DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.9.351 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

一种减小共模电压的级联H桥逆变器容错运行策略

杨 柳，黄 海(中国电源学会学生会员)，邱荣禄，王涵宇(中国电源学会会员)，
张 兴(中国电源学会高级会员)
(可再生能源接入电网技术国家地方联合工程实验室(合肥工业大学)，合肥 230009)

摘要：级联H桥CHB(cascaded H-bridge)逆变器的容错运行需注入共模电压CMV(common-mode voltage)，可在不增加硬件成本的条件下使逆变器在故障后保持平衡线电压，但这会导致三相功率存在显著差异，甚至发生功率回流，造成不利影响。对此，提出了一种三次谐波与交替钳位算法相结合的CMV注入方式，以实现最大程度减小CMV的基频分量FCMV(fundamental common-mode voltage)。首先，通过交替钳位取值确定CMV，增大故障相输出电压以减小CMV；随后，注入三次谐波扩大CMV的线性调制区域，提高无需注入CMV的线电压极限值，以改善该方法所需线电压越小注入CMV越大的局限性。所提出的容错运行策略计算简单，FCMV小，提升了容错之后的变换器运行性能，仿真和实验证明了该方法的有效性。

关键词：级联H桥；故障容错；共模电压；三次谐波

A Fault-tolerant Operation Strategy for Cascaded H-bridge Inverters Aimed at Reducing Common-mode Voltage

YANG Liu, HUANG Hai, *Student Member*, *CPSS*, QIU Ronglu, WANG Hanyu, *Member*, *CPSS*,
ZHANG Xing, *Senior Member*, *CPSS*
(National and Local Joint Engineering Laboratory for Renewable Energy Access to Grid Technology (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China)

Abstract: Cascaded H-bridge (CHB) inverters require common-mode voltage (CMV) injection for fault-tolerant operation, which enables the inverter to maintain balanced line-to-line voltage after a fault without additional hardware costs. However, it can potentially lead to unbalanced power in a three-phase system, leading to reverse power flow, which is unwanted in applications. To mitigate these side-effects, a method for injecting CMV that combines the third harmonic and an alternating clamping algorithm is proposed to minimize the fundamental common-mode voltage (FCMV). The approach starts by using alternating clamping to determine CMV, thereby increasing the output voltage of the faulty phase and reducing CMV. Subsequently, the third harmonic is injected to expand the linear modulation region of the CMV, thereby increasing the maximum line-to-line voltage limit achievable without CMV injection. This optimization mitigates the limitation that smaller line-to-line voltages require larger CMV injection of the proposed method. The proposed fault-tolerant operation strategy demonstrates simple calculations and a reduced FCMV, enhancing converter performance after a fault. Simulations and experiments confirm the effectiveness of this method.

Keywords: Cascaded H-bridge (CHB); common-mode voltage (CMV); fault-tolerant operation; third harmonic

收稿日期：2024-11-28；**录用日期**：2025-02-05；**网络首发日期**：2025-03-31
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52107187)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52107187

级联H桥CHB(cascaded H-bridge)多电平逆变器目前被广泛应用于中压驱动、电池储能系统、静态补偿器、可再生能源发电系统等场合[1–4]。与其他多电平逆变器相比，CHB型多电平逆变器具有

制造模块化、扩展性强及容错能力较高等特点。这些特点使其在实际工程中能够根据需要灵活增加或减少功率单元，适应不同规模和功率要求。然而，CHB 多电平逆变器的模块化结构意味着系统中包含大量功率单元，每个单元均由 4 个开关器件组成。随着模块数量的增加，功率开关器件的总数急剧增多，从而显著提高了系统发生故障的概率。因此，为保障功率器件故障后的持续运行能力，需对 CHB 逆变器故障后的容错运行方法进行研究。

一旦功率开关故障发生，就需要立刻将故障隔离并采取相应的容错控制策略使系统继续稳定运行[5-6]。目前，基于 CHB 逆变器的故障容错方法主要分为硬件容错和软件容错 2 大类。硬件容错即在系统中增加冗余单元来提供故障部分损失的容量。文献[7-8]分别通过与 CHB 逆变器串联 1 个带直流源和直流母线电容的辅助单元，达到在逆变器发生单故障情况后恢复故障前运行能力的目的；文献[9]提供了一种可以解决多故障的硬件拓扑方法，但是需要 7 个额外的开关。硬件容错的方法可以恢复故障前的工作状态，然而在实际应用中，这种方法的成本较高。软件容错无需额外硬件成本，通过修正故障后的调制和控制算法实现容错运行。在将故障单元旁路后，需要使输出线电压重新平衡，常采用中性点位移法[10-11]。文献[12]通过计算能获得最大平衡线电压的最佳夹角，并将相电压夹角改变为预先计算的夹角来偏移中性点，实现线电压的平衡。文献[13-17]通过在逆变器中性点与网侧中性点间注入一个共模电压 CMV(common-mode voltage)来实现平衡线电压。文献[13]定义了一种广义线性调制区域，在此区域内选择区域边界的平均值作为 CMV 注入；文献[14-15]基于广义的线性调制区域选择了最小 CMV 注入；文献[16]提出了一种改进的技术来计算故障后相电压的参考值；文献[17]将故障相参考电压超出限制的部分重新分配给正常相，以产生期望的线电压。这些中性点位移方法不可避免地在系统中产生了 CMV，导致三相功率存在差异，在电机驱动[16]、静止无功补偿器[17]及非再生 CHB[18]等应用中是有害的，并且当系统处于低功率因数状态运行时，CMV 可能引起功率回流[13]。因此，为了减小 CMV 对逆变器故障后运行性能的不利影响，扩大系统单向功率传输的工作区域，应在尽可能恢复故障前输出能力的同时，减小 CMV 的基频分量 FCMV(fundamental common-mode voltage)和峰值。

