

单相二极管箝位三电平逆变器死区时间补偿技术

罗 登,林宏健,舒泽亮

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:针对调制过程中的死区时间导致逆变器输出电压和电流畸变、谐波含量增加等问题,提出一种简单可行的死区时间补偿策略。该策略在传统调制方法的“调制信号”与“死区时间处理”之间增加“死区时间补偿”。以单相二极管箝位三电平逆变器为对象,分析死区时间对桥臂输出电平的影响,根据桥臂电流方向选择延迟开关器件驱动信号的上升沿或下降沿来对死区时间进行合理补偿。相比于传统基于特定调制方式的死区时间补偿技术,该补偿策略简便易行并且与调制方式独立,能够灵活应用于各种不同的调制方式。在MATLAB/Simulink 平台上建立仿真模型对该补偿策略进行仿真验证,并设计了基于可编程逻辑器件的死区时间补偿控制核心,搭建物理实验平台进行实验验证。仿真和实验结果验证了所提策略的有效性。

关键词:逆变器;死区时间补偿;桥臂电流;单相二极管箝位三电平逆变器

中图分类号:TM 464

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.08.021

0 引言

随着高速铁路的快速发展,三相逆变器结合三相异步电机的相关控制问题成为研究热点。此外,在环境问题日益突出的今天,光伏发电作为新能源,具有绿色、低碳环保的特点而受到青睐,作为将光伏能源接入电网的逆变器也成为研究热点^[1]。在逆变器的研究热点中,调制过程中的死区时间导致的逆变器输出电压和电流畸变、谐波含量增加等问题成为众多研究热点之一^[2]。文献[3-4]根据伏秒等效原理提出死区时间补偿策略。文献[5-7]以电压空间矢量调制为基础提出了死区时间补偿,导致死区时间补偿与调制方法相关联,补偿策略与其他调制方法不兼容,算法较为复杂。文献[8]提出一种基于功率导通时间实时检测的死区时间补偿方法,该方法可以避免电流过零点直接检测,但是需要额外的硬件电路去检测功率管的导通时间,增加了逆变器的硬件电路复杂度,从而增加逆变器故障的概率。

本文从逆变器桥臂输出电平出发,提出一种根据桥臂电流方向选择延迟驱动信号上升沿或下降沿的死区时间补偿策略。以单相三电平二极管箝位逆变器为对象,分析死区时间对桥臂输出电平的影响,根据桥臂电流选择延迟驱动信号的上升沿或下降沿。该补偿策略与逆变器采用的调制方法独立,可以用于不同调制方法下的死区时间补偿。通过在MATLAB/Simulink 仿真平台上建立单相二极管箝位三电平逆变器仿真模型,对本文提出的死区时间补

偿策略进行仿真验证。最后,搭建物理实验平台,采用可编程逻辑器件设计该死区时间补偿策略控制核心,对死区时间补偿策略进行实验验证。

1 死区机理及其影响分析

单相二极管箝位三电平逆变器拓扑^[9]如图1所示,该结构的优点是单个开关器件承受的最大电压是H桥结构的一半^[10-12]。其中开关器件 S_{11} 与 S_{13} 、 S_{12} 与 S_{14} 的通断状态互补,每个开关器件承受的最大电压为 $U_d/2$,为了避免直流电压 U_d 直接作用到单个开关器件上,互补开关器件在通断状态切换之间必须等待一个过渡时间,即死区时间^[13-15]。例如:由 S_{11} 与 S_{12} 导通、 S_{13} 与 S_{14} 关断状态向 S_{12} 与 S_{13} 导通、 S_{11} 与 S_{14} 关断状态切换时,在 S_{11} 关断后, S_{13} 不能立刻导通,需要等待一个死区时间后 S_{13} 才能导通。

