

双馈三电平变流器低频控制优化策略研究

朱志权, 王 瑜, 孙耀杰*

(复旦大学 智能机器人与先进制造创新学院, 上海 200433)

Research on Low-Frequency Control Optimization Strategy for Double-Fed Three-Level Converter

ZHU Zhiquan, WANG Yu, SUN Yaojie*

(College of Intelligent Robotics and Advanced Manufacturing, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the issue of power device junction temperature fluctuations and lifetime degradation caused by half-cycle modulation in high-power doubly-fed wind power converters with three-level topologies under low-frequency operating conditions, this paper proposes an operational state-aware and performance-optimized switching control method between three-level active neutral-point-clamped (ANPC) and neutral-point-clamped (NPC) modes.

[Methods] A frequency-adaptive dynamic topology switching technique was employed, where the ANPC topology was activated in the high-frequency range to reduce switching losses, while a switch to the NPC topology was implemented in the low-frequency range to suppress diode conduction losses. This approach was validated through high-fidelity simulation and a physical prototype platform. [Results] Experimental results demonstrated that the proposed control method exhibited significant advantages during the operation of the doubly-fed three-level converter, with particularly outstanding effectiveness in suppressing diode junction temperature fluctuations. By dynamically matching the optimal topology to the rotor frequency, the loss distribution of the converter's power devices was rendered more rational, and the fluctuation amplitude of the diode junction temperature was effectively reduced over a wide frequency range. [Conclusion] The proposed method effectively balances system control performance and device reliability, thus providing a viable and novel approach for the design of low-frequency control strategies in doubly-fed three-level

converters.

Key words: three-level topology; active neutral-point-clamped; neutral-point-clamped; junction temperature fluctuation

摘要: [目的]针对大功率双馈风电变流器三电平拓扑在低频工况下因半周期调制引发的功率器件结温波动与寿命衰减问题,本文提出了一种基于运行状态感知与性能优化的三电平有源中性点钳位(ANPC)/中性点钳位(NPC)切换运行控制方法。[方法]采用频率自适应的动态拓扑切换技术,高频段启用 ANPC 拓扑以降低开关损耗,低频段切换至 NPC 拓扑抑制二极管导通损耗,结合高精度仿真与实物平台验证。[结果]试验结果表明,所提控制方法在双馈三电平变流器运行过程中表现出显著优势,尤其在二极管结温波动抑制方面效果突出。根据转子频率动态匹配最优拓扑结构,变流器功率器件的损耗分布更趋合理,二极管结温在宽频率范围内的波动幅度得到有效降低。[结论]所提方法兼顾了系统控制性能与器件可靠性,为双馈三电平变流器低频控制策略设计提供了新的适用性方法。

关键词: 三电平拓扑;有源中性点钳位;中性点钳位;结温波动

0 引言

三电平拓扑结构凭借其中高压电力电子系统中优异的电能质量与转换效率优势,已成为工业电源、可再生能源并网及电机驱动等领域的核心技术。在双馈风电变流器中,机侧基波频率覆盖 0~20 Hz,其中低频运行场景(尤其是近 0 Hz)面临着严峻的技术挑战:当基波频率降低时,变流器功率模块持续通流与冷却交替过程延长,导致二极管结温波动幅度显著增大,反复的热应力循

基金项目: 中国科学技术部智能电网-国家科技重大专项 (2024ZD0800400)

Smart Grid of Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China-National Major Science and Technology Project (2024ZD0800400)

环严重威胁器件稳定性与系统寿命,成为制约风电变流器低频运行可靠性的关键瓶颈。

现有研究虽围绕三电平拓扑调制策略展开了系列探索,但仍存在明显局限性:文献[1]提出基于有源中性点钳位(Active Neutral-Point-Clamped, ANPC)拓扑的脉宽调制方案,虽量化了功率模块开关损耗特性,却未针对低频等特殊应用场景的适应性问题分析;文献[2]开发的结温均衡调节策略虽能优化器件温度分布,但未考虑基波低频条件下结温波动的抑制需求;文献[3]聚焦开关器件开路故障下 ANPC 调制策略的切换,主要解决故障容错问题而非正常运行下的性能优化;文献[4]针对双馈变流器转子侧低频运行提出功率补偿式结温抑制方案,但仅局限于次同步工况分析,缺乏全频率范围的普适性。

