

微逆变器过零点电流畸变抑制的混合控制策略

王楠¹, 易映萍¹, 张超²

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 微型光伏并网逆变器输出电流过零点畸变会导致电网注入电流谐波增加, 严重时还会干扰电网正常运行。为解决该问题, 通过对反激式微逆变器峰值电流控制策略的分析, 讨论了功率器件关断延迟时间对系统功率平衡的影响, 指出功率器件关断延迟时间是造成过零点畸变的主要原因, 据此提出了一种新的混合峰值电流控制策略。详细分析了其工作原理, 给出了控制实现方法, 并构建了100 W样机进行实验。实验结果表明所提出的混合控制策略能有效抑制输出电流过零点畸变。

关键词: 微逆变器; 反激式变换器; 峰值电流控制; 过零点畸变; 混合控制策略

Hybrid control strategy for suppressing zero-crossing current distortion of micro-inverter

WANG Nan¹, YI Ying-ping¹, ZHANG Chao²

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The zero crossing distortion of micro-inverter output current can increase the THD of grid current, in severe cases it can disturb the normal operation of the grid. To resolve this problem, through the analysis of peak current control strategy of flyback type micro inverter, the effect of switching delay time of power electronic elements on power balance is discussed in detail, that the switching delay time is the main cause of zero crossing distortion is pointed out, thus a new hybrid peak current control strategy is presented. The control theory is analyzed in detail and a controller is designed. A 100 W micro-inverter prototype is built to verify the proposed control method. Experimental results show that the proposed control strategy can suppress the zero crossing distortion effectively.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050206).

Key words: micro-inverter; flyback type converter; peak current control; zero crossing distortion; hybrid control strategy

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0059-05

0 引言

光伏发电作为绿色可再生能源近年来得到长足的发展。但是受输出功率限制, 光伏组件在使用中广泛采用串联、并联或者串并联的形式, 这会因组件特性差异、局部阴影等问题降低光伏组件电能转换效率^[1-3]。

微逆变器是解决该问题的有效方法, 此外它还具有初期投入低、安装地点灵活、冗余度高、系统易于扩充等优点, 是目前光伏发电研究的热点。微逆变器是光伏发电系统与电网的接口设备, 目前其输出电流(进网电流)通常存在过零点畸变, 导致电流总谐波失真(Total Harmonic Distortion, THD)较高, 降低了并网电能质量^[4-12]。

国内外对该问题提出了一些解决思路, 如文献[13]为克服逆变器死区时间对输出电流的影响, 将滑模控制应用到控制脉冲的生成, 而平均电流控制策略可以部分缓解因功率器件开关时间延迟导致的过零点畸变^[14]。文献[15]则针对采样速率引起的电流畸变展开研究, 提出了线性死区补偿方法。文献[16]为消除功率器件寄生参数对输出电流的影响提出了实时控制策略。虽然上述方法均对输出电流畸变起到一定的改善作用, 但是普遍存在电流采样精度高、控制算法复杂的缺点, 不适合用于对价格敏感的微逆变器。因此, 如何在确保微逆变器满足并网要求的基础上简化控制策略是其得以推广和普及的重要保证。

本文以反激式微逆变器为例, 分析峰值电流控制方法的工作原理, 探讨本类型逆变器输出电流过零点畸变产生的原因, 在原控制策略的基础上, 引入微逆变器输出电流瞬时值作为参考控制量, 改善

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA050206)

了逆变器输出电流过零点畸变问题，降低了并网电流 THD。仿真和实验验证了本控制策略的有效性。

1 峰值电流控制原理

图 1 是反激式微逆变器电路，它由反激式变换器（DC-DC 变换）和 H 桥逆变器（DC-AC 变换）构成。当功率器件 S_M 导通时，光伏器件向变压器励磁电感 L_m 充电（见式(1)），并将能量存储其中；当其关断时，该能量通过变压器向负载释放，一个开关周期传递的能量如式(2)所示。

$$U_{DC} = L_m \frac{I_{Lm}}{dT_s} \quad (1)$$

$$W_T = \frac{1}{2} L_m I_{Lm}^2 = \frac{1}{2} \frac{(U_{DC} dT_{on})^2}{L_m} \quad (2)$$

