

带有谐波补偿功能的主动移频式孤岛检测法

蔡逢煌^{1,2}, 林琼斌^{1,2}, 王武^{1,2}

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116;

2. 漳州科华技术有限责任公司博士后工作站, 福建 漳州 363000)

摘要: 首先利用快速傅里叶变换分析了用于孤岛检测的传统主动频率偏移(AFD)法引起的谐波, 基于分析结果, 得出了传统AFD法引起的3、5、7次谐波电流的公式。通过引入与上述谐波电流相位相反的电流, 对谐波进行补偿。给出了所提带谐波补偿功能的AFD法在数字化控制系统中的实现方法。仿真和实验结果表明, 所提方法有效地减少了系统中的谐波电流, 同时不影响孤岛检测。

关键词: 孤岛检测; 主动移频; 谐波分析; 补偿; 电流畸变; 快速傅里叶变换; 数字化控制系统; 分布式发电

中图分类号: TM 71

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.009

0 引言

孤岛检测是光伏系统、风力发电系统(或其他分布式发电系统)并网时必须解决的技术问题^[1-2]。孤岛检测标准UL1741^[3]和IEEE Std1547^[4]要求分布式并网发电系统必须具备孤岛检测功能。我国发布的GB/T19939—2005《光伏系统并网的技术要求》也规定了必须至少采用一种主动和被动孤岛检测保护。被动式检测法仅根据并网逆变器公共耦合点电压的幅值、频率、相位或谐波等的变化是否异常来检测孤岛, 不影响电网供电质量, 但通常存在较大的检测盲区。主动式孤岛检测法通过向并网电流注入扰动, 引起公共点电压幅值、频率或相位等发生变化来判断孤岛是否发生。主动频率偏移AFD(Active Frequency Drift)法是最主要的主动孤岛检测技术之一^[5-9]。

随着分布式发电系统的发展, 电力系统对发电设备的并网电流质量提出了更高的要求。其中关键的性能指标之一就是并网电流总谐波含量。并网电流谐波含量受到诸多因素干扰, 如系统电路拓扑结构、PWM技术、并网电流控制算法、开关频率和电网频率波动等。AFD法将使并网电流正负半波尾部存在死区时间, 导致电流畸变。目前学者们所提出的改善电流畸变的方法主要是通过减少扰动量或扰动次数来实现^[10-11], 这在一定程度上降低了孤岛检测的效率。为此, 本文提出了一种具有谐波补偿功能的AFD法, 该方法能在不影响孤岛检测效率的前提下减小主动扰动引起的并网电流畸变。

1 AFD的快速傅里叶变换分析

AFD法的工作机理是以公共耦合点处电压频率为输出电流的参考频率, 在输出电流正负半波尾部

注入一定的死区时间 t_z , 使其频率呈现增大或减小的趋势来进行孤岛检测, 其稳定时带死区时间的电流波形如图1所示^[12]。该图以死区时间段的中点为坐标原点, 纵轴为电流标么值。在该坐标系下, 电流 $i_{inv}(t)$ 表达式是关于坐标原点的奇函数, 其在 $[0, T/2]$ 区间内如式(1)所示^[13]。

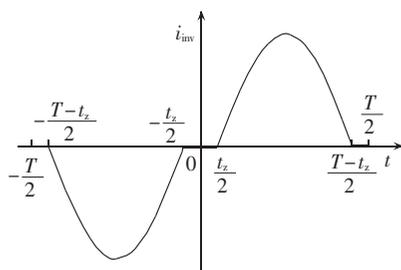


图1 采用传统AFD法后的稳定电流波形

Fig.1 Waveform of stable currents after traditional AFD method is applied

$$i_{inv}(t) = \begin{cases} \sin\left[\frac{2\pi}{T_1}\left(t - \frac{t_z}{2}\right)\right] & \frac{t_z}{2} \leq t < \frac{T-t_z}{2} \\ 0 & 0 \leq t < \frac{t_z}{2}, \frac{T-t_z}{2} \leq t < \frac{T}{2} \end{cases} \quad (1)$$

其中, T 为公共点电压周期值。令斩波率 $c_f = 2t_z/T$, 则扰动后电流周期 $T_1 = (1-c_f)T$ 。

根据快速傅里叶变换公式, 可得出 k 次谐波分量系数 b_k 的表达式如下:

$$b_k = \frac{2(1-c_f)\sin\left(\frac{\pi k}{2}c_f\right)[\cos(\pi k)-1]}{\pi[k^2(1-c_f)^2-1]} \quad (2)$$

