

有源中点钳位逆变器逐波“软”限流方法

翁婷婷¹, 李晓华^{1*}, 余江², 孔飞², 刘华东³, 孙啸宇¹, 戈本俊¹

1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641;
2. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510663;
3. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

Cycle-by-Cycle "Soft" Current Limiting Methods for ANPC Inverters

Weng Tingting¹, Li Xiaohua^{1*}, Yu Jiang², Kong Fei², Liu Huadong³,
Sun Xiaoyu¹, Ge Benjun¹

- (1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510663, China;
3. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: [Objective] With the rapid development of new energy, the weak anti-interference capability of new energy inverters intensifies the risk of cascading grid disconnection after fault disturbances, posing new challenges to current risk prevention and control technologies for protection. This paper investigates the cycle-by-cycle (CBC) current limiting control methods for the fault condition of active neutral point clamped (ANPC) inverters when an AC side short circuit occurs. [Methods] In traditional CBC current limiting control methods, all switching devices of the inverter were turned off when the current exceeded the over-current threshold. However, this frequently triggered current limiting control, resulting in high current change rate di/dt of switching devices, and excessive current flowing through the anti-parallel diode of the insulated gate bipolar transistor (IGBT), which failed to effectively protect the switching devices in the inverter. Between the control strategy of forcibly turning off all switching devices and the new energy grid disconnection accidents caused by allowing over-current to develop, this paper proposed a technology that controlled the inverter in an intermediate state—partial-switching-off CBC "soft" current

limiting control technology. When the control was triggered, the specified switching devices were turned off while the remaining ones were kept on. Finally, a simulation model was established using MATLAB/Simulink to verify the proposed CBC current limiting control method. [Results] The results indicated that this method could effectively reduce the number of triggers, lower the di/dt of the switching devices, and decrease the current peak value of the internal switching devices in the inverter, thereby enhancing the reliability of the inverter. Compared with the full-switching-off CBC current limiting method, the trigger cycles of the partial-switching-off CBC "soft" current limiting were longer, and the trigger frequency was lower. Moreover, the CBC "soft" current limiting method limited the peak current of the switching devices to a lower level, which was beneficial for improving the reliability of the inverter and optimizing the CBC current limiting control method. [Conclusion] The proposed CBC "soft" current limiting control method for ANPC inverters can effectively control inverter current under short-circuit faults, improve the inverter's short-circuit fault ride-through capability, and provide technical support for the safe operation of new energy grid connection.

Key words: cycle-by-cycle current limiting; active neutral point clamped inverter; over-current protection; switching device current stress

摘要: [目的]随着新能源的迅速发展,新能源逆变器的弱抗扰性加剧了其在故障扰动后发生连锁性脱网的风

基金项目:广东省自然科学基金海上风电联合基金重点项目(2024B1515250001);广东省自然科学基金面上项目(2025A1515010058)

Project supported by Key Project of Offshore Wind Power Joint Fund of Guangdong Provincial Natural Science Foundation (2024B1515250001) and General Project of Guangdong Provincial Natural Science Foundation (2025A1515010058)

险,对现有保护风险防控技术提出了新的挑战。针对有源中点钳位(ANPC)逆变器交流侧短路的故障工况,本文对逐波限流控制方法进行了研究。【方法】在传统的逐波限流控制方法中,当电流大于过流阈值时,会断开逆变器所有开关器件。但这会频繁触发限流控制,开关器件的电流变化率 di/dt 很高,且有过电流流过绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的反并联二极管,无法有效保护逆变器中的开关器件。在强制关断所有开关器件的控制与放任过电流发展导致新能源脱网事故发生之间,本文提出了一种控制逆变器介于中间状态的技术,即开关部分关断的逐波“软”限流控制技术。当触发控制时,关断指定开关器件,导通剩余开关器件。最后使用 MATLAB/Simulink 建立仿真模型,对本文提出的逐波限流控制方法进行验证。【结果】结果表明,该方法可有效减少触发次数,降低开关器件的 di/dt ,并且降低逆变器内部开关器件的电流峰值,提高逆变器的可靠性。与全关断逐波限流相比,逐波“软”限流的触发周期更长,触发次数更少,且将开关器件电流峰值限制在更低水平,有利于提高逆变器的可靠性,优化了逐波限流控制方法。【结论】本文提出的有源中点钳位型逆变器逐波“软”限流控制方法,在短路故障情况下,能够有效减小逆变器开关器件电流应力,提升逆变器短路故障穿越能力,为新能源并网安全运行提供技术支持。

关键词: 逐波限流;有源中点钳位逆变器;过流保护;开关器件电流应力

0 引言

随着全球气候变化和能源危机的加剧,近年来全世界新能源迅速发展^[1-4]。2016年和2019年,澳大利亚电网和英国电网分别受强台风和雷击影响造成电网故障,引发大规模新能源脱网^[5-6]。2016至2023年期间,北美地区也发生了多起由电网故障引发的新能源大规模脱网事故^[7],此类由大规模新能源脱网引发的大范围停电事故得到了国内外的广泛关注。风电、光伏等新能源发电设备所接变流器的弱抗扰性使得故障后逆变器电流急剧上升,加剧其在故障扰动后发生连锁性脱网的风险,给电力系统的安全稳定运行带来了严峻挑战^[8-11]。因此,研究逆变器的过流保护和故障穿越能力变得尤为重要^[12-14]。

目前相关研究主要集中于软件与硬件两类限流方法。由于数字控制存在采样延迟与控制环延迟,基于软件的限流方法均存在动态响应缓慢的

缺陷,难以在短路故障工况下对开关器件实现有效保护^[15-17]。因此,需重新审视硬件限流方法,开展针对性分析与优化。硬件限流中,断路器与熔断器响应慢,无法瞬时应对短路故障,且不可即时复位,不具备短路穿越能力^[18-19]。逐波限流作为有效的硬件限流方案,可实现过流限制、短路穿越及开关器件电流管控^[20-21]。文献[22]提出了IGBT全关断逐波限流策略,虽能快速关断并恢复,但存在开关器件 di/dt 过大、触发频繁等问题,影响逆变器稳定性。为此,研究提出了部分关断逐波限流方法。文献[20]针对三电平中点钳位半桥逆变器,提出了一种减少触发次数并保护反并联二极管的开关部分关断逐波限流方法。专利[23]针对三电平逆变电路提出了一种逐波限流控制电路,过流时立刻封锁开关器件驱动。文献[24]基于高速运放与高精度比较器,提出了适用于2.2 MHz开关电源的低功耗逐波限流器。文献[25]提出了逐波限流特殊处理控制方法,减小辅助开关器件电流应力。但在部分关断逐波限流下,逆变器内部开关器件仍承受部分过电流。