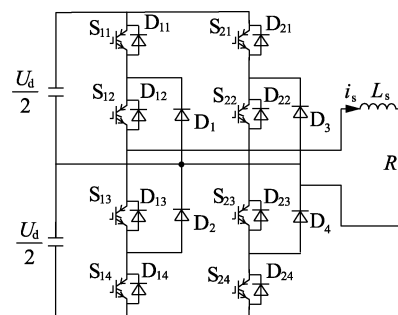


图1 单相二极管箝位三电平逆变器拓扑

Fig.1 Topology of single-phase diode-clamped three-level inverter

以便于表述,单个桥臂的开关状态定义见表1,表中 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{13} 与 S_{14} 分别为开关器件 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{13} 与 S_{14} 的开关状态,1表示导通,0表示关断。死区时间定义为 T_d ,桥臂电流 i_s 定义由桥臂到负载为正向。以左桥臂为例分析死区时间对桥臂输出电平的影响。

收稿日期:2017-08-19;修回日期:2018-04-16

基金项目:国家自然科学基金青年连续面上项目(51477144);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(A092050251516-6)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China for Youth Continuous General Program (51477144) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (A092050251516-6)

表 1 桥臂开关状态定义

Table 1 Definition of bridge arm switch condition

S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	状态定义
1	1	0	0	P
0	1	1	0	O
0	0	1	1	N

死区时间将导致调制输出的电压波形与期望波形不一致,因此,需要对死区时间进行补偿。死区时间对桥臂输出电平的具体影响如表 2 所示。

表 2 死区时间对桥臂电平的影响

Table 2 Influence of dead time on bridge arm voltage level

i_s 方向	开关状态	桥臂电平	死区时间对桥臂电平的影响
$i_s > 0$	P→O	0	无影响
	O→P	0	$U_d/2$ 持续时间减少 T_d
	N→O	$-U_d/2$	$-U_d/2$ 持续时间增加 T_d
	O→N	$-U_d/2$	无影响
$i_s < 0$	P→O	$U_d/2$	$U_d/2$ 持续时间增加 T_d
	O→P	$U_d/2$	无影响
	N→O	0	无影响
	O→N	0	$-U_d/2$ 持续时间减少 T_d

从附录中图 A1 所示的死区时间电流路径可知,在每种死区时间情况下,死区时间对右桥臂输出电平的影响与左桥臂一致,需要注意的是:右桥臂的电流方向与左桥臂的电流方向刚好相反。

2 死区补偿策略

由第 1 节分析可知,在桥臂电流 i_s 为正向时,桥臂开关状态由 O 到 P 切换时,桥臂输出电平 $U_d/2$ 的持续时间将减少 T_d ,桥臂开关状态由 N 到 O 切换时,桥臂输出电平 $-U_d/2$ 持续时间增加 T_d ,因此需要将开关器件 S_{11} 与 S_{12} 的驱动信号的下降沿延迟一个死区时间, S_{13} 与 S_{14} 的驱动信号分别与 S_{11} 与 S_{12} 的驱动信号互补;在桥臂电流 i_s 为负向时,桥臂开关状态由 P 到 O 切换时,桥臂输出电平 $U_d/2$ 持续时间将增加 T_d ,桥臂开关状态由 O 到 N 切换时,桥臂输出电平 $-U_d/2$ 持续时间减少 T_d ,因此需要将开关器件 S_{11} 与 S_{12} 的驱动信号的上升沿延迟一个死区时间, S_{13} 与 S_{14} 的驱动信号分别与 S_{11} 与 S_{12} 的驱动信号互补。死区时间补偿如图 2 中“补偿死区的调制信号”所示,根据表 2 所示的死区时间影响,由“未补偿死区+死区处理的调制信号”可以得出未进行死区时间补偿情况下桥臂的输出电平,如图 2 中“未补偿桥臂电平”所示。将“未补偿桥臂电平”与“理想桥臂电平”比较可知:在桥臂电流 i_s 为正向时, $-U_d/2$ 电平变宽, $U_d/2$ 电平变窄;在桥臂电流 i_s 为负向时, $U_d/2$ 电平变宽, $-U_d/2$ 电平变窄。未补偿死区时间的桥臂输出电平波形发生畸变,导致变换器端口电压畸变,负载电流谐波含量增加。

