基于特定单元开关管动作延迟的 ANPC 不期望电平消除方法

杨若雨， 王琛琛， 陆格野， 刘明月， 李赵烨， 邵葳
（北京交通大学 电气工程学院，北京 100044）

摘 要：有源中点箝位型（ANPC）变换器死区会带来不期望电平输出以及开关管过压问题，导致开关管寿命缩短，影响设备安全。针对死区时间内 5L-ANPC、3L-ANPC 变换器不期望电平问题，提出了一种基于特定单元开关管动作延迟的方法。根据电流极性以及参与切换的状态延迟特定互补开关管动作，能完全消除所有死区带来的不期望电平。针对死区时间 5L-ANPC、3L-ANPC 变换器开关管过压问题，在考虑开关管结电容的基础上，计算死区时间内开关管承受电压，确定出现开关管过压的切换及过压量，采用并联吸收电容的方法抑制开关管过压问题。最后，在 5L-ANPC、3L-ANPC实验平台上验证了方法的有效性。所提方法无需增加额外开关管，实现过程简单适用于解决其他拓扑的相似问题。

关键词：三电平；五电平；有源中点箝位型变换器；死区不期望电平；死区开关管过压；吸收电容
DOI：10.15938/j.emc.2025.04.015
中图分类号：TM464 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-449X(2025)04-0158-13

ANPC unexpected level elimination method based on specific unit switching tube action delay

YANG Ruoyu， WANG Chenchen， LU Geye， LIU Mingyue， LI Zhaoyang， SHAO Wei
（School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China）

Abstract: The dead time of active neutral point clamped (ANPC) converters can lead to unexpected level output and overvoltage issues in the switching tubes, resulting in a shortened lifespan of the switching tubes and affecting equipment safety. A method based on specific unit switching transistor action delay was proposed to address the problem of unexpected levels in 5L-ANPC and 3L-ANPC converters during dead time. Based on the polarity of the current and the delay of specific complementary switching transistor actions involved in switching, all unexpected levels caused by dead times can be completely eliminated. In response to the overvoltage problem of switching tubes in 5L-ANPC and 3L-ANPC converters during dead time, considering the junction capacitance of the switching tubes, the voltage borne by the switching tubes during the dead time was calculated to determine the switching and overvoltage amount that may occur. The overvoltage problem of the switching tubes was suppressed by using a parallel ab-

收稿日期：2024-07-04
基金项目：北京自然科学基金(3222056)；国家自然科学基金青年科学基金(52207208)
作者简介：杨若雨(1997—)，女，硕士，研究方向为多电平变换器；
王琛琛(1981—)，男，博士，教授，博士生导师，研究方向为大功率电能变换技术；
陆格野(1993—)，女，博士，副教授，研究方向为新能源系统与装置监测与控制；
刘明月(1997—)，女，硕士，研究方向为多电平变换器；
李赵烨(1998—)，男，博士研究生，研究方向为多电平变换器；
邵 葳(2000—)，女，硕士研究生，研究方向为多电平变换器。
通信作者：杨若雨

sorption capacitor method. Finally, effectiveness of the method was verified on 5L-ANPC and 3L-ANPC experimental platforms. The proposed method does not require the addition of additional switching tubes, and the implementation process is simple and suitable for solving similar problems in other topologies.

Keywords: three level; five level; active neutral point converter; dead time level; dead time switch tube overvoltage; absorption capacitance

0　引　言

有源中点箝位型变换器(active neutral point converter,ANPC)具有便于往多电平方向拓展、电容电压控制简单的优势[1-5],在光伏并网以及电机驱动等方面得到广泛应用[6-10]。为了防止电压源型变换器上、下管直通,通常在互补开关管中加入死区。这会引起非受控死区能量注入,造成谐波增加、输出电流畸变、开关管过压等问题,影响设备安全稳定运行[11-12]。对于 ANPC 变换器而言,死区会造成两种比较严重的问题:一方面死区期间变换器会输出不期望电平;另一方面死区期间某些开关管承受的电压会超出额定耐压。

针对死区不期望电平,文献[13]在传统 5L-ANPC 的基础上,于悬浮电容支路加入一个开关管,可增加零电平状态,但会增加开关管数量以及导通损耗。文献[14]加入新的过渡状态来实现电压正负输出间的切换,但实现过程复杂。文献[15]采用两种非零电平状态实现正负电平间的切换,但存在非相邻电平间的跳变问题。文献[16-17]根据检测到的电流方向,将一对互补开关管分为相关与无关两类,并使无关开关管一直处于关断状态,从而取消死区的设置,避免死区效应。但在电流过零点处存在零电流箝位效应,会造成电流波形失真。针对开关过压问题,文献[18]提出两种方法:一种在电压极性反转的死区时间里,保持有过压风险的开关处于导通状态,以避免过电压发生,仅对部分切换有效。另一种从硬件上并联吸收电容,对所有切换有效,但存在原理分析不准确的问题。

以 5L-ANPC 与 3L-ANPC 为例详细分析两类死区问题的成因,并提出相应方法进行解决。针对变换器输出不期望电平问题,根据输出电流方向,在每种开关状态下将换流单元分为相关与无关两类。利用无关单元中开关管的通断不影响输出电平的特点,构造中间状态。在输出不期望电平的切换中插入构造的中间状态,消除不期望电平。此过程只需简单地延迟特定单元开关管动作即可实现。针对第二类开关管承受电压超出额定耐压问题,在考虑开关管结电容的基础上,分析死区时间内开关管承受电压超出量。采用并联吸收电容的方法抑制,并计算可行的吸收电容最小值。所提方案无需额外增加开关管,同时,其简单的实现过程也使该方法适用于解决其他拓扑的相似问题。

1　ANPC 工作原理

根据 ANPC 常用的开关状态将动作相同或相反的开关管分成几组换流单元。如图 1(a),5L-ANPC 的单相结构共 8 个开关管分别用 T_{xi} 和 T'_{xi} 表示,其中 $i \in \{1,2,3,4\}$,x 为 a、b、c 三相中的一相。

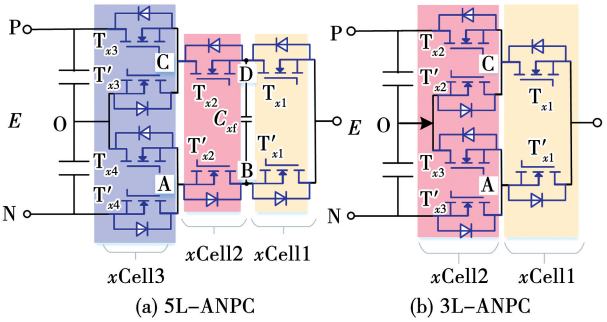


图 1　ANPC 单相结构图

Fig. 1　Scheme of single phase ANPC topology

表 1 为 5L-ANPC 拓扑的开关状态,表 2 为 3L-ANPC 拓扑的开关状态。根据表 1 中的 8 种常用开关状态,可将开关管初步分成 4 对互补动作开关管,开关函数为:

$$S_{xi} = \begin{cases} 1, (T_{xi} \text{ 导通}, T'_{xi} \text{ 关断}); \\ 0, (T_{xi} \text{ 关断}, T'_{xi} \text{ 导通})。 \end{cases} \tag{1}$$

继续分析 8 种开关状态,容易发现 S_{x3} 与 S_{x4} 相等,可将 5L-ANPC 分为 xCell3、xCell2、xCell1 3 个换流单元,使用 S_{x3}、S_{x2}、S_{x1} 3 个开关信号控制。

3L-ANPC 与之相同。

为保持 ANPC 的多电平优势,开关状态不允许在非相邻电平间切换,图 2 分别给出 5L-ANPC 和

3L-ANPC 的开关状态切换图。

表 1 5L-ANPC 拓扑的开关状态

Table 1 Switching state for a 5L-ANPC topology

常用状态	开关组合编码			电平
	$S_{x3}(S_{x4})$	S_{x2}	S_{x1}	
$S_x(0)$	0	0	0	$-E/2$
$S_x(1)$	0	0	1	$-E/4$
$S_x(2)$	0	1	0	$-E/4$
$S_x(3)$	0	1	1	0
$S_x(4)$	1	0	0	0
$S_x(5)$	1	0	1	$E/4$
$S_x(6)$	1	1	0	$E/4$
$S_x(7)$	1	1	1	$E/2$

