

CHB 逆变器 $3N+1$ 与 SVM 容错切换

张影, 祝杰, 王宁, 田诗雯, 陈曲

(国网辽宁省电力有限公司锦州供电公司, 辽宁 锦州 121000)

摘要: 多电平逆变器的开关器件一旦发生故障, 会造成输出电压不对称, 系统运行负担加剧等不良影响。将 $3N+1$ 冗余和空间矢量调制 (SVM) 应用于多电平级联 H 桥 (CHB) 逆变器实现开关故障的容错控制, 平衡故障引起的直流偏移, 稳定逆变器的运行。根据不同开关故障类型的无效空间矢量分布, 判断是否需要插入冗余单元以及冗余单元是否发挥直流电压的作用, 再选择有效开关状态控制开关器件的通断平衡线电压和负载电压。提出的方案能够提高故障 CHB 逆变器的最大输出电压和可靠性。仿真和实验结果验证了提出的容错策略的有效性。

关键词: 级联 H 桥逆变器; 空间矢量调制; 直流偏移; $3N+1$ 冗余; 有效开关状态

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd18542

3N+1 and SVM Fault-tolerant Switching of CHB Inverter

ZHANG Ying, ZHU Jie, WANG Ning, TIAN Shiwen, CHEN Qu

(Jinzhou Power Supply Company, State Grid Liaoning Electrical Power Co., Ltd.,
Jinzhou 121000, Liaoning, China)

Abstract: Switching device of multi-level inverter once the fault occurs, and it will cause the output voltage asymmetry, system operation burden increased and other adverse effects. The $3N+1$ redundancy and space vector modulation (SVM) was applied to the multi-level cascade H-bridge (CHB) inverter to realize the fault-tolerant control of the switch failure, balanced DC offset caused by the fault, and stabilized operation of the inverter. According to the different switch fault types in invalid space vector distribution, judging whether need to insert redundancy and whether the redundancy units play the role of DC voltage, and then the valid switching states were selected to control switches on-off balancing line-to-line voltage and load voltage. The proposed scheme can improve the maximum output voltage and reliability of the fault CHB inverter. The results of simulation and experiment verify the effectiveness of the proposed fault tolerance strategy.

Key words: cascaded H-bridge inverter (CHB); space vector modulation (SVM); DC offset; $3N+1$ redundancy; valid switching states

级联 H 桥 (CHB) 逆变器模块化程度高, 谐波畸变率低, 开关应力小, 在高压大功率领域应用广泛^[1-3]。随着电压等级升高, 逆变器开关数量增多, 主要导致两个缺陷: 成本增加和可靠性降低。多电平逆变器开关器件一旦出现故障, 输出相电压不平衡, 相间可能存在直流偏移和逆变器运行负担增加等。此时 CHB 逆变器的可靠性下降。而 CHB 的可靠性成为能否投入工业应用的关键问题, 因此应用容错控制技术提高 CHB 逆变器的可靠性成为重要研究课题。

在 CHB 逆变器的切换算法中, 空间矢量调制 (SVM) 容易实现数字化, 开关损耗小^[4-5], 空间矢量分布的冗余状态多。因而本文选用 SVM 实现开关的切换。

文献[6]在多电平逆变器发生开关故障时, 改变拓扑结构以产生对称的负载电压, 该方案成本较高且仅适用三相对称负载。文献[7]提出中性点偏移的脉宽调制方法: 级联 APF 故障时改变载波信号的相移角稳定系统运行。该方法在理论上可以产生较高的平衡电压, 但较大的调制系数

会产生高次谐波,使得该方法在实际应用的效果不理想。文献[8]提出冗余一个单元的容错方法,该方法在单相故障时容错效果理想,但在多相故障时容错能力大大受限。

本文针对上述问题,将3N+1冗余与SVM算法应用于CHB逆变器,稳定逆变器故障状况的运行。该方案首先根据故障状况判断插入3N+1冗余的必要性,再从有效空间矢量中选择对应的最佳开关状态控制逆变器工作,提高最大输出电压和可靠性。