将“未补偿桥臂电平”与“理想桥臂电平”作比

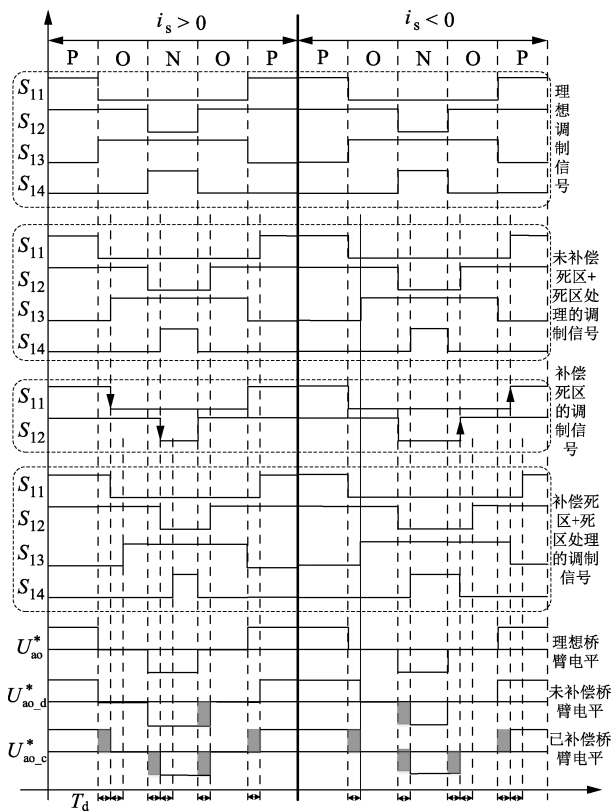


图 2 死区时间补偿原理

Fig.2 Principle of dead time compensation

较,在 i_s 为正向时,桥臂电平由 N 向 O 切换, $-U_d/2$ 电平持续时间增加 T_d ,而在 i_s 为负向时,桥臂电平由 O 向 N 切换时, $-U_d/2$ 电平持续时间减少 T_d ,如图 2 中“未补偿桥臂电平”的阴影部分所示。

将“已补偿桥臂电平”与“理想桥臂电平”比较可知:“已补偿桥臂电平”的每个电平状态持续时间与“理想桥臂电平”持续时间一致,它们之间唯一的差异就是“已补偿桥臂电平”在相位上滞后于“理想桥臂电平”一个死区时间,如图 2 中“已补偿桥臂电平”的阴影部分所示。由于死区时间相较于逆变输出电压信号的周期极小,因此由补偿死区时间造成的相位滞后可以忽略不计。

3 仿真实验

在 MATLAB/Simulink 仿真平台上建立如图 1 所示的单相二极臂三电平逆变器拓扑的仿真模型,死区时间补偿策略对应的仿真模型如图 3 所示。仿真参数如下:输入直流电压为 96 V,逆变输出电压有效值为 45 V,开关频率为 10 kHz,死区时间为 2 μ s。图中, u_{ab} 为逆变器调制信号; S_1 、 S_2 与 S_5 、 S_6 分别为左、右桥臂上 2 个开关器件的调制输出驱动信号; S_{1comp} 、 S_{2comp} 与 S_{5comp} 、 S_{6comp} 分别为 S_1 、 S_2 与 S_5 、 S_6 经过死区时间补偿后的驱动信号; S_{11} — S_{24} 为经过死区补偿后的开关器件驱动信号。

死区时间补偿逆变器输出电压和电流的仿真结

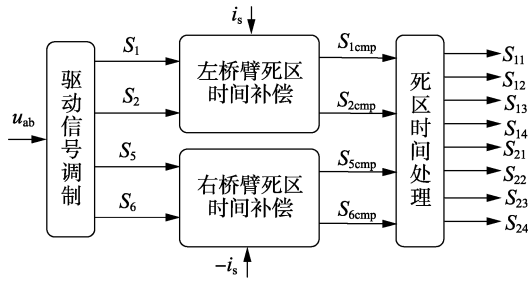


图 3 死区时间补偿仿真模型

Fig.3 Dead time compensation model

果见图 4。对比可知:未进行死区时间补偿时逆变器输出电压、电流正弦度最差,谐波含量最高;进行 50% 死区时间补偿时,逆变器输出电压和电流正弦度改善;进行 100% 死区时间补偿时,逆变器输出电压和电流正弦度最高,谐波含量较低。仿真结果说明死区补偿控制策略是有效可行的。图 5 为 3 种死区时间补偿情况下的逆变器输出电流总谐波畸变率 (THD) 分析,可知由死区时间导致的输出电流谐波主要为奇数次谐波。