然而,针对新能源并网场景中广泛应用的有源中点钳位(Active Neutral Point Clamped, ANPC)三电平逆变器,其逐波限流技术的相关研究仍较为匮乏。为此,本文对ANPC逆变器的逐波限流技术展开研究,分析其对逆变器内外电流特性的影响,在目前国内外ANPC逆变器逐波限流技术研究的基础上提出一种新型逐波“软”限流方法。该方法能有效减少控制触发次数,降低开关器件电流应力,提高逆变器的故障穿越能力。

1 逆变器工作原理

新能源电力ANPC逆变器系统主要由新能源发电机、直流侧稳压电容器、逆变电路、滤波电路等组成,拓扑结构如图1所示。ANPC逆变器主电路拓扑包含a、b、c三相,每一相由开关单元 S_{x1} - S_{x6} 组成(其中 $x = a, b, c$, 表示A、B、C三相),开关单元包括绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) T_{x1} - T_{x6} 及其反并联二极管 D_{x1} - D_{x6} 。IGBT开关管 T_{x5} 和 T_{x6} 及其反并联二极管 D_{x5} 、 D_{x6} 被钳位到直流母线中点 O 。输出端分别能够输出 $+V_{dc}/2$ 、 0 和 $-V_{dc}/2$ 三种电压。

在正常运行状态下,逆变器基于三相桥臂的

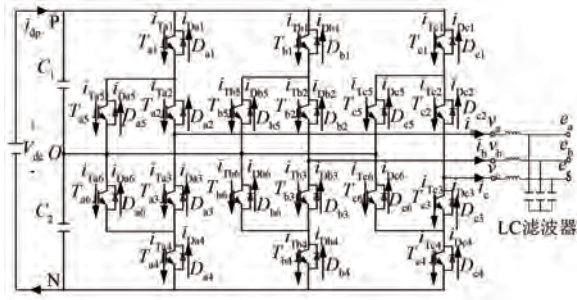


图1 ANPC 逆变器拓扑结构

Fig.1 ANPC inverter topology

对称结构与 1 状态(P 状态)、-1 状态(N 状态)、0 状态(OU/OL 状态)的周期性切换,通过调节各相开关单元中 IGBT 的导通时序与占空比,使输出电压跟踪给定参考值,进而驱动输出电流平稳跟踪电网或负载需求,确保电能高质量变换与传输。

这一控制目标的实现依赖于精准的电流感控策略,ANPC 逆变器采用三电平层叠式载波脉宽调制(Pulse-Width Modulation, PWM)策略实现电流感控,该策略将三角载波与参考调制波进行实时比较,生成高低电平驱动信号,并将其合理分配至主电路各开关器件,以此控制开关器件的有序开通与关断。

PWM 的驱动信号生成如图 2 所示,其中 u_s 为调制波, u_{c1} 和 u_{c2} 为三角载波。其原理为当调制波 u_s 为正且 $u_s > u_{c1}$ 时, v_{gsx1} 、 v_{gsx2} 、 v_{gsx6} 为高电平, v_{gsx3} 、 v_{gsx4} 、 v_{gsx5} 为低电平,此时输出状态为 P 状态; $u_s < u_{c1}$ 时, v_{gsx1} 、 v_{gsx3} 、 v_{gsx6} 为高电平, v_{gsx2} 、 v_{gsx4} 、 v_{gsx5} 为低电平,此时输出状态为 OL 状态。当调制波 u_s 为负且 $u_s > u_{c2}$ 时, v_{gsx2} 、 v_{gsx4} 、 v_{gsx5} 为高电平, v_{gsx1} 、 v_{gsx3} 、 v_{gsx6} 为低电平,此时输出状态为 OU 状

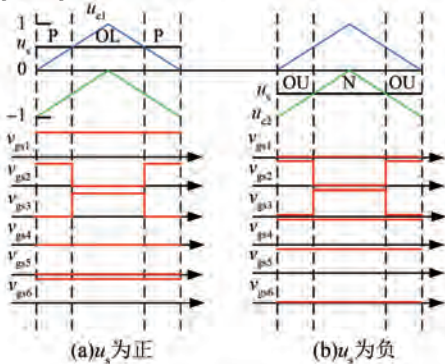


图2 三电平层叠式载波 PWM 调制策略

Fig.2 Three-level stacked carrier PWM modulation strategy

态; $u_s < u_{c2}$ 时, v_{gsx3} 、 v_{gsx4} 、 v_{gsx5} 为高电平, v_{gsx1} 、 v_{gsx2} 、 v_{gsx6} 为低电平,此时输出状态为 N 状态。

逆变器工作时, PWM 控制发出驱动信号 v_{gsx1} - v_{gsx6} , IGBT 在接收到高电平驱动信号时导通,各开关器件在控制发出的驱动信号作用下轮换导通,实现交直流变换,如图 3 及表 1 所示。单个开关单元中 IGBT 与反并联续流二极管有互锁工作机制,即 IGBT 导通时续流二极管关断, IGBT 关断后续流二极管仅在满足导通条件时导通。

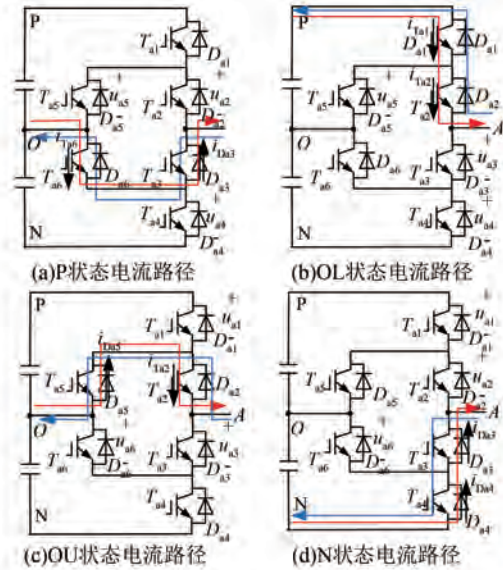


图3 ANPC 逆变器电流路径

Fig.3 Current paths of the ANPC inverter

表1 ANPC 逆变器开关状态

Tab.1 Switching states of ANPC inverter

开关状态	P	OL	OU	N
v_{gsx1}	1	1	0	0
v_{gsx2}	1	0	1	0
v_{gsx3}	0	1	0	1
v_{gsx4}	0	0	1	1
v_{gsx5}	0	0	1	1
v_{gsx6}	1	1	0	0