作为典型三电平拓扑,ANPC 与中性点钳位(Neutral-Point-Clamped, NPC)在技术特性上呈现互补性差异:ANPC 通过增设钳位管有效降低开关器件电压应力,但拓扑复杂度较高且轻载效率偏低;NPC 结构更为简洁,在高压应用中对器件耐压能力提出更高要求。现有研究尚未充分利用两种拓扑的特性差异实现动态优化应用,面对风电变流器宽频运行场景,固定拓扑结构难以在全工况下兼顾效率与可靠性。因此,本文分析了低频工况运行时模块损耗的约束条件,提出了一种基于运行状态感知与性能优化的三电平 ANPC/NPC 切换运行控制方法^[5],通过动态选择最优拓扑换流结构,实现了不同转子频率下的高效脉宽调制,为解决双馈变流器机侧低频工况结温波动问题提供了新的技术路径。

1 原理分析

变流器的主要热源是绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)与二极管等功率器件产生的损耗。由于这些器件对温度高度敏感,形成“损耗-温度-特性”耦合效应:一方面,功率器件导通、开关过程中产生的损耗转化为热量,使得变流器内部温度升高;另一方面,温度升高会反向改变器件的导通阈值、关断延迟及电流承载能力,导致变流器输出精度下降、效率衰减。若温度超出器件安全范围,还可能引发热失效。

在低转差频率工况下,采用 ANPC 调制的三电平双馈机侧变流器因基波电流频率低^[6]、电流正负交替周期长,导致三电平调制长时间处于半周期调制状态。ANPC 调制整流模式的电流换流回路如图 1 所示,正电平与零电平交替输出时,内管的二极管 D2 持续导通;负电平与零电平交替输出时,内管的二极管 D3 持续导通。

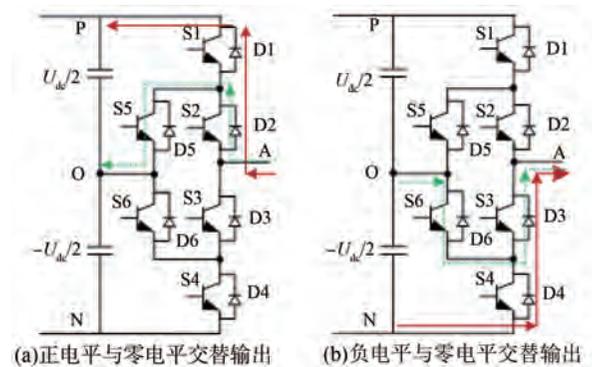


图 1 ANPC 调制整流模式下的电流换流回路

Fig. 1 Current commutation circuit of ANPC modulated rectifier mode

根据二极管的工作特性,在基波电流频率较低时,D2 和 D3 的损耗由导通损耗主导,即:

$$P_{\text{con,D}} = u_{\text{D}}I + r_{\text{D}}I^2 \quad (1)$$

式中: $P_{\text{con,D}}$ 为二极管的导通损耗; u_{D} 、 r_{D} 分别为二极管的初始饱和压降、初始导通电阻; I 为流过二极管的电流。

引入温度修正系数 $K_{u,\text{D}}$ 和 $K_{r,\text{D}}$ 对二极管的饱和压降和初始导通电阻进行温度修正^[7],使模型能精准描述不同结温下二极管的损耗特性,即:

$$u_{\text{D}} = u_{\text{D},25} + K_{u,\text{D}}(T_{\text{vj}} - 25) \quad (2)$$

$$r_{\text{D}} = r_{\text{D},25} + K_{r,\text{D}}(T_{\text{vj}} - 25) \quad (3)$$

式中: $u_{\text{D},25}$ 、 $r_{\text{D},25}$ 分别为二极管在 25 °C 的饱和压降、导通电阻; T_{vj} 为功率器件虚拟结温。