根据式(2), 可以得出AFD法引起的各次谐波分量系数的计算公式, 如式(3)—(6)所示, 由此计算出不同 c_f 下的谐波含量, 如表1所示。

$$b_1 = -\frac{4(1-c_f)\sin\left(\frac{\pi}{2}c_f\right)}{\pi[(1-c_f)^2-1]} \quad (3)$$

$$b_3 = -\frac{4(1-c_f)\sin\left(\frac{3\pi}{2}c_f\right)}{\pi[(9(1-c_f)^2-1)]} \quad (4)$$

收稿日期: 2013-07-08; 修回日期: 2014-06-02

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2012J01257, 2013-J01178)

Project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province(2012J01257, 2013J01178)

$$b_5 = -\frac{4(1-c_f)\sin\left(\frac{5\pi}{2}c_f\right)}{\pi[25(1-c_f)^2-1]} \quad (5)$$

$$b_7 = -\frac{4(1-c_f)\sin\left(\frac{7\pi}{2}c_f\right)}{\pi[49(1-c_f)^2-1]} \quad (6)$$

表 1 不同 c_f 下各次谐波与基波比值

Tab.1 Ratio of harmonic current to fundamental current for different c_f values

c_f	谐波含量/%		
	$k=3$	$k=5$	$k=7$
0.01	0.76	0.42	0.30
0.02	1.55	0.86	0.60
0.03	2.37	1.30	0.90
0.04	3.21	1.75	1.21
0.05	4.07	2.21	1.50

从表 1 可知,AFD 法引起的各次谐波含量与 c_f 有关,且随着 c_f 的增大,相应的各次谐波含量也增大。AFD 扰动没有产生偶次谐波,3 次谐波的含量最高,其次为 5 次谐波,7 次谐波含量最少。不同 c_f 下的电流总谐波畸变率如表 2 所示,表中 THD_a 为 3、5 和 7 次谐波引起的电流畸变率,THD_b 为电流总谐波畸变率。可见,3、5 和 7 次谐波含量占绝大部分,约 90%; c_f 越大,电流总谐波畸变率也越大。

表 2 不同 c_f 下的电流总谐波畸变率

Tab.2 Current THD for different c_f values

c_f	THD _a /%	THD _b /%
0.01	0.92	1.04
0.02	1.87	2.08
0.03	2.85	3.12
0.04	3.85	4.16
0.05	4.87	5.21

2 谐波补偿原理

基于上述 AFD 法引起的谐波的分布规律,本文提出对输出并网电流进行 3、5 和 7 次谐波主动补偿的孤岛检测技术。图 2 为谐波补偿的示意图。图中,曲线 1 是传统 AFD 法下的稳定电流波形,存在 t_z 的死区时间;曲线 3 是对曲线 1 进行傅里叶变换得到的 3 次谐波波形,即 $i_3(t) = b_3 \sin(3\omega t)$;为了能够抑制该 3 次谐波,需要主动补偿一个相位与曲线 3 相反的谐波分量 $\hat{i}_3(t) = -b_3 \sin(3\omega t)$,即曲线 4。电流输出控制时将谐波补偿给定量 $\hat{i}_3(t)$ 叠加到原有算法的电流给定量作为新的电流给定量,则可抑制 3 次谐波。为了避免由于补偿导致原有死区大小或电流过零点变化,进而影响孤岛检测,对一个工频周期内的电流波形,仅在输出电流的时间内进行相应谐波量的补偿,即图 2 中的谐波补偿区,而死区时间段内其电流仍强制为零。同理,可对传统 AFD 法的给定电流参考量叠加 5 次和 7 次谐波补偿量 $\hat{i}_5(t)$ 、 $\hat{i}_7(t)$,

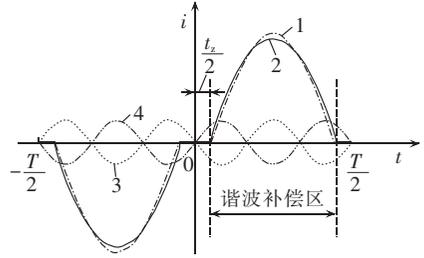


图 2 AFD 法谐波补偿示意图

Fig.2 Schematic diagram of AFD method with harmonic compensation

最终补偿后的逆变电流波形如曲线 2 所示。

进行 AFD 后,电流周期为 T_1 ,角频率为 ω_1 ,其工频下基波电流周期为 T ,角频率 $\omega = 2\pi/T$ 。移频技术是通过改变脉冲周期(即载波周期 T_s)的大小来实现的。当扰动信号斩波率为 c_f 时,载波周期调整为 $T_{1s} = (1-c_f)T_s$,则扰动后的电流周期为 $T_1 = (1-c_f)T$ 。将未加谐波补偿时的标么化电流式(1)分解后得到 3、5 和 7 次谐波补偿量如式(7)所示。