式中： I_{Lm} 是励磁电感的峰值电流； d 是 S_M 的占空比； T_s 是功率器件的开关周期； U_{DC} 是光伏器件输出电压。该公式表明，反激式变换器一个开关周期内传递到变压器二次侧的能量是随占空比 d 变化而改变的。式(3)是微逆变器瞬时输出功率。

$$p_o = \frac{1}{2} P_{DC} (1 - \cos 2\omega t) \quad (3)$$

式中： P_{DC} 是光伏器件输出功率，假设其稳定不变； ω 是电网工作频率。当开关周期足够小时，可认为逆变器瞬时输出功率也为常数，滤波器件电压、电流稳定。根据能量平衡定律可得

$$p_o T_s = P_{DC} d T_s \quad (4)$$

式(4)表明，逆变器输出功率与开关器件 S_M 占空比成正比，由式(1)可知励磁电感峰值电流是 d 的线性函数，通过控制 I_{Lm} 按照正弦规律变化则可使逆变器输出功率满足式(3)，即峰值电流控制策略。

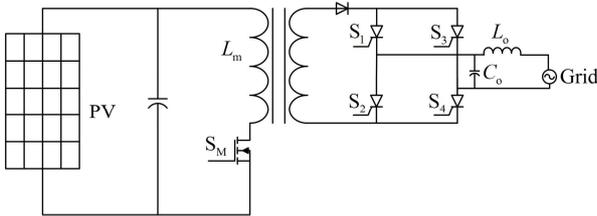


图 1 反激式微逆变器电路图

Fig. 1 Micro-inverter based on flyback converter

2 输出电流畸变产生的原因

上述分析表明峰值电流控制策略控制参数少、易于实现，但是在实际应用中，逆变器输出电流存在明显的过零点畸变，导致电网注入电流 THD 升高。下面分析该现象产生的原因，以寻找解决方法。

为简化分析，设所有器件均工作在理想条件下。将式(3)代入式(4)可得

$$d = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \quad (5)$$

该式表明，为了输出与电网电压同步的工作电流，功率器件 S_M 导通时间应跟随电网相位变换，其变化频率为 100 Hz。当输出电压为零时， d 亦等于零；随着电网电压增加，占空比逐步上升直至电网电压达到峰值时其等于 0.5，然后开始下降。

与理想器件不同，电力电子器件开通和关断均存在一定的延迟时间 T_{delay} ：即上升时间 T_r 、下降时间 T_f 之和。因此，器件有效导通时间如式(6)所示，它由理论导通时间 T'_{on} 和延迟时间构成。

$$T_{on} = T'_{on} + T_{delay} = dT_s + T_{delay} \quad (6)$$

图 2 是延迟时间对功率器件工作影响的示意图。该图表明， dT_s / T_{delay} 足够大时（ $dT_s > 10T_{delay}$ ），下降时间可以忽略不计；反之，则要将 T_{delay} 计入。对微逆变器而言，该情况在电网电压过零点区域最为突出，由式(5)、式(6)可得此时有 $T_{on} \approx T_{delay}$ 存在。这表明由于功率器件下降时间不能忽略，一个开关周期内电源向变压器二次侧传递的能量近似不变，如式(7)及图 3 所示。

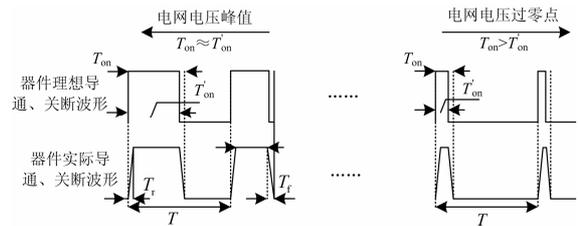


图 2 延迟时间、导通时间关系图

Fig. 2 Relations between on time and delay time of power device

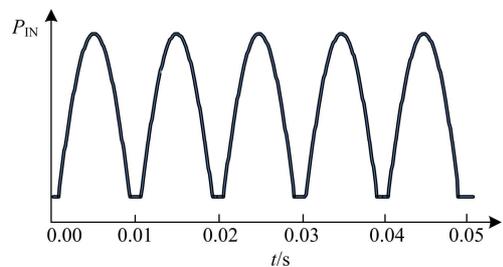


图 3 变压器原边输入功率

Fig. 3 Input power of transformer primary side

$$W_T = \frac{1}{2} L_m I_{Lm}^2 = \frac{1}{2} \frac{(U_{DC} T_r)^2}{L_m} \quad (7)$$

