

特定消谐式逆变器无死区控制策略研究

张文义^{1,2}, 佟为明¹, 杨乐民², 徐会明¹
(1. 哈尔滨工业大学 电气学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 特定消谐式逆变器在理论上能有效地消除谐波, 但死区设置增加了输出电压的谐波含量。通过对特定消谐式逆变器换流机理的分析, 研究了感性负载时死区对输出电压的影响。分别对提前关断死区加入方式、滞后导通死区加入方式和对称死区加入方式的工作过程进行了分析, 得到相应的波形图和输出谐波幅值公式。提出了应用于特定消谐式逆变器的无死区控制策略, 并分析了实现无死区控制的条件。在特定消谐式逆变器中应用无死区控制策略可以消除死区对输出电压的不利影响。

关键词: 特定消谐; 逆变器; 死区效应; 无死区控制

中图分类号: TM 464 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)01-0013-04

0 引言

特定消谐技术^[1-2]是一种针对特定次数的谐波进行消除的技术, 它具有消除谐波次数多、残余的谐波分量幅值小、电压利用率高等优点^[3], 将其应用于逆变器可得到特定消谐式逆变器^[4]。虽然, 在理论上特定消谐式逆变器能有效地消除谐波, 但为防止上下桥臂直通而在理想开关时刻加入的死区时间使其不能精确地复现理想输出电压波形, 必然产生新的谐波。研究者对 SPWM 逆变器中的死区效应进行了分析^[5-6], 给出了死区时间引起的输出电压基波及谐波的变化规律^[7]。但是, 现有的逆变器死区补偿方法是在实际开关时刻已经偏离理想开关时刻的情况下进行死区补偿^[6-8]。本文在 SPWM 整流器无死区滞后控制技术^[9]的基础上, 提出特定消谐式逆变器无死区控制策略, 简化了特定消谐式逆变器的死区补偿问题。

1 基本原理

以单相全桥电压型逆变器为研究对象(见图 1),

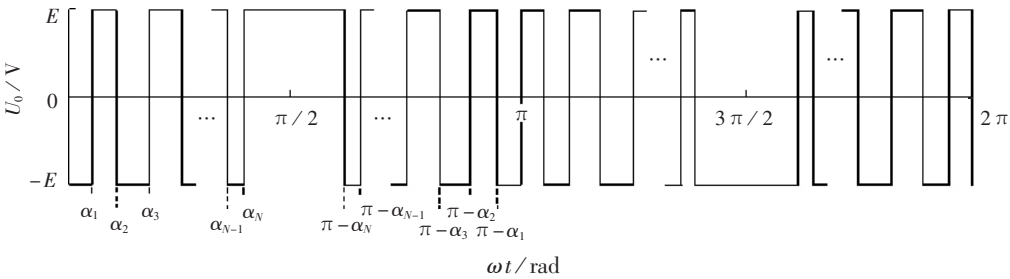


图 2 单相全桥电压型逆变器输出电压波形
Fig.2 Output voltage waveform of single-phase full-bridge voltage-source inverter

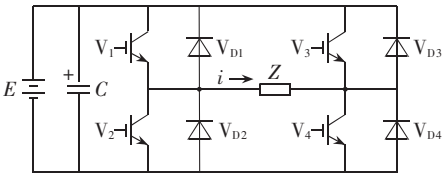


图 1 单相全桥电压型逆变器的主电路
Fig.1 Main circuit of single-phase full-bridge voltage-source inverter

其输出电压波形如图 2 所示。实际应用中, 所构造的图 2 波形在 $[0, \pi]$ 区间以 $\pi/2$ 点为轴对称, 在 $[0, 2\pi]$ 区间以 π 点为点对称。由傅里叶级数理论可知, 其直流分量、偶次分量为零, 而基波和各奇次谐波分量为

$$\alpha_n = \frac{4E}{n\pi} \left[-1 - 2 \sum_{k=1}^N (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right] \tag{1}$$

式中 $n=1, 3, 5, \dots$ 为基波和各次谐波的次数; α_k 为 $[0, \pi/2]$ 区间内的 N 个开关角中第 k 个开关角。在此令 q 为所选定的基波幅值(为表示方便, 令 $E=1, E$ 为直流电压), 则

$$a_1 = q \tag{2}$$

若令 $n=3, 5, 7, \dots$ 为拟消除的谐波次数, 则

$$a_n=0 \quad n=3,5,7,\dots \quad (3)$$

使基波幅值 q 为一需要的值,并在式(3)中取 $N-1$ 个方程,则式(2)和式(3)就构造了在 $1/4$ 周期内用 N 个开关角消除 $N-1$ 个特定谐波的特定消谐技术的数学模型。