4 实验验证

为了进一步验证前述死区时间补偿策略的有效性,根据图 1 所示的单相二极管箝位三电平逆变器拓扑搭建附录中图 A2 所示的物理实验平台,选用 Altera 公司第三代 FPGA 芯片 EP3C55F484I7,采用 Verilog 硬件电路设计语言设计前述死区时间补偿策略控制核心。实验参数如下:输入直流电压为 96 V,逆变输出电压有效值为 45 V,输出滤波电感为 2 mH,负载为 80 Ω ,开关频率为 7 kHz,死区时间为 2 μ s。

图 6 为逆变器工作时桥臂电平与驱动信号的波

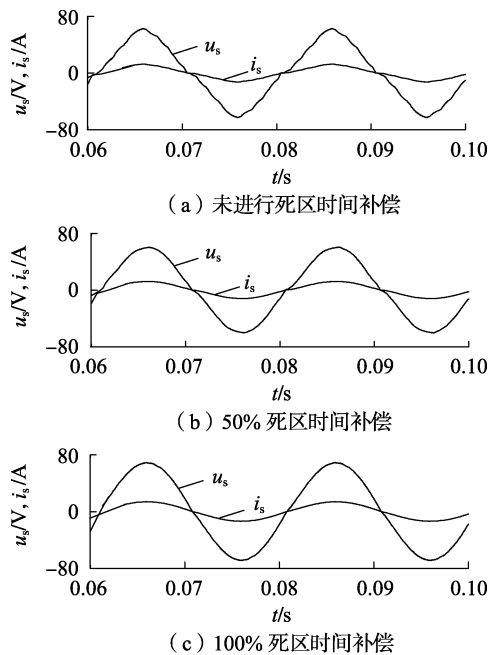
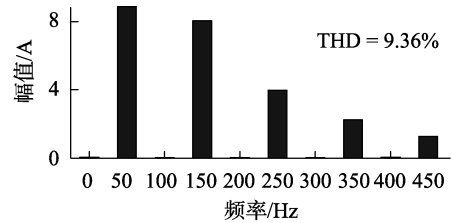
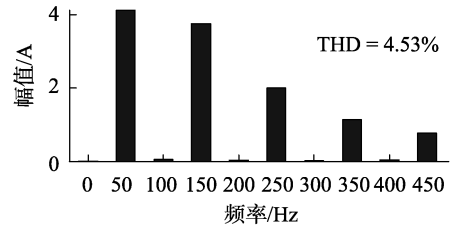


图 4 死区时间补偿仿真结果

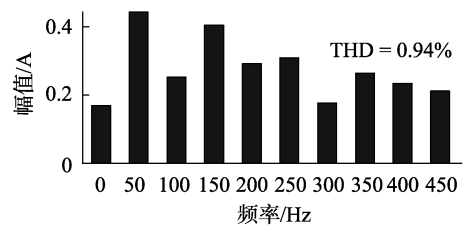
Fig.4 Simulative results of dead time compensation



(a) 未补偿死区时间



(b) 50% 死区时间补偿



(c) 100% 死区时间补偿

图 5 逆变器输出电流 THD

Fig.5 Inverter output current THD

形。图 7、图 8 分别为桥臂电平为正、负时,未补偿死区时间和已补偿死区时间的驱动信号波形。通过比较“未补偿死区时间”与“已补偿死区时间”的桥臂电平可以看出:死区时间补偿后,桥臂电平变宽,克服了由于死区时间导致的桥臂电平脉宽变窄的问题。