表 2 3L-ANPC 拓扑的开关状态

Table 2 Switching state for a 3L-ANPC topology

常用状态	开关组合编码		电平
	$S_{x2}(S_{x3})$	S_{x1}	
N	0	0	$-E/2$
OU	0	1	0
OL	1	0	0
P	1	1	$E/2$

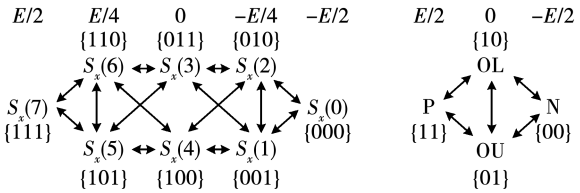


图 2 ANPC 常用开关状态切换

Fig. 2 ANPC frequently used switch state switching

2 ANPC 死区不期望电平问题

2.1 ANPC 换流单元分类

MOSFET 具有当电流方向与其体二极管方向一致时,可在无导通信号情况下保持导通的特点。借此将 ANPC 开关管所在单元分为相关与无关两类:在输出电流方向确定时,若某单元中有导通情况影响输出电平的开关管,称为相关单元,否则称为无关单元。如图 3 所示,对于 5L-ANPC 正向输出电流下的 $S_x(4)$ 状态,xCell3 为相关单元,xCell1、xCell2 为无关单元。

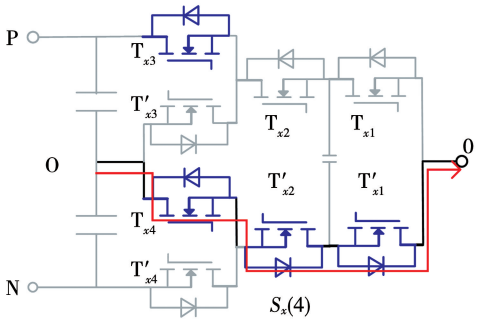


图 3 5L-ANPC 的 $S_x(4)$ 状态电流通路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of $S_x(4)$ state current path of 5L-ANPC

为方便分析,给出 5L-ANPC、3L-ANPC 各状态下的无关单元如表 3、表 4 所示。

表 3 5L-ANPC 各状态下的无关单元

Table 3 Unrelated units in each state of 5L-ANPC

状态名	电流为正时无关单元	电流为负时无关单元
$S_x(0)$	xCell1、xCell2、xCell3	无
$S_x(1)$	xCell2、xCell3	xCell1
$S_x(2)$	xCell1、xCell3	xCell2
$S_x(3)$	xCell3	xCell1、xCell2
$S_x(4)$	xCell1、xCell2	xCell3
$S_x(5)$	xCell2	xCell1、xCell3
$S_x(6)$	xCell1	xCell2、xCell3
$S_x(7)$	无	xCell1、xCell2、xCell3

表 4 3L-ANPC 各状态下的无关单元

Table 4 Unrelated units in each state of 3L-ANPC

状态名	电流为正时无关单元	电流为负时无关单元
N	xCell1、xCell2	无
OU	xCell2	xCell1
OL	xCell1	xCell2
P	无	xCell1、xCell2

2.2 ANPC 死区不期望电平问题分析

实际上 ANPC 变换器死区时间的不期望电平问题是由于动作单元不同时属于切换前后两状态中某一个的无关单元造成的。

如图 4(a)所示,正向电流下,当 5L-ANPC 发生 $S_x(3)\rightarrow S_x(4)$ 切换时,所有单元均动作,其中 xCell3 仅为 $S_x(3)$ 状态的无关单元,xCell1、xCell2 仅为 $S_x(4)$ 状态的无关单元,会输出不期望电平。而图 4(b)所示,正向电流下当 5L-ANPC 发生 $S_x(4)\rightarrow S_x(5)$ 切换时,xCell1 是动作单元,属于 $S_x(4)$ 状态

的无关单元死区输出电平与 $S_x(4)$ 一致,无不期望电平问题。

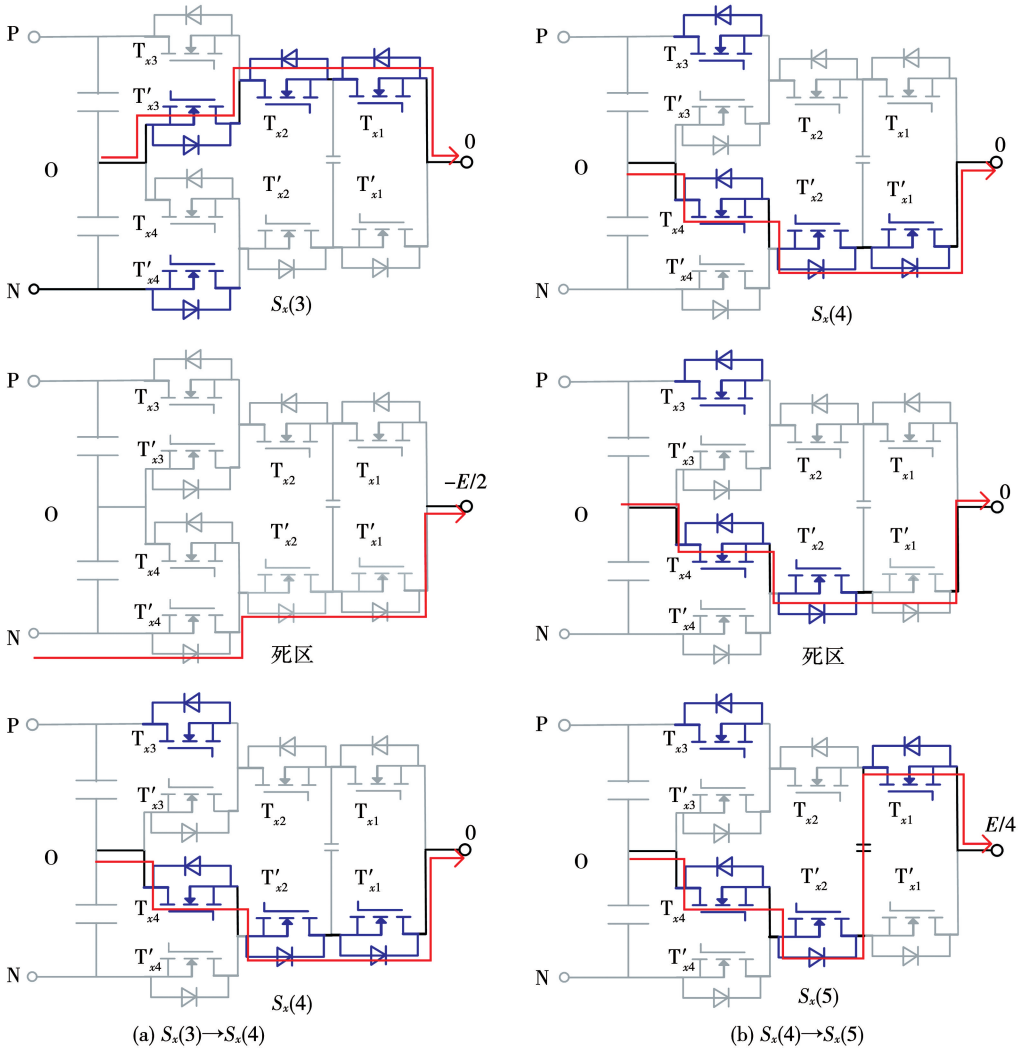


图 4　正向电流下 5L-ANPC 的代表性切换

Fig. 4　Representative switching of 5L-ANPC under forward current

2.3　ANPC 死区不期望电平消除

为消除不期望电平,考虑引入无关单元关断的新状态作为过渡。以 $S_x(3)\rightarrow S_x(4)$ 切换为例:如图 5(a)所示,当电流方向为正时,根据表 4,$S_x(3)$ 无关单元中参与动作的为 xCell3,关断此单元所有开关管获得“$S_x(3)-S_x(4)$ 中间状态 1”;$S_x(4)$ 无关单元中参与动作的为 xCell1、xCell2,关断两单元所有开关管获得“$S_x(3)-S_x(4)$ 中间状态 2”。两种中间状态均输出零电平,且二者切换时不会发生短路,可直接切换。同样,当电流方向为负时可得图 5(b)所示中间状态。

