

三相八开关逆变器的容错控制策略^{*}

吴 宁, 时维国

(大连交通大学 电气信息工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 针对中性点箝位型(NPC)三电平逆变器的容错拓扑及其控制问题, 考虑逆变器发生功率器件断路故障情况以及故障前后空间矢量的变化, 当故障发生时, 将输出端子连接到直流链路的中性点, 建立可容错三电平逆变器模型, 实现开路故障下的容错控制。同时考虑逆变器直流侧中性点电压平衡问题, 采用零序电压注入法, 抑制了中性点电位的波动。仿真结果证明了该容错控制策略的可行性和有效性。

关键词: 三电平逆变器; 容错控制; 开路故障; 拓扑重构; 中性点箝位

中图分类号: TM 464 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)07-0089-06

doi: 10.12177/emca.2021.046

Fault-Tolerant Control Strategy for Three-Phase Eight-Switch Inverter^{*}

WU Ning, SHI Weiguo

(School of Electronics and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: For the fault tolerance topology of neutral-point-clamped (NPC) three-level inverter and its control problem, considering the case of inverter power devices open-circuit fault and the change of space vector after the fault occurs, the fault-tolerant three-level inverter model is set up by connecting the output terminal to the neutral point of the DC link, so as to implement fault-tolerant control under open-circuit fault. At the same time, considering the neutral point voltage balance in the DC side of the inverter, zero sequence voltage injection method is adopted to suppress the fluctuation of neutral point potential. Simulation results show that the fault-tolerant control strategy is feasible and effective.

Key words: three-level inverter; fault-tolerant control; open-circuit fault; topology reconstruction; neutral-point-clamped (NPC)

0 引 言

中性点箝位型(NPC)三电平逆变器由于输出谐波含量低、电压利用率高、开关损耗小等优点, 已经成功应用于铁路电气化、高压特高压直流输电、新能源发电等大功率逆变场合。因此, 逆变器的可靠性越来越受到重视^[1-3]。与两电平逆变器相比, 三电平逆变器对开关施加的电压应力较小, 适用于高功率场景。在关键应用中使用逆变器意味着内部功率器件故障会导致性能下降甚至工作

过程中断, 造成严重的经济损失或安全事故^[4]。因此, 三电平逆变器的容错控制对提高系统的可靠性具有重大意义。

通过设计具有容错能力的电力电子系统, 可以将逆变器内部故障的后果降至最低, 允许逆变器继续保持运行, 直到故障被修复。可以显著减少故障的影响, 大大提高系统的可靠性, 避免巨大的经济损失。

多电平变换器拓扑主要可分为“三桥臂”和“四桥臂”2种方法^[5-8]。文献[9]在NPC变换器

收稿日期: 2021-03-19; 收到修改稿日期: 2021-05-20

^{*} 基金项目: 辽宁省教育厅科学研究项目(JDL2019011)

作者简介: 吴 宁(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多电平逆变器故障诊断。

时维国(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为网络控制和电机驱动控制。(通信作者)

中增加了第 4 支路和额外的熔断器、晶闸管及功率器件,在容错操作中,该分支替代了故障相位,从而保证了 NPC 变换器的正常工作,使功率器件不承受过电压。该方法对断路和短路故障均是有效的。文献[10]在给出三电平逆变器四桥臂容错拓扑及其控制方式的基础上,就不同类型故障提出相冗余与矢量冗余相结合的容错控制策略,最终通过仿真建模对复合故障容错控制策略进行验证,结果表明所提控制策略的有效性,但是这种解决方案使逆变器拓扑过于复杂。文献[11]在“四桥臂”拓扑结构的基础上进行研究,当功率器件出现故障时,把负载通过开关控制连接到一个不对称桥臂,第四桥臂由 2 个功率器件构成,采用的器件数量相对较少且能保障系统运行。