2 换流机理分析

为研究死区的加入对输出电压波形的影响,对图 1 所示特定消谐式逆变器的换流机理进行分析,仅以左半桥为研究对象。 V_1 和 V_2 是可控器件,规定电流流出半桥的方向为正。为保证逆变器的安全工作,同一半桥上下桥臂中的可控器件必须设置死区时间,即某一桥臂的可控器件得到关断信号后,要经过延时才能给另一桥臂的可控器件导通信号。根据输入电流的方向分为 2 种换流情况。

a. 电流方向为正时,换流在可控器件 V_1 和二二极管 V_{D2} 之间进行:如果 V_1 导通,电流从下桥臂的 V_{D2} 换流到上桥臂的 V_1 ;如果 V_1 关断,电流从上桥臂的 V_1 换流到下桥臂的 V_{D2} 。

b. 电流方向为负时,换流在可控器件 V_2 和二二极管 V_{D1} 之间进行:如果 V_2 导通,电流从上桥臂的 V_{D1} 换流到下桥臂的 V_2 ;如果 V_2 关断,电流从下桥臂的 V_2 换流到上桥臂的 V_{D1} 。

综合以上换流情况,当二极管换流到可控器件时,由于可控器件的控制信号存在死区延时,可能引起脉宽的改变。由于在死区时间内可控器件 V_1 和 V_2 均处于关断状态,感性负载电流不能突变的特点使得电流流过能维持原方向的二极管。当电流方向为正时,在死区时间内电流流过二极管 V_{D2} ,输出电压为负;当电流方向为负时,在死区时间内电流流过二极管 V_{D1} ,输出电压为正。

3 死区加入方式对输出电压波形的影响

死区在可控器件 V_1 和 V_2 的关断和导通之间加入,可采用提前关断方式、滞后导通方式或对称方式。本文对这 3 种死区加入方式分别进行分析。设死区时间为 t ,死区时间所对应的电角度为 α_t 。

3.1 提前关断方式

提前关断的死区加入方式是在理想开关时刻到来之前 t 给某一桥臂的可控器件施加关断信号,经过 t 后在理想开关时刻给另一桥臂的可控器件施加导通信号。提前关断方式时的实际输出电压波形如图 3 所示,图中波形 1,2 分别为理想情况时 V_1, V_2 的控制信号波形;3,4 分别为提前关断方式时 V_1, V_2 的控制信号波形;5,6 分别为电流方向为正和为负时的实际输出电压波形。下面分析其工作过程。

a. 电流方向为正时,假设初始状态为 V_2 导通、

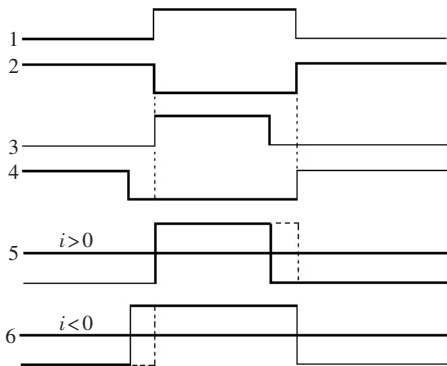


图 3 提前关断方式时的实际输出电压波形

Fig.3 Practical output voltage waveform in advance-off manner

V_1 关断,此时输出电压为负。 V_2 提前关断,电流流过 V_{D2} ,输出电压为负; V_1 在理想开关时刻正常导通,输出电压为正; V_1 提前关断,电流流过 V_{D2} ,输出电压为负; V_2 在理想开关时刻正常导通,输出电压为负。波形见图 3 中的波形 5。

b. 电流方向为负时,假设初始状态为 V_2 导通、 V_1 关断,此时输出电压为负。 V_2 提前关断,电流流过 V_{D1} ,输出电压为正; V_1 在理想开关时刻正常导通,输出电压为正; V_1 提前关断,电流流过 V_{D1} ,输出电压为正; V_2 在理想开关时刻正常导通,输出电压为负。波形见图 3 中的波形 6。