通过实验进一步说明死区时间补偿的原理与效果,结合 Quartus 内嵌工具 SignalTap 提取出控制器内部的相关驱动信号,如附录中图 A3 所示。单个桥臂的 4 路驱动信号 S_{11} — S_{14} 都分别给出了理想驱动信号、未补偿死区时间的驱动信号和已补偿死区时间的驱动信号,并根据驱动信号计算出对应的理想桥臂电平、未补偿死区时间的桥臂电平和已补偿死区时间的桥臂电平。选取其中一个桥臂电平脉宽进行放大分析,如附录中图 A3 左侧所示,可知:未补偿桥臂电平的脉宽较理想桥臂电平脉宽变窄一个

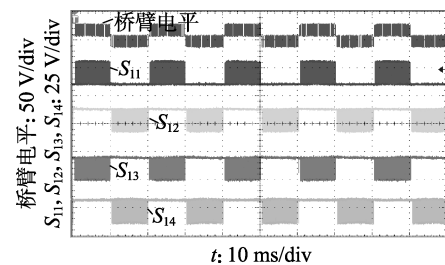


图 6 逆变器桥臂电平与驱动信号

Fig.6 Inverter arm level and drive signal

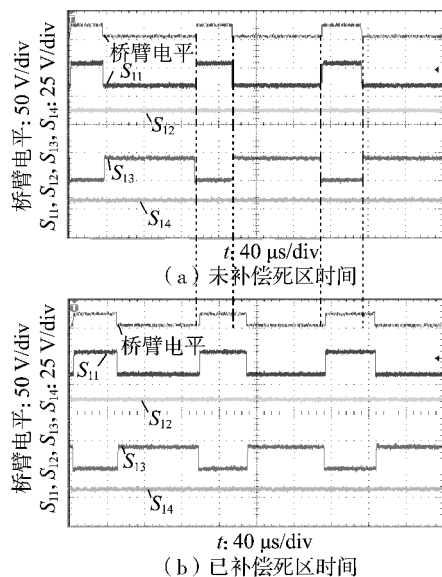


图 7 正桥臂电平时的驱动信号实验波形

Fig.7 Experimental waveforms of drive signal when arm level is positive

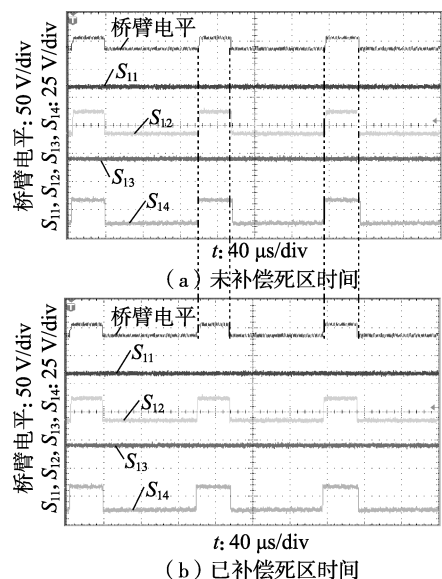
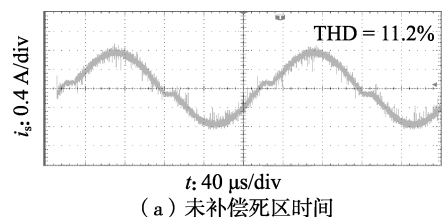


图 8 负桥臂电平时的驱动信号实验波形

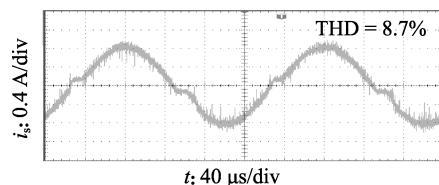
Fig.8 Experimental waveforms of drive signal when arm level is negative

死区时间;已补偿桥臂电平脉宽与理想桥臂电平脉宽相等,仅滞后一个死区时间的相位,与理论分析结果一致。

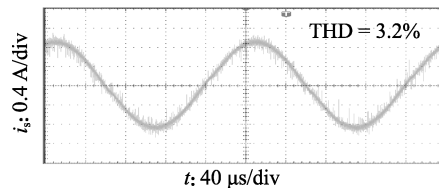
逆变器输出电流实验结果见图 9,其中(a)~(c)分别为未对逆变器开关信号进行死区时间补偿、对死区时间进行 50%补偿、对死区时间进行 100%补偿时