二极管持续导通时, T_{vj} 不再是恒定值,而是由损耗热量和散热系统共同决定,最终达到热平衡。在半周期调制状态下,二极管持续导通形成了“损耗-升温-损耗增大”的正反馈,极端情况下导致 T_{vj} 超过最高结温。而当二极管关断时,器件停止产热,其存储的热量通过“结-壳-散热片-环境”的热路径逐步散失,结温随关断时间延长而下降,形成“导通阶段升温-关断阶段降温”的周期性结温波动。这种周期性波动会在器件内部(如芯片与封装界面、焊料层)产生交变热应力^[8],最

终导致器件电性能劣化,甚至永久失效。双馈转子变流器不同运行频率下结温波动的对比如图 2(a)所示,三种不同结温波动下模块循环次数的对比如图 2(b)所示。

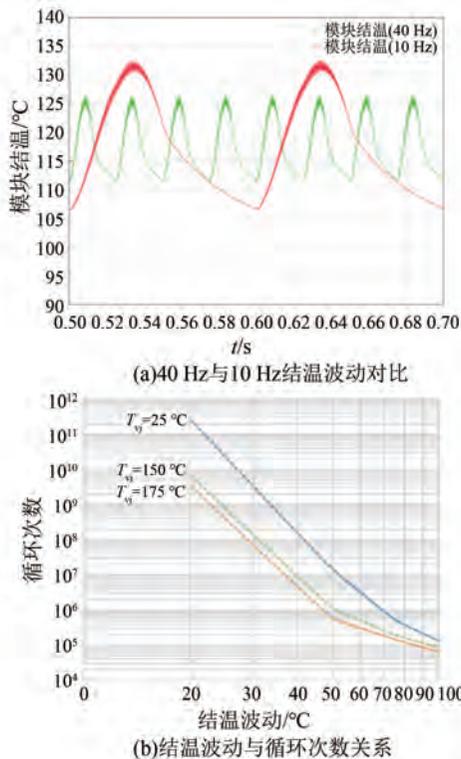


图 2 模块结温波动与频率和循环次数的关系

Fig. 2 Relationship between module junction temperature fluctuation, frequency and cycle number

剧烈的结温波动会急剧缩短模块的使用寿命。为了延长变流器的使用寿命,需要考虑调整脉宽调制策略,减少低频工况下内管二极管的持续导通时间^[9]。采用 NPC 调制时,其整流模式下换流回路如图 3 所示,可以看出正、负电平与零电

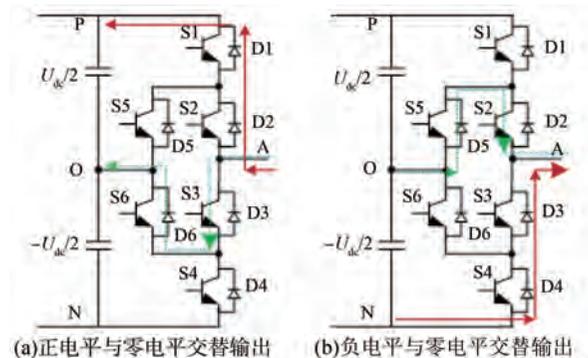


图 3 NPC 调制整流模式下的电流换流回路

Fig. 3 Current commutation circuit of NPC modulated rectifier mode

平交替输出,通过内管二极管与 IGBT 换流,可有效降低二极管持续导通电流的时间,进而降低二极管的结温波动^[10]。

为降低关断电压尖峰,内管 IGBT 的驱动电阻通常比外管与钳位管的驱动电阻大,同样开关频率下,内管 IGBT 结温会更高。采用 NPC 调制策略时,通过内管 IGBT 开通关断实现换流,相比 ANPC 通过钳位管开通关断实现换流,IGBT 的结温会更高^[11]。

综上,当双馈机侧变流器在高转差频率时,内管二极管结温波动不明显,采用 ANPC 调制降低 IGBT 的最高结温^[12];在低转差频率区间时,采用 NPC 调制降低内管二极管的结温波动^[13]。因此,本文提出一种基于转子运行频率在线切换调制策略的控制方法,实现双馈机侧变流器的最优化调制控制,有效延长双馈变流器的使用寿命^[14]。