绘制 $S_x(3)\rightarrow S_x(4)$ 添加新状态后切换过程的开关信号,如图 6 所示,可以发现实际实现时,只需要在输出电流为正时使 xCell1、xCell2 延迟一个死区时间动作,在输出电流为负时使 xCell3 延迟一个死区时间动作即可消除不期望电平问题。表 5、表 6 分别给出对于 5L-ANPC、3L-ANPC 应用此方法时每种情况下需要延迟动作的单元。

3　ANPC 死区开关管过压问题

除了不期望电平之外,死区还会造成 ANPC 开关管过压问题,影响设备安全。

3.1　ANPC 死区开关管承受电压分析

对于 5L-ANPC 而言,xCell1、xCell3 中的每对开关管均有电容箝位,在电容电压正常的情况下它们的电压不会超出额定耐压,仅有 xCell2 开关管存在

电压超出额定耐压的可能。xCell2 右侧与电容相连,如图 1,D 点电位与 B 点电位始终相差电容电压,与 xCell1 开关管通断无关,所以 xCell2 承受电压是否超出额定耐压也与 xCell1 开关管通断无关,下述分析不考虑 xCell1,仅考虑 xCell2、xCell3 动作情况。

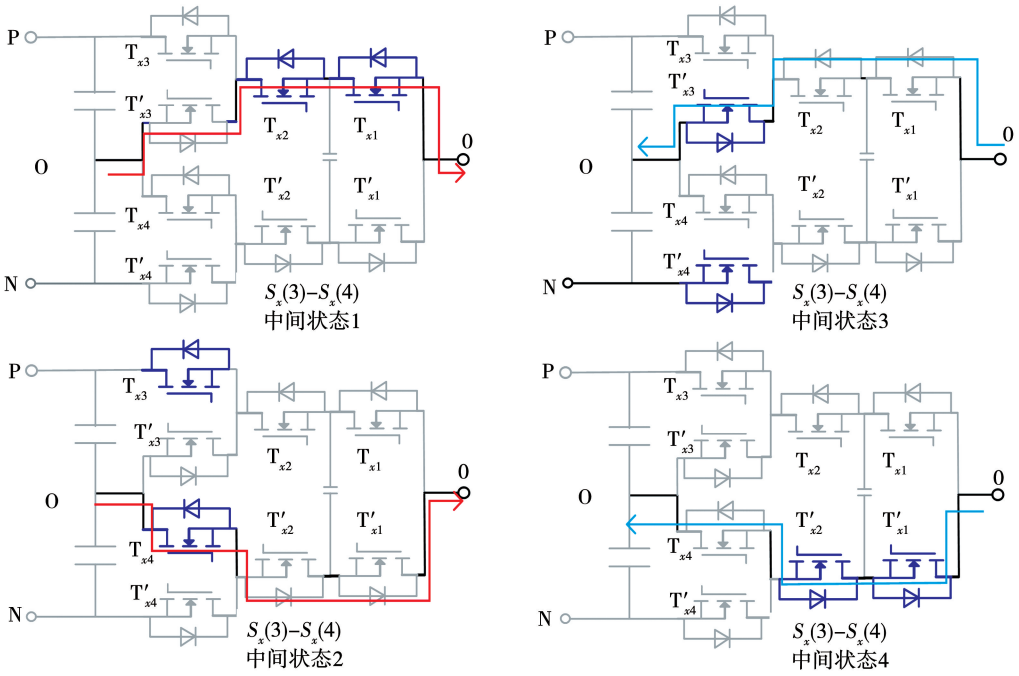


图 5 $S_x(3)\rightarrow S_x(4)$ 加入中间状态

Fig. 5 $S_x(3)\rightarrow S_x(4)$ added to intermediate state

表 5 5L-ANPC 死区不期望电平消除方法

Table 5 Dead time error level elimination of 5L-ANPC

切换名	$i_x>0$ 延迟动作单元	$i_x<0$ 延迟动作单元
$S_x(3)\rightarrow S_x(4)$	xCell1、xCell2	xCell3
$S_x(4)\rightarrow S_x(3)$	xCell3	xCell1、xCell2
$S_x(3)\rightarrow S_x(5)$	xCell2	xCell3
$S_x(5)\rightarrow S_x(3)$	xCell3	xCell2
$S_x(3)\rightarrow S_x(6)$	xCell1	xCell3
$S_x(6)\rightarrow S_x(3)$	xCell3	xCell1
$S_x(2)\rightarrow S_x(4)$	xCell2	xCell3
$S_x(4)\rightarrow S_x(2)$	xCell3	xCell2
$S_x(1)\rightarrow S_x(4)$	xCell1	xCell3
$S_x(4)\rightarrow S_x(1)$	xCell3	xCell1
$S_x(1)\rightarrow S_x(2)$	xCell1	xCell2
$S_x(2)\rightarrow S_x(1)$	xCell2	xCell1
$S_x(5)\rightarrow S_x(6)$	xCell1	xCell2
$S_x(6)\rightarrow S_x(5)$	xCell2	xCell1

若仅 xCell3 动作,如图 7 死区时间内此单元开关管全部关断,若 T_{x2} 导通,T'_{x2} 电压仅在电流为负时存在超出额定耐压的可能;若 T'_{x2} 导通,T_{x2} 电压仅在电流为正时存在超出额定耐压的可能。

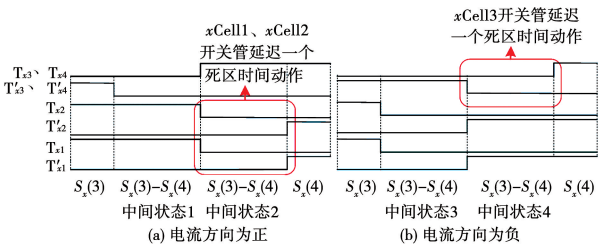


图 6 $S_x(3)\rightarrow S_x(4)$ 加入中间状态的开关信号

Fig. 6 $S_x(3)\rightarrow S_x(4)$ switch signal with intermediate state

表 6 3L-ANPC 死区不期望电平消除方法

Table 6 Dead time error level elimination of 3L-ANPC

切换名	$i_x>0$ 延迟动作单元	$i_x<0$ 延迟动作单元
OU→OL	xCell1	xCell2
OL→OU	xCell2	xCell1

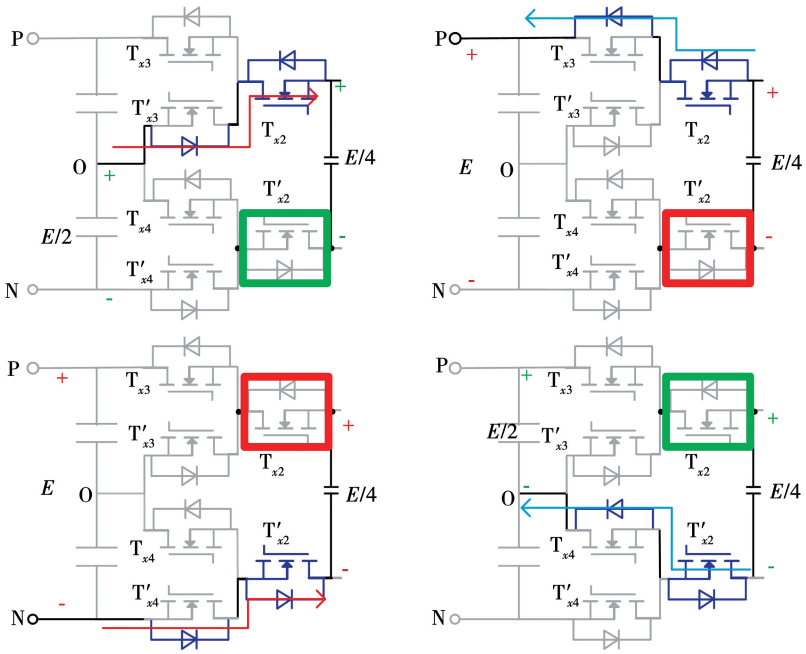


图 7　仅 *x*Cell3 开关管动作的承受电压分析

Fig. 7　Voltage stress analysis of only *x*Cell3 action

同样若仅 *x*Cell2 动作,死区时间内 *x*Cell2 开关管全部关断,开关管电压均不会超出额定耐压 $E/4$;若 *x*Cell2、*x*Cell3 同时动作时,死区时间内两单元开关管全部关断,T_{x2} 或 T'_{x2} 电压存在超出额定耐压 $E/4$ 的可能,分析方法与前述相同不再赘述。至此,能够得到可能发生开关管电压超额定耐压问题的切换,为了分析承受电压具体值,确认是否出现问题,开关管的结电容不可忽略,将其等效成大小为 C 且与开关管并联的输出电容,绘制拓扑如图 8 所示。