在一个开关周期内, 微逆变器系统满足下列能量平衡公式:

$$W_T = W_o + W_c \quad (8)$$

式中依次为变压器原边传递到副边的能量, 如式(2)所示; 逆变器输出能量以及滤波电容 C_o 存储的能量。在过零点区域, 逆变器输出能量应近似为零, 该式改写为

$$\frac{1}{2} \frac{(U_{DC} T_f)^2}{L_m} = C_o (U_c'^2 - U_c^2) \quad (9)$$

式中, U_c 、 U_c' 分别对应开关器件导通、关断时电容 C_o 工作电压。式(9)表明, 由于变压器输出能量全部存储在电容 C_o 中, 致使电容电压上升。在过零点区域, 电容电压随着开关次数的增加不断上升直至逆变器再次向电网注入功率, 此时 U_c' 为

$$U_c' = \sqrt{\frac{k W_T}{C_o}} \quad (10)$$

式中: k 为功率器件开关次数; W_T 为式(7)表述的常量。该公式表明, 随着开关器件工作次数的增加, 电容电压逐步上升。对于逆变器滤波电感有下列公式存在:

$$U_c = L_o \frac{di_o}{dt} + u_o \quad (11)$$

式中, i_o 、 u_o 分别是逆变器输出电流及电网电压。过零点附近该电压近似为零, 因此 i_o 远大于零, 从而导致逆变器输出电流产生畸变。

3 过零点畸变消除控制策略

为解决上述问题, 在原有峰值电流控制策略的基础上引入逆变器并网电流 i_o 作为 S_M 控制参考信号, 实现系统的功率平衡。控制过程如下: ① 控制器对电压、电网相关数据进行采样后, 根据式(12)得到峰值电流参考信号 i_{ref}^* 、逆变器输出电流参考信号 i_o^* ; ② 检测逆变器输出电流 i_o , 并将其与参考值进行比较; ③ 如果 Δi_o 小于设定值, 表明逆变器工作正常, 仍采用峰值电流控制; 反之, 逆变器输出电流存在过零点畸变, 在一个开关周期停止 S_M 导通, 直至该电流误差小于给定值, 如图4所示。

$$i_{ref}^* = n i_o^* = n \frac{P_o}{U_o} \sin \omega t \quad (12)$$

其中: n 是变压器匝比; P_o 是逆变器输出功率有效值; U_o 是电网电压有效值。在该控制策略下, 当逆变器出现过零点畸变现象时, 由于原边功率器件 S_M 闭合, 电源不再向变压器二次侧及电网提供能量,

而是由电容 C_o 提供, 如式(13)所示。随着电容能量的释放, 其工作电压及逆变器输出电流不断下降(见式(11)), 从而抑制了过零点畸变, 该过程直至 Δi_o 小于给定值时, 逆变器重新开始工作在峰值电流控制下。

$$i_o = C_o \frac{dU_o}{dt} \quad (13)$$

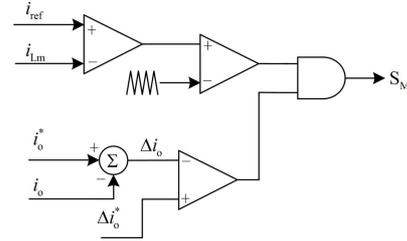


图4 混合峰值电流控制策略示意图

Fig. 4 Control strategy of hybrid peak current control

逆变部分由晶闸管 $S_1 \sim S_4$ 及LC滤波器构成。当电网电压大于零时, i_o 通过 S_1 、 S_4 向电网注入正向电流; 反之, S_2 、 S_3 导通, 电网从逆变器获取负向电流, 实现微逆变器并网发电。

4 仿真、实验结果及分析

为验证上述分析, 对图5所示的控制方法在Psim环境下进行仿真实验, 微逆变器工作条件如表1所示。图5分别是输入功率50W和100W时, 输出电流的仿真结果。由图可知, 在本文所提出的控制策略下, 过零点附近功率器件开关次数明显下降, 降低了滤波电容电压, 有效抑制了过零点畸变。该图表明, 当逆变器输出功率较大时, 控制器对过零点畸变有更好的抑制效果。其原因是由于滤波电容电压会随输出功率的增加而加大, 从而 S_M 关断时间延长, 避免了小功率时 S_M 因干扰、检测精度造成的控制模式频繁切换。

