛效应被检测出来。加入频率正反馈孤岛效应检测策略后,如图12所示,逆变器输出电压频率在3个工频周期内超出了频率保护上限值 50.5 Hz,孤岛效应被检测出来。

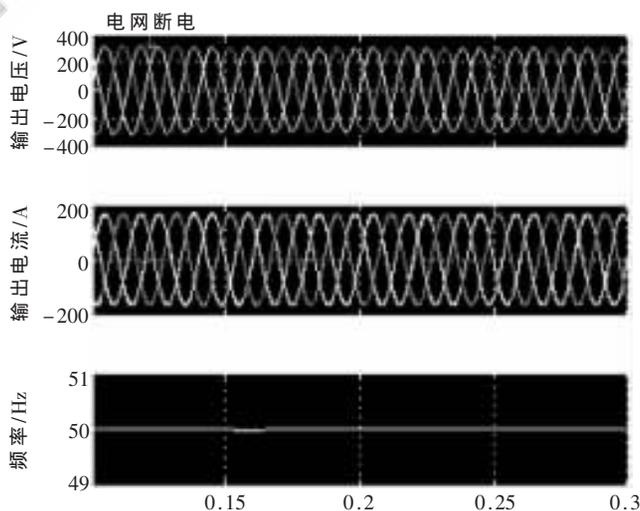


图10 没有孤岛检测的仿真结果

本文论述了用于分布式发电的双频并网逆变器的结构原理及孤岛效应检测策略。理论分析与仿真结果表明,该双频并网逆变器的输出电流性能与高频下的标准三相桥输出电流性能相当,总的谐波畸变率小,能快速跟踪电网电压,实现以单位功率因数向电网输电。另外,

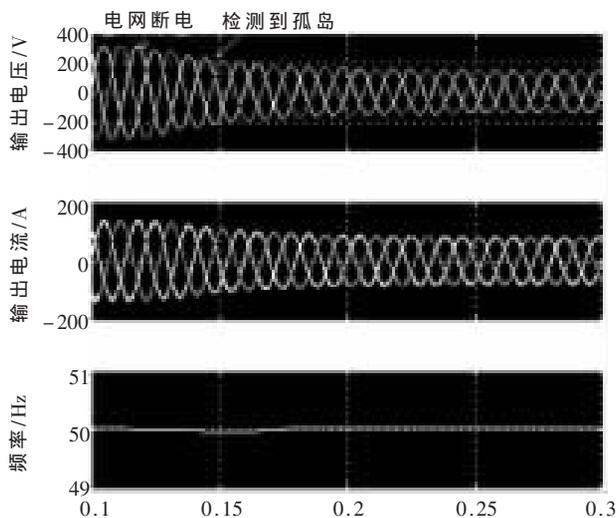


图 11 电压正反馈的仿真结果

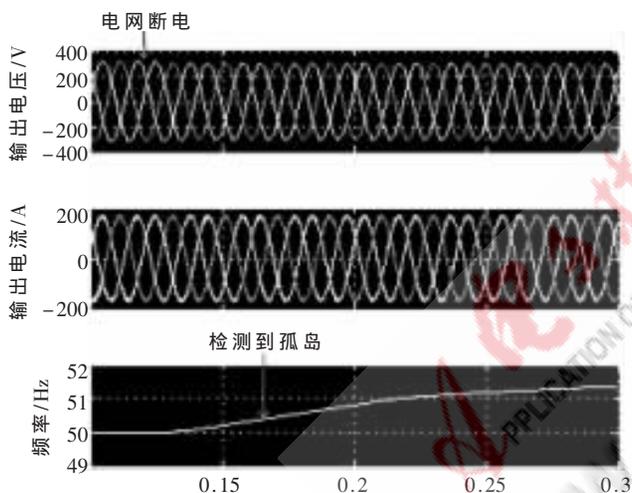


图 12 频率正反馈的仿真结果

系统采用了基于 dq 变换和正反馈的孤岛效应检测策略,基于这个策略,提出了基于 dq 变换的电压正反馈和频率正反馈两种检测方法,并进行了仿真研究。仿真结果分析表明,该方法通过引入正反馈,打破了孤岛发生后可能出现电网平衡的状态,实现了并网系统运行时的快速孤岛检测,消除了传统孤岛检测方法中存在的检测盲区,对电能质量影响可以忽略。这种新型并网逆变器的拓扑结构和孤岛效应检测策略结构原理简单,有一定的工程应用价值。

参考文献

[1] XUE Yao Suo, CHANG Liu Chen, KJAER S B, et al. Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators; an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1305-1314.
 [2] PRASAD B S, JAIN S, AGARWA V. Universal single-stage

grid-connected inverter[J]. IEEE trans on energy conversion, 2008, 23(1): 128-137.
 [3] JOUNG H P, JUN Y A, BO H C, et al. Dual-module based maximum power point tracking control of photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1036-1047.
 [4] PRODANOVIC M, GREEN T C. Control and filter design of three-phase inverters for high power quality grid connection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1): 373-380.
 [5] TWINING E, HOLMES D G. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 888-895.
 [6] 张强, 张崇巍, 张兴, 等. 风力发电用大功率并网逆变器研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 54-59.
 [7] CHAO K H, LIAW C M. Three-phase soft-switching inverter for induction motor[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2001, 148(1): 8-12.
 [8] ALEPUZ S, BUSQUETS M S, BORDONAU J, et al. Interfacing renewable energy sources to the utility grid using a three-level inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1504-1511.
 [9] 周维维, 杜雄, 付志红, 等. 双频 Buck 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 68-72.
 [10] WOVTE A, BELMANS R, NIJS J. Testing the islanding protection function of photovoltaic inverters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(3): 157-162.
 [11] GONZALEZ G H, IRAVANI R. Current injection for active islanding detection of electronically-interfaced distributed resources[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1698-1705.
 [12] JERAPUTRA C, ENJETI P N. 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.
 [13] ROPP M E, BEGOVIC M, ROHATGI A. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 810-816.
 [14] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 97-102.
 [15] HUNG G K, CHANG C C, CHEN C L. Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(1): 169-173.

(收稿日期: 2008-12-08)