(a) 未补偿死区时间



(b) 死区时间补偿 50%



(c) 死区时间补偿 100%

图 9 死区时间补偿实验结果

Fig.9 Experimental results of dead time compensation

的电流实验结果,电流 THD 分别为 11.2%、8.7%、3.2%。实验结果与仿真结果一致,进一步验证了前述死区补偿控制策略的有效性和可行性。

5 结论

针对调制过程中的死区时间导致逆变器输出电压和电流畸变、谐波含量增加的问题,提出一种简单可行的死区时间补偿策略。该补偿策略先根据桥臂电流方向对调制信号进行死区时间补偿,再进行死区时间处理。与传统死区时间补偿技术相比,本文提出的死区补偿策略不仅能有效克服死区时间导致的逆变器输出电压、电流畸变问题且简便易行,与调制方式独立,能灵活应用于各种不同调制方式下,具有较好的灵活性和优越的性能。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 周羽,李槐树,黄克峰.带输出滤波器的永磁同步电机系统的逆变器最大功率因数研究[J].电力自动化设备,2014,34(5):93-97.
- [2] ZHOU Yu, LI Huaishu, HUANG Kefeng. Maximum power factor of inverter for PMSM system with output filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 93-97.
- [3] 胡文彪,夏立,向东阳,等.基于逆变器直流侧电流和融合算法的感应电机转子故障诊断方法[J].电力自动化设备,2011,31(8):38-43.
- [4] HU Wenbiao, XIA Li, XIANG Dongyang, et al. Rotor fault diagnosis based on DC-side current and fusion algorithm for induction motors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 38-43.
- [5] 周京华,贾斌,章小卫,等.三电平逆变器死区补偿策略研究[J].电机与控制学报,2013,17(5):69-74.
- [6] ZHOU Jinghua, JIA bin, ZHANG Xiaowei, et al. Research on dead-time compensation strategy of three-level inverter[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(5): 69-74.
- [7] 黄文卿,张兴春,张幽彤.一种交流逆变器死区效应半周期补偿方法[J].电机与控制学报,2014,17(5):24-29.
- [8] HUANG Wenqing, ZHANG Xingchun, ZHANG Youtong. Inverter dead time compensation method based on half PWM period control

- [J]. Electric Machines and Control, 2014, 17(5): 24-29.
- [5] 肖海峰, 刘海龙, 贺昱曜, 等. 基于电压空间矢量控制 PMSM 系统新型死区补偿方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 114-119.
XIAO Haifeng, LIU Hailong, HE Yuyao, et al. Study of a dead-time compensation method for PMSM drive based on voltage space vector control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 114-119.
- [6] 周华伟, 温旭辉, 赵峰, 等. 一种新颖的电压源逆变器自适应死区补偿策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 26-32.
ZHOU Huawei, WEN Xuhui, ZHAO Feng, et al. A novel adaptive dead-time compensation strategy for VSI[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 26-32.
- [7] 何正义, 季学武, 瞿文龙. 一种新颖的基于死区时间在线调整的 SVPWM 补偿算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 42-47.
HE Zhengyi, JI Xuewu, QU Wenlong. A novel SVPWM compensation strategy based on regulating dead time on-line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 42-47.
- [8] 刘军锋, 李叶松. 死区对电压型逆变器输出误差的影响及其补偿[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 117-122.
LIU Junfeng, LI Yesong. Dead-time influence on output error of voltage source inverter and compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 117-122.
- [9] 王树文, 单硕硕, 张洋, 等. 改进型准 Z 源逆变器[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 142-150.
WANG Shuwen, SHAN Shuoshuo, ZHANG Yang, et al. Improved quasi-Z-source inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 142-150.
- [10] 汪飞, 雷志方, 梁东, 等. 单相逆变器低频脉动电流抑制机理分析与方法综述[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 184-192.
WANG Fei, LEI Zhifang, LIANG Dong, et al. Analysis of mechanism and review of methods for low-frequency ripple current suppression of single-phase inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 184-192.
- [11] 刘军娜, 赵成勇, 李广凯. 二极管箝位式三电平 VSC 损耗分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 96-100.
LIU Junna, ZHAO Chengyong, LI Guangkai. Power loss analysis of diode-clamped three-level VSC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 96-100.
- [12] 陈昕, 张昌华, 黄琦. 引入功率微分项的并网下垂控制逆变器小信号建模与分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 151-157.
CHEN Xin, ZHANG Changhua, HUANG Qi. Small-signal modeling with power differential term for droop control inverter and analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 151-157.
- [13] 肖华锋, 杨晨, 谢少军. NPC 三电平并网逆变器共模电流抑制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(33): 23-30.
XIAO Huafeng, YANG Chen, XIE Shaojun. NPC three-level grid-connected inverter with leakage current suppression[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 23-30.
- [14] 窦真兰, 程孟增, 李素英, 等. 三电平 NPC 整流器控制及中点电位平衡控制技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 32-38.
DOU Zhenlan, CHENG Mengzeng, LI Suying, et al. Decoupling control and neutral-point-potential balance control for three-level neutral-point-clamped rectifier[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 32-38.
- [15] 王顺亮, 宋文胜, 冯晓云. 一种负载不平衡情况下单相三电平脉冲整流器中点电位控制方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 79-86.
WANG Shunliang, SONG Wensheng, FENG Xiaoyun. Neutral point voltage control for single-phase three-level pulse rectifier with unbalanced loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 79-86.