1 CHB 逆变器

图1给出了CHB逆变器主电路的拓扑结构,每个H桥单元直流侧电压为 U_{dc} ,H桥输出电压为 $+U_{dc}, 0, -U_{dc}$ 。每相由2个H桥串联组成,可以构成五电平逆变器。

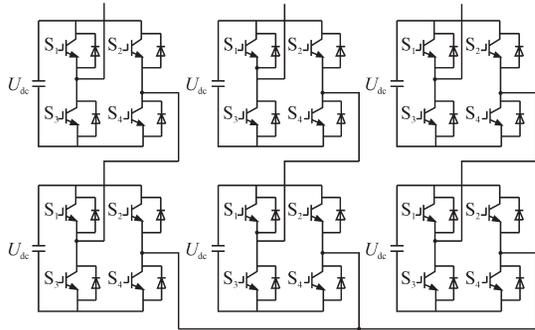


图1 CHB逆变器拓扑结构

Fig.1 CHB inverter topology structure

级联CHB逆变器故障类型包括:直流母线故障、功率驱动模块的丢失、功率开关故障、交流侧开路故障及逆变器桥臂短路等。在这些故障中最常见的故障类型为开关故障。在本文中,主要考虑开关的短路、开路故障。当H桥单元中开关发生开路故障时,H桥输出电压减少一个电平,可能造成逆变器三相电压不对称;当短路故障时,故障桥臂持续开关动作将导致整个单元损坏。对此采取保护措施为:开路故障时闭合同桥臂互补开关,短路故障时断开同桥臂互补开关。

每个H桥作为一个单元根据开关故障状况将其分为^[9]:1)F₁类故障:开关S₁或S₄发生开路或开关S₂或S₃发生短路,不能输出 $+U_{dc}$ 。2)F₂类故障类型:开关S₂或S₃发生开路或开关S₁或S₄发生短路,不能输出 $-U_{dc}$ 。

2 SVM 原理

传统空间矢量调制法在级联CHB逆变器

SVM算法中具有较多冗余空间矢量,这为控制算法的容错实现奠定了基础。传统的SVM算法是建立在 α - β 坐标系下,根据基本空间矢量之间的角度都是 60° 这一特点,本文采用 g - h 坐标系下的SVM,即 60° 坐标系。在 a - b - c 坐标系下假设三相电压 $\mathbf{U} = (u_a, u_b, u_c)$,那么根据克拉克变换可以得到 g - h 坐标系下的电压相量形式如下所示:

$$\begin{bmatrix} u_g \\ u_h \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{23} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

空间矢量控制在文献[10]中叙述详尽,不再赘述。三相五电平CHB逆变器空间矢量分布如图2所示。

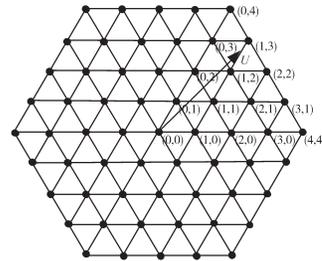


图2 五电平的空间矢量图

Fig.2 Five level space vector diagram

每个基本的空间矢量 (α, β) 的对应开关状态数量 n_{sw} 为

$$n_{sw} = n - (\alpha + \beta) \quad (2)$$

式中: n 为逆变器输出相电压等级数。

绝大多数空间矢量对应的不止一个开关状态,表1给出空间矢量 (α, β) 所有开关状态计算结果^[11]。 M 为每相H桥单元数, $P_i (i=1, \dots, n-(\alpha+\beta))$ 为可能的开关状态数。容错切换的目标是谐波畸变少、共模电压小和开关损耗低,根据目标要求在表1中选择开关状态。