对此，本文针对 CHB 逆变器故障后的容错运行提出了一种新的 CMV 注入方法，首先通过交替钳位算法生成 CMV，在确保不过调制的同时增加故障相的输出电压，以减小 CMV。此外，针对所需线电压越小、注入的 CMV 反而越大的问题，注入三次谐波，扩大了 CMV 的线性调制区域，进一步减小了注入的 CMV。该方法能够使逆变器故障后持续稳定运行，根据所需线电压注入最小化 FCMV，尽可能减小 CMV 对逆变器的负面影响。

1 CHB 多电平逆变器故障后运行方式

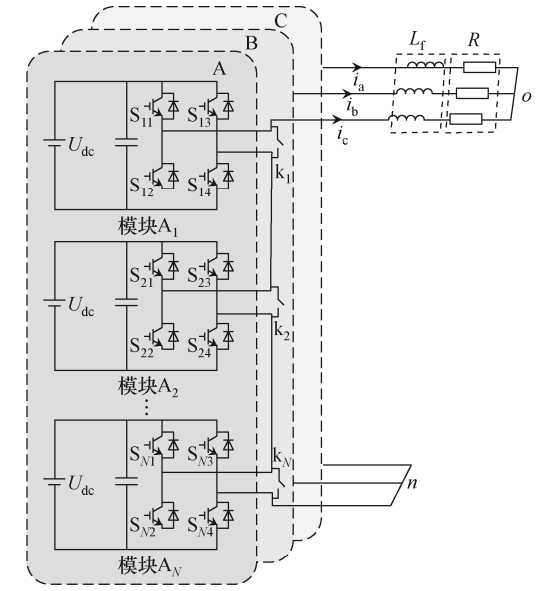
三相 CHB 逆变器拓扑及其在不同运行条件下的相量如图 1 所示。由图 1(a)可见，该拓扑每相由 N 个 H 桥单元串联，每个 H 桥单元中含有 4 个带反并联二极管的开关管，直流侧并联 1 个直流电压源 U_{dc} 和 1 个电容，逆变器输出经滤波电感 L_{f} 与负载 R 连接。图中：S_{j1}~S_{j4} 为构成各模块的功率开关管，j=1, 2, …, N。正常运行时，N 个 H 桥单元串联构成的逆变器产生的输出电压含有 2N+1 个电平，每相的瞬时相电压可表示为

$$u_{xn} = mN_x U_{\mathrm{dc}} \cos(\omega t - \varphi_x) \qquad x \in \{\mathrm{a}, \mathrm{b}, \mathrm{c}\} \tag{1}$$

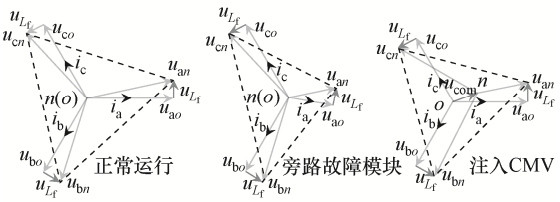
式中：m 为调制度；N_x 为各相正常工作的模块数；ω 为角频率；φ_x 为各相初始相位角，$\varphi_{\mathrm{a}} = 0$，$\varphi_{\mathrm{b}} = \dfrac{2\pi}{3}$，$\varphi_{\mathrm{c}} = -\dfrac{2\pi}{3}$。

每个模块单元的输出侧均装有旁路开关 k_N，开关管发生故障后立即闭合旁路开关隔离故障模块。故障前、后的关键相量如图 1(b)所示。图中：$u_{L_{\mathrm{f}}}$ 为电感电压；i_x 为系统输出电流；u_{xn} 为逆变器输出相电压；u_{xo} 为负载相电压。故障前，逆变器输出中

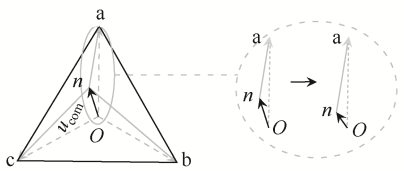
性点 n 与负载中性点 o 重合，CMV 为 0。假设 A 相的某个模块发生故障并将其旁路，则三相正常工作的模块数不再相等，逆变器输出的相电压、线电压不平衡，输出电流也不对称，为了使系统继续正常运行，必须采取相应的容错控制策略使负载线电压重新平衡。



(a) 三相CHB逆变器拓扑



(b) 正常运行、旁路故障模块及注入CMV后的三相相量



(c) 忽略电感电压后的三相电压相量

图 1　三相 CHB 逆变器拓扑及其在不同运行条件下的相量

Fig. 1 Topology and phasor of three-phase CHB inverter under various operating conditions

中性点位移是一种有效的容错方法，其原理如图 1(b)所示，注入 CMV 可以使逆变器中性点与负载中性点分离，即使逆变器的输出相电压是不平衡的，负载仍能够由平衡的线电压馈电。正常情况下，N 个模块逆变器输出的最大线电压的幅值为 $\sqrt{3}NU_{dc}$，而故障后故障相的电压输出受到模块限制，在中性点位移方法中，基于改变波形的方法能恢复更大的输出能力[10]，能达到的最大线电压为

$$U_{llmax} = N_a U_{dc} + N_b U_{dc} + N_c U_{dc} - \max\{N_a U_{dc}, N_b U_{dc}, N_c U_{dc}\} \tag{2}$$