作者简介:



罗登

罗登(1989—),男,四川泸州人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子变压器、双向隔离 DC-DC 变化器、动车组辅助变流器、蓄电池充电机(E-mail: lmsgneec105@163.com);

林宏健(1990—),男,海南澄迈人,博士研究生,主要研究方向为电力系统、电力电子变压器、同相供电;

舒泽亮(1979—),男,四川德阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为多电平变换装置、同相供电系统及电力电子应用中的数字信号处理技术等。

Dead time compensation technology of single-phase diode-clamped three-level inverter

LUO Deng, LIN Hongjian, SHU Zeliang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the deficiencies of output current and voltage distortions and harmonic content increase caused by dead time in the modulation process, a simple and feasible dead time compensation strategy is proposed. This strategy adds dead time compensation between the modulation signal and dead time processing of the traditional modulation method. Taking the single-phase diode-clamped three-level inverter as an example, the influence of dead time on the arm output level is analyzed, and the rising edge or falling edge is relayed based on the arm current direction, in order to reasonably compensate the dead time. Compared with the traditional dead time compensation techniques based on specific modulation mode, the proposed strategy is simple, independent to the modulation mode and can be flexibly applied to different modulation modes. The simulation model is established with MATLAB/Simulink, the control core of dead time compensation environment is designed based on programmable logic device, and the physical experiment platform is constructed. The simulative and experimental results verify the effectiveness of the proposed dead time compensation strategy.

Key words: electric inverters; dead time compensation; bridge arm current; single-phase diode-clamped three-level inverter