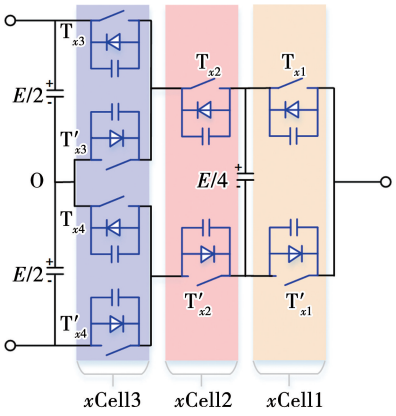


图 8　5L-ANPC 等效拓扑

Fig. 8　5L-ANPC equivalent topology

图 9 绘制电流为正 $S_x(4)\rightarrow S_x(3)$ 切换死区开关耐压变化过程。$S_x(4)$ 状态下各开关管承受电压在图中标出。由 $S_x(4)$ 切换到死区瞬间会发生结电容的充放电,假设此过程中 T_{x2}、T_{x3}、T_{x4} 承受电压改变量分别为 Δu_{Tx2}、Δu_{Tx3}、Δu_{Tx4},结合 $S_x(4)$ 状态开关管承受电压,可以得到此过程 T_{x2}、T_{x3}、T_{x4}、T'_{x3} 承受电压在图 9(b)中标出。根据电容的电压与电流关系式,得到流过 T_{x1}、T_{x2}、T'_{x2} 的电流,在图 9(c)中标出。

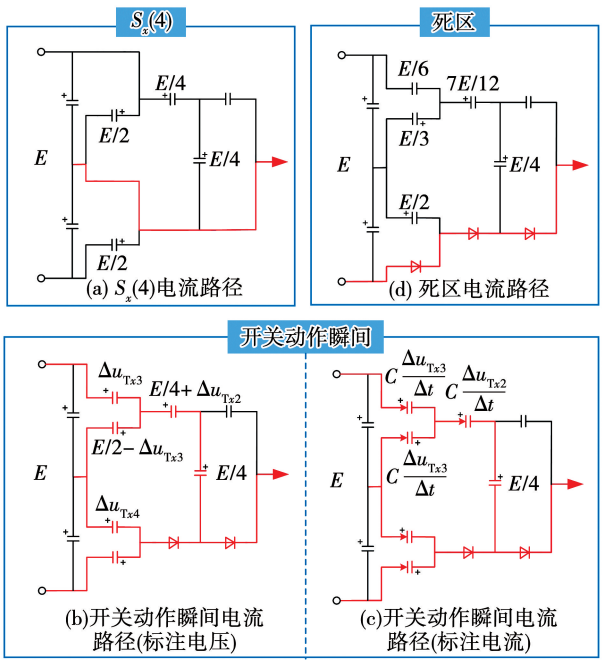


图 9　电流为正时 $S_x(4)\rightarrow S_x(3)$ 切换死区开关耐压变化

Fig. 9　Withstand voltage change process of $S_x(4)\rightarrow S_x(3)$ switching dead time when the current is positive

在图 9(b)中应用 KVL 可以得到

$$E/2 - \Delta u_{Tx3} + \Delta u_{Tx4} = E/2 + \Delta u_{Tx2}。 \quad (2)$$

在图 9(c)中应用 KCL 可以得到

$$2C\frac{\Delta u_{Tx3}}{\Delta t} = C\frac{\Delta u_{Tx2}}{\Delta t}\Delta u_{Tx4} = E/2。 \quad (3)$$

结电容充放电结束后,死区时间内,T_{x4} 承受电压将变为 $E/2$,可以得到

$$\Delta u_{Tx4} = E/2。 \quad (4)$$

式(2)~式(4)联立可以得到:

$$\left.\begin{aligned}\Delta u_{Tx2} &= E/3;\\ \Delta u_{Tx3} &= E/6。\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

根据图 9(b)计算死区时间内各开关管耐压,最终结果在图 9(d)给出,其中 T_{x2} 承受电压为 $7E/12$,约为额定耐压的 2.33 倍,超出 133%。

使用上述方法分析其他情况,可得 5L-ANPC 开关管承受电压超出量如表 7 所示。对于 3L-ANPC 也可采用同样的方法讨论开关管承受电压超出量,由于篇幅的限制,仅给出讨论结果如表 8 所示。

表 7 5L-ANPC 开关管电压超出量

Table 7 Excess of voltage on 5L-ANPC switching tubes

切换	电流方向	过压开关	承受电压	超出量/%
$S_x(3)\rightarrow S_x(4)$	负	T'_{x2}	$7E/12$	133
$S_x(3)\rightarrow S_x(4)$	正	T_{x2}	$E/4$	0
$S_x(4)\rightarrow S_x(3)$	正	T_{x2}	$7E/12$	133
$S_x(4)\rightarrow S_x(3)$	负	T'_{x2}	$E/4$	0
$S_x(3)\rightarrow S_x(5)$	正	T_{x2}	$E/4$	0
$S_x(3)\rightarrow S_x(5)$	负	T'_{x2}	$7E/12$	133
$S_x(5)\rightarrow S_x(3)$	正	T_{x2}	$E/4$	0
$S_x(5)\rightarrow S_x(3)$	负	T'_{x2}	$7E/12$	133
$S_x(3)\rightarrow S_x(6)$	负	T'_{x2}	$7E/12$	133
$S_x(6)\rightarrow S_x(3)$	负	T_{x2}	$E/4$	0
$S_x(2)\rightarrow S_x(4)$	正	T_{x2}	$E/4$	0
$S_x(2)\rightarrow S_x(4)$	负	T'_{x2}	$7E/12$	133
$S_x(4)\rightarrow S_x(2)$	正	T_{x2}	$7E/12$	133
$S_x(4)\rightarrow S_x(2)$	负	T'_{x2}	$E/4$	0
$S_x(1)\rightarrow S_x(4)$	正	T_{x2}	$E/4$	0
$S_x(4)\rightarrow S_x(1)$	正	T_{x2}	$7E/12$	133

3.2 ANPC 死区开关管过压抑制

对于 5L-ANPC 上述开关管承受电压超额定耐压问题可以通过并联吸收电容解决,并联位置如图 10所示,设其容值为 C_w。以负载电流为正时,5L-ANPC 发生 $S_x(4)\rightarrow S_x(3)$ 切换为例分析可行原因。

表 8 3L-ANPC 开关管电压超出量

Table 8 Excess of voltage on 3L-ANPC switching tubes

切换	电流方向	过压开关	承受电压	超出量/%
P→OU	负	T'_{x1}	$E/2$	0
OU→P	负	T'_{x1}	$5E/6$	67
N→OL	正	T_{x1}	$E/2$	0
OL→N	正	T_{x1}	$5E/6$	67
OU→OL	正	T_{x1}	$E/2$	0
OL→OU	正	T_{x1}	$5E/6$	67
OU→OL	负	T'_{x1}	$5E/6$	67
OL→OU	负	T'_{x1}	$E/2$	0

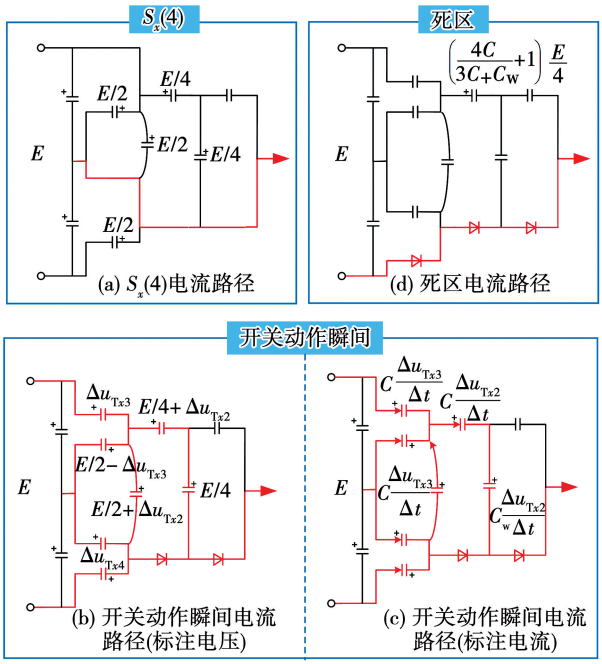


图 10 加入吸收电容电流为正时 $S_x(4)\rightarrow S_x(3)$ 切换死区开关耐压变化

Fig. 10 Withstand voltage change process of $S_x(4)\rightarrow S_x(3)$ switching dead time when the current is positive after adding absorption capacitors