表1 给定的空间矢量的可能开关状态

Tab.1 Possible switching states of a given space vector

可能的开关状态	u_a	u_b	u_c
P_1	$\alpha+\beta-m$	$\beta-m$	$-m$
P_2	$\alpha+\beta-m+1$	$\beta-m+1$	$-m+1$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$P_{n-(\alpha+\beta)}$	m	$m-\alpha$	$m-(\alpha+\beta)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

3 容错策略

3.1 故障状况下的空间矢量分布

当逆变器单相的开关发生故障时,故障相输出电压减少了一个等级。减少的这一个电压等

级会导致逆变器相间存在直流电流偏移,造成同桥臂的上、下开关承受不均匀的电压应力,可能造成磁心饱和。此时空间矢量分布如图3所示,“×”标注的为无效空间矢量。正常运行时最大调制系数 M_{max} 和电压等级 n 有关,可以计算为

$$M_{max} = \sqrt{3} \times (n - 1) / 2 \quad (3)$$

故障状况输出电压等级下降,最大调制系数也降低。

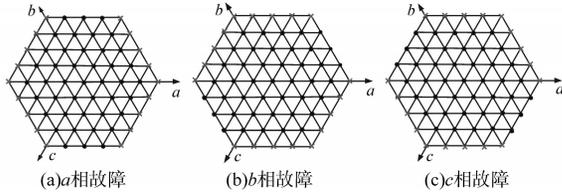


图3 单相故障的无效空间矢量

Fig.3 The invalid space vector of a single phase fault

图4为当逆变器两相或者三相发生相同类型故障的无效空间矢量分布图,图5为逆变器两相或者三相发生不同类型故障的无效空间矢量分布图。

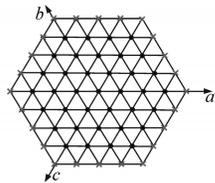


图4 多相发生同一类型故障的无效空间矢量

Fig.4 Invalid space vectors for multiphase occurrence of the same type of fault

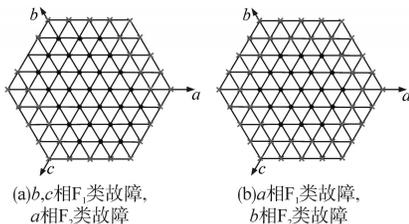


图5 多相发生不同类型故障的无效空间矢量

Fig.5 Invalid space vector for different types of faults in multiple phases

由图3~图5可以看出当故障类型的不同,无效空间矢量的数量是不同的。由于故障类型的限制,有效空间矢量层数减少。

3.2 容错调制与硬件拓扑结构的重构

为实现故障情况下逆变器的稳定运行,必须选择有效的开关状态工作。有效空间矢量在开关故障时减少,此时应及时调整控制策略以便产生平衡的线电压和负载电压。

本文在现有的硬件容错拓扑与软件容错调

制策略的基础上,将硬件和软件容错相结合来优化逆变器系统的容错设计。为此,提出的容错调制主要分为两步:第一步,诊断是否插入3N+1冗余;第二步,从有效空间矢量选择恰当的开关状态。

3.2.1 判断插入3N+1冗余的必要性

3N+1拓扑结构如图6所示。

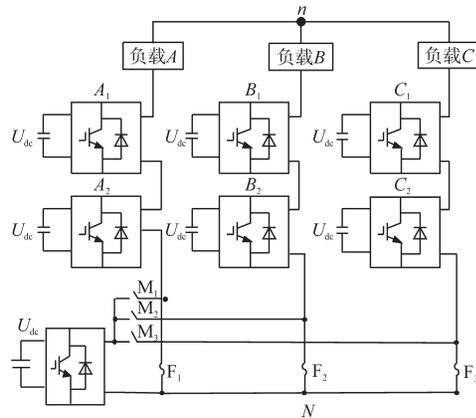


图6 容错拓扑结构

Fig.6 Fault-tolerant topology structure

冗余单元与H桥单元拓扑结构相同,该拓扑采用三相共用一个冗余单元。但并不是所有的故障都需外加冗余单元实现调制,只有以下两种故障情况需要:

1) 单相故障:单相故障无论是 F_1 类或 F_2 类,都需要冗余H桥单元工作。具体实现为旁路故障所在H桥单元,对应的快速熔断器熔断继电器闭合,冗余单元代替故障单元工作,将有效空间矢量分布由图3转变为图2。该类故障不需要改变逆变器的控制算法,只需把控制故障H桥通断信号送入冗余单元即可。

2) 不同相发生不同类型故障:多相发生不同类型故障,有效空间矢量层数较少,需外加直流电压增加有效空间矢量。具体实现为根据具体故障类型给冗余单元指定信号,使其输出 $+U_{dc}$ 或 $-U_{dc}$ 直流电压,添加到适当的故障相,补偿故障引起的直流偏移。直流电压投入故障相后,需调整切换算法产生平衡的线电压稳定系统。利用上述调制可将图5的空间矢量分布转换为图4。表2给出了不同故障类型的可能组合(故障状况1~9)。

表2中有“#”标志的单元格表示对应相需插入冗余单元;“*”标志表示对应相需外加直流电压 $+U_{dc}$ 或 $-U_{dc}$ 。故障状态产生的最大输出电压等

于或小于正常状态,逆变器不同故障类型输出最大电压列于表2。

表2 逆变器输出最大可达电压

Tab.2 Maximum output voltage of inverter output

故障情景	A相	B相	C相	U_{max}
1	#F ₁	0	0	$2 \times \sqrt{3}$
2	#F ₂	0	0	$2 \times \sqrt{3}$
3	F ₁	F ₁	0	$1.5 \times \sqrt{3}$
4	F ₂	F ₂	0	$1.5 \times \sqrt{3}$
5	*F ₁	F ₂	0	$1.5 \times \sqrt{3}$
6	*F ₁	F ₂	F ₂	$1.5 \times \sqrt{3}$
7	F ₁	F ₁	F ₁	$1.5 \times \sqrt{3}$
8	F ₂	F ₂	F ₂	$1.5 \times \sqrt{3}$
9	F ₁	*F ₂	F ₁	$1.5 \times \sqrt{3}$

3.2.2 选择适当的开关状态

有些空间矢量因开关故障而失效,对应的开关状态也不可。g-h坐标系下的参考矢量和空间矢量如图7所示,假设故障导致最外层空间矢量无效,参考电压需限定到U'。此时选定的空间矢量为(2,1),(1,2)和(1,1),再从这三个矢量中选择有效开关状态工作。这步根据故障状况确定所有可能的开关状态,从中选择最佳可用开关状态获得平衡的三相线电压。

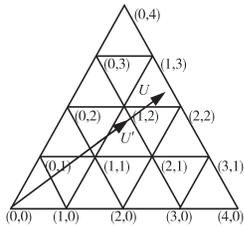


图7 g-h坐标系下的参考矢量和空间矢量

Fig.7 Reference vector and space vector in g-h coordinate system

4 仿真和实验验证

4.1 仿真验证

本文利用 Matlab/Simulink 搭建了三相五电平CHB逆变器的仿真模型,验证提出方案的有效性。图8为a相在t=0.02s发生F₁类故障时逆变器输出的相电压、线电压和负载电压波形。故障出现后暂态内a相不能输出+2U_{dc}。暂态内需调整冗余单元代替故障单元工作,之后即可恢复系统正常工作。故障状况2发生时所采取的措施与之相同。

图9为a相和b相在t=0.02s发生F₁类故障时逆变器输出的相电压、线电压和负载电压波形。

a相和b相不能输出+2U_{dc}电压导致相间存在直流偏移。此时不必外加冗余,而需要选择恰当的开关状态使每相产生相同的直流偏移来维持相间均衡。故障状况7发生时采取的容错措施与状况3相同。当逆变器发生状况9类型故障时,将直流电压-U_{dc}添加到b相,增加相同的电压等级。