附录

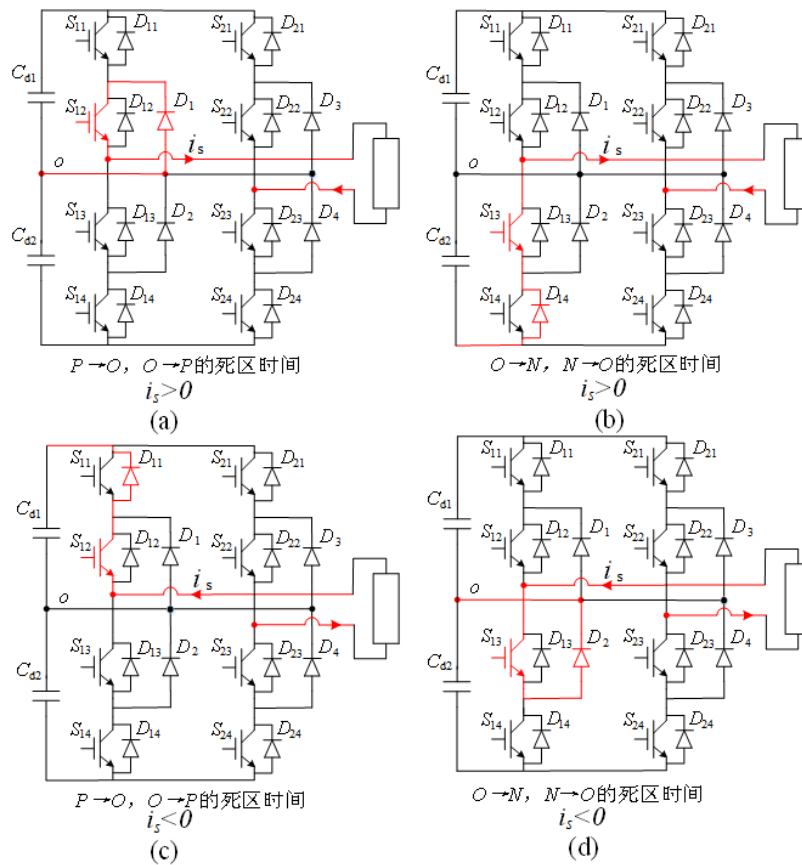


图 A1 死区时间电流路径

Fig.A1 Current path of inverter in dead time

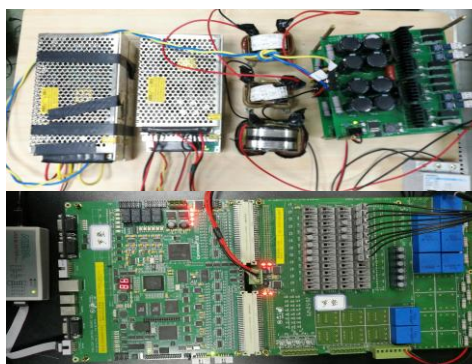


图 A2 死区时间补偿实验平台

Fig.A2 Experimental platform of dead time compensation

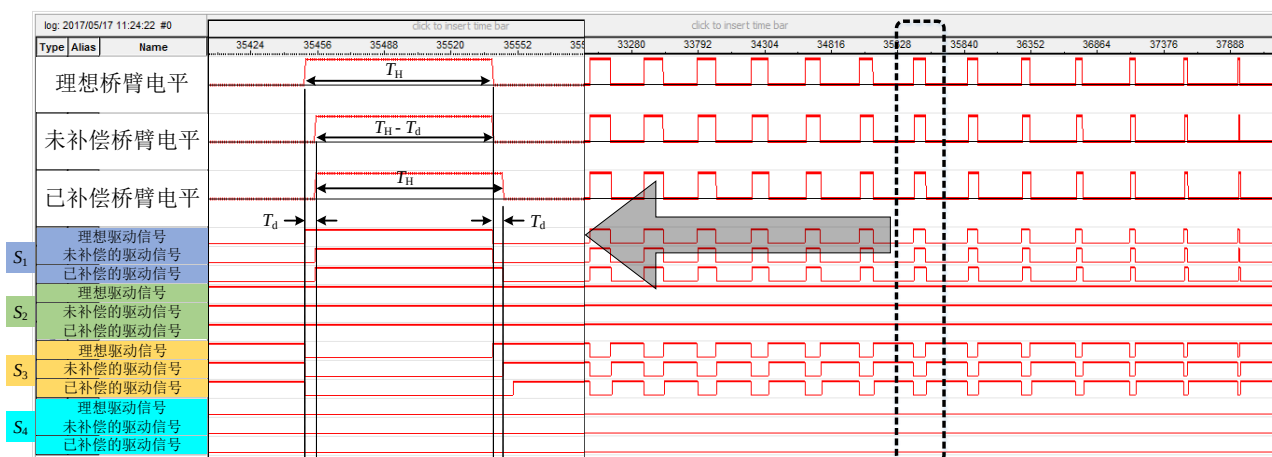


图 A3 死区时间补偿控制器输出驱动信号

Fig.A3 Output driver signal in dead time compensation controller