$S_x(4)$ 状态下各开关管承受电压在图中标出。由 $S_x(4)$ 切换到死区瞬间会发生结电容的充放电,假设此过程中 T_{x2}、T_{x3}、T_{x4} 承受电压改变量分别为 Δu_{Tx2}、Δu_{Tx3}、Δu_{Tx4},结合 $S_x(4)$ 状态开关管承受电压,可以得到此过程 T_{x2}、T_{x3}、T'_{x3}、T_{x4} 承受电压以及 AC 间吸收电容电压在图 10(b)标出。根据电容的电压与电流关系式,可以得到流过 T_{x2}、T_{x3}、T'_{x3}、吸收电容的电流,在图 10(c)中标出。

在图 10(b)中应用 KVL 可以得到

$$E/2 - \Delta u_{Tx3} + \Delta u_{Tx4} = E/2 + \Delta u_{Tx2}。 \quad (6)$$

在图 10(c)中应用 KCL 可以得到

$$2C\frac{\Delta u_{Tx3}}{\Delta t}=C\frac{\Delta u_{Tx2}}{\Delta t}+C_w\frac{\Delta u_{Tx2}}{\Delta t}。\tag{7}$$

式(6)、式(7)联立可以得到

$$(3C+C_w)\Delta u_{Tx3}=(C+C_w)\Delta u_{Tx4}。\tag{8}$$

进一步计算有

$$\Delta u_{Tx3}=\frac{C+C_w}{3C+C_w}\Delta u_{Tx4}。\tag{9}$$

结电容充放电结束后,死区时间内,T_{x4} 承受电压将变为 $E/2$,可以得到

$$\Delta u_{Tx4}=E/2。\tag{10}$$

最终:

$$\left.\begin{aligned}\Delta u_{Tx3}&=\frac{C+C_w}{3C+C_w}\frac{E}{2};\\ \Delta u_{Tx2}&=\Delta u_{Tx4}-\Delta u_{Tx3}=\frac{2C}{3C+C_w}\frac{E}{2}。\end{aligned}\right\}\tag{11}$$

根据图 10(b)可得 T_{x2} 电压 u_{Tx2} 将变为

$$u_{Tx2}=\frac{E}{4}+\Delta u_{Tx2}=\frac{E}{4}\frac{4C}{3C+C_w}+\frac{E}{4}。\tag{12}$$

以 $E/4$ 为基准,可得 T_{x2} 电压的标幺值 v_{Tx2}

$$v_{Tx2}=\frac{4C}{3C+C_w}+1。\tag{13}$$

根据式(12)可看出 v_{Tx2} 随 C_w 的增大而减小,且其值无限趋近于 1。当 C_w 取 $10C$ 时 v_{Tx2} 为 1.308,开关管电压超出量为 30.8%,仍较大;当 C_w 取 $200C$ 时,v_{Tx2} 为 1.019,开关管电压超出量为 1.9% 可满足要求,再增大电容容值收益很小,因此 C_w 可取结电容容值 C 的 200 倍。实际上 C 并非固定值,为了保证过压抑制效果,计算 C_w 时 C 取最大结电容容值。

4　仿真与实验

为验证所提方法,分别搭建 3L-ANPC、5L-ANPC 逆变器仿真模型与实验模型进行仿真和实验验证。部分仿真和实验参数相同在表 9 中给出。3L-ANPC 除无悬浮电容外,其余参数均与 5L-ANPC 实验平台一致。由于篇幅限制,下面仅以几种具有代表性的情况进行验证。

表 9　ANPC 仿真实验参数

Table 9　Parameters of test bench

参数	数值
直流母线电容/μF	1 600
直流母线电压/V	100
悬浮电容(5L-ANPC)/μF	158
死区时间/μs	4

4.1　死区问题消除仿真

搭建 5L-ANPC、3L-ANPC 逆变器仿真模型,开关管结电容 C 设为 1 nF,并联吸收电容 C_w 取 200 nF。

图 11 为 5L-ANPC 当 A 相电流为负时,发生 $S_a(3)\rightarrow S_a(4)$ 时死区问题消除前后各单元开关管信号、T_{a2}、T'_{a2} 承受电压以及输出电压情况。可以看出,死区问题消除前相电压会输出 50 V 的不期望电平,且 T'_{a2} 承受电压最大为 58.25 V,超出 25 V 额定值约 133%;应用对应方法后不期望电平和 T'_{a2} 过压问题均不会发生。

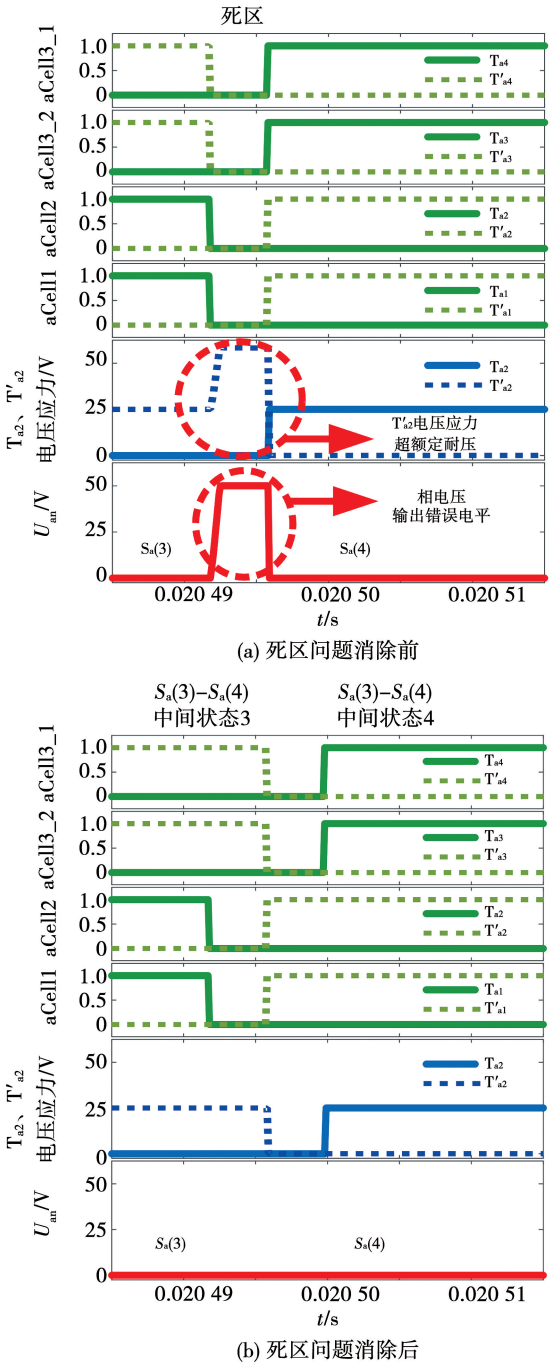
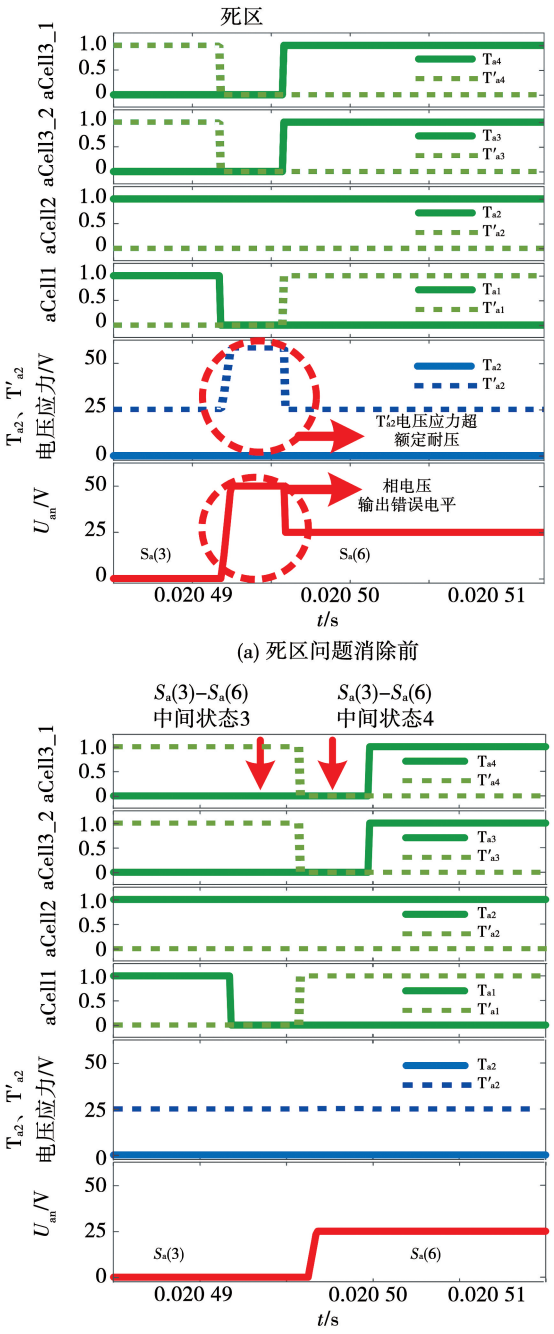