当弱抗扰性逆变器遭遇交流侧短路等突发故障时,电网电压骤降会引发电流快速飙升,若不及时抑制,过高的电流应力将严重损坏开关器件,甚至导致逆变器脱网。由于数字控制存在采样延迟与控制环延迟,基于软件的限流方法均存在动态响应缓慢的缺陷,难以在短路故障工况下对开关器件实现有效保护。

为解决这一故障防护难题,逐波限流技术成为 ANPC 逆变器的关键保护方案,该方法依托硬件快速检测与实时响应机制,在每个 PWM 周期内对输出电流进行动态监测,一旦检测到电流超过预设安全阈值,立即通过调整开关器件导通逻辑(如全关断或部分关断)限制电流幅值,避免器件过载,待故障缓解后恢复正常控制,为逆变器的故障穿越提供可靠保障。

2 现有逐波限流策略分析

2.1 全关断逐波限流控制分析

2.1.1 全关断逐波限流控制策略

传统全关断逐波限流控制策略为在三相输出电流绝对值超过电流限定值时,封锁该相所有开关管,至下一开关周期到来时,若三相电流下降至限定值之下,则恢复开关管的正常发波。其在短路情况发生时关断所有开关器件,如图 4 所示,电流将会流过开关的输入电容和反向并联二极管。

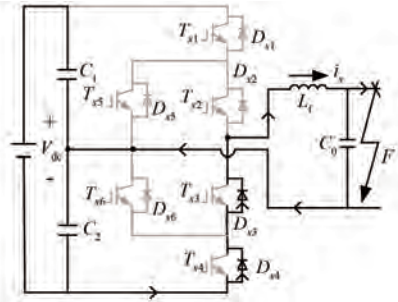


图 4 ANPC 逆变器全关断逐波限流电路

Fig. 4 Circuit of ANPC inverter full-switching-off CBC current limiting

以正半周期为例,当电流绝对值 $|i_x|$ 大于电流上限值 I_{sth_h} 时,所有开关管的驱动信号 $v_{gsx1} - v_{gsx6}$ 均变为低电平。当电流绝对值下降至电流下限值 I_{sth_l} 以下,各开关恢复正常工作;若电流绝对值大于限定值,则所有开关继续保持封锁。

2.1.2 全关断逐波限流存在的不足

基于全关断逐波限流控制,对逆变器在短路故障条件下的开关状态进行了详细分析。

所采用的电路参数列于表 2 中。逆变器的电流上限值 I_{sth_h} 和下限值 I_{sth_l} 分别为 46 A 和 42 A,其由比较器实现。电感值 0.003 H、电阻值 0.08 Ω 用于以下计算和模拟。

表 2 仿真电路参数

Tab. 2 Circuit parameters for simulation

参数名称	参数值
直流侧电压 U_{dc}/kV	1
开关频率 f_{sw}/kHz	20
滤波器电感 L_f/mH	3
滤波器电阻 r_L/Ω	0.08
滤波器电容 $C_0/\mu F$	10

短路故障条件下,A 相正半周开关状态的等效电路如图 5 和图 6 所示。其中, v_{A0} 为 A 端和 O 端之间的输出电压, i_A 为 A 相电流。

(1) 状态 1

i_A 从 I_{sth_l} 增加到上限 I_{sth_h} ,如图 5(a) 所示, S_{a1} 和 S_{a2} 导通,其他开关关断。因此,电感和电阻上的电压等于直流电压的 1/2。

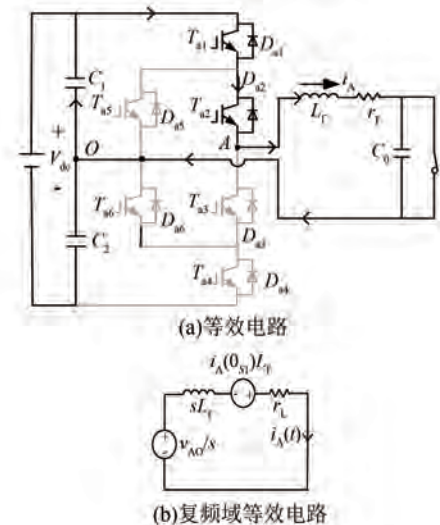


图 5 全关断逐波限流下,状态 1 的等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of state 1 with full-switching-off CBC current limiting

从图 5(b) 复频域中的等效电路可得状态 1 下电感电流 $i_{1A}(s)$ 的表达式,如式(1)所示:

$$i_{1A}(s) = \frac{v_{A0}/s + i_A(0_{S1})L_f}{(sL_f + r_L)} \quad (1)$$

式中: s 为复频率; $i_A(0_{S1})$ 为状态 1 开始时的电感电流的初始值,其值等于 I_{sth_l} 。

根据表 2 所列参数,利用拉普拉斯逆变换计算得到电流 i_A 增加到 I_{sth_h} 的持续时间 t_{rfs} 为 32.3 μs ,电流变化率 di/dt 为 123.84 A/ms。

由于开关周期为 50 μs , t_{rfs} 接近开关周期的

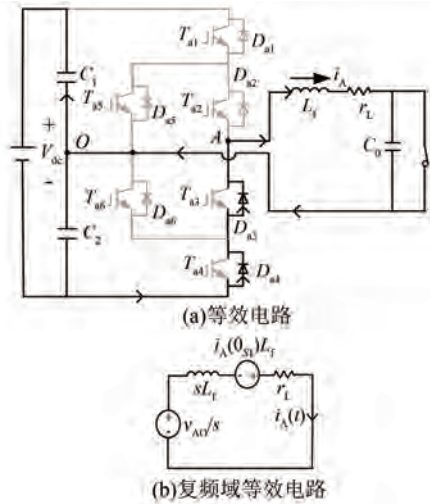


图 6 全关断逐波限流下,状态 2 的等效电路
Fig. 6 Equivalent circuit of state 2 with full-switching-off CBC current limiting

一半,这表明在如此短的时间内,若没有任何保护措施,电流会急剧升高至逐波限流阈值上限。

(2) 状态 2

如图 6(a) 所示,根据全关断逐波限流控制, S_{a3} 和 S_{a4} 的反并联二极管导通,并且所有开关关断。此时,电感和电阻上的电压等于直流电压的 $-1/2$ 。