$$\begin{cases} \hat{i}_3(t) = -b_3 \sin(3\omega t) \\ \hat{i}_5(t) = -b_5 \sin(5\omega t) \\ \hat{i}_7(t) = -b_7 \sin(7\omega t) \end{cases} \quad (7)$$

由上述机理可得补偿后标么化电流如式(8)所示,据此可对进行 AFD 后的电流进行谐波补偿。

$$\hat{i}_{inv}(t) = \begin{cases} \sin\left[\frac{2\pi}{T_1}\left(t - \frac{t_z}{2}\right)\right] + \hat{i}_3(t) + \hat{i}_5(t) + \hat{i}_7(t) & \frac{t_z}{2} \leq t < \frac{T-t_z}{2} \\ 0 & 0 \leq t < \frac{t_z}{2}, \frac{T-t_z}{2} \leq t < \frac{T}{2} \end{cases} \quad (8)$$

3 算法实现

数字化控制系统中,常用的并网电流控制算法有 PID 控制、无差拍控制、单周期控制和预测控制等^[14-15],算法中将电流周期 N 等分,由正弦电流给定信号控制各载波周期开关管的占空比,实现对电流波形的实时控制。正弦电流给定信号可由正弦查表的方式或直接由正弦函数计算获得。例如,针对开关频率 $f_s = 16 \text{ kHz}$ 的电流波形控制而言,工频下电流周期做 $N = 320$ 等分,各点的标么化正弦函数值可由式(9)计算,或将各点正弦值制成数组,通过查表获取。

$$i_{ref}(k) = \sin\frac{2\pi k}{N} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

谐波抑制是要在脉冲个数固定为 N 的正弦电流给定中加入谐波补偿给定量。图 2 中,为了获得离散化的谐波补偿量,以补偿前的稳定电流波形(曲线 1)过零点为参考纵轴,其在半个周期,即区间 $[0, T_1/2]$ 内的电流表达式为式(10),则相应的各次谐波补偿

量表达式为式(11)。实际上,式(9)是式(10)离散化后的脉冲正弦值。现对式(11)中各次谐波补偿量进行离散化,分别把 $T_1=NT_{1s}$ 和 $t=kT_{1s}$ 代入式(11),又由于 $c_f=2t_z/T$,化简后得到式(12)。

$$i_{\text{ref}}(t) = \sin(\omega_1 t) = \sin\left(\frac{2\pi}{T_1} t\right) \quad (10)$$

$$\begin{cases} \hat{i}_3(t) = -b_3 \sin\left[\frac{6\pi(1-c_f)}{T_1} \left(t + \frac{t_z}{2}\right)\right] \\ \hat{i}_5(t) = -b_5 \sin\left[\frac{10\pi(1-c_f)}{T_1} \left(t + \frac{t_z}{2}\right)\right] \\ \hat{i}_7(t) = -b_7 \sin\left[\frac{14\pi(1-c_f)}{T_1} \left(t + \frac{t_z}{2}\right)\right] \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \hat{i}_3(k) = -b_3 \sin\left[\frac{6\pi(1-c_f)k}{N} + \frac{3\pi}{2} c_f\right] \\ \hat{i}_5(k) = -b_5 \sin\left[\frac{10\pi(1-c_f)k}{N} + \frac{5\pi}{2} c_f\right] \\ \hat{i}_7(k) = -b_7 \sin\left[\frac{14\pi(1-c_f)k}{N} + \frac{7\pi}{2} c_f\right] \end{cases} \quad (12)$$

算法中总的参考电流值为给定电流值与谐波补偿电流值之和。因此,由式(13)可实现对电流的谐波补偿,负半周期给定值计算原理与正半周期类似。

$$\hat{i}_{\text{ref}}(k) = i_{\text{ref}}(k) + \sum_{j=3,5,7} \hat{i}_j(k) \quad k=0, 1, \dots, \frac{N}{2}-1 \quad (13)$$