基于改变波形的方法即在原参考电压中注入一个合适的共模电压 u_{com}，改变参考电压的波形，参考电压虽不再是正弦波，但对应的线电压保持正弦和对称，注入 CMV 后的参考电压可表示为

$$u_{x,ref} = u_{xo} + u_{com} \tag{3}$$

将故障单元旁路后，注入 CMV 有过调制的风险，为了不过调制，参考电压应满足

$$-N_x U_{dc} \leqslant u_{x,ref} \leqslant N_x U_{dc} \tag{4}$$

根据式(3)和式(4)可以确定 CMV 的线性调制区域为

$$\begin{cases} u_l \leqslant u_{com} \leqslant u_u \\ u_l = \max\{-N_a U_{dc} - u_{ao}, -N_b U_{dc} - u_{bo}, \\ \quad -N_c U_{dc} - u_{co}\} \\ u_u = \min\{N_a U_{dc} - u_{ao}, N_b U_{dc} - u_{bo}, N_c U_{dc} - u_{co}\} \end{cases} \tag{5}$$

式中，u_l 和 u_u 分别为 CMV 线性调制区域的下边界电压及上边界电压。

即在该 CMV 线性调制区域内取任意一个特定的 CMV 均可确保逆变器工作在线性区域内，较简单的方法是平均值法[12]和最小值法[14]。然而，这些方法仍不可避免地存在较大的 FCMV，为进一步降低 FCMV，扩大逆变器的工作区域，减小 FCMV 造成的不利影响，本文提出了由三次谐波 u_3 与交替钳位共模电压 u_{on} 2 个部分组成的 CMV 注入方案。

2　改进的 CMV 注入策略

所提出的容错运行策略控制框图如图 2 所示，将故障模块旁路后，根据故障后所需的输出线电压大小分区注入 CMV，以适应不同工况的需求，从而使整体范围内注入的 CMV 尽可能减小。首先，

根据所需的线电压确定其所在的电压区间，并以此区间号作为标志信号，注入相应的 CMV。当所需线电压低于$\sqrt{3}N_{\min}U_{\mathrm{dc}}$时，系统本身具有足够的冗余能力，无需注入 CMV，$N_{\min}$ 为输出能力最弱相的正常模块数；当所需线电压高于$\sqrt{3}N_{\min}U_{\mathrm{dc}}$时，则进入三次谐波优化范围，在此范围内，如果线电压小于$2N_{\min}U_{\mathrm{dc}}$，则仅注入三次谐波，当线电压超过$2N_{\min}U_{\mathrm{dc}}$时，系统需要额外注入交替钳位 CMV。CMV 与原参考电压合成修正后的参考电压，经过载波相移脉宽调制 CPS-PWM(carrier phase-shifted pulse width modulation)后得到各模块的开关信号。图中：$U_{\mathrm{dc},x}$为三相电容电压的平均值；u_{in}为运行模块数最少一相的相电压，$i=\underset{x=\mathrm{a,\,b,\,c}}{\operatorname{argmin}}(N_x)$；$U_{\mathrm{ll}}$为故障后系统所需线电压。

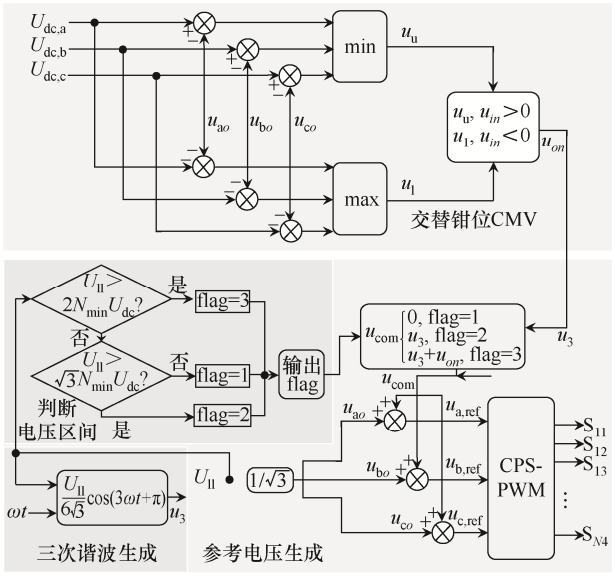


图 2 所提容错运行策略框图

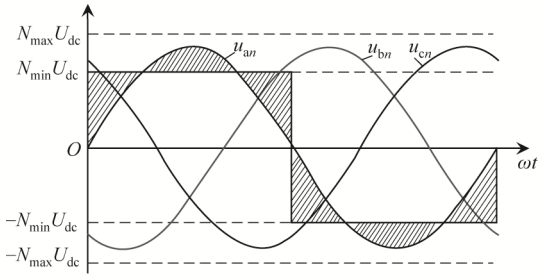
Fig. 2 Block diagram of the proposed fault-tolerant method

2.1 交替钳位 CMV 取值

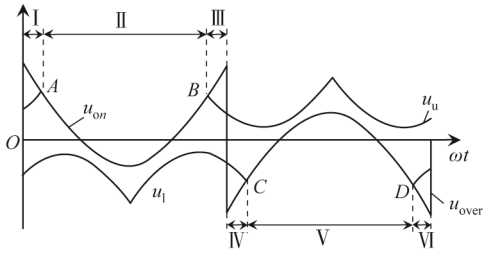
忽略电感电压，故障后运行的电压相量如图 1(c)所示，为了获得平衡的线电压，u_{xo}被假设为三相平衡电压，在所需线电压已知的情况下 u_{xo}固定，因此减小 u_{com}的一个思路是使输出能力最弱的一相输出电压 u_{xn}最大化。