2 方法设计

本文所提控制方法通过三个核心功能模块的协同工作,实现了系统的高效稳定运行。各模块的具体功能及联动机制如下。

转子频率检测模块作为系统运行状态的感知单元,其核心功能是通过高精度传感设备实时采集双馈电机的转速信号与转子电流频率信息^[15-16]。该模块基于预设的频率阈值范围、波动幅值限制等关键参数的运行状态对采集到的信号进行分析与处理,从而精准识别系统当前所处的运行工况。无论低频(低速)还是高频(高速)运行阶段,均能为后续控制策略的动态调整提供准确的实时依据^[17]。

切换控制模块作为决策核心,以转子频率检测模块输出的状态判断结果为输入^[18],依据预先设定的切换策略(基于频率区间划分的分段控制逻辑)生成拓扑切换指令,其结构框图如图 4 所示。当转子频率处于低频范围时,模块启用 NPC 拓扑;当转子频率升至高频范围时,则切换至 ANPC 拓扑^[19-20],以此确保系统在不同频率工况下均能匹配最优的拓扑结构,从而提升运行性能。

拓扑结构切换环节作为执行层,通过开关状态平滑过渡控制,实现 NPC 与 ANPC 拓扑之间

的无冲击切换^[21]。在切换过程中,通过对功率器件开关状态的实时精准调整,保证切换前后输出电压的幅值、相位以及谐波含量维持稳定^[22],有效规避了拓扑切换过程中可能出现的电流冲击与电压波动等问题,进而保障系统在全频率运行范围内具备良好的稳定性与可靠性^[23]。

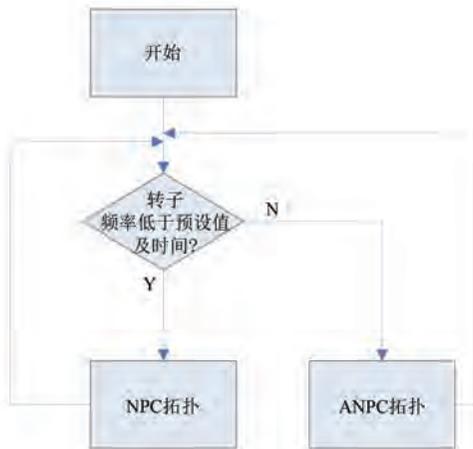


图 4 ANPC 与 NPC 相互切换策略

Fig. 4 Mutual switching strategy between ANPC and NPC

3 试验与结果分析

为了验证所提方法的有效性,在三电平拓扑试验平台上进行测试,分析所提频率自适应 ANPC/NPC 切换方法下二极管的动态结温特性^[24]。

试验中的 IGBT 开关管波形如图 5 所示。图中,0.2 s 时从 ANPC 切换到 NPC,对应图 6 中从 ANPC 切换到 NPC 的双馈变流器三相转子电流波形,通过提前调整 IGBT 驱动信号的导通角,使拓扑切换时的电流换流路径平滑过渡,避免了因开关状态突变导致的电流冲击。

在 ANPC 拓扑结构中,通过将工作模式切换为传统 NPC 状态,可实现二极管所承受的电应力向 IGBT 的转移^[25]。如图 7 所示,内侧管中原本由二极管 D2 和 D3 承受的热应力,被成功转移并重新分配至 T2 和 T3,从而完成了二极管热应力向 IGBT 热应力的转换,实现了热应力的优化与再平衡。试验设置转子电流为 1 000 A,实测不同发波方式对结温分布的影响。实测模块结温数据如表 1 所示。