文献[12]采用一种基于拓扑理论的逆变器容错控制方法,在功率器件旁并联额外的功率器件,当故障逆变器的额定输出降低时,通过改变连接的结构来保持三相平衡输出,加强逆变器的可靠性。这种方法需要的功率器件较多,成本过高。文献[13]提出在合适的扇区补偿参考电压幅值的策略,并通过试验验证该容错控制策略能够在逆变器故障后保障逆变器继续工作。文献[14]采用“三桥臂”容错方法,故障发生时将故障桥臂与直流母线中性点连接。这种解决方案对额外硬件的要求相对较少,并且允许故障后系统的运行。文献[15]调整空间矢量脉宽调制(SVPWM)的正负小矢量分次运行时间,使平衡点上下两电容充放电时间保持一致,仿真验证表明该方法能够抑制中性点电压波动。

本文考虑了一个具有最小硬件扩展的解决方案,基于“三桥臂”容错控制策略,分析故障前后空间矢量变化,用能产生相同输出电压的其他矢量代替这些故障中不可能产生的空间矢量,解决输出电流畸变和输出电压波动过大的问题,同时采用零序电压注入法抑制电容电压的波动。对不同调制度条件下的容错控制效果进行了对比。通过仿真验证证明了所提容错控制的有效性。

1 NPC 型三电平逆变器故障前后空间矢量分析

NPC 三电平逆变器由 12 个开关器件($S_{x1} \sim$

$S_{x4}, x=a,b,c$)、6 个箝位二极管(VD_{x1}, VD_{x2})、2 个电容(C_1, C_2)组成,如图 1 所示。

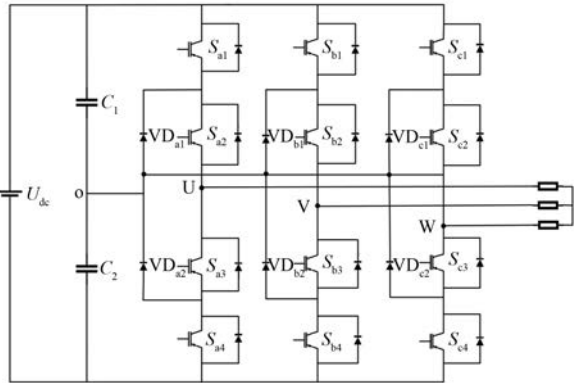


图 1 NPC 三电平逆变器的电路拓扑结构

NPC 三电平逆变器每相有 3 种工作状态:P 表示 S_{x1} 和 S_{x2} 信号为 1,输出电位为 $U_{dc}/2$;O 表示 S_{x2} 和 S_{x3} 信号为 1,输出电位为 0;N 表示 S_{x3} 和 S_{x4} 信号为 1,输出电位为 $-U_{dc}/2$ 。输出电位和开关状态如表 1 所示。

表 1 逆变器输出电位和开关状态

电位	状态	开关信号			
		S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}
$U_{dc}/2$	P	1	1	0	0
0	O	0	1	1	0
$-U_{dc}/2$	N	0	0	1	1

三电平逆变器空间矢量分布如图 2 所示,NPC 逆变器具有 27 种开关状态组合,对应 27 个空间电压矢量。根据空间电压矢量的大小分为 4 类,即零电压矢量、小电压矢量、中电压矢量大电压矢量。

逆变器容错能力的主要目标是保证系统在故障状态下持续运行。故障状态下输出电压不正确,输出电流不对称,并且在直流链路的中性点出现电压不平衡。如果单个开关设备在 S_{x1} 和 S_{x4} 之间发生开路故障,则输出端子必须连接到直流链路的中性点。图 3 为基于拓扑重构的电路结构图,每一相桥臂通过双向导通晶闸管连接到桥臂中性点,这些双向导通晶闸管的作用是当发生开路故障时,将故障桥臂连接到中性点上,并且故障桥臂的所有开关信号都被关闭。在这种情况下,只有 2 个可控桥臂,但负载继续由 3 个平衡电流