交替钳位 CMV 如图 3 所示，图 3(a)中：$N_{\min}$为输出能力最弱相的正常模块数(以 A 相最弱为例)，$N_{\max}$为输出能力最强相的正常模块数。为了尽可能增加逆变器最弱相的输出电压，在最弱相正半周内将其输出电压钳位至该相最大值 $N_{\min}U_{\mathrm{dc}}$，负半周内钳位到$-N_{\min}U_{\mathrm{dc}}$，使最弱相电压始终保持最大输出。将超出电压(即阴影部分)注入参考电压中，即可使最弱相输出电压钳位在最大值。但是此电压并不能直接作为 CMV 注入，因为必须保证 CMV 处于其线性区域内，图 3(b)展示了此限制，超出电压 u_{over}可表示为

$$u_{\mathrm{over}}=\begin{cases}N_{\min}U_{\mathrm{dc}}-u_{ao} & u_{ao}>0\\ -N_{\min}U_{\mathrm{dc}}-u_{ao} & u_{ao}<0\end{cases}\tag{6}$$



(a) 钳位方式与超出电压



(b) 限制区域与交替钳位CMV

图 3 交替钳位 CMV

Fig. 3 Alternating clamping CMV

在Ⅱ、Ⅴ区域内超出电压 u_{over}分别与 CMV 上下边界 u_{u}、u_{l}重合，而Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅵ区域内 u_{over}将超出线性区域，这是因为在点 A、C 处有$\left|N_{\min}U_{\mathrm{dc}}-u_{an}\right|=\left|N_{\max}u_{\mathrm{dc}}-u_{cn}\right|$。在Ⅰ、Ⅳ区域内有

$$\begin{cases}u_{\mathrm{u}}=N_{\max}U_{\mathrm{dc}}-u_{co}\\ u_{\mathrm{l}}=-N_{\max}U_{\mathrm{dc}}-u_{co}\\ \left|N_{\min}U_{\mathrm{dc}}-u_{ao}\right|>\left|N_{\max}U_{\mathrm{dc}}-u_{co}\right|\end{cases}\tag{7}$$

同理，在Ⅲ、Ⅵ区域内 u_{over}的值分别比 u_{u}、u_{l}大，因此在Ⅰ、Ⅲ区域将超出电压限制为 u_{u}，在Ⅳ、Ⅵ区域内将超出电压限制为 u_{l}，最终 CMV 可定义为

$$u_{on}=\begin{cases}u_{\mathrm{u}} & u_{in}>0\\ u_{\mathrm{l}} & u_{in}<0\end{cases}\tag{8}$$

2.2 三次谐波优化

不同线电压区间三次谐波注入前、后的 CMV 对比如图 4 所示。交替钳位方法的局限性在于当所需线电压较小时，故障相电压与最大值差距较大，如图 4(a)所示，CMV 的上、下边界全为正或全为负，此时取得的 CMV 将会很大。在实际运行中，系统并不总是要求输出最大线电压，当输出线电压较小时，仅靠系统自身的冗余即可实现线电压平衡，CMV 的注入是不必要的。因此，可以界定一个电压范围来分辨是否需要注入 CMV，如果上边界全为正、下边界全为负，即上边界的极值大于 0 或下边界的极值小于 0，剩余正常模块完全能够提供所需的输出电压，则无需注入 CMV，即

$$\min(u_{\mathrm{u}})=0 \tag{9}$$

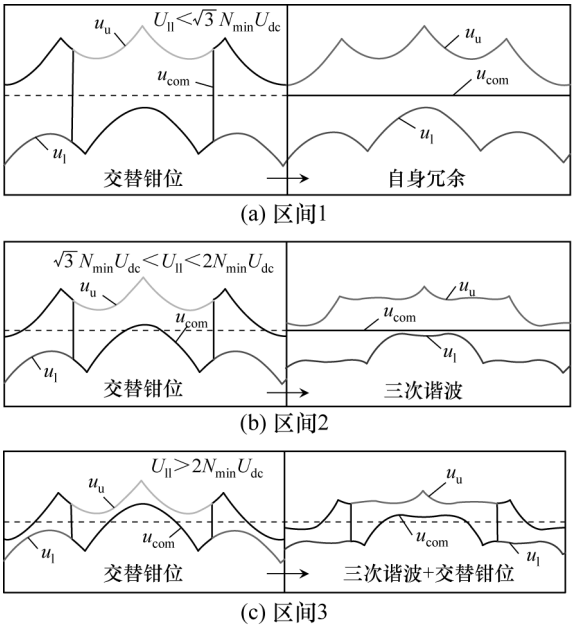


图 4　不同线电压区间三次谐波注入前、后 CMV 对比

Fig. 4 Comparison of CMV before and after third harmonic injection under different line-to-line voltages

根据式(9)可以得到无需注入CMV的线电压极限值$U_{\mathrm{ll}}^{\mathrm{r}}=\sqrt{3}N_{\min}U_{\mathrm{dc}}$。若将此极限值提高，无需注入 CMV 的范围将会扩大，能够在全范围内进一步减小 CMV。提高$U_{\mathrm{ll}}^{\mathrm{r}}$可以等价为扩大 CMV 的线性区域，根据式(5)可知，其唯一自由度为 u_{xo}，因此可以通过降低 u_{xo} 的峰值来提高此极限值。逆变器是星形连接，可以考虑在参考电压中加入一定幅值的三次谐波来降低相电压的峰值。为使 u_{xo} 峰值降到最低，注入的三次谐波幅值应为 u_{xo} 基波幅值的 1/6[19]。设参考电压 u_{xo} 的幅值$U_1=\dfrac{U_{\mathrm{ll}}}{\sqrt{3}}$，则注入的三次谐波表达式为

$$u_3=-\frac{1}{6}\cdot\frac{U_{\mathrm{ll}}}{\sqrt{3}}\cos(3\omega t)=\frac{U_{\mathrm{ll}}}{6\sqrt{3}}\cos(3\omega t+\pi) \tag{10}$$