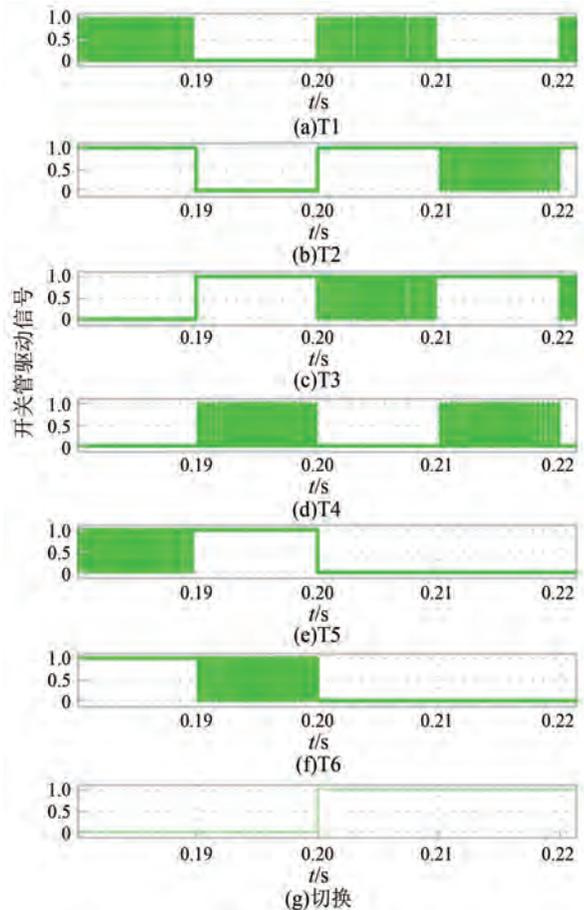


图 5 ANPC 切换到 NPC 的 IGBT 开关管波形

Fig. 5 IGBT waveforms of ANPC switching to NPC

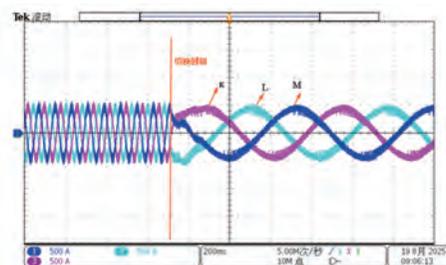


图 6 ANPC 切换到 NPC 的转子电流波形

Fig. 6 Rotor current waveforms of ANPC switching to NPC

4 结语

本文针对双馈三电平变流器在低频运行稳定性与器件可靠性优化问题,提出了一种基于转子频率在线切换 NPC 与 ANPC 拓扑的控制方法。在低频段启用 NPC 拓扑、高频段切换至 ANPC 拓扑,两种拓扑过渡过程中转子电流无切换冲击。试验结果表明,所提控制方法在双馈三电平变

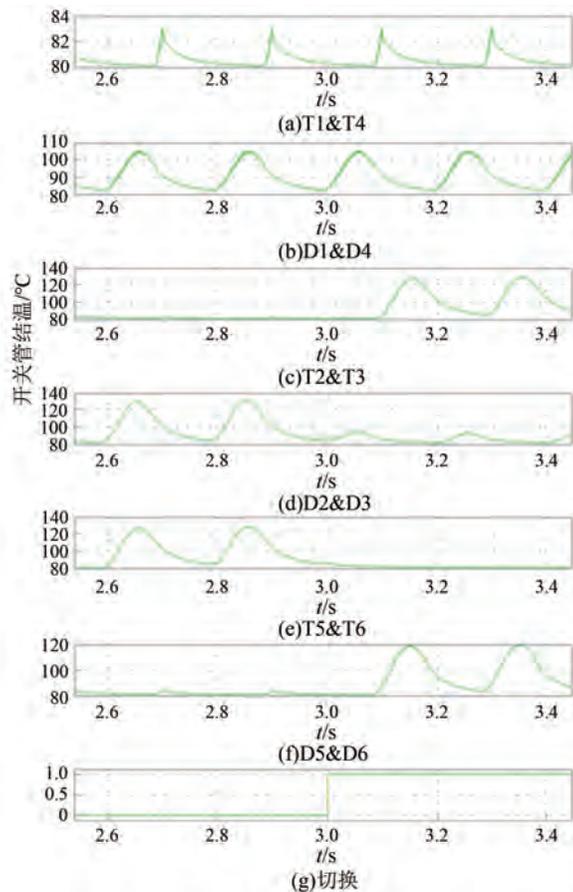


图7 ANPC切NPC热应力分布状态

Fig. 7 Thermal stress distribution state of ANPC switching to NPC

表1 转子模块 NPC 和 ANPC 实测温度对比

Tab. 1 Comparison of measured temperatures for NPC and ANPC rotor modules /°C

开关管	NPC 拓扑	ANPC 拓扑
T1	78	79
T2	109	85
T3	112	85
T4	78	80
T5	75	100
T6	73	102
D1	92	92
D2	90	112
D3	92	114
D4	90	89
D5	102	83
D6	102	83