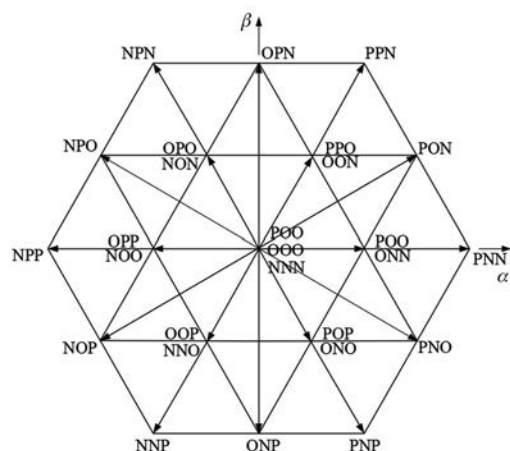


图2 三电平逆变器空间矢量分布

供电。以 A 相发生故障为例, B、C 两相桥臂可以输出 P、O、N 3 种状态, 而故障相 A 相相当于被强制输出 O 状态。

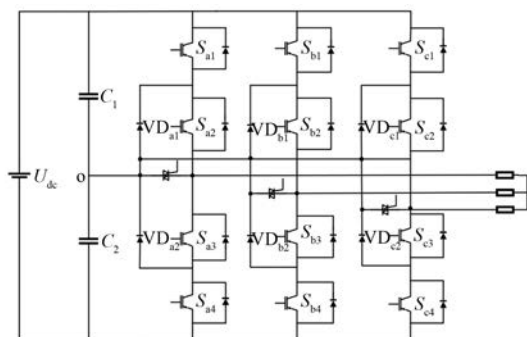
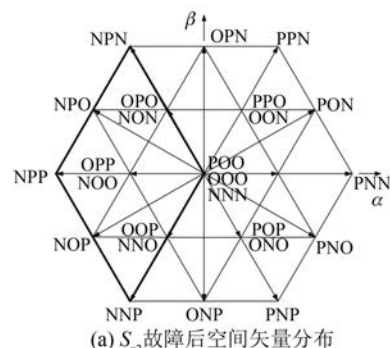
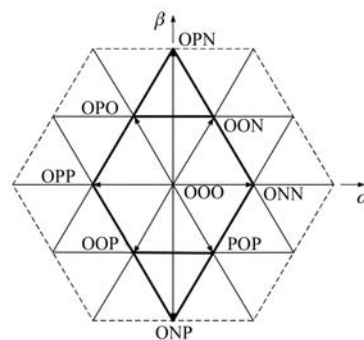


图3 三电平容错逆变器拓扑结构

2 基于容错拓扑结构的控制策略

当 IGBT 发生故障时, 逆变器的电压输出可能会受到严重影响, 降低系统的稳定性。以 A 相桥臂开关器件 S_{a2} 发生故障为例, 逆变器失去了在调制区(六边形)右侧产生电压矢量的能力, 如图 4(a) 所示。这意味着故障发生后三相逆变器的平衡运行是不可能实现的。当故障桥臂连接到直流母线中性点时, 硬件重构后可用的 9 个电压矢量在 α - β 平面的分布如图 4(b) 所示。电压矢量由 2 个中矢量 (OPN、ONP)、6 个小矢量 (OON、ONN、POP、OOP、OPP、OPO) 和 1 个零矢量 (OOO) 构成。从图 4 可以看出, 有效矢量末端构成一个菱形, 菱形的内切圆为最大线性调制区。

以 A 相故障为例, 得到的拓扑结构如图 5 所示, 此时拓扑结构重构为三相八开关逆变器。

(a) S_{a2} 故障后空间矢量分布

(b) 容错控制后空间矢量分布

图4 故障和容错控制状态下的空间电压矢量分布

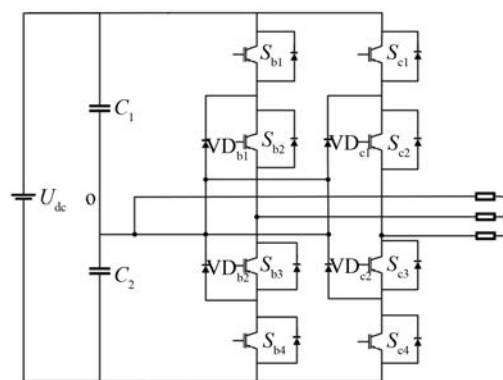


图5 重构后的三相八开关逆变器

定义开关函数 S_x ($x=b, c$) 为

$$S_x = \begin{cases} 1, & S_{x1}S_{x2} \text{ 导通} \\ 0, & S_{x2}S_{x3} \text{ 导通} \\ -1, & S_{x3}S_{x4} \text{ 导通} \end{cases} \quad (1)$$