图 11　5L-ANPC 负向电流 $S_a(3)\rightarrow S_a(4)$

Fig. 11　5L-ANPC negative current $S_a(3)\rightarrow S_a(4)$

图 12 为 5L-ANPC 当 A 相电流为负时发生 $S_a(3)\rightarrow S_a(6)$时的仿真效果。



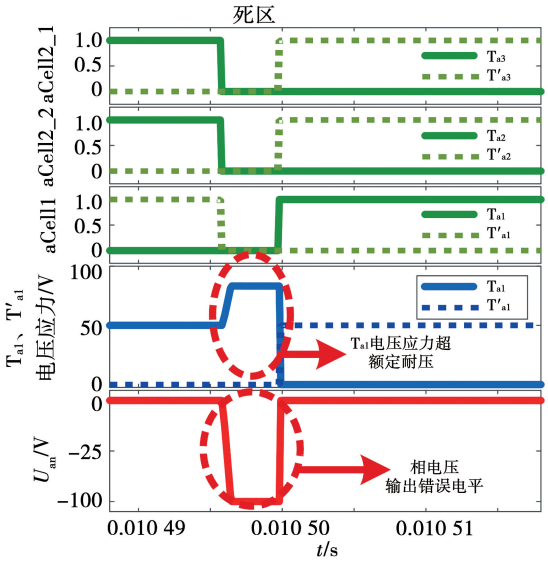
(a) 死区问题消除前

(b) 死区问题消除后

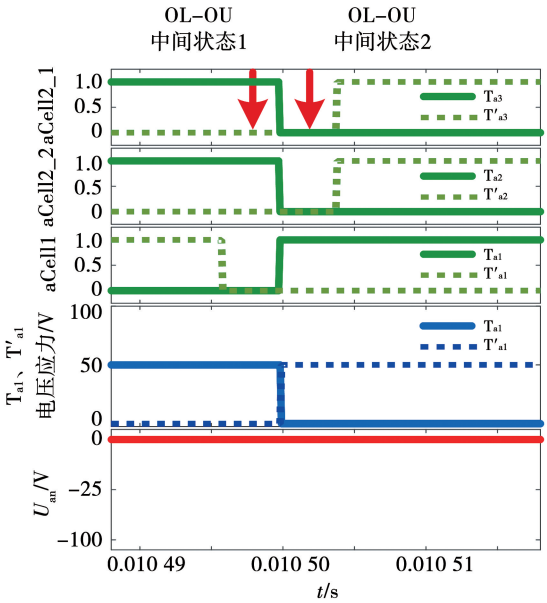
图 12 5L-ANPC 负向电流 $S_a(3)\rightarrow S_a(6)$

Fig. 12 5L-ANPC negative current $S_a(3)\rightarrow S_a(6)$

图 13 为 3L-ANPC 当 A 相电流为正时发生 OL→OU 切换。可以看出，此切换发生时相电压会输出 50 V 的不期望电平，且死区时间 T'_{a1} 承受电压约为 83.35 V，超出 50 V 的设定 67%；应用对应方法后，不期望电平和 T'_{a1} 过压问题均不会发生。



(a) 死区问题消除前



(b) 死区问题消除后

图 13 3L-ANPC 正向电流 OL→OU

Fig. 13 3L-ANPC positive current OL→OU

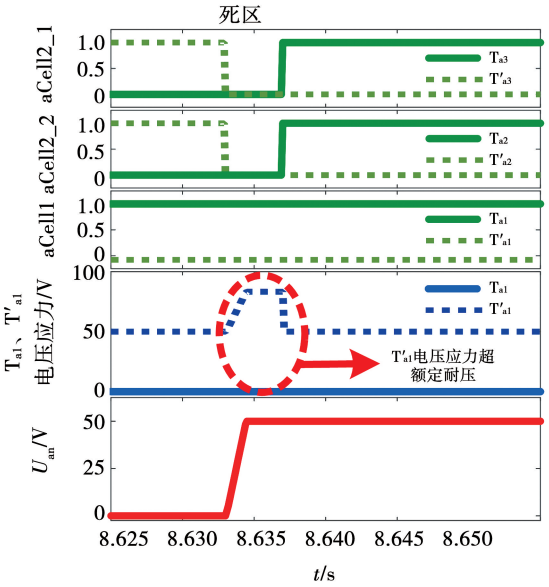
图 14 为 3L-ANPC 当 A 相电流为负时发生 P→OU 切换的仿真效果。

4.2 死区问题消除实验

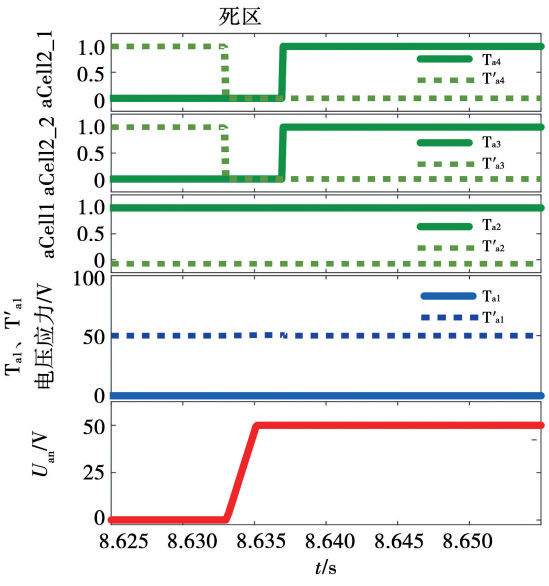
1）单一开关周期死区问题消除。

搭建 5L-ANPC、3L-ANPC 逆变器实验平台。开关管选用英飞凌的 IMBG65R057M1H SiC MOSFET，查数据手册可得开关管结电容最大为 1 nF，计算可得吸收电容容值应取 200 nF，由于实验条件限制，选用容值为 220 nF 的吸收电容；DSP 控制板选用 TI 公司的 TMS320F28335 芯片，负责完成系统中的保