如图 4(b)所示，注入三次谐波后，CMV 的线性调制区域扩大，低线电压要求下 CMV 将为 0，$U_{\mathrm{ll}}^{\mathrm{r}}$将提升至$2N_{\min}U_{\mathrm{dc}}$。经上述分析，所提方法能够根据所需线电压调整 CMV 的注入，即

$$u_{\mathrm{com}}=\begin{cases}0 & U_{\mathrm{ll}}<\sqrt{3}N_{\min}U_{\mathrm{dc}}\\ u_3 & \sqrt{3}N_{\min}U_{\mathrm{dc}}<U_{\mathrm{ll}}<2N_{\min}U_{\mathrm{dc}}\\ u_3+u_{on} & 2N_{\min}U_{\mathrm{dc}}<U_{\mathrm{ll}}<U_{\mathrm{llmax}}\end{cases} \tag{11}$$

3 仿真和实验分析

3.1 仿真验证

为验证所提容错运行策略的有效性，本文搭建了 CHB 三相七电平系统仿真模型和实验平台，系统参数见表 1。

表 1　仿真及实验参数

Tab. 1 Simulation and experimental parameters

参数	数值
开关频率 f_{s}/kHz	10
直流电压 U_{dc}/V	25
滤波电感 L_{f}/mH	4
负载 R/Ω	20
每相模块数 N_x	3

用各相剩余模块数表示系统故障工况，例如 A 相故障旁路了 1 个模块，B 相和 C 相无故障发生，即 N_{a}=2、N_{b}=N_{c}=3，记为 2-3-3 故障。根据表 1 的参数，仿真模拟了三相七电平系统 3-2-3 故障。在纯电阻负载下，所需线电压给定为 120 V，如图 5 所示，系统在 0.02 s 前正常运行，0.02 s 时 B 相 1 个模块发生故障后立即将该模块旁路，此时系统的线电压和电流不再平衡。0.04 s 时应用所提的容错

运行策略，参考电压不再是正弦波，在 B 相正半周期内，B 相参考电压被钳位至 $2U_{dc}$，A、C 相被钳位至 $3U_{dc}$；负半周期内 B 相参考电压被钳位至 $-2U_{dc}$，A、C 相被钳位至$-3U_{dc}$。通过应用所提策略，三相线电压和电流恢复平衡，系统能够继续运行，且 FCMV 仅为 6.50 V，有效验证了所提容错运行策略的有效性。

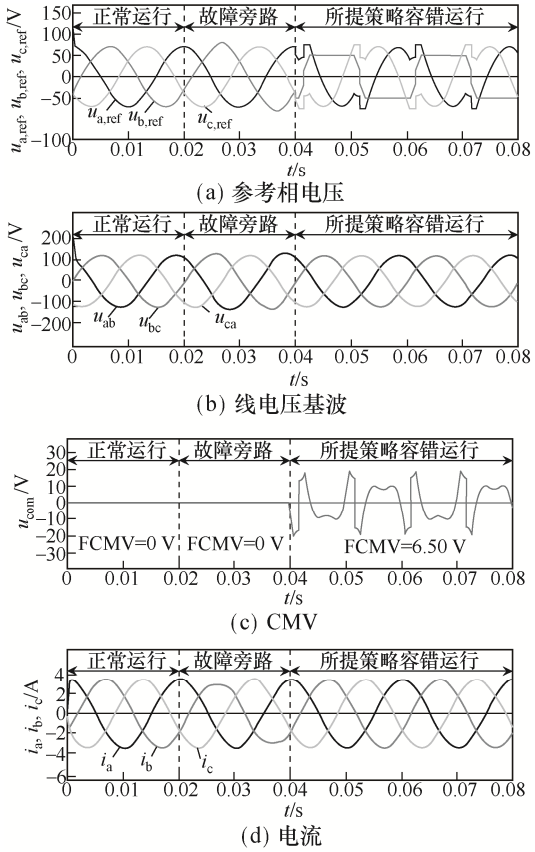
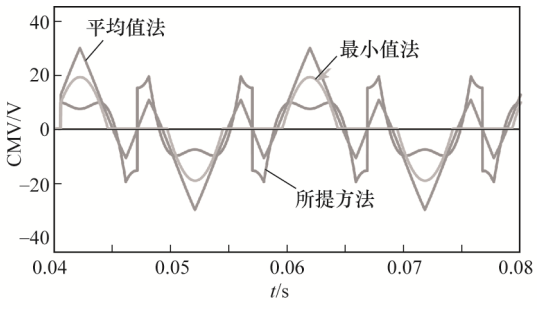


图 5 U_{II}=120 V 时 3-2-3 故障仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms under 3-2-3 fault at U_{II}=120 V

在同等工况下，发生故障后注入不同的 CMV 容错运行，如图 6 所示。图 6(a)为平均值法、最小值法及所提方法注入 CMV 的仿真波形，结果显示所提方法降低了 CMV 的峰值。分别对这3种CMV进行频谱分析，如图6(b)~(d)所示。平均值法的 FCMV 达到了 14.51 V，最小值法的 FCMV 为 11.85 V,所提方法的 FCMV 仅为 6.50 V，显著减少了注入 CMV 的基频成分。