为进一步验证本文所提出控制方法的有效性, 构建了一台额定功率100W的微逆变器样机。系统控制采用数模混合的方法, 数字部分用TI公司的TMS2812DSP实现, 其主要功能有: ①根据光伏模块输出功率及电网电压计算峰值电流控制模式的参

表1 微逆变器电路参数

Table 1 Parameters of micro-inverter	
光伏器件输出电压 U_{PV}	30 V
额定功率 P_{PV}	100 W
工作频率	100 kHz
电网电压 U_{Grid}	220 V
变压器匝比 N	10
励磁电感 L_m	200 μ H

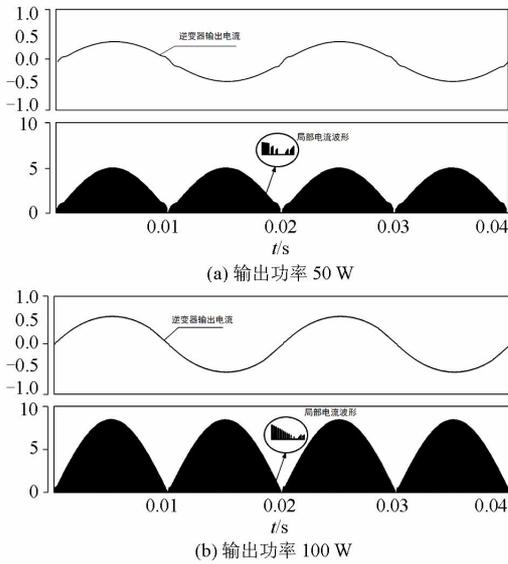


图 5 逆变器仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms of inverter

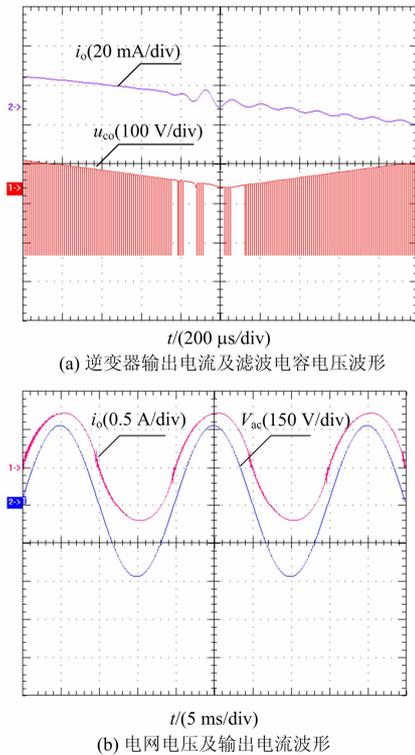


图 6 微逆变器输出电流波形

Fig. 6 Output current waveform of micro-inverter

考电流 i_{ref} 及逆变器输出参考电流 $i_{o(ref)}$ ；②计算输出电流误差，判断逆变器是否工作在过零点区域，并据此发出 S_M 辅助控制信号。参考电流 i_{ref} 经 TLC320AD50C D/A 芯片转换为模拟量，用作混合控制策略的参考信号。

图 6 是并网条件下逆变器输出功率 100 W 时工作相关波形。由图 6(a)可知在非过零点区域，原边功率器件开关频率等于设定频率，在过零点区域开关次数明显减少，输出电容电压由于不能够补充能量而随电网电压变化，抑制了过零点输出电流 i_o 畸变。图 6(b)是电网电压及输出电流波形，该图也表明在过零点区域电流变化比较平稳。

由上述仿真及实验结果可以看出，在本文提出的混合控制策略下，过零点畸变得得到有效抑制，证明了本文所提出控制方法是有效的。

5 结论

1) 分析了功率器件导通、关断时间延迟时间在能量传递过程中的影响，指出器件关断时间是引起输出电流过零点畸变的主要原因。

2) 将逆变器输出电流引入峰值电流控制策略，给出混合控制策略实现方法。

3) 通过仿真和实验验证了论文所提出的混合控制策略的有效性。

4) 本论文提出的混合控制策略在抑制逆变器输出电流畸变上起到良好的效果，但是根据实验可以看出它在小功率条件下控制效果仍有待改进和提高。

参考文献

[1] MENESES D, BLAABJERG F, GARCÍA O, et al. Review and comparison of step-up transformerless topologies for photovoltaic AC-module application[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(6): 2649-2663.