护算法和控制算法部分;FPGA 采用 Xilinx 公司的 XC6SLX9 芯片,负责生成 PWM 信号、处理采样结果等部分。



(a) 死区问题消除前

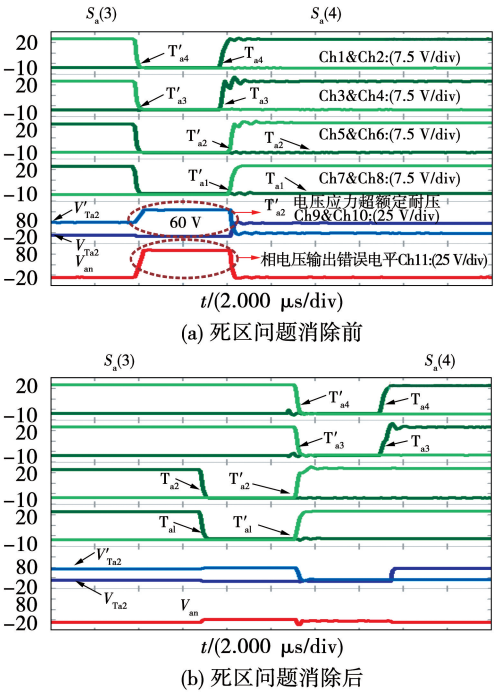


(b) 死区问题消除后

图 14　3L-ANPC 负向电流 OU→P

Fig. 14　3L-ANPC negative current OU→P

图 15、图 16 分别为 5L-ANPC 输出电流为负时,A 相电压过零点处 $S_a(3)\rightarrow S_a(4)$、$S_a(3)\rightarrow S_a(6)$ 消除死区问题前后的实验结果,与仿真基本相同。应用相应方法前,A 相相电压会输出不期望电平,且 T'_{a2} 承受电压分别达 60 V 与 58 V,超出额定耐压 25 V的 140% 与 132%,与理论分析结果 133% 接近。应用相应方法后,相电压输出中无不期望电平,且开关管过压问题被抑制。

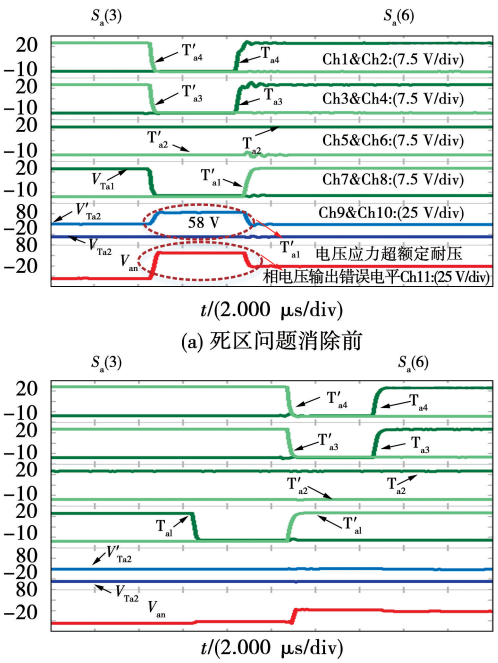


(a) 死区问题消除前

(b) 死区问题消除后

图 15　5L-ANPC 负向电流 $S_a(3)\rightarrow S_a(4)$ 实验

Fig. 15　5L-ANPC negative current $S_a(3)\rightarrow S_a(4)$ experimental



(a) 死区问题消除前

(b) 死区问题消除后

图 16　5L-ANPC 负向电流 $S_a(3)\rightarrow S_a(6)$ 实验

Fig. 16　5L-ANPC negative current $S_a(3)\rightarrow S_a(6)$ experimental

图 17、图 18 分别为 3L-ANPC 输出电流为负时，A 相电压过零点处 OU→OL、OU→P 消除死区问题前后的实验结果，与仿真基本相同。应用相应方法前，发生 OU→OL 切换时，死区时间内输出不期望电平，应用相应方法后不期望电平问题被解决。发生 OU→P 切换时，T'_{a1} 承受电压达 87 V，超出额定耐压 50 V 的 74%，和理论分析结果 67% 接近。应用方法后，开关管承受电压不会超出额定耐压。

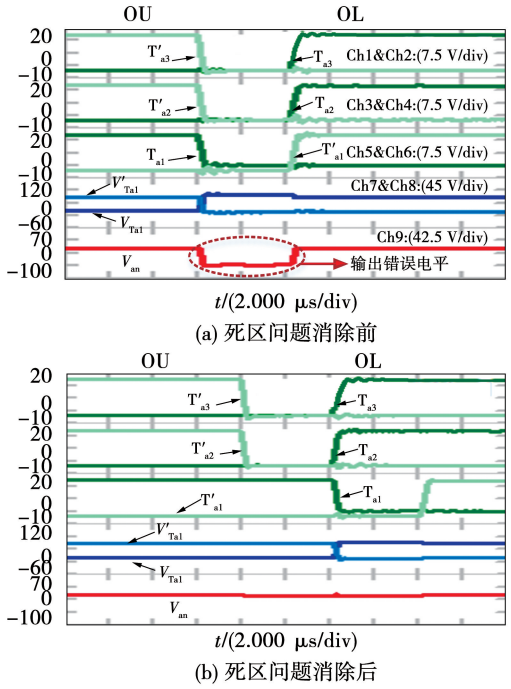


图 17 3L-ANPC 正向电流 OU→OL 实验

Fig. 17 3L-ANPC positive current OU→OL experimental

2）基波周期死区问题消除。

5L-ANPC 和 3L-ANPC 常采用载波层叠 + 载波移相和载波同相层叠的调制方式。分别在相应平台上进行对应调制方式下的死区问题消除实验。

调制比 m 取 0.8，载波频率 2 kHz，调制波频率 50 Hz。图 19 为 5L-ANPC 死区问题消除前后的 T_{a2}、T'_{a2} 承受电压、A 相输出电压情况以及 A 相输出电流情况。显然，应用方法前，在每个基波周期中的参考电压过零点处，A 相电压会输出不期望电平，且会出现 T_{a2} 或 T'_{a2} 承受电压超出额定耐压的情况；应用对应方法后，上述两问题均被解决。图 20 为 3L-ANPC 死区问题消除前后的实验结果，两问题同样得到有效解决。