由图 3 可知,采用提前关断方式时,如果电流方向为正,实际输出电压波形中由负到正的开关时刻和理想开关时刻一致,由正到负的开关时刻比理想开关时刻提前 t ;如果电流方向为负,实际输出电压波形中由负到正的开关时刻比理想开关时刻提前 t ,由正到负的开关时刻和理想开关时刻一致。据此在采用提前关断方式时给出电流方向为正和电流方向为负时实际输出电压波形基波和各次谐波分量的幅值公式如下:

$$U_n = \frac{2E}{n\pi} \left\{ \left[\sum_{k=1}^{4N+2} (-1)^k \sin(n\alpha'_k) \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{4N+2} (-1)^{k+1} \cos(n\alpha'_k) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\text{若 } i > 0, \text{ 则 } \alpha'_k = \begin{cases} \alpha_k & k=1,3,5,\dots \\ \alpha_k - \alpha_t & k=2,4,6,\dots \end{cases}$$

$$\text{若 } i < 0, \text{ 则 } \alpha'_k = \begin{cases} \alpha_k - \alpha_t & k=1,3,5,\dots \\ \alpha_k & k=2,4,6,\dots \end{cases}$$

3.2 滞后导通方式

滞后导通的死区加入方式是在理想开关时刻给某一桥臂的可控器件施加关断信号,经过 t 后给另一桥臂的可控器件施加导通信号。滞后导通方式时的实际输出电压波形如图 4 所示,图中波形 1,2 分别为理想情况时 V_1, V_2 的控制信号波形,3,4 分别为滞后导通方式时 V_1, V_2 的控制信号波形,5,6 分别为

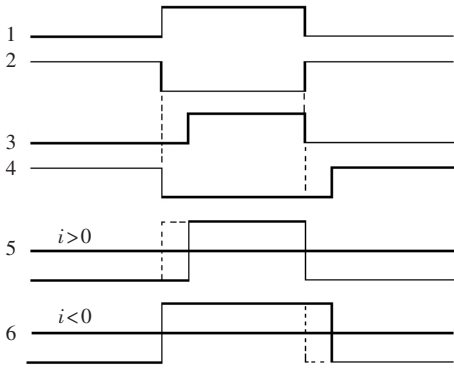


图 4 滞后导通方式时的实际输出电压波形

Fig.4 Practical output voltage waveform in lag-on manner

电流方向为正和为负时的实际输出电压波形。下面分析其工作过程。

a. 电流方向为正时,假设初始状态为 V_2 导通、 V_1 关断,此时输出电压为负。 V_2 在理想开关时刻正常关断,电流流过 V_{D2} ,输出电压为负; V_1 滞后导通,输出电压为正; V_1 在理想开关时刻正常关断,电流流过 V_{D2} ,输出电压为负; V_2 滞后导通,输出电压为负。波形见图 4 中的波形 5。

b. 电流方向为负时,假设初始状态为 V_2 导通、 V_1 关断,此时输出电压为负。 V_2 在理想开关时刻正常关断,电流流过 V_{D1} ,输出电压为正; V_1 滞后导通,输出电压为正; V_1 在理想开关时刻正常关断,电流流过 V_{D1} ,输出电压为正; V_2 滞后导通,输出电压为负。波形见图 4 中的波形 6。

由图 4 可知,采用滞后导通方式时,如果电流方向为正,实际输出电压波形中由负到正的开关时刻比理想开关时刻滞后 t ,由正到负的开关时刻和理想开关时刻一致;如果电流方向为负,实际输出电压波形中由负到正的开关时刻和理想开关时刻一致,由正到负的开关时刻比理想开关时刻滞后 t 。据此在采用滞后导通方式时给出电流方向为正和电流方向为负时实际输出电压波形基波和各次谐波分量的幅值公式如下:

$$U_n = \frac{2E}{n\pi} \left\{ \left[\sum_{k=1}^{4N+2} (-1)^k \sin(n\alpha_k'') \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{4N+2} (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k'') \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\text{若 } i > 0, \text{ 则 } \alpha_k'' = \begin{cases} \alpha_k + \alpha_i & k=1, 3, 5, \dots \\ \alpha_k & k=2, 4, 6, \dots \end{cases}$$

$$\text{若 } i < 0, \text{ 则 } \alpha_k'' = \begin{cases} \alpha_k & k=1, 3, 5, \dots \\ \alpha_k + \alpha_i & k=2, 4, 6, \dots \end{cases}$$

3.3 对称方式

对称的死区加入方式是在理想开关时刻到来之前 $t/2$ 给某一桥臂的可控器件施加关断信号,经过 t 后给另一桥臂的可控器件施加导通信号。对称方式时的实际输出电压波形如图 5 所示,图中波形 1,