从图 6(b) 复频域中的等效电路可得状态 2 下电感电流 $i_{2A}(s)$ 的表达式,如式(2)所示:

$$i_{2A}(s) = \frac{v_{A0}/s + i_A(0_{S2})L_r}{(sL_r + r_L)} \quad (2)$$

式中: $i_A(0_{S2})$ 为状态 2 开始时的电感电流初始值,其值等于 $I_{sth,h}$ 。

根据表 2 所列参数,利用拉普拉斯逆变换计算得到电流 i_A 下降到 $I_{sth,l}$ 的持续时间 t_{fls} 为 $31.7 \mu s$,电流变化率 di/dt 为 $-126.18 A/ms$ 。

此时流过开关器件的电流值为

$$i_{Da3} = i_{Da4} = i_A \quad (3)$$

式中: i_{Da3} 为流过逆变器 A 相续流二极管 Da3 的电流; i_{Da4} 为流过逆变器 A 相续流二极管 Da4 的电流。

根据上述开关状态分析,状态 1 和状态 2 的总时间为 $64 \mu s$,触发频率为 $15.625 kHz$,开关周期为 $50 \mu s$,实际控制逻辑波形如图 7 所示。

全关断逐波限流的触发频率几乎等于开关频率,逐波限流的高频次触发直接导致交流侧输出

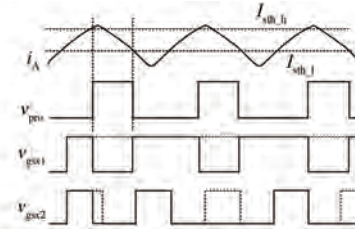


图 7 全关断逐波限流控制逻辑波形
Fig. 7 Waveforms of the full-switching-off CBC current limiting control logic

电流波形呈现剧烈的周期性锯齿振荡,这对电力系统的可靠性是不利的。

此外,在状态 2 时,故障电流会全部流经 IGBT 的反并联二极管,二极管成为唯一的载流器件。反并联二极管的电流传导特性通常比独立的快速恢复二极管差,正向导通压降更高,导通损耗更大,且反向恢复速度更慢。全关断逐波限流下,IGBT 及续流二极管损耗较大。

因此,全关断逐波限流控制不能有效地保护 ANPC 逆变器中的开关器件。

2.2 部分关断逐波限流控制分析

2.2.1 部分关断逐波限流控制策略

在 ANPC 逆变器中,部分关断逐波限流控制是当交流电流绝对值超过电流上限时,开关器件 S_{a1} 和 S_{a4} 关断, S_{a2} 、 S_{a3} 、 S_{a5} 和 S_{a6} 的驱动信号仍由调制波经 PWM 调制生成并调节。电流流过开关装置 S_{a5} 或 S_{a6} 和开关装置 S_{a2} 或 S_{a3} 的情况,如图 8 所示。

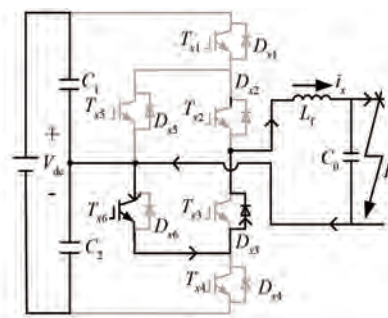


图 8 ANPC 逆变器部分关断逐波限流电路
Fig. 8 Circuit of ANPC inverter partial-switching-off CBC current limiting

与传统全关断逐波限流控制相比,部分关断逐波限流控制中的驱动信号 v_{gsa2} 、 v_{gsa3} 、 v_{gsa5} 和 v_{gsa6} 仍然由调制波经 PWM 调制生成并调节。因此,在短路故障条件下,逐波限流方法仅控制 v_{gsa1} 和

v_{gsx4} 关断。

2.2.2 部分关断逐波限流存在的不足

短路故障条件下开关状态的等效电路如图 9 (a) 所示, 可以看出, 电感电流流经 T_{a6} 和 D_{a3} , AO 端电压等于 0, 此时电感电流逐渐减小到下限。

(1) 状态 1

该状态类似于全关断逐波限流的状态 1, 复频域的等效电路如图 9 (b) 所示。计算得出电流 i_A 从 $I_{sth,l}$ 增加到 $I_{sth,h}$ 的持续时间 t_{rps} 为 32.3 μ s, 电流变化率 di/dt 为 123.84 A/ms。

(2) 状态 2

电流 i_A 从上限 $I_{sth,h}$ 减小到下限 $I_{sth,l}$, T_{a6} 和 D_{a3} 导通, 因此输入电压等于 0, 其复频域的等效电路如图 9 (c) 所示。 i_A 下降到 $I_{sth,l}$ 的持续时间 t_{fps} 为 2.47 ms, 电流变化率 di/dt 为 -1.619 4 A/ms。

此时流过开关器件的电流值为

$$i_{Ta6} = i_{Da4} = i_A \quad (4)$$

式中: i_{Ta6} 为流过 IGBT 开关管 Ta6 的电流。

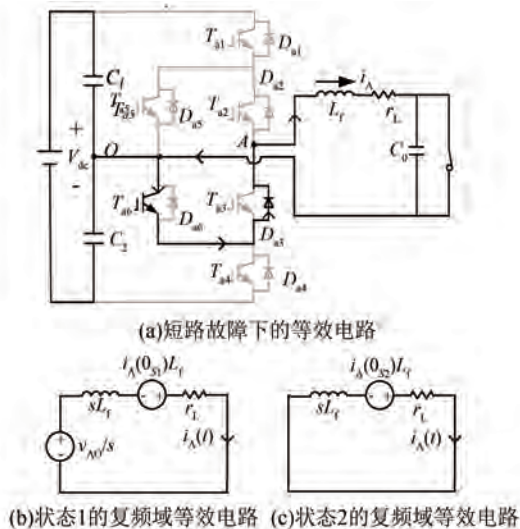


图 9 部分关断逐波限流的等效电路

Fig. 9 Equivalent circuit of partial-switching-off CBC current limiting

基于上述开关状态分析, 状态 1 和状态 2 的总时间约为 2.5 ms, 触发频率为 0.4 kHz。

部分关断限流通过选择性关断故障相桥臂的部分 IGBT, 保留其余器件的可控导通状态, 将故障电流钳位至直流侧中点电位, 避免了全部关断限流下高频次触发限流控制的问题, 减小电流变化率 di/dt 。但仍存在故障电流流过续流二极管, 且器件