(a) 不同CMV仿真波形

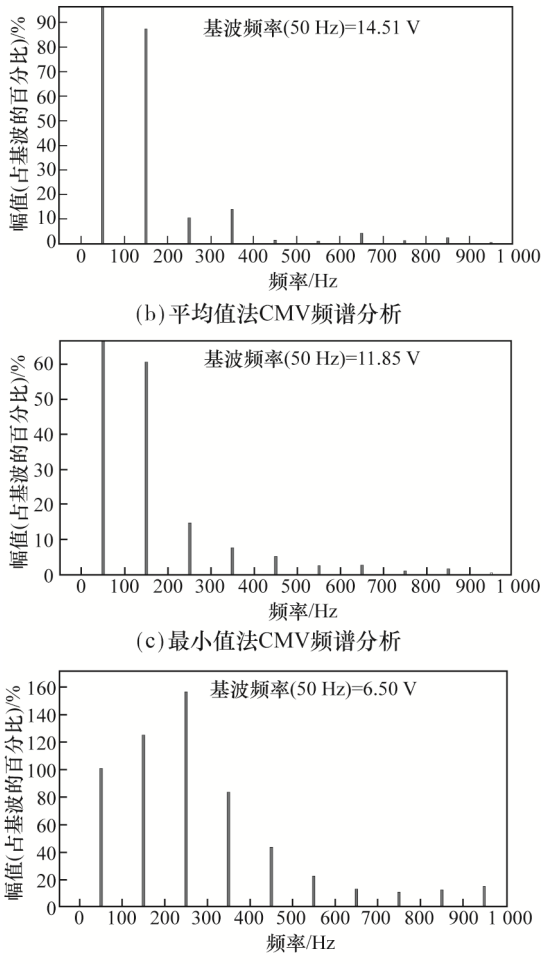


图 6 U_{II}=120 V 时 3-2-3 故障不同 CMV 对比

Fig. 6 Comparison of different CMVs under 3-2-3 fault at U_{II}=120 V

3.2 实验验证

为验证本文所提容错运行策略的有效性，搭建了如图 7 所示的三相隔离型七电平 CHB 实验平台。该实验平台为两级式 CHB 逆变器，前级为隔离型全桥 LLC，后级为 CHB 逆变器。LLC 的输入端接直流电压源，输出端作为 CHB 的直流电压源。主电路为 CHB，输出侧接并网板，并网板含滤波电路及电压电流采样电路等，且通过并网板连接负载。此外，数字信号处理器 DSP(digital signal

processor)用于前级 LLC 控制，主电路的控制通过转接板与控制器实现。

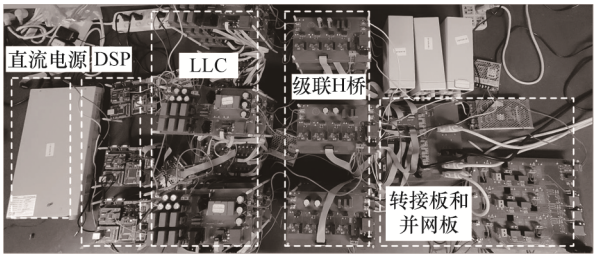


图 7　实验平台

Fig. 7 Experimental platform

本次实验前级 LLC 仅作为 CHB 的直流源。实验时通过控制驱动信号来模拟开关管开路故障，并在故障发生后立即将故障模块旁路。正常工作条件下，三相带纯电阻负载，保持单位功率因数运行，交流侧电压、电流对称。CHB 的输入电压即 LLC 的输出电压为 25 V，H 桥正常输出阶梯波电压为七电平。实验在系统正常工作一段时间后，使 A 相第 2 个模块中的 1 个开关管故障，并立即采取完全旁路方法将故障模块从系统中隔离，即模拟了 2-3-3 故障。故障旁路后 A 相缺失 2 个电平，其他两相则保持不变。三相中 A 相的电流发生明显畸变，且由于 A 相电平的缺失，三相输出线电压和电流不再对称。

在所需线电压大于 $2N_{\min}U_{dc}$(即 $4U_{dc}$)区间内验证所提容错运行策略，控制故障后输出线电压为 120 V，如图 8 所示，三相负载电流、线电压恢复平衡，系统继续正常运行，逆变器输出相电压波形发生改变，负载中性点与逆变器中性点间存在 1 个 CMV。在同等工况下，故障旁路后应用了传统的平均值法和最小值法，并将 3 种方法 CMV 的数据用 MATLAB 进行了快速傅里叶变换 FFT(fast Fourier transform)分析。传统方法 2-3-3 故障实验结果(电流、CMV)及 3 种方法 CMV 频谱如图 9 所示。平均值法和最小值法均能使三相电流恢复平衡，但是其 CMV 基频幅值分别为 14.14 V 和 11.15 V，而所提方法 CMV 基频幅值仅为 6.12 V。经实验验证，所提方法注入的 CMV 基频幅值相比平均值法降低了 57%，相比最小值法减少了 45%。