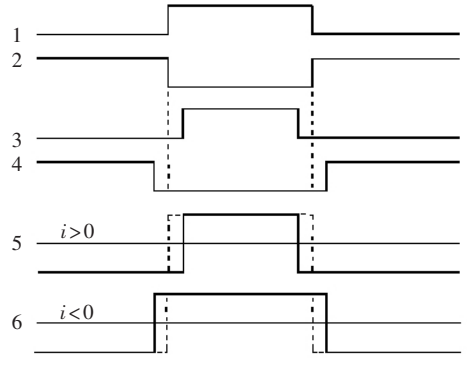


图 5 对称方式时的实际输出电压波形

Fig.5 Practical output voltage waveform in symmetry manner

2 分别为理想情况时 V_1, V_2 的控制信号波形;3,4 分别为对称方式时 V_1, V_2 的控制信号波形;5,6 分别为电流方向为正和为负时的实际输出电压波形。下面对其工作过程进行分析。

a. 电流方向为正时,假设初始状态为 V_2 导通、 V_1 关断,此时输出电压为负。 V_2 提前关断,电流流过 V_{D2} ,输出电压为负; V_1 滞后导通,输出电压为正; V_1 提前关断,电流流过 V_{D2} ,输出电压为负; V_2 滞后导通,输出电压为负。波形见图 5 中的波形 5。

b. 电流方向为负时,假设初始状态为 V_2 导通、 V_1 关断,此时输出电压为负。 V_2 提前关断,电流流过 V_{D1} ,输出电压为正; V_1 滞后导通,输出电压为正; V_1 提前关断,电流流过 V_{D1} ,输出电压为正; V_2 滞后导通,输出电压为负。波形见图 5 中的波形 6。

由图 5 可知,采用对称方式时,如果电流方向为正,实际输出电压波形中由负到正的开关时刻比理想开关时刻滞后 $t/2$,由正到负的开关时刻比理想开关时刻提前 $t/2$;如果电流方向为负,实际输出电压波形中由负到正的开关时刻则比理想开关时刻提前 $t/2$,由正到负的开关时刻比理想开关时刻滞后 $t/2$ 。据此在采用对称方式时给出电流方向为正和电流方向为负时实际输出电压波形基波和各次谐波分量的幅值公式如下:

$$U_n = \frac{2E}{n\pi} \left\{ \left[\sum_{k=1}^{4N+2} (-1)^k \sin(n\alpha_k''') \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{4N+2} (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k''') \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\text{若 } i > 0, \text{ 则 } \alpha_k''' = \begin{cases} \alpha_k + \alpha_i / 2 & k=1, 3, 5, \dots \\ \alpha_k - \alpha_i / 2 & k=2, 4, 6, \dots \end{cases}$$

$$\text{若 } i < 0, \text{ 则 } \alpha_k''' = \begin{cases} \alpha_k - \alpha_i / 2 & k=1, 3, 5, \dots \\ \alpha_k + \alpha_i / 2 & k=2, 4, 6, \dots \end{cases}$$

4 无死区控制策略

对特定消谐式逆变器换流过程的进一步分析发现,当电流方向为正时,可控器件 V_2 完全处于闲置状态;当电流方向为负时,可控器件 V_1 完全处于闲

置状态。总之,对应逆变器的一个电流输入方向,只有一个可控器件处于工作状态,同一半桥的另一个可控器件完全处于闲置状态,可以取消其控制信号,使其不会导通。因此,在电流方向不变的区间内不需要设置死区,可以实现无死区控制。

图6示出在不同的电流方向时实现无死区控制的波形图,图中波形1,2分别为理想情况时 V_1, V_2 的控制信号波形;3,4分别为电流方向为正时 V_1, V_2 的控制信号波形;5,6分别为电流方向为负时 V_1, V_2 的控制信号波形;7为实际输出电压波形。采用无死区控制策略时,实际输出电压波形基波和各奇次谐波分量的幅值同式(1)。

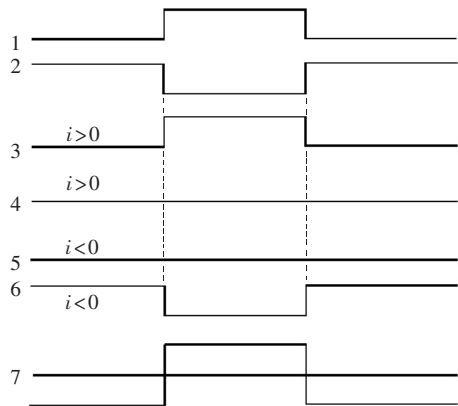


图6 实现无死区控制的实际输出电压波形

Fig.6 Practical output voltage waveform in no-dead-time manner

无死区控制策略的实现与电流方向密切相关,对于不同的电流方向所采用的无死区控制策略是不同的,因此在特定消谐式逆变器中实现无死区控制策略需要精确地判断输出电流的极性。对具有电流控制环的特定消谐式逆变器,其输出电流本身就作为检测量,不需要增加额外的硬件检测输出电流的过零点。由于给定信号有很精确的过零点,也可以通过检测给定电流信号的极性来得到实际输出电流的极性。

5 结语

死区效应使特定消谐式逆变器的实际输出电压波形偏离理想输出电压波形,限制了特定消谐式逆变器的应用。通过对特定消谐式逆变器换流机理的分析,提出了应用于特定消谐式逆变器的无死区控制策略,充分发挥了特定消谐式逆变器消除谐波能力强的优点,解决了实际应用中的问题。

参考文献:

[1] LI Li, CZARKOWSKI D, LIU Ya-guang, et al. Multilevel selective harmonic elimination PWM technique in series -connected voltage inverters[J]. **IEEE Trans. on I.**

A., 2000, 36(1): 160-170.