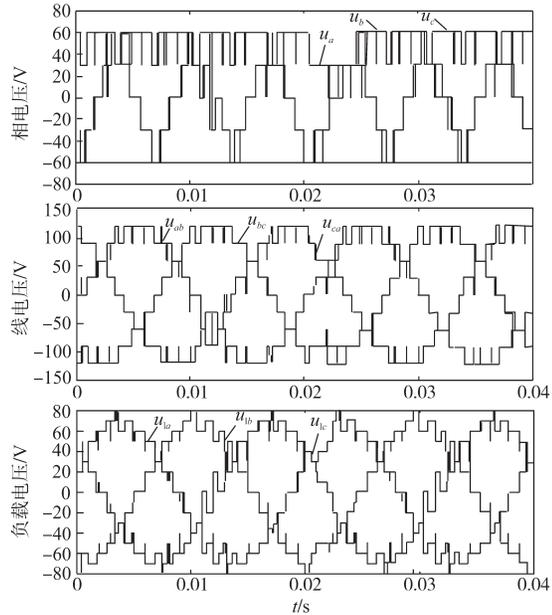


图8 a相发生F₁类故障的电压波形

Fig.8 Voltage waveforms of a phase occurs F₁ type fault

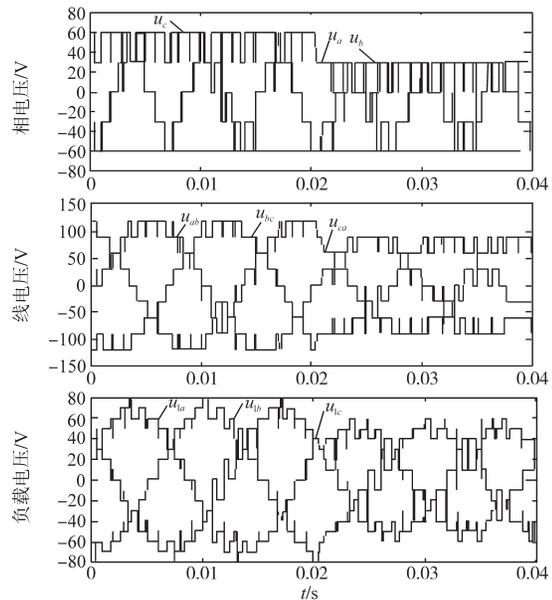


图9 a相和b相同时发生F₁类故障的电压波形

Fig.9 Voltage waveforms of a phase and b phase occur F₁ type fault

当逆变器发生故障状况4时,存在电压偏移,需要通过选择开关状态保障系统对称,状况8发生时与之相同。发生故障状况5或状况6时将直流电压+U_{dc}加到a相,增加有效空间矢量,如图

10所示。

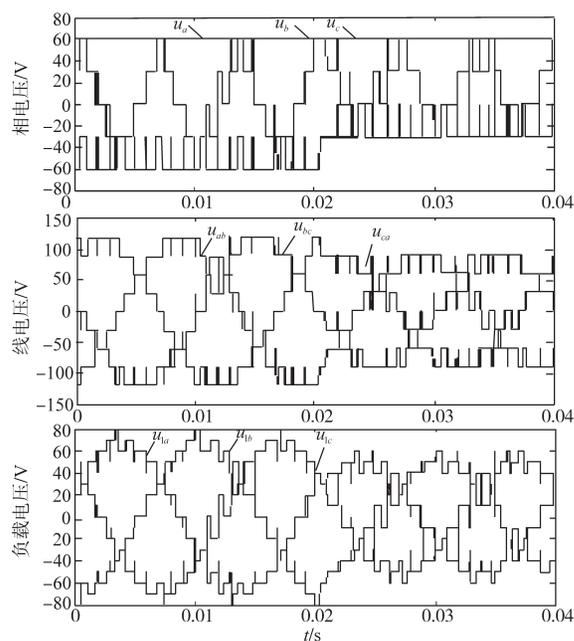


图10 a 相发生 F_1 类故障, b 相和 c 相同时发生 F_2 类故障的电压波形
Fig.10 Voltage waveforms of a phase occurs F_1 type fault and in the same time b phase and c phase occur F_2 type fault