4 仿真分析

为验证基于谐波补偿的孤岛检测技术理论,利用 PSIM 仿真软件搭建了分布式并网发电系统仿真平台,其额定功率为 4.2 kW,整体框架如图 3 所示。并网发电系统的基本结构包括了逆变主电路、LC 滤波、负载、电网模块和延迟锁相环(DLL)控制器模块, S_1 、 S_2 分别为电网掉电开关和孤岛切断信号开关。电网主要参数为:电压 $U_g = 220$ V,电网频率 $f_g = 50$ Hz。LC 滤波参数为: $L = 4$ mH, $C = 30$ μ F。

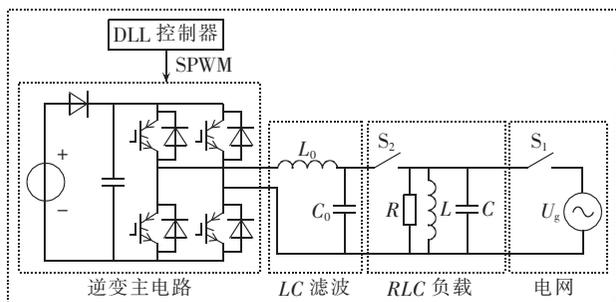
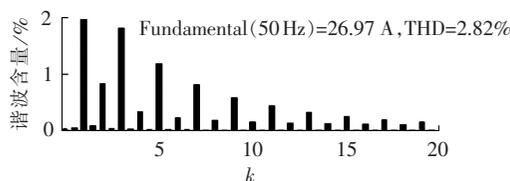


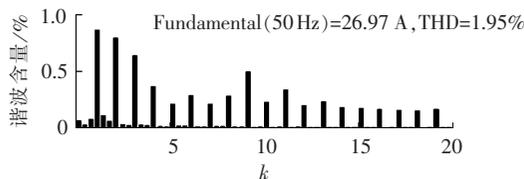
图 3 分布式并网系统仿真框图

Fig.3 Block diagram of distributed grid-connection system simulation

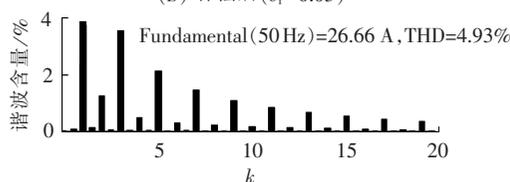
图 4 所示为 $c_f=0.03$ 和 $c_f=0.05$ 扰动下电流谐波总体情况。可见,补偿后并网电流的 3、5 和 7 次谐波被明显抑制, $c_f=0.03$ 时总谐波畸变率从 2.82% 降至 1.95%, $c_f=0.05$ 时总谐波畸变率从 4.93% 降至 2.70%,由此验证了引入谐波抑制的 AFD 法能有效减少电流谐波,提高系统供电质量。



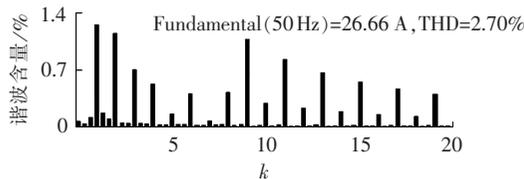
(a) 补偿前 ($c_f=0.03$)



(b) 补偿后 ($c_f=0.03$)



(c) 补偿前 ($c_f=0.05$)



(d) 补偿后 ($c_f=0.05$)

图 4 谐波补偿前后的谐波对比图

Fig.4 Comparison of harmonic currents between with and without harmonic compensation

图 5 给出了 $c_f=0.05$ 时,并网系统进行 AFD 谐波补偿前后的移频效果对比情况。由图 5 可见:采用带谐波补偿的 AFD 法使公共耦合点电压频率 f_{PCC} 由 50 Hz 逐渐增大,5 个周期后达到稳定点 50.94 Hz;而不带谐波补偿时频率稳定于 50.90 Hz。仿真结果表明,谐波补偿前后的频率偏移基本一致且最终频率稳定点非常接近,所以在非死区区间进行谐波补偿不影响移频效果。可见,带谐波补偿的 AFD 法既能在并网系统正常运行时改善电流波形,又不影响孤岛检测。

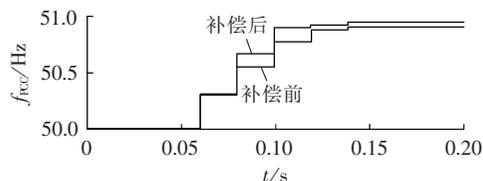


图 5 谐波补偿前后的移频对比图

Fig.5 Comparison of frequency drift between with and without harmonic compensation