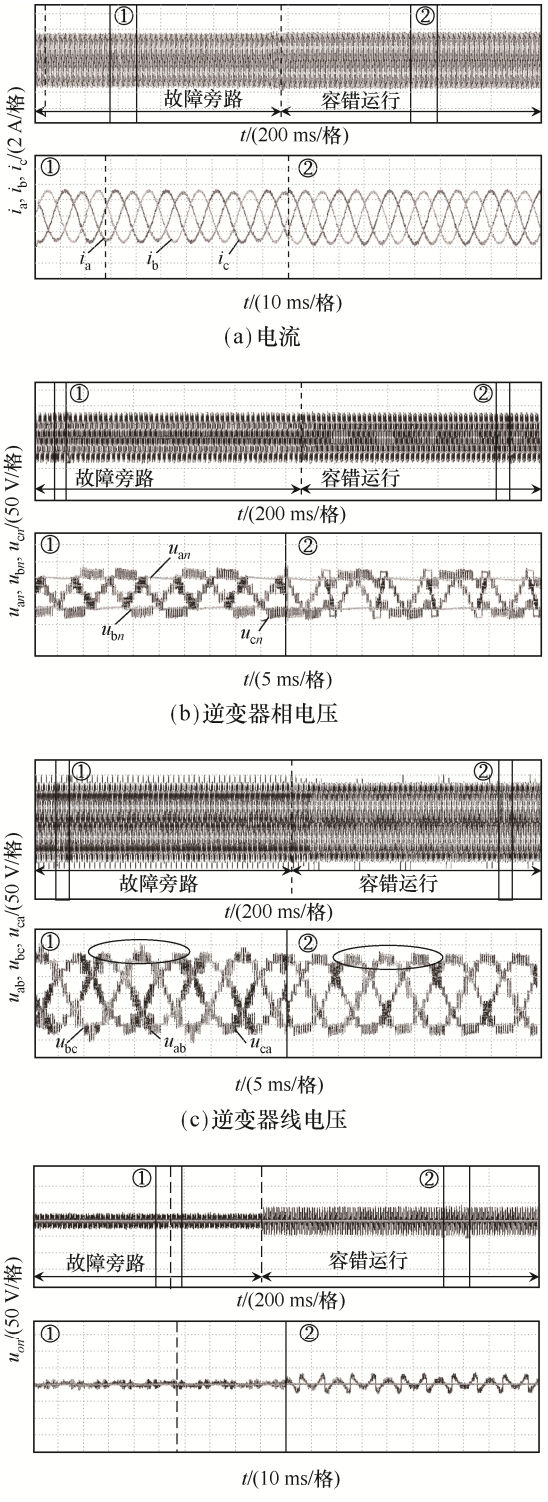
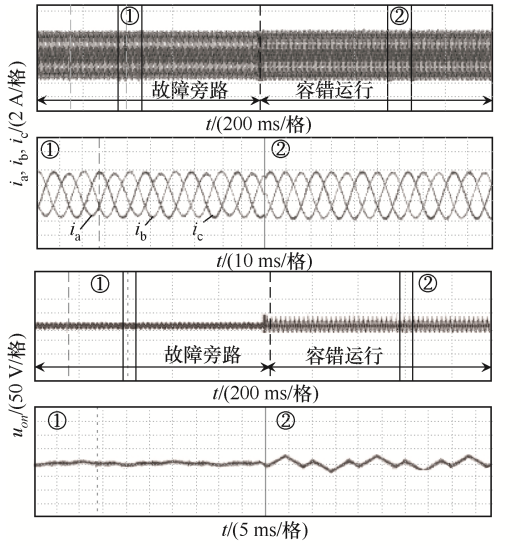
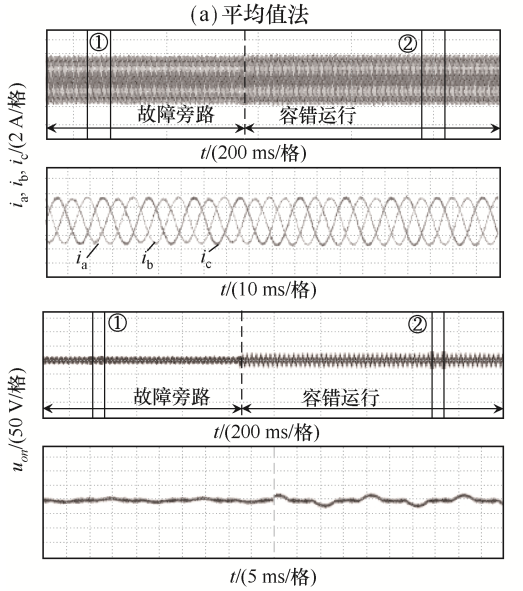


图 8　所提方法 2-3-3 故障实验结果

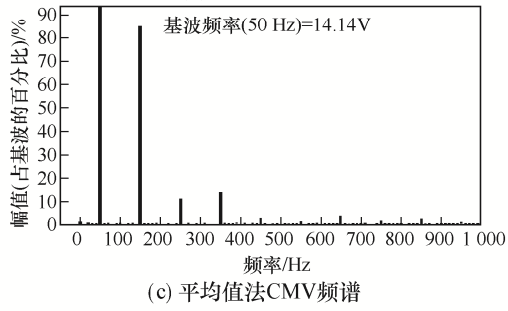
Fig. 8 Experimental results of the proposed method under 2-3-3 fault



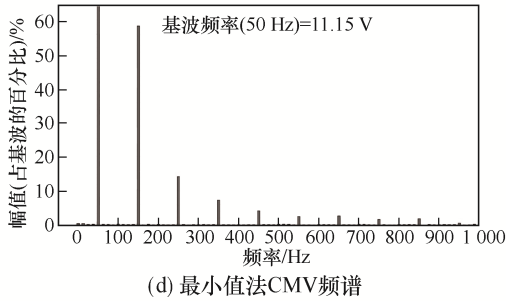
(a) 平均值法



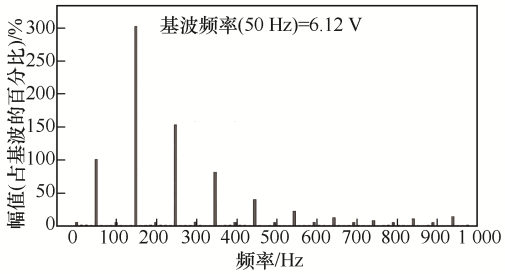
(b) 最小值法



(c) 平均值法CMV频谱



(d) 最小值法CMV频谱



(e) 所提方法CMV频谱

图 9 传统方法 2-3-3 故障实验结果(电流、CMV)及 3 种方法 CMV 频谱

Fig. 9 Experimental results of the traditional method under 2-3-3 fault with CMV spectra of three methods