损耗较大的问题, 实际控制逻辑波形如图 10 所示。

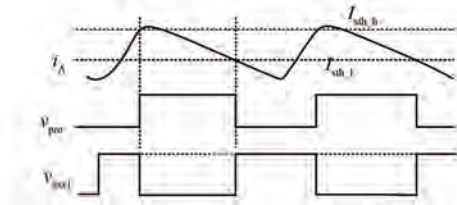


图 10 部分关断逐波限流控制逻辑波形

Fig. 10 Waveforms of partial-switching-off CBC current limiting control logic

3 新型逐波“软”限流方法

在全关断逐波限流控制下, 逆变器所有开关器件被强制关断, 但反并联续流二极管在满足导通条件时会自动导通, 导致故障电流进入不可控状态; 此时续流二极管相当于引入反向电压, 使电流快速衰减, 进而引发逐波限流的反复触发, 加剧开关器件的应力冲击。部分关断逐波限流控制虽能将逆变器钳位至中点电压, 减缓电流下降速度以减少触发频次, 且避免电流流经反并联续流二极管, 但逆变器内部开关器件仍需承受部分过电流应力。

鉴于 ANPC 逆变器采用全控型器件的拓扑特征, 本文提出一种优化控制策略, 即逐波“软”限流方法。该方法在过流发生时, 通过控制驱动信号将逆变器钳位至中点电压, 同时导通内部两条对称电流通路, 使故障电流在两条路径中均衡分配, 从而显著降低单个开关器件的电流应力及损耗, 有效提升逆变器在故障工况下的运行可靠性。

3.1 新型逐波“软”限流控制策略

利用 ANPC 内部器件皆为全控器件的特征进行逐波限流的优化, 改进逐波限流策略。当交流电流超过电流上限时, 将开关器件 S_{x1} 和 S_{x4} 关断, S_{x2} 、 S_{x3} 、 S_{x5} 和 S_{x6} 同时打开, 增加内部器件流通支路, 电流流过开关装置 S_{x5} 、 S_{x6} 和开关装置 S_{x2} 、 S_{x3} , 如图 11 所示。

逐波“软”限流控制在短路故障条件下, 只有 v_{gsx1} 和 v_{gsx4} 关断, v_{gsx2} 、 v_{gsx3} 、 v_{gsx5} 和 v_{gsx6} 全部开通。

3.2 新型逐波“软”限流原理

短路故障条件下开关状态的等效电路如图 12 (a) 所示, 可以看出, 电感电流流经 D_{a5} 、 T_{a2} 、 T_{a6} 和 D_{a3} , AO 端电压等于 0, 此时电感电流逐渐减小到下限。

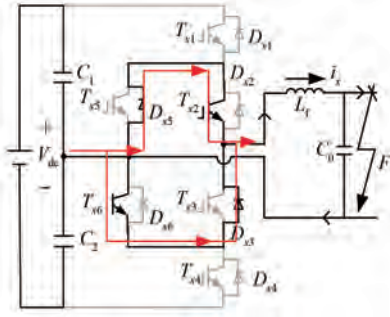


图 11 新型逐波“软”限流电路

Fig. 11 Circuit of novel partial-switching-off CBC "soft" current limiting

(1) 状态 1

该状态类似于部分关断逐波限流的状态 1, 复频域的等效电路如图 12(b) 所示。

电流 i_A 从 $I_{sth,l}$ 增加到 $I_{sth,h}$ 的持续时间为 $32.3 \mu s$, 电流变化率 di/dt 为 $123.84 A/ms$ 。

(2) 状态 2

该状态类似于部分关断逐波限流的状态 2。 D_{a5} 、 T_{a2} 、 T_{a6} 和 D_{a3} 导通, 复频域中的等效电路如图 12(c) 所示。电流 i_A 从 $I_{sth,h}$ 减小到 $I_{sth,l}$ 持续时间为 $2.47 ms$, 电流变化率 di/dt 为 $-1.619 4 A/ms$ 。

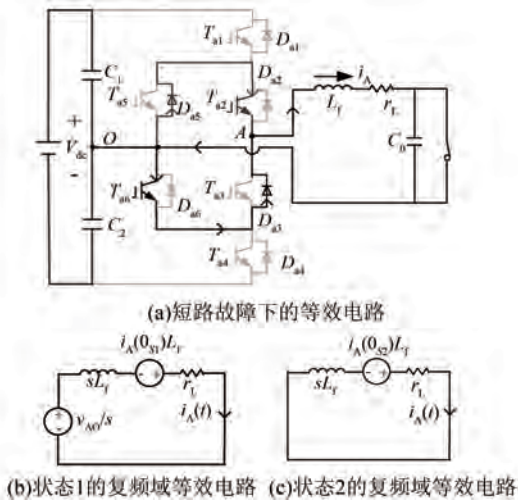


图 12 逐波“软”限流等效电路

Fig. 12 Equivalent circuit of CBC "soft" current limiting

此时流过开关器件的电流值为

$$i_{Da5} = i_{Ta2} = i_{Ta6} = i_{Da4} = \frac{1}{2} i_A \quad (5)$$

式中: i_{Da5} 为流过逆变器 A 相续流二极管 $Da5$ 的电流; i_{Ta2} 为流过 IGBT 开关管 $Ta2$ 的电流。

基于上述开关状态分析, 状态 1 和状态 2 的

总时间为 $2.5 ms$, 触发频率为 $0.4 kHz$, 与部分关断逐波限流控制的情况一致。

与部分关断逐波限流策略相比, 逐波“软”限流方法能同时导通逆变器内部的两条电流通路, 使双通路处于并联运行状态, 该拓扑可将续流二极管电流降至电感电流的 50% 左右。在减小开关器件电流的基础上, 逐波“软”限流方法还能降低器件损耗, 有效提高逆变器的可靠性, 实际控制逻辑波形如图 13 所示。

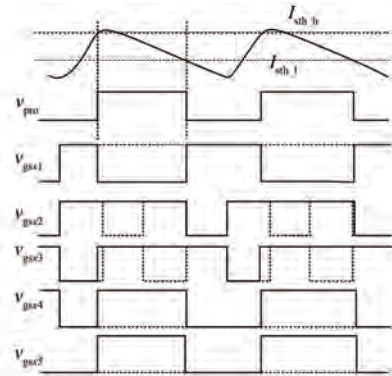


图 13 逐波“软”限流控制逻辑波形

Fig. 13 Waveforms of CBC "soft" current limiting control logic

4 仿真分析

为了研究所提出的新型逐波“软”限流控制方法的性能, 使用 MATLAB/Simulink 建立仿真模型, 仿真参数列于表 1 中, 故障类型为三相接地短路故障, 故障时间为 $45 ms$ 。