图 6 给出了带谐波补偿的 AFD 法在谐振负载下的孤岛检测波形,包括公共点电压、电流(放大 5 倍)和频率曲线。由图可见,在 $t=0.05$ s 时孤岛产生,频率逐渐增大,在 $t=0.14$ s 时超出孤岛频率保护点 (50.5 Hz),使并网系统立即切断输出,公共点电压在

电容作用下缓慢降至 0,有效地完成了孤岛保护动作。

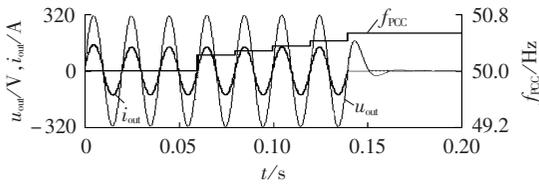


图 6 带谐振负载时的孤岛检测结果

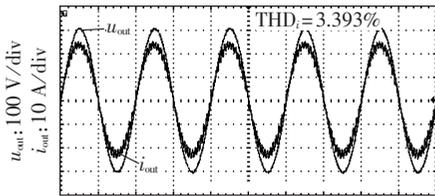
Fig.6 Results of island detection with resonant load

5 实验验证

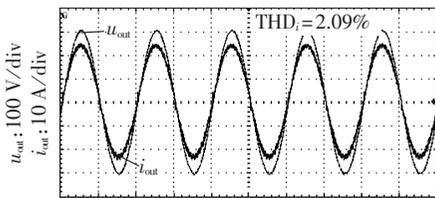
搭建 4.2 kW 并网逆变器的孤岛试验平台进行实验验证,负载采用群菱公司的 ACLT-2206H 并网逆变器反孤岛保护试验检测装置,实验步骤可参考文献[16]。分别进行了带谐波补偿和不带谐波补偿的并网电流波形实验和带谐波补偿的孤岛检测实验。

在相同功率和相同控制算法下对不带谐波补偿和带谐波补偿的 AFD 法进行比较,结果如图 7 所示。通过对比可以看出,采用带谐波补偿的 AFD 法后,并网电流 THD 减小了约 1.3%。

在不同的 RLC 品质因数和负载下,利用带谐波补偿的 AFD 法进行孤岛检测。图 8 为 50% 额定负



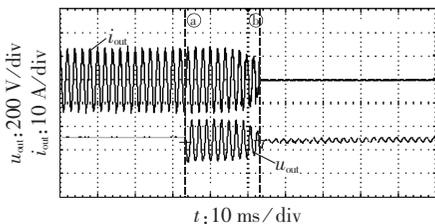
(a) 不带谐波补偿



(b) 带谐波补偿

图 7 实验波形

Fig.7 Experimental waveforms

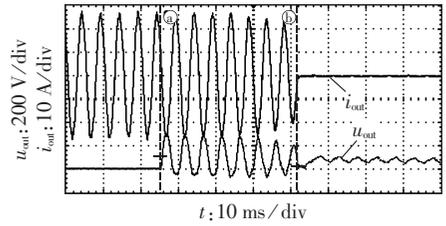


① 80.40 ms, -28.0 V
② 277.2 ms, -12.0 V
 $\Delta t = 196.8 \text{ ms}, \Delta u = 16.0 \text{ V}$

图 8 50% 额定功率、 $Q_r=2$ 时的孤岛检测结果

Fig.8 Results of island detection with 50% of rated power and $Q_r=2$

载,RLC 谐振品质因数 $Q_r=2$ 时的孤岛实验波形,图 9 为 100% 额定负载、RLC 谐振品质因数 $Q_r=1$ 时的孤岛实验波形。由图可见,孤岛检测时间分别为 196.8 ms 和 146.4 ms,满足标准要求($<2 \text{ s}$)。



① 102.8 ms, 120 V
② 249.2 ms, 32.0 V
 $\Delta t = 146.4 \text{ ms}, \Delta u = 88.0 \text{ V}$

图 9 100% 额定功率、 $Q_r=1$ 时的孤岛检测结果

Fig.9 Results of island detection with 100% of rated power and $Q_r=1$

6 结论

本文分析了 AFD 法对并网电流所造成的畸变规律,由此提出了一种具有谐波补偿功能的 AFD 法。该检测方法通过对并网电流叠加 3、5 和 7 次谐波补偿量,抑制由于频率扰动所引起的大部分谐波含量,从而降低了并网电流波形的畸变率,减少了对电力系统的谐波污染。通过理论分析和 PSIM 仿真验证了该方法既可有效检测孤岛状态,又可以减少对并网电流的影响。