流器运行过程中表现出显著优势,尤其在二极管

结温波动抑制方面效果突出。根据转子频率动态匹配最优拓扑结构,变流器功率器件的损耗分布更趋合理,二极管结温在宽频率范围内的波动幅度得到有效降低。该方法兼顾了系统控制性能与器件可靠性,为双馈三电平变流器低频控制策略设计提供了新的适用性方法。

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

朱志权进行了方案设计、内容总结与论文撰写,王瑜进行了试验研究,孙耀杰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 scheme design, content summary and paper writing were carried out by Zhu Zhiqian. The experiment was conducted by Wang Yu. The manuscript was revised by Sun Yaojie. All authors have read and approved the final manuscript for submission.

参考文献

- [1] 谢非,张洪浩,周晓云. ANPC型三电平拓扑换流原理及开关损耗分析[J]. 控制与信息技术, 2022(2): 35-42.
Xie F, Zhang H H, Zhou X Y. Analysis of commutation principle and switching loss for ANPC three-level topology [J]. Control and Information Technology, 2022(2): 35-42.
- [2] 朱信威. 三电平 ANPC 变换器结温均衡调制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
Zhu X W. Research on 3L-ANPC converter modulation strategy based on junction temperature balance [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [3] 陈怡薇,徐永海,袁敞,等. 基于切换调制策略的 ANPC 三电平逆变器开路故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(2): 27-37.
Chen Y W, Xu Y H, Yuan C, et al. Research on open-circuit fault diagnosis method of ANPC three-level inverter based on switching modulation strategy

- [J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(2): 27-37.
- [4] 胡玉. 双馈风电变流器功率模块结温波动分析及抑制策略[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- Hu Y. Analysis and suppression of junction temperature fluctuation of power module for doubly-fed wind power converters [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [5] Liu H T, Wang S, Hu L, et al. Junction temperature control of a traction inverter based on three-level active neutral point-clamping [J]. *Energies*, 2025, 18(9): 2241.
- [6] 张超, 胡存刚, 董浩, 等. 三电平 ANPC 逆变器虚拟空间矢量控制策略[J]. *电力电子技术*, 2018, 52(6): 68-71+91.
- Zhang C, Hu C G, Dong H, et al. Virtual space vector pulse width modulation control strategy for three-level ANPC inverter [J]. *Power Electronics*, 2018, 52(6): 68-71+91.
- [7] Gyawali B, Rukhsar, Ajmal A M, et al. Design and analysis of a triple-input three-level PV inverter with minimized number of MPPT controllers [J]. *Energies*, 2024, 17(21): 5380.
- [8] 景巍. 大功率三电平变频器功率器件损耗研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- Jing W. Study on power device losses of high power three-level converter [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [9] Górecki K, Górecki P. Fast method of computations of ripples in the junction temperature of discrete power SiC-MOSFETs at the steady state [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(17): 8887.
- [10] Wang R Y, Tan L L, Li C Y, et al. Analysis, design, and implementation of junction temperature fluctuation tracking suppression strategy for SiC MOSFETs in wireless high power transfer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 36(1): 1193-1204.
- [11] 左智超, 许峰, 张礼杰, 等. 基于 T-NPC 型三电平逆变器的控制策略研究[J]. *电工技术*, 2024(21): 50-53.
- Zuo Z C, Xu F, Zhang L J, et al. T-NPC three-level inverter-based control strategy for power electronic transformers [J]. *Electric Engineering*, 2024(21): 50-53.
- [12] Sahan B, Mueller C R, Lenze A, et al. Combining the benefits of SiC T-MOSFET and Si IGBT in a novel ANPC power module for highly compact 1 500-V grid-tied inverters [C] // PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany: VDE, 2019: 1-6.
- [13] Schittler A C, Heer D, Mueller C R. Interaction of power-module design and modulation scheme for active neutral-point-clamped inverters [C] // PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany: VDE, 2019: 1-7.
- [14] 李兵, 崔介兵, 何怡刚, 等. 基于能量谱熵及小波神经网络的有源中性点钳位三电平逆变器故障诊断门[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(10): 2216-2225.
- Li B, Cui J B, He Y G, et al. Fault diagnosis of active neutral point clamped three-level inverter based on energy spectrum entropy and wavelet neural network [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(10): 2216-2225.
- [15] 时维国, 吴宁. 基于小波包变换和 SVM 的三电平逆变器故障诊断[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(2): 91-95+100.
- Shi W G, Wu N. Fault diagnosis of three-level inverter based on wavelet packet transform and support vector machine [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(2): 91-95+100.
- [16] Bruckner T, Bernet S. Loss balancing in three-level voltage source inverters applying active NPC switches [C] // IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, Vancouver, BC, Canada, 2001, 2: 1135-1140.
- [17] Hosseinkhani V, Sarvi M. A new five-level inverter with reduced leakage current for photovoltaic system applications [J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(2): 287-299.
- [18] 徐志远, 朝泽云, 程华, 等. 一种考虑中点平衡的 ANPC 变换器的混合断续脉冲宽度调制策略[J]. *电源学报*, 2021, 19(1): 49-58.
- Xu Z Y, Chao Z Y, Cheng H, et al. Hybrid discontinuous pulse width modulation strategy for ANPC converter considering neutral-point balance [J]. *Journal of Power Supply*, 2021, 19(1): 49-