负载相电压 U_a 、 U_b 、 U_c 表示为

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

将电压空间矢量 U_r 用负载相电压表示:

$$U_r = \frac{2}{3} (U_a + U_b e^{\frac{2\pi j}{3}} + U_c e^{\frac{4\pi j}{3}}) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),可得拓扑重构后的电压矢量表达式为

$$U_r = \frac{2}{3}(S_b e^{\frac{2\pi}{3}j} + S_c e^{\frac{4\pi}{3}j}) \quad (4)$$

若不考虑直流侧两电容电压波动的情况,联立式(1)和式(4)可得9种基本电压矢量,如表2所示。

表2 逆变器基本电压矢量

开关状态	A相故障	B相故障	C相故障
NN	$U_{dc}/3$	$U_{dc} e^{\frac{2\pi}{3}j}/\sqrt{3}$	$U_{dc} e^{\frac{4\pi}{3}j}/\sqrt{3}$
NO	$U_{dc} e^{\frac{5\pi}{3}j}/3$	$-U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$
NP	$U_{dc} e^{\frac{11\pi}{6}j}/\sqrt{3}$	$U_{dc} e^{\frac{7\pi}{6}j}/\sqrt{3}$	$U_{dc} e^{\frac{5\pi}{6}j}/\sqrt{3}$
ON	$U_{dc} e^{\frac{\pi}{3}j}/3$	$U_{dc} e^{\frac{\pi}{3}j}/3$	$U_{dc} e^{\frac{5\pi}{3}j}/3$
OO	0	0	0
OP	$U_{dc} e^{\frac{2\pi}{3}j}/3$	$U_{dc} e^{\frac{4\pi}{3}j}/3$	$U_{dc} e^{\frac{2\pi}{3}j}/3$
PN	$U_{dc} e^{\frac{2\pi}{3}j}/3$	$U_{dc}/3$	$U_{dc} e^{\frac{11\pi}{6}j}/\sqrt{3}$
PO	$U_{dc} e^{\frac{4\pi}{3}j}/3$	$U_{dc} e^{\frac{11\pi}{6}j}/\sqrt{3}$	$U_{dc}/3$
PP	$-U_{dc}/3$	$U_{dc} e^{\frac{5\pi}{3}j}/3$	$U_{dc} e^{\frac{\pi}{3}j}/3$

三相静止到两相静止坐标下的变换为

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{an} \\ U_{bn} \\ U_{cn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: U_α 、 U_β 为 α - β 坐标系下的变量; U_{an} 、 U_{bn} 、 U_{cn} 为三相静止坐标系下的变量。

NPC逆变器单功率器件故障有9种开关状态,受控制的逆变器在故障状态下不存在切换状态冗余。正常逆变器的开关矢量呈六边形,而故障下被控逆变器的开关矢量在空间上呈菱形。故障状态下被控制的NPC逆变器线性调制区域为菱形内切圆的半径,正常的NPC逆变器输出电压为 $U_{dc}/2$ 。被控制的NPC逆变器在功率装置故障情况下可分为6个扇区,如图6所示。

3 直流侧中性点电压平衡控制

在三电平逆变器理想运行的条件下,三相参考电压和电流分别表示为

$$\begin{cases} u_{am} = U_m \sin(\omega t) \\ u_{bm} = U_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u_{cm} = U_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (6)$$

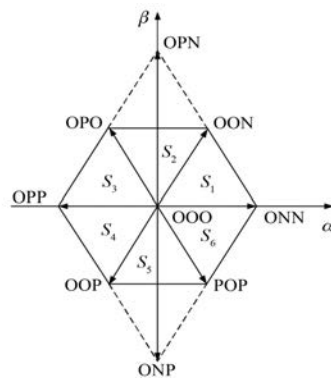


图6 扇区分布

$$\begin{cases} i_a = I_m \sin(\omega t) \\ i_b = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3 - \varphi) \\ i_c = I_m \sin(\omega t + 2\pi/3 - \varphi) \end{cases} \quad (7)$$