全关断逐波限流、部分关断逐波限流和逐波“软”限流在触发时刻的 A 相波形如图 14 所示。

其中, v_{out} 为输出电压, $v_{gsa1} - v_{gsa6}$ 为 $S_{a1} - S_{a6}$ 的门控信号。由图 14(a) 可以看出, 通过使用全关断逐波限流方法, i_A 在 $I_{sth,l}$ 和 $I_{sth,h}$ 之间变化, 触发周期为 $64 \mu s$ 。由图 14(c) 可以看出, 通过使用逐波“软”限流方法, i_A 在 $I_{sth,l}$ 和 $I_{sth,h}$ 之间变化, 触发周期为 $2.5 ms$; 部分关断逐波限流方法与逐波“软”限流方法在电压电流变化以及触发周期上是一致的。

与全关断逐波限流方法相比, 部分关断逐波限流方法和逐波“软”限流方法的触发周期更长, 触发次数更少, 有利于提高逆变器的可靠性。

在短路故障发生时, 电感电流上升触发逐波限流控制, 在全关断逐波限流方法、部分关断逐波

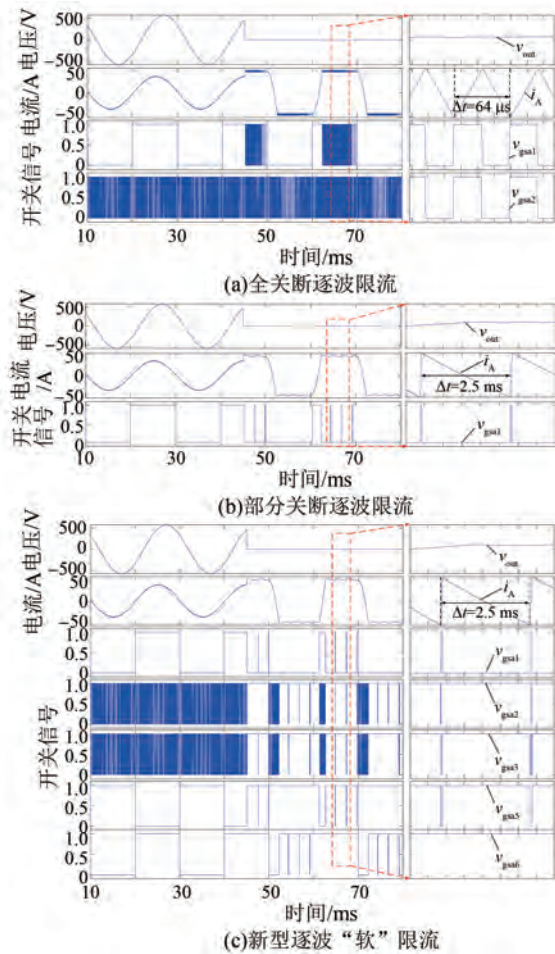


图 14 触发控制时刻波形

Fig. 14 Waveforms at the moment of trigger control

限流方法和逐波“软”限流方法下内部开关器件的电流波形,如图 15 所示。由图 15 可知,单个开关单元内 IGBT 与反并联续流二极管呈互锁工作关系,将 IGBT 与二极管电流合并不影响开关器件电流观测,即 $i_{ax} = i_{T_{ax}} + i_{D_{ax}}$, $x = 1 \sim 6$ 。

由图 15 可知,启动逐波限流控制后,全关断逐波限流方法将器件电流限制在阈值上限值以内;部分关断逐波限流方法将大部分器件电流限制在 0.5 倍的上限值以内,但开关管 3/6 的电流最大值仍为上限值;新型逐波“软”限流方法可将所有器件电流限制在 0.5 倍的上限值以内。

为进一步验证上述分析,以交流侧输出功率为变量进行仿真分析,分别在 12、8、6 kW 工况下,获取无逐波限流、全关断逐波限流、部分关断逐波限流与逐波“软”限流方法下开关器件的电流应力数据,结果见表 3。

由表 3 可知,相较于全关断逐波限流方法和

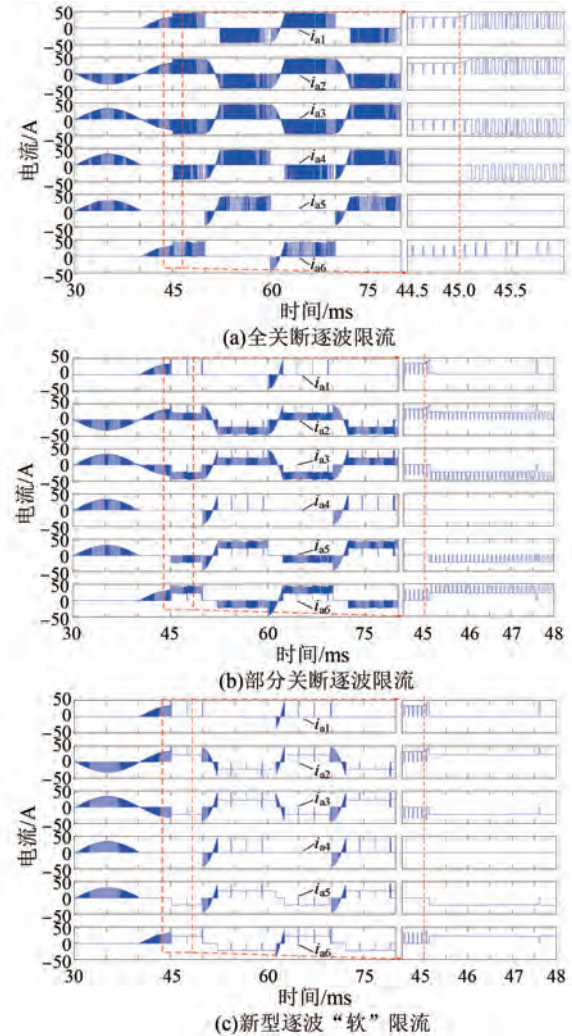


图 15 触发控制时刻开关器件电流波形

Fig. 15 Current waveforms of switching devices at the moment of trigger control

部分关断逐波限流方法,本文提出的逐波“软”限流方法可将逆变器内部开关器件电流应力降至原有水平的 50%,为逆变器短路穿越能的提升提供了基础支持。

表 3 不同输出功率下限流控制后逆变器内部开关器件电流值

Tab. 3 Current values of switching devices inside the inverter after current limiting control under different output power

	output power			A
有功功率	12 kW	8 kW	6 kW	
无逐波限流	355	296.5	257.6	
全关断逐波限流	45.65	37.73	31.86	
部分关断逐波限流	45.62	37.71	31.84	
逐波“软”限流	22.82	18.82	15.98	