4.2 实验验证

搭建与仿真相对应的样机模型。直流电压侧为30V,对应的三相负载为50Ω电阻。此外,选用TMS320F2812实现所提出的调制算法。实验结果如图11,图12所示。

图11显示了 a 相和 b 相同时发生 F_2 类故障时逆变器输出相电压和线电压。此类故障得到的实验结果与仿真结果与图9相吻合。

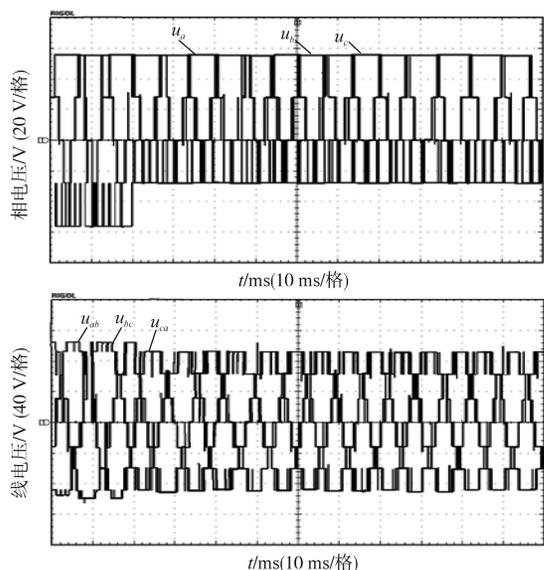


图11 a 相, b 相同时发生 F_1 类故障的电压实验波形
Fig.11 Voltage experimental waveforms of a phase and b phase occur F_1 type fault

图12为 a 相发生 F_1 类故障, b 相和 c 相出现 F_2 类故障逆变器输出相电压和线电压。此时需外部直流电压添加到 a 相,机电继电器 M_1 在小于一个周期内开启。在暂态内采取传统的SVM算法。暂态之后,改变切换算法选择新的开关状态。图12获得的结果验证了所提出算法的正确性,并与仿真结果图10吻合。此外,图12中相关的瞬态延迟是用来激活机电继电器的,这是在仿真结果中没有看到的。

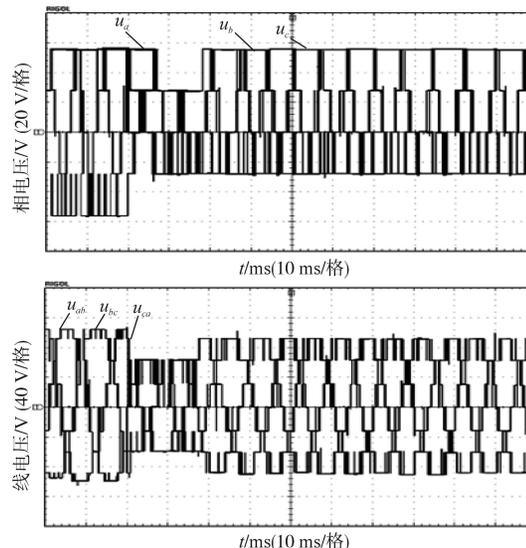


图12 a 相发生 F_1 类故障, b 相和 c 相发生 F_2 类故障的电压实验波形
Fig.12 Voltage experimental waveforms of a phase occurs F_1 type fault and in the same time b phase and c phase occur F_2 type fault