式中: U_m 和 I_m 分别为参考电压峰值和参考电流峰值; ω 为角频率; φ 为功率因数角。

脉宽调制(PWM)载波周期 T_s 内流经直流侧中性点的电流 i_o 表示为

$$i_o = i_{oa} + i_{ob} + i_{oc} = i_a d_{oa} + i_b d_{ob} + i_c d_{oc} \quad (8)$$

式中: d_{oa} 、 d_{ob} 、 d_{oc} 分别表示a、b、c三相连接至直流侧中性点的占空比。

可表示为

$$d_{ox} = 1 - 2 \frac{|u_{xm}|}{U_{dc}} = 1 - 2u_{xm} \text{sgn}(u_{xm})/U_{dc} \quad (9)$$

当逆变器发生断路故障后,定义中性点电压偏移量 $\Delta U_d = u_{d1} - u_{d2}$:

$$\Delta U_d = \frac{i_o \cdot T_s}{C} = \frac{(i_a d_{oa} + i_b d_{ob} + i_c d_{oc}) \cdot T_s}{C} \quad (10)$$

从式(10)分析可知,中性点电压偏移量与流经直流侧的电流有关,在理想的运行状态下 i_o 和电容电压偏移量为零。在非理想的情况下,三电平逆变器发生故障进行容错控制后,导致流经直流侧中性点的平均电流不为零,应根据三相电流和电容电压计算出中性点电流,然后调整开关状态,实现三电平逆变器在容错控制模式下的平稳运行。

将式(9)代入式(10),可以将中性点电流 i_o 表示为

$$i_o = -2 \sum_{x=a,b,c} u_{xm} i_x \text{sgn}(u_{xm})/U_{dc} \quad (11)$$

在原有的调制信号上新增零序电压分量 u_0 ,调节后的调制信号 $u'_{xm} = u_{xm} + u_0$,则注入到直流侧

的零序电压为

$$u_0 = -\frac{m_a \operatorname{sgn}(m_a) i_a + m_b \operatorname{sgn}(m_b) i_b + m_c \operatorname{sgn}(m_c) i_c}{\operatorname{sgn}(m_a) i_a + \operatorname{sgn}(m_b) i_b + \operatorname{sgn}(m_c) i_c} + \frac{C \Delta u_{dc}}{T_s [\operatorname{sgn}(m_a) i_a + \operatorname{sgn}(m_b) i_b + \operatorname{sgn}(m_c) i_c]} \quad (12)$$

式中: C 为直流侧电容值; $m_x = 2u_{xm}/U_{dc}$, $0 < m_x \leq 1$ 。

由式(12)可以看出,零序电压分量 u_0 由 2 部分构成:(1)由调制指数、调制电压的方向和电流计算得到,用以平衡直流侧电容电压;(2)直流侧电容电压偏差 Δu_{dc} 产生的反馈控制分量,可以有效地消除电容电压和低频电压引起的偏差。

在三相八开关三电平逆变器容错运行模式下,输出三相电压和电流的幅值仅为正常模式的 $1/\sqrt{3}$,因此在容错模式下三相电压和电流表示为

$$\begin{cases} u'_{am} = U_m \sin(\omega t) / \sqrt{3} \\ u'_{bm} = U_m \sin(\omega t - 2\pi/3) / \sqrt{3} \\ u'_{cm} = U_m \sin(\omega t + 2\pi/3) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} i'_a = I_m \sin(\omega t) / \sqrt{3} \\ i'_b = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3 - \varphi) / \sqrt{3} \\ i'_c = I_m \sin(\omega t + 2\pi/3 - \varphi) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (14)$$

需要注入直流侧的零序电压 u_0 更改为

$$u_0 = -\frac{m_a \operatorname{sgn}(m_a) i_a + m_b \operatorname{sgn}(m_b) i_b + m_c \operatorname{sgn}(m_c) i_c}{\sqrt{3} [\operatorname{sgn}(m_a) i_a + \operatorname{sgn}(m_b) i_b + \operatorname{sgn}(m_c) i_c]} + \frac{C \sqrt{3} \Delta u_{dc}}{T_s [\operatorname{sgn}(m_a) i_a + \operatorname{sgn}(m_b) i_b + \operatorname{sgn}(m_c) i_c]} \quad (15)$$