参考文献:

- [1] 陈炜,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.
- [2] KHAMIS A, SHARE EF H, BIZKEVELCI E. A review of islanding detection techniques for renewable distributed generation systems[J]. Renew Sustain Energy Rev, 2013, 28: 483-493.
- [3] UL. UL174 Inverter, converter, and controllers for use in independent power system[S]. [S.l.]: UL, 2004.
- [4] IEEE. IEEE Std 1547.1-2005 IEEE standard conformance test procedures for equipment interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. [S.l.]: IEEE, 2005.
- [5] 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, 25(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, 25(3): 172-176.
- [6] 应展峰,陈运,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.
- [7] YAFAROU A, WU B, KOURO S. Improved active frequency drift

- anti-islanding detection method for grid connected photovoltaic systems[J]. IEEE Industrial Electronics Society, 2012, 27(5): 2367-2375.
- [8] BAHRAI B, KARIMI H, IRAVANI R. Nondetection zone assessment of an active islanding detection method and its experimental evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 517-525.
- [9] VATANI M R, SANJARI M J, GHAREHPETIAN G, et al. A new fast and reliable method for islanding detection based on transient signal[C]//2nd Iranian Conference on Smart Grid. Tehran, Iran: IEEE, 2012: 1-4.
- [10] 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): 157-162. REN Biying, SUN Xiangdong, ZHONG Yanru, et al. Novel current-disturbing method for islanding detection in single-phase distributed generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 157-162.
- [11] YAFAOUI A, WU Bin, KOURO S. Improved active frequency drift anti-islanding detection method for grid connected photovoltaic systems[J]. IEEE Industrial Electronics Society, 2012, 27(5): 2367-2375.
- [12] ESTEBANEZ E J, MORENO V M, PIGAZO A, et al. Performance evaluation of active islanding-detection algorithms in distributed-generation photovoltaic systems: two inverters case[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1185-1193.
- [13] 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. A low distortion of the active frequency shift in island detection technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 219-223.
- [14] 蔡逢煌, 郑必伟, 王武. 单相光伏并网逆变器的两种控制算法比较[J]. 电力电子技术, 2011, 45(4): 4-6. CAI Fenghuang, ZHENG Biwei, WANG Wu. Comparisons of two control methods for single-stage grid connected inverter[J]. Power Electronics, 2011, 45(4): 4-6.
- [15] 李春鹏, 孙绍华. 数字控制对并网逆变器系统稳定性和动态性能的影响[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 23-27. LI Chunpeng, SUN Shaohua. Influence of digital control on stability and dynamic performance of grid-connected inverter system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 23-27.
- [16] 蔡逢煌, 郑必伟, 王武. 结合同步锁相的光伏并网发电系统孤岛检测技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 202-206. CAI Fenghuang, ZHENG Biwei, WANG Wu. Islanding detection method combined with PLL for photovoltaic grid-connected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 202-206.

作者简介:



蔡逢煌

蔡逢煌(1976-),男,福建莆田人,副教授,博士,主要研究方向为电力电子系统建模与优化、电力电子系统控制算法及其实现(E-mail: caifenghuang@fzu.edu.cn);

林琼斌(1976-),男,福建莆田人,副教授,博士,研究方向为电力电子系统建模与优化、电力电子系统控制算法及其实现(E-mail: qiongbnlin@fzu.edu.cn);

王武(1973-),男,福建莆田人,教授,博士,研究方向为电力电子系统建模与优化、电力电子系统控制算法设计与实现(E-mail: wangwu@fzu.edu.cn)。

Island detection by active frequency drift method with harmonic compensation

CAI Fenghuang^{1,2}, LIN Qiongbn^{1,2}, WANG Wu^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Zhangzhou Kehua Technology Co., Ltd., Zhangzhou 363000, China)

Abstract: The harmonic currents induced by the traditional AFD(Active Frequency Drift) method for island detection are analyzed by fast Fourier transform and the formulas of its third-, fifth- and seventh-order harmonic currents are obtained. Therefore, the currents with inverse phase can be applied to compensate the harmonic currents caused by the AFD method. The way to implement the AFD method with harmonic compensation in digital control system is introduced. Simulative and experimental results show that, the proposed method effectively reduces the harmonic currents without influencing the island detection.

Key words: island detection; active frequency drift; harmonic analysis; compensation; current distortion; fast Fourier transforms; digital control systems; distributed power generation