5 结论

本文研究了3N+1冗余和SVM算法相配合的容错开关切换。该方案能够在CHB逆变器单相故障时替换故障单元工作,维持系统正常运行且不改变控制策略;当逆变器多相出现不同类型故障时,给定冗余单元信号,将 $+U_{dc}$ 或 $-U_{dc}$ 投入到相应的故障相以增加有效空间矢量层数,提高输出电压等级。选择有效开关状态补偿了开关故障引起的直流偏移,平衡相电压、线电压和负载电压,稳定逆变器的工作。本文所提出方案利用硬件拓扑配置和调制技术提高了最大输出电压并保障最大输出电压几乎不受故障类型的影响,提高了CHB逆变器的可靠性,防止了某些故障导致逆变器中断的状况。仿真和实验结果表明故障时CHB逆变器仍能够稳定的运行,证实了提出方案的合理性和有效性。该策略易于扩展到更

高电平的 CHB 逆变器,在工业应用中具有一定的价值。

参考文献

[1] 张颖,李崇坚,朱春毅,等. 三电平 H 桥级联型逆变器[J]. 电工技术学报. 2011,26(5):78-82.
 [2] 高志刚,李永东. 一种适用于级联 H 桥型逆变器的新型 PWM 脉冲模型[J]. 中国电机工程学报,2010,30(27):96-101.
 [3] 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.
 [4] 朱宁辉,白晓民,董伟杰,等. 空间矢量脉宽调制下有源电力滤波器直流侧电压设定值研究[J]. 电网技术. 2013,37(2):568-574.
 [5] 申张亮,郑建勇,梅军,等. 基于改进电压空间矢量调制的有源滤波器双滞环电流跟踪控制策略[J]. 中国电机工程学报,2011,31(15):8-14.

[6] 江丽丽,马文忠,李林欢,等. 模块化多电平换流器的容错控制策略[J]. 电网技术,2014,38(9):2497-2513.
 [7] 江才,宋文胜,王顺亮,等. 一种三电平中性点钳位逆变器中点电位控制算法[J]. 电力系统自动化,2014,38(7):88-94.
 [8] Parvin M, Hamid M, Reza. A Fault-tolerant Operation of Cascaded H-bridge Inverter Using One Redundant Cell[J]. IEEE Power and Energy Conference at Illinois, 2015, 15(3):1-5.
 [9] Mingyao M, Lei H, Alian C, et al. Reconfiguration of Carrier-based Modulation Strategy for Fault Tolerant Multilevel Inverters[J]. IEEE Power and Energy Conference at Illinois, 2007, 22(5):2050-2060.
 [10] 刘凤君. 多电平逆变技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
 [11] Wei S, Wu B, Rizzo S, et al. Comparison of Control Schemes for Multilevel Inverter with Faulty Cells[J]. IEEE Industrial Electronics Society, 2004, 30(2):1817-1822.

收稿日期:2017-11-29

修改稿日期:2019-01-22

~~~~~  
 (上接第 20 页)

[5] 赵萍. 基于单级升压逆变器的光伏并网发电系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.  
 [6] Ribeiro H, Pinto A, Borges B. Single-stage DC-AC Converter for Photovoltaic Systems[C]//IEEE ECCE, 2010:604-610.  
 [7] Abdelhakim A, Mattavelli P, Davari P, et al. Performance Evaluation of the Single-phase Split-source Inverter Using an Alternative DC-AC Configuration[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1):363-373.  
 [8] Tang Y, Wang T, Fu D. Multicell Switched-inductor Switched-capacitor Combined Active-network Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4):2063-2072.  
 [9] Li K, Hu Y, Ioinovici A. Generation of the Large DC Gain Step-up Nonisolated Converters in Conjunction with Renew-

able Energy Sources Starting From a Proposed Geometric Structure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7):5323-5340.

[10] Abramovitz A, Zhao B, Smedley K M. High-gain Single-stage Boosting Inverter for Photovoltaic Applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5):3550-3558.  
 [11] Xiao B, Hang L, Mei J, et al. Modular Cascaded H-bridge Multilevel PV Inverter with Distributed MPPT for Grid-connected Applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2):1722-1731.

收稿日期:2019-12-30

修改稿日期:2020-03-25