- [2] ESPINOZA J R, JOOS G, GUZMAN J I, et al. Selective harmonic elimination and current / voltage control in current / voltage-source topologies: a unified approach [J]. **IEEE Trans. on I. E.**, 2001, 48(1): 71-81.
- [3] 张文义, 佟为明, 杨乐民, 等. 特定消谐式变频器及其在火电厂中的应用[J]. **电力系统自动化**, 2004, 28(6): 65-67, 93.
- ZHANG Wen-yi, TONG Wei-ming, YANG Le-min, et al. Selective harmonic elimination inverter and its application in power plants[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2004, 28(6): 65-67, 93.
- [4] 张文义, 杨乐民, 佟为明, 等. 特定消谐式变频器的研究[J]. **电力电子技术**, 2002, 36(4): 53-55, 58.
- ZHANG Wen-yi, YANG Le-min, TONG Wei-ming, et al. Study of selective harmonic elimination inverter [J]. **Power Electronics**, 2002, 36(4): 53-55, 58.
- [5] 史伟伟, 刘永强. 串联型电能质量补偿器中死区效应研究[J]. **电力自动化设备**, 2004, 24(3): 46-49.
- SHI Wei-wei, LIU Yong-qiang. Research on dead-time effect on series power quality compensator[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2004, 24(3): 46-49.
- [6] 范瑞祥, 周腊吾, 肖红霞. APF逆变器中死区效应研究[J]. **电力自动化设备**, 2005, 25(2): 37-39.
- FAN Rui-xiang, ZHOU La-wu, XIAO Hong-xia. Research on dead-time effect of inverter in APF [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2005, 25(2): 37-39.
- [7] 刘陵顺, 尚安利. SPWM逆变器死区效应的研究[J]. **电机与控制学报**, 2001, 5(4): 237-241.
- LIU Ling-shun, SHANG An-li. Study of dead-time effect in SPWM converter [J]. **Electric Machines and Control**, 2001, 5(4): 237-241.
- [8] 陈锐, 尹项根, 王志华. 级联型高压变频器死区效应分析[J]. **电力自动化设备**, 2003, 23(8): 33-37.
- CHEN Rui, YIN Xiang-gen, WANG Zhi-hua. Analysis of dead-time effect in cascaded multi-level medium-voltage inverters [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2003, 23(8): 33-37.
- [9] 毛鸿, 吴兆麟, 王毅, 等. SPWM变换器无死区滞后控制技术的研究[J]. **电力电子技术**, 2000, 34(4): 7-9.
- MAO Hong, WU Zhao-lin, WANG Yi, et al. A strategy of non-dead-time control in SPWM converter [J]. **Power Electronics**, 2000, 34(4): 7-9.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

张文义(1972-), 男, 黑龙江尚志人, 博士研究生, 研究方向为变频电源与谐波抑制、电器测试与控制(E-mail: wenyiz@hit.edu.cn);

佟为明(1964-), 男, 黑龙江宁安人, 教授, 博士, 研究方向为变频电源与谐波抑制、智能电器与现场总线。



张文义

Study of no-dead-time control strategy in selective harmonic elimination inverter

ZHANG Wen-yi^{1,2}, TONG Wei-ming¹, YANG Le-min², XU Hui-ming¹

(1. School of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Selective harmonic elimination inverter can eliminate harmonic effectively in theory, but dead-time increases the harmonic component in output voltage. Based on its operating principle, effect of dead-time on output voltage of inductive load is investigated. Working processes are analyzed on advance-off dead-time manner, lag-on dead-time manner and symmetry dead-time manner, their waveform figures and output harmonics amplitude equations are obtained accordingly. No-dead-time control strategy applied in selective harmonic elimination inverter is presented and the conditions for realizing no-dead-time control are analyzed. Applying no-dead-time control strategy in selective harmonic elimination inverter may eliminate bad influence of dead-time on output voltage.

Key words: selective harmonic elimination; inverter; dead-time effect; no-dead-time control