表 3 为每个扇区的切换模式。每个扇区有 3 个矢量序列,控制的 NPC 逆变器输出电压由参考电压矢量的相邻矢量组成。

表 3 电压矢量作用顺序

扇区	矢量序列
S_1	000→00N→0NN→0ON→000
S_2	000→0PO→0ON→0PO→000
S_3	000→0PO→0PP→0PO→000
S_4	000→0OP→0PP→0OP→000
S_5	000→0OP→0NO→0OP→000
S_6	000→0NO→0NN→0NO→000

4 仿真分析

利用 MATLAB/Simulink 对整个系统进行仿真,验证容错控制方法的可行性。负载为三相对称阻感负载, $P = 50 \text{ kW}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$, 仿真时间 0.2 s , 开路模拟故障信号加入时间 0.06 s , 容错控制时间 0.06 s 。以 S_{a2} 出现开路故障状态为例, 输出相电压如图 7 所示。故障信号加入之前, 相电压三相平衡, 0.06 s 之后, A 相的相电压波形严重畸变, 正半周幅值几乎为 0, B、C 两相输出的波形受到的影响相对较小。

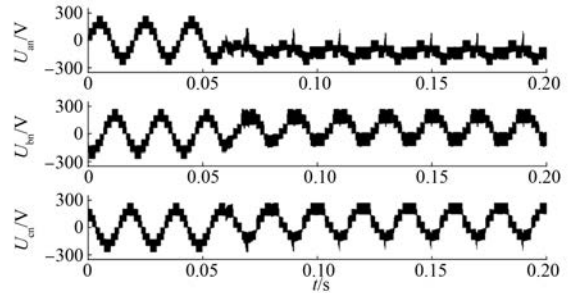


图 7 S_{a2} 开路故障状态下输出相电压

4.1 调制度大于 0.5 仿真结果

设置参考电压 U_{ref} 为 200 V , 调制度 $m = U_{ref}/(U_{dc}/\sqrt{3}) = 200/(400/\sqrt{3}) = 0.86$ 。故障前后相电压波形如图 8 所示。

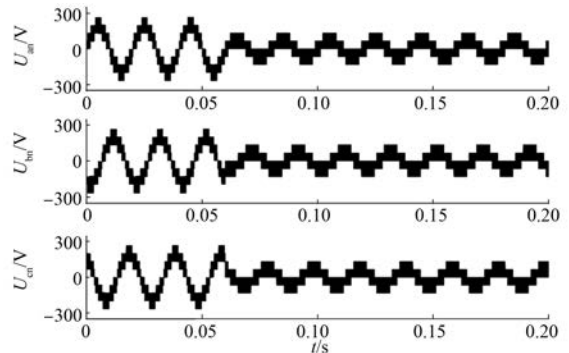


图 8 容错控制后输出相电压(调制度为 0.86)

故障信号加入前,相电压波形输出为九电平,即: $0, \pm 1/6 U_{dc}, \pm 1/3 U_{dc}, \pm 1/2 U_{dc}$ 和 $\pm 2/3 U_{dc}$ 。在 $t = 0.06 \text{ s}$ 时,加入故障,切除故障桥臂,逆变器容错运行,观察容错控制后的相电压波形可以发现,虽然负载相电压三相平衡,但电压幅值有所降低,输出为五电平: $0, \pm 1/6 U_{dc}, \pm 1/3 U_{dc}$ 。直流电源电压的利用率相对降低,在故障情况下, NPC 逆变

器的输出电压为故障发生前相电压的 $1/\sqrt{3}$ 。

4.2 调制度小于 0.5 时仿真结果

设置参考电压 U_{ref} 为 50 V, 调制度 $m = U_{\text{ref}} / (U_{\text{dc}}/\sqrt{3}) = 50 / (400/\sqrt{3}) = 0.22$ 。故障前后相电压波形如图 9 所示。