4 结语

本文提出了一种三次谐波与交替钳位算法相结合的 CMV 注入方法。通过在正、负半周期内分别将最弱相参考电压钳位至最大电压，增大故障相电压，在线性调制区域内取超出电压作为 CMV 注入，尽可能地减小了 CMV；再通过注入三次谐波扩大 CMV 的线性调制区域，增大无需注入 CMV 的线电压范围，扩大了故障后容错运行的工作区域。对三相七电平模块故障进行了仿真和实验验证，证明了所提策略的基本容错功能，且最大程度地减小了 FCMV。

参考文献：

[1] Ota J I Y, Sato T, Akagi H. Enhancement of performance, availability, and flexibility of a battery energy storage system based on a modular multilevel cascaded converter (MMCC-SSBC) [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 2791-2799.

[2] 王晓鹏, 姚帅亮, 姚芳, 等. 逆变器功率管开路故障诊断方法综述[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 156-169.
Wang Xiaopeng, Yao Shuailiang, Yao Fang, et al. Review of open-circuit fault diagnosis methods for inverter power transistors [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 156-169. (in Chinese)

[3] 顾军, 张维国, 李平, 等. 级联 H 桥逆变器的新型功率均衡调制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 42-50.
Gu Jun, Zhang Weiguo, Li Ping, et al. Novel power equalization modulation strategy for cascaded H-bridge inverter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 42-50. (in Chinese)

[4] 叶伟, 李善寿, 张可, 等. 混合级联 H 桥逆变器改进功

率均衡调制策略[J]. 电源学报, 2026, 24(1): 51-60.
Ye Wei, Li Shanshou, Zhang Ke, et al. Improved power balance modulation strategy for hybrid cascaded H-bridge inverter [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(1): 51-60. (in Chinese)

[5] Neyshabouri Y, Iman-Eini H. A new fault-tolerant strategy for a cascaded H-bridge based STATCOM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6436-6445.

[6] 朱旭, 胡长生, 董璧韬. 一种基于级联 H 桥多电平变换器的故障容错控制方法[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 199-207.
Zhu Xu, Hu Changsheng, Dong Bitao. Fault-tolerant control method for cascaded H-bridge multilevel converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 199-207. (in Chinese)

[7] Salimian H, Iman-Eini H. Fault-tolerant operation of three-phase cascaded H-bridge converters using an auxiliary module [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1018-1027.

[8] Moradi E, Iman-Eini H, Sheikhaei S. A simple hardware-based fault-tolerant method for cascaded H-bridge converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(10): 9711-9720.

[9] Aleenejad M, Jafarishiadeh S, Mahmoudi H, et al. Reduced number of auxiliary H-bridge power cells for post-fault operation of three phase cascaded H-bridge inverter [J]. IET Power Electronics, 2019, 12(11): 2923-2931.

[10] 董志强, 王琛琛, 周明磊, 等. 基于 SHEPWM 的三电平三相逆变器中点电位主动平衡控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1147-1158.
Dong Zhiqiang, Wang Chenchen, Zhou Minglei, et al. Active neutral-point voltage balance control strategy for three-level three-phase inverter under SHEPWM [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1147-1158. (in Chinese)

[11] 朱琴跃, 于逸尘, 占岩文, 等. 基于短时傅里叶变换和深度网络的模块化多电平换流器子模块 IGBT 开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3840-3854.
Zhu Qinyue, Yu Yichen, Zhan Yanwen, et al. IGBT open-circuit fault diagnosis of modular multilevel converter sub-module based on short-time Fourier transform and deep networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3840-3854. (in Chinese)

[12] Lezana P, Ortiz G. Extended operation of cascade multicell converters under fault condition [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2697-2703.

[13] Carnielutti F, Pinheiro H, Rech C. Generalized carrier-based modulation strategy for cascaded multilevel converters operating under fault conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 679-689.

[14] Neyshabouri Y, Monfared K K, Iman-Eini H, et al. Symmetric cascaded H-bridge multilevel inverter with enhanced multi-phase fault tolerant capability [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 8739-8750.

[15] Fathi M, Khajehoddin S A. A fault compensation scheme for cascaded H-bridge inverter with reduced common mode voltage [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(4): 3257-3267.

[16] Ouni S, Zolghadri M R, Khodabandeh M, et al. Improvement of post-fault performance of a cascaded H-bridge multilevel inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 2779-2788.

[17] Xiao Q, Chen L, Jin Y, et al. An improved fault-tolerant control scheme for cascaded H-bridge STATCOM with higher attainable balanced line-to-line voltages [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 2784-2797.

[18] Sharma R, Das A. Postfault operation of cascaded H-bridge converter for equal power handling by the healthy cells [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(11): 9174-9183.

[19]宋峻竑. 电池柔性成组储能系统故障容错控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
Song Junhong. Research on fault-tolerant control for flexible group battery energy storage system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)



杨柳

作者简介：

杨柳(2001—)，女，硕士研究生。研究方向：电力电子变换器的容错运行。E-mail：2023110391@mail.hfut.edu.cn。

黄海(2001—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：电力电子变换器的故障诊断。E-mail：2023170528@mail.hfut.edu.cn。

邱荣禄(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：多电平电力电子装置。E-mail：2022170499@mail.hfut.edu.cn。

王涵宇(1990—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：电力电子变换器的故障诊断及容错运行。E-mail：hywang@hfut.edu.cn。

张兴(1963—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：新能源发电及其电力电子技术。E-mail：honglf@ustc.edu.cn。

(责任编辑：耿越)