在 ANPC 三电平逆变器故障工况下,开关器件的损耗特性是制约其安全运行的关键因素。参照文献[26]的 IGBT 与反并联二极管损耗计算方法,对不同逐波限流策略下的器件损耗进行对比评估。

在输出功率为 12 kW 工况下,记录 3 种逐波限流方法的逆变器 A 相各开关器件损耗数据于表 4。对比不同控制方法的各器件损耗差异,可以看出,部分关断逐波限流方法下,其最大器件损耗与全关断逐波限流方法的接近,其总损耗有些许降低;而新型逐波“软”限流方法下,其最大器件损耗约为全关断逐波限流的 0.74 倍,二极管损耗也有所降低,进而降低了总损耗。

表 4 输出功率为 12 kW,不同限流方法下 A 相各开关器件损耗值

Tab. 4 The loss values of each switching device in phase A under different current limiting methods at an output power of 12 kW W

器件损耗值	全关断逐波限流	部分关断逐波限流	逐波“软”限流
P_{Ta1}	44.367	1.314	1.173
P_{Ta2}	44.442	30.276	34.963
P_{Ta3}	48.305	31.956	34.962
P_{Ta4}	48.129	1.344	1.349
P_{Ta5}	1.514	44.171	35.579
P_{Ta6}	3.793	47.139	33.667
P_{Da1}	21.703	0.296	0.269
P_{Da2}	21.914	23.463	17.798
P_{Da3}	20.789	25.587	17.818
P_{Da4}	18.173	0.296	0.269
P_{Da5}	1.544	16.204	17.798
P_{Da6}	1.575	17.167	17.791
$P_{总}$	276.248	237.284	213.436

为进一步验证说明,在不同功率下展开逐波限流控制下总损耗的对比,分别在 12、8、6 kW 交流侧输出功率工况下进行仿真试验,将 3 种逐波限流方法的逆变器 A 相器件总损耗数据记录于表 5。由表 5 可知,在工况相同的情况下,全关断逐波限流方法的器件损耗最高,新型逐波“软”限流方法的器件损耗最低,部分关断逐波限流方法的器件损耗介于上述二者之间。新型逐波“软”

限流方法的器件损耗约为全关断逐波限流方法的 80%,约为部分关断逐波限流方法的 90%。所提新型逐波“软”限流控制方法在一定程度上降低了器件损耗。

表 5 不同输出功率下不同限流方法的总损耗

Tab. 5 Total losses of different current limiting

有功功率	12 kW	8 kW	6 kW
全关断逐波限流	276.248	187.708	152.267
部分关断逐波限流	237.284	161.481	135.236
逐波“软”限流	213.436	148.673	124.207

在本文提出的新型逐波“软”限流方法下,故障电流将主要经由与直流中点相连的钳位开关器件流通,因此在暂态过程中会形成幅值相对较大的中点电流。该电流会对直流侧中点电位产生一定影响,因此在不同功率下展开逐波限流下中点电位波动值的对比。

分别在 12、8、6 kW 工况下,将无逐波限流方法与逐波“软”限流方法下中点电位波动百分比数据记录于表 6。由表 6 可见,逐波“软”限流方法下中点电位波动百分比较小,仍在可控范围内,远优于未采取限流方法的工况。

表 6 不同输出功率下新型逐波“软”限流方法的中点电位波动百分比

Tab. 6 Neutral point potential fluctuation percentage of novel "soft" CBC current limiting method under different output powers %

有功功率	12 kW	8 kW	6 kW
无逐波限流	6.69	5.39	4.69
逐波“软”限流	1.47	0.93	0.61

5 结语

针对 ANPC 逆变器现有逐波限流技术存在触发限流频次过高及电流应力过大的不足,本文提出了一种新型逐波“软”限流方法。该方法在逆变器触发逐波限流控制时,通过有选择性地关断连接直流侧高压端及低压端的开关器件,同时导通连接直流侧中点及交流侧的开关器件,构建逆变器内部两条并联电流通路。这一调控方式可有效削减逐波限流的触发次数,降低逆变器内部开关器件的电流变化率 di/dt 和电流应力,为新能

源并网安全运行提供技术支撑。

理论分析和仿真分析共同验证了所提方法的可行性,新型逐波“软”限流方法能够减少限流电路的触发次数,通过并联通路分流,将开关器件电流峰值限制在更低水平,有效降低逆变器内部开关器件的电流应力;其最大器件损耗显著降低,二极管损耗也有所下降,总损耗随之降低,可有效避免器件因过热而烧毁。新型逐波“软”限流方法提升了逆变器的短路故障穿越能力,保障了逆变器的可靠运行。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

翁婷婷进行了模型搭建、数据获取、内容总结与论文撰写,李晓华进行了研究构思、设计了研究框架,余江进行了技术路线设计,孔飞进行了程序调试,刘华东进行了试验结果复核,翁婷婷、李晓华、余江、孔飞、刘华东、孙啸宇、戈本俊参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The model establishment, data acquisition, summary of content and paper writing were carried out by Weng Tingting. The research conception and research framework design were conducted by Li Xiaohua. The technical route design was completed by Yu Jiang. The program debugging was performed by Kong Fei. The verification of experimental results was undertaken by Liu Huadong. The review and revision of the paper were participated in by Weng Tingting, Li Xiaohua, Yu Jiang, Kong Fei, Liu Huadong, Sun Xiaoyu and Ge Benjun. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

[1] 周孝信, 赵强, 张玉琼. “双碳”目标下我国能源电力系统发展前景和关键技术[J]. 中国电力企业管理, 2021(31): 14-17.

[2] International Energy Agency (IEA). World energy outlook 2023[R]. Paris: IEA, 2023.

[3] 刘志坚, 洪朝飞, 郭成, 等. 基于 WRLS-ARMAX 系统辨识的新能源电力系统惯量评估[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(7): 84-93.

Liu Z J, Hong Z F, Guo C, et al. Inertia estimation of new energy power system based on WRLS-ARMAX system identification [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 84-93.

[4] 韩鸿霖, 王星璐, 林存浩. 基于自适应 VSG 控制策略的光伏混合储能系统研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 159-170.

Han H L, Wang X L, Lin H C. Research on photovoltaic hybrid energy storage system based on adaptive VSG control strategy[J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 159-170.

[5] Nigel M, John R. Power outages, climate events and renewable energy: Reviewing energy storage policy and regulatory options for Australia[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137:110617.

[6] 樊陈, 姚建国, 张琦兵, 等. 英国“8·9”大停电事故振荡事件分析及思考[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 34-41.