- 58.
- [19] Krah J O, Holtz J, Sahan B. Control of a hybrid IGBT-SiC inverter [C]// 2019 2nd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy, Doha, Qatar, 2019: 1-6.
- [20] He J B, Demerdash N A O. Diagnosis of open-circuit faults in multilevel active-NPC switch (ANPC) inverters [C]// 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Dearborn, MI, USA, 2014: 1-6.
- [21] 徐浩歌, 项基, 李楚杉. 一种混合型 ANPC 三电平变流器拓扑和调制策略研究[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(6): 138-139+141.
- Xu H G, Xiang J, Li C S. Circuit topology and modulation strategy for hybrid ANPC three-level converter [J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(6): 138-139+141.
- [22] Kou L, Liu C, Cai G W, et al. Fault diagnosis for open-circuit faults in NPC inverter base on knowledge-driven and data-driven approaches [J]. IET Power Electronics, 2020, 13: 1236-1245.
- [23] 王超, 何英杰, 宋志顺, 等. 有源中点钳位多电平逆变器空间矢量调制与三角载波调制统一理论 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(14): 106-115.
- Wang C, He Y J, Song Z S, et al. Unified theory between the space vector and the triangular carrier-based PWM strategies in active neutral-point clamped multilevel inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14): 106-115.
- [24] 李辉, 杨甜, 谭宏涛, 等. 基于电压和电流特征的双馈风电变流器功率器件开路故障综合诊断[J]. 电工技术学报, 2021, 36(16): 3433-3445.
- Li H, Yang T, Tan H T, et al. Comprehensive diagnosis of open-circuit fault for power devices of doubly-fed wind power converter based on the features of voltage and current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (16): 3433-3445.
- [25] Kim Y J, Kim S H, Kim S M, et al. Open fault diagnosis and tolerance control for grid-connected hybrid active neutral-point-clamped inverters with optimized carrier-based pulse width modulation [J]. IEEE Access, 2020, 8: 145542-145551.

收稿日期:2025-10-10

收到修改稿日期:2025-12-03

作者简介:

朱志权(1979—),男,博士,正高级工程师,研究方向为可再生能源智能化控制技术,zzq99311@126.com;

*通信作者:孙耀杰(1969—),男,博士,教授,研究方向为电力电子技术,y_wangfdu@fudan.edu.cn。