[2] CARBONE R, TOMASELLI A. Recent advances on AC PV-modules for grid-connected photovoltaic plants[C] // Clean Electrical Power (ICCEP), 2011 International Conference on, 2011: 124-129.

[3] 高文祥, 王明渝, 王立健, 等. 光伏微型逆变器研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 147-153. GAO Wen-xiang, WANG Ming-yu, WANG Li-jian, et al. Review of research on photovoltaic micro-inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 147-153.

[4] 牟龙华, 黄舒予, 周伟. 小功率微型逆变器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 58-64. MOU Long-hua, HUANG Shu-yu, ZHOU Wei. Research on low-power micro-inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 58-64.

[5] 蔡可健, 张颖, 程晓燕. 单周控制反激逆变器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 125-130.

- CAI Ke-jian, ZHANG Ying, CHENG Xiao-yan. One-cycle control approach for flyback inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 125-130.
- [6] 王勤, 张杰, 阮新波, 等. 一种新型双输入反激DC/DC变换器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 115-122.
WANG Qin, ZHANG Jie, RUAN Xin-bo, et al. A new double-input flyback DC/DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 115-122.
- [7] SHIMIZU T, WADA K, NAKAMURA N. Flyback-type single-phase utility interactive inverter with power pulsation decoupling on the DC input for an AC photovoltaic module system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2006, 21(5): 1264-1272.
- [8] 黄晶晶, 张杭, 张爱民, 等. 一种新型并网逆变器电流控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 137-140.
HUANG Jing-jing, ZHANG Hang, ZHANG Ai-min, et al. Research on the new current control strategy based on the grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 137-140.
- [9] 吴春华, 黄建明, 杨宇. 高效率微型光伏并网逆变器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 106-111.
WU Chun-hua, HUANG Jian-ming, YANG Yu. Control strategy of high efficiency grid-connected photovoltaic micro-inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 106-111.
- [10] 朱思国, 欧阳红林, 刘鼎, 等. 基于电流滞环控制的H桥级联型逆变器新型调制方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 212-218.
ZHU Si-guo, OUYANG Hong-lin, LIU Ding, et al. A new modulation method based on current hysteresis control for cascaded H-bridge inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 212-218.
- [11] 张凤阁, 朱仕禄, 殷孝睢, 等. 交错反激式光伏并网微逆变器的控制器实现[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 142-147, 153.
ZHANG Feng-ge, ZHU Shi-lu, YIN Xiao-ju, et al. Controller design of grid-connected microinverter based on interleaved flyback structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 142-147, 153.
- [12] KOTSOPOULOS A, HESKES P J M, JANSEN M J. Zero-crossing distortion in grid-connected PV inverters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2005, 52(2): 558-565.
- [13] BLAHNIK V, PEROUTKA Z, ZAK J, et al. Elimination of dead-time effect causing current distortion of single-phase power converters[C] // Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International, 2012: DS1e3-1-DS1e3-6.
- [14] SHARMA R, BALL J A R. Unipolar switched inverter low-frequency harmonics caused by switching delay[J]. IET Power Electron, 2009, 12(5): 508-516.
- [15] GUSSEINE K D, SYPE D M V, RYCKAERT W R, et al. Zero-crossing distortion in grid-coupled AC-DC converters[C] // Proc Eur Conf Power Electron Appl, Dresden, Germany, 2005: 1-10.
- [16] ZHANG Zhe, ZHANG Chi, CHEN Min, et al. An improved on-time control method to reduce the line-current distortion for BCM/DCM mixed micro-inverter at light load condition[C] // Industrial Electronics (ISIE), 2012 IEEE International Symposium on, 2012: 1759-1764.

收稿日期: 2014-01-07; 修回日期: 2014-03-01

作者简介:

王楠(1963-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电力电子及电力传动; E-mail: nany_dd@hotmail.com

易映萍(1967-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力电子及电力传动;

张超(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子与光伏发电系统。