Fan C, Yao J G, Zhang Q B, et al. Reflection and analysis for oscillation of the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 34-41.

[7] 徐式蕴, 王一鸣, 孙华东, 等. 国外新能源电网事故对中国电网安全稳定运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(13): 1-8.

Xu S Y, Wang Y M, Sun H D, et al. Insights from renewable energy outage accidents abroad for secure and stable operation of power grids in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(13): 1-8.

[8] 董昱, 郭强, 葛睿, 等. 近年国外高比例新能源电力系统大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(22): 8754-8764.

Dong Y, Guo Q, Ge R, et al. Analysis and lessons of recent blackout events in high proportion renewable energy power systems worldwide[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(22): 8754-8764.

[9] 李智, 刘辉, 刘明波, 等. 虚拟同步发电机并网稳定性与控制技术研究综述[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 1-10.

Li Z, Liu H, Liu M B, et al. Research overview of

- grid-connected virtual synchronous generator stability and control technologies [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(11): 1-10.
- [10] 叶康权, 曾江, 刘佩. 基于固定开关状态切换的三电平逆变器定频滞环电流控制的仿真分析[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(12): 13-25.
Ye K Q, Zeng J, Liu P. Simulation analysis of fixed frequency hysteresis current control of three-level inverter based on fixed switch state switching [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(12): 13-25.
- [11] 李智, 李长喜, 陈创庭, 等. 电流控制型储能变流器控制稳定性分析与谐波谐振抑制技术研究[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(7): 21-28.
Li Z, Li C X, Chen C T, et al. Control stability analysis and research on harmonic resonance suppression technology of current-control type energy storage converter [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(7): 21-28.
- [12] 吴炜, 刘玉飞, 孙炎平, 等. 海上风电弱电网并网稳定性分析方法及关键技术综述[J]. *南方能源建设*, 2025, 12(6): 53-68.
Wu W, Liu Y F, Sun Y P, et al. A review of analysis methods and key technologies for grid connection stability of offshore wind power in weak grids [J]. *Southern Energy Construction*, 2025, 12(6): 53-68.
- [13] 黄强, 李宽, 范荣奇, 等. 新能源直流送出系统受端交流故障穿越控制策略[J]. *电力工程技术*, 2025, 44(6): 165-173.
Huang Q, Li K, Fan R Q, et al. A grid side fault ride-through control for renewable energy connected MMC-HVDC [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(6): 165-173.
- [14] 贾科, 田起硕, 毕天姝, 等. 接入弱电网的新能源多场站协同故障穿越控制方法[J/OL]. *电网技术*, 1-11 [2025-12-11]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0328>.
Jia K, Tian Q S, Bi T S, et al. Cooperative fault ride-through control method for multi renewable power plants connecting to weak grid [J/OL]. *Power System Technology*, 1-11 [2025-12-11]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0328>.
- [15] Chen Z, Pei X, Yang M, et al. A novel protection scheme for inverter-interfaced microgrid (IIM) operated in islanded mode [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(9): 7684-7697.
- [16] Liang Z, Lin X, Kang Y, et al. Short circuit current characteristics analysis and improved current limiting strategy for three-phase three-leg inverter under asymmetric short circuit fault [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(8): 7214-7228.
- [17] 赵平, 杜龙, 龚砚, 等. 有功指令共享下的两级式光伏VSG并网系统故障穿越策略[J/OL]. *电力系统及其自动化学报*, 1-12 [2025-12-12]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001690>.
Zhao P, Du L, Gong Y, et al. Fault ride-through strategy of a two-stage grid-connected PV-VSG system under active power command sharing [J/OL]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 1-12 [2025-12-12]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001690>.
- [18] Shukla A, Demetriades G D. A survey on hybrid circuit-breaker topologies [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(2): 627-641.
- [19] Nuutinen P, Peltoniemi P, Silventoinen P. Short-circuit protection in a converter-fed low-voltage distribution network [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(4): 1587-1597.
- [20] Wu F, Zhao R, Chen J, et al. A current protection strategy for NPC-TL half-bridge inverters [C]// 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Korea (South), IEEE, 2018: 2262-2267.
- [21] 陈兆岭, 周炼, 吴振飞, 等. 微电网中储能变流器平滑切换控制的研究[J]. *现代电子技术*, 2022, 45(7): 102-106.
Chen Z L, Zhou L, Wu Z F, et al. Control strategy of grid-connection and off-grid seamless switching of power converter system in microgrid [J]. *Modern Electronic Technique*, 2022, 45(7): 102-106.
- [22] 张新永. IGBT驱动及逐波限流保护技术 [C]// 中国电源学会第18届全国电源技术年会. 厦门, 中国电源学会, 2009: 362-363.
- [23] Zhang X Y. IGBT drive and cycle-by-cycle current limiting protection technology [C]// The 18th National Power Technology Annual Meeting of China Power Supply Society. Xiamen, China Power Supply Society, 2009: 362-363.
- [24] 石少鹏, 王伟, 张驰. 三电平逐波限流电路和控制方法: 201910906127.2 [P]. 2020-01-31.
- [24] Shi Y, Wang J, Cao J, et al. An ultra-low power

- cycle-by-cycle current limiter suitable for switching-mode power supply with 2.2 MHz frequency [C]// 2019 IEEE 13th International Conference on ASIC (ASICON). Chongqing, IEEE, 2019: 1-4.
- [25] 叶怡伟, 陈敏, 徐德鸿. 软开关有源钳位逆变器逐波限流控制策略研究[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 43-50.
- Ye Y W, Chen M, Xu D H. Research on cycle-by-cycle current limit strategies for active-clamped soft-switching inverters [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 43-50.
- [26] 刘江, 孙中行, 熊涛, 等. 基于调制切换的三电平逆变器开关损耗优化[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(20): 156-164.
- Liu J, Sun Z H, Xiong T, et al. Switching loss optimization of three-level inverters based on modulation switching [J]. Ship Science and

Technology, 2025, 47(20): 156-164.

收稿日期:2025-12-18

收到修改稿日期:2026-03-04

作者简介:

翁婷婷(2001—),女,硕士研究生,研究方向为直流换流器器件级虚拟量测及控保协同,1329567869@qq.com;

*通信作者:李晓华(1975—),女,博士,教授,研究方向为高压直流输电,eplxh@scut.edu.cn;

余江(1975—),女,博士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统继电保护运行与管理,yujiang@csg.cn;

孔飞(1989—),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为控保协同研究,kongfei@csg.cn;

刘华东(1982—),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为新能源发电技术,124771090@qq.com。