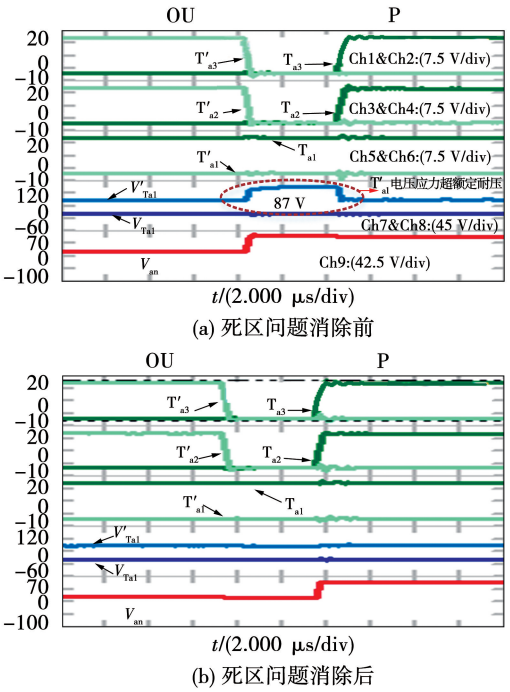


图 18 3L-ANPC 负向电流 OU→P 实验

Fig. 18 3L-ANPC negative current OU→P experimental

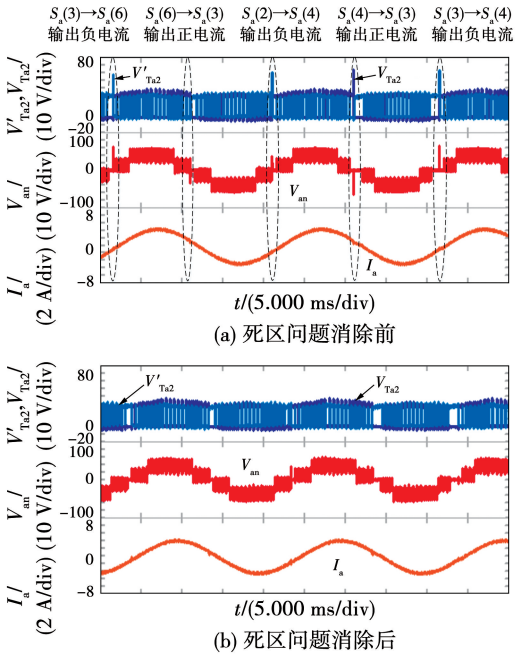


图 19 5L-ANPC 载波层叠 + 载波移相调制下死区问题消除实验

Fig. 19 Dead time problem elimination experiment under 5L-ANPC PS + PD-PWM

为了进一步证明采用延时方法不会影响输出电流的谐波性能，对上述两情况下的输出电流进行谐波分析，如图 21 所示，可以看出输出电流谐波差异

不大。

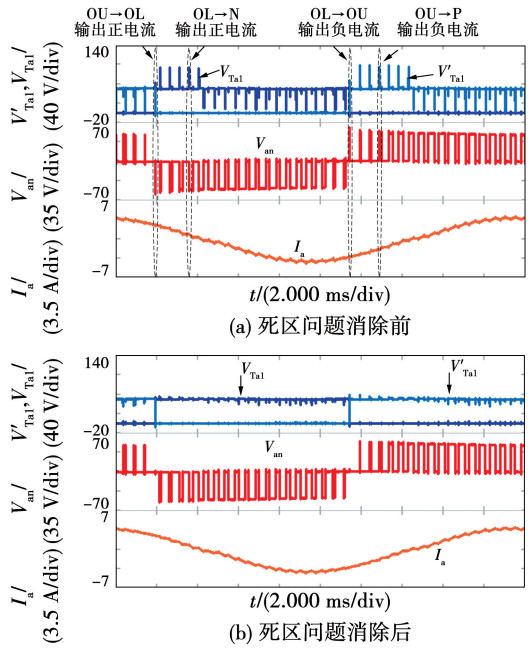


图 20　3L-ANPC 载波同相层叠调制下死区问题消除实验

Fig. 20　Dead time problem elimination experiment under 3L-ANPC PD-PWM

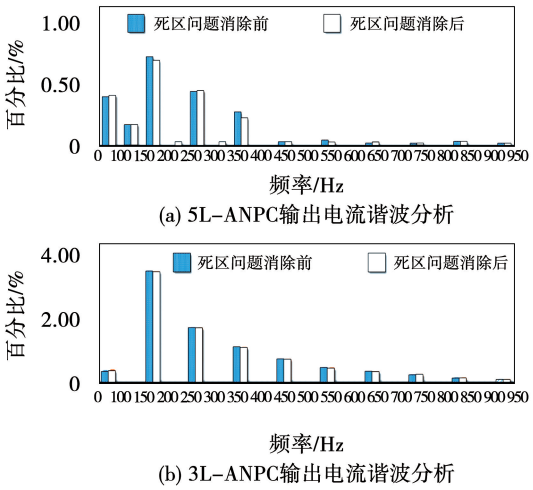


图 21　电流谐波分析

Fig. 21　Analysis of current harmonics

5　结　论

详细分析了 5L-ANPC、3L-ANPC 死区带来的不期望电平以及开关管过压问题,并在此基础上分别进行解决。在发生存在死区不期望电平的状态切换时,根据电流极性以及参与切换的状态,对特定单元开关管动作进行延迟,完全消除了 5L-ANPC 中存在的不期望电平输出问题。对于开关管过压问题,选择并联吸收电容来降低开关管承受电压。所提方法无需增加额外开关管,同时,其简单的实现过程也使该方法适用于解决其他拓扑的相似问题。仿真和实验结果表明,所提方法可解决所有切换中存在的死区不期望电平以及开关管承受电压超出额定耐压的问题。

参 考 文 献:

[1] NABAE A, TAKAHASHI I, AKAGI H. A new neutral-point-clamped PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1981, 17(5): 518.

[2] FOCH H, THOMAS P. Multicell converters: basic concepts and industry applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(5): 955.

[3] BAKER R H, BANNISTER L H. Electric power converter: US 3867643A[P]. 1975 - 02 - 18.

[4] 胡存刚, 芮涛, 马大俊, 等. 三电平 ANPC 逆变器中点电压平衡和开关损耗减小的 SVM 控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3598.
HU Cungang, RUI Tao, MA Dajun, et al. A space vector modulation scheme for three-level ANPC inverters with neutral-point potential balancing and switching loss reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3598.

[5] HU Cungang, YU Xinghuo, HOLMES D G, et al. An improved virtual space vector modulation scheme for three-level active neutral-point-clamped inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 7419.

[6] BARATER D, CONCARI C, BUTICCHI G, et al. Performance evaluation of a three-level ANPC photovoltaic grid-connected inverter with 650 V SiC devices and optimized PWM[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 2475.

[7] 胡存刚, 邓娜, 陆寅, 等. 三电平 ANPC 并网逆变器损耗分布平衡的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5): 722.
HU Cungang, DENG Na, LU Yin, et al. Research on loss distribution balancing for three-level ANPC grid-connected inverter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(5): 722.

[8] ABARZADEH M, KHAN W A, WEISE N, et al. A new configuration of paralleled modular ANPC multilevel converter controlled by an improved modulation method for 1 MHz, 1 MW EV charger [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 3164.

[9] 张强. 三电平逆变器在永磁同步电机驱动系统中的应用[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.

[10] 张涛. 三电平逆变器异步电机直接转矩控制[D]. 杭州: 浙

江大学, 2007.

[11] JEONG S G, PARK M H. The analysis and compensation of dead-time effects in PWM inverters[J]. IEEE Transaction on Industry Electronics, 1991, 38(2): 108.

[12] 于兆凯,颜钢锋,林志赟. 电压源逆变器死区效应的分析与消除[J]. 控制工程, 2012, 18(6):1081.
YU Zhaokai, YAN Gangfeng, LIN Zhiyun. Dead-time effects analysis and elimination for voltage source inverter[J]. Control Engineering of China, 2012,18(6):1081.

[13] 高娜,张宇,关清心,等. 基于有源中点钳位五电平电路的双有源桥 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报,2023,43(5):1950.
GAO Na, ZHANG Yu, GUAN Qingxin, et al. Five-level active neutral point clamed dual active bridge DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(5):1950.

[14] 卢凯尔, 刘战, 王旭, 等. 一种无传感器的 ANPC-5L 逆变器死区效应消除方法[J]. 电力电子技术, 2021, 55(10): 87.
LU Kaier,LIU Zhan,WANG Xu,et al. A method for eliminating dead-time effects of ANPC-5L inverter without sensor[J]. Power Electronics, 2021,55(10):87.

[15] 刘计龙,李科峰,肖飞,等. 一种有源中点钳位五电平逆变器简化等效空间矢量调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6410.
LIU Jilong, LI Kefeng, XIAO Fei, et al. A simplified equivalent SVPWM strategy for active neutral point clamped five-level inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6410.

[16] 张文义, 佟为明, 杨乐民,等. 特定消谐式逆变器无死区控制策略研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 13.
ZHANG Wenyi, TONG Weiming, YANG Lemin,et al. Research on dead-free control strategy of specific harmonic elimination inverter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(1): 13.

[17] 张永锋. DSP 控制 SPWM 逆变器死区问题的研究[D]. 安徽:合肥工业大学, 2007.

[18] 黄杨涛, 邓金溢, 陈敏, 等. 5L-ANPC 逆变器中器件过电压分析及抑制[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 129.
HUANG Yangtao, DENG Jinyi, CHEN Min, et al. Analysis and suppression of device over-voltage in 5L-ANPC inverter [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 129.

(编辑:朱美华)

(上接第157页)

[20] 杨玉岗, 祁鳞, 李龙华. 交错并联磁集成 Buck 变换器本质安全性输出纹波电压的分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 181.
YANG Yugang, QI Lin, LI Longhua. Analysis of output ripple voltage of essential safety for interleaving magnetics Buck converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 181.

[21] 杨志超. 本质安全型磁集成双向 DC-DC 变换器电弧放电理论研究[D]. 北京:北方工业大学, 2023.

[22] 赵永秀, 王骑, 王瑶, 等. 爆炸性环境电感分断放电引燃能力及本安性能评价方法[J]. 煤炭学报, 2020,45(S2):867.
ZHAO Yongxiu, WANG Qi, WANG Yao, et al. Criterion of intrinsically safe and ignition capability of inductor-disconnected-discharge in explosive environments [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 867.

[23] 孟庆海, 田媛. 本质安全电路模拟储能元件潜在危险性分析及其本质安全判据[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 676.
MENG Qinghai, TIAN Yuan. Analysis of potential hazards of analog energy storage components in the intrinsic safety circuits and their intrinsic safety criteria [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3):676.

[24] 赵永秀, 刘树林, 王孟, 等. 基于安全火花试验装置的电感分断电弧电阻建模研究[J]. 电子学报, 2017, 45(5): 1078.
ZHAO Yongxiu, LIU Shulin, WANG Meng, et al. Arc resistance modeling of inductor-disconnected circuit based on safety spark test apparatus[J]. Acta Electronica Sinica,2017, 45(5): 1078.

(编辑:朱美华)