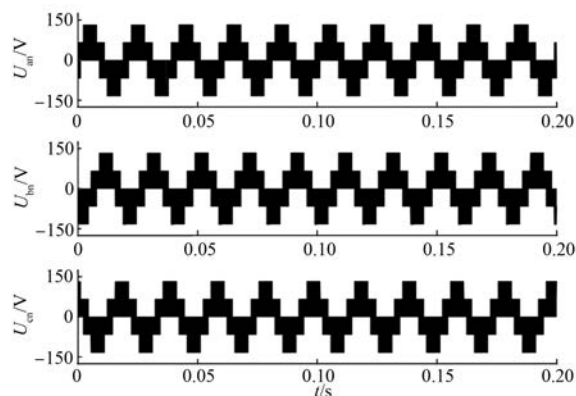


图 9 容错控制后输出相电压(调制度为 0.22)

故障信号加入之前,相电压保持三相平衡,输出为五电平 $0, \pm 1/6 U_{\text{dc}}, \pm 1/3 U_{\text{dc}}$ 。在 $t = 0.06$ s 时,加入故障并进行容错控制,观察容错控制后的波形可以发现,相电压输出仍为五电平,与故障发生前保持一致。

将三电平逆变器调制度保持在 0.5 以下,可以通过提高母线直流电压或者降低参考电压的方法,保证容错前后电压的幅值、正弦度等性能基本不变。功率器件发生开路故障后,切除故障桥臂,将故障相负载直接与直流侧电容中性点相连,相对于母线中性点其他相能输出 $+U_{\text{dc}}, 0, -U_{\text{dc}}$ 三电平,但故障桥臂只能输出零电平,如图 10 所示。

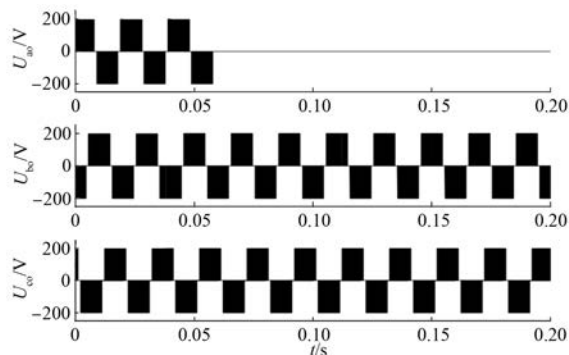


图 10 拓扑重构后容错相电压

中性点电压平衡控制后电容电压如图 11 所示,在 0.6 s 时,采用中性点电压补偿的方法,实现

了电容电压的平衡,降低电压波纹,有效地抑制了电容电压的波动。

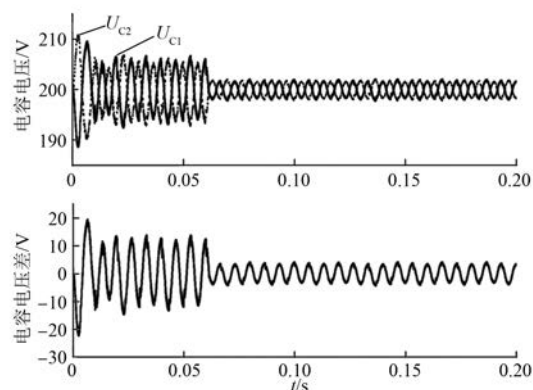


图 11 中性点电压平衡控制后电容电压

5 结 语

本文提出了一种适用于单功率设备故障条件下连续运行的 NPC 三电平逆变器容错控制策略。详细分析了其工作原理。采用改进的 SVPWM 控制策略,可以有效地驱动 NPC 逆变器。对比研究了不同调制比下的容错结果。该方法提供恒定幅值的正弦相电流,同时抑制了电容电压的波动。仿真验证表明三相八开关拓扑重构逆变器具有良好的容错性能。该容错控制方法成本低,控制灵活,具有良好的应用前景。

【参考文献】

- [1] RODRIGUEZ J, BERNET S, STEIMER P K, et al. A survey on neutral-point-clamped inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2219.
- [2] CEBALLOS S, POUL J, ROBLES E, et al. Three-level converter topologies with switch breakdown fault-tolerance capability [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 982.
- [3] XU S Z, WANG C J, WANG Y. An improved fault-tolerant control strategy for high-power ANPC three-level inverter under short-circuit fault of power devices [J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 55443.
- [4] CEBALLOS S, POUL J, ZARAGOZA J, et al. Efficient modulation technique for a four-leg fault-tolerant neutral-point-clamped inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 1067.

(下转第 106 页)