DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.238 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

基于中性点移位的三电平双向直流变换器载波调制研究

冯杨州[1]，杨 旭[2,3]，张海平[4]，李惠庸[4]
(1.国网甘肃省电力公司建设部，兰州 730000；2.同济大学电子与信息工程学院计算机科学与技术系，上海 201804；3.同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室，上海 201804；4.国网甘肃省电力公司经济技术研究院，兰州 730000)

摘要：为解决三电平双向直流变换器载波调制时，变换器存在正、反向运行切换不平滑，动态响应慢易使谐振回路产生谐波等问题，提出1种基于中性点移位的三电平双向直流变换器载波调制方法。分析双向直流变换器工作原理，基于中性点移位原理，优化变换器三相输出电压相位角调整方式，在开关频率不变的基础上计算不同幅度调制比的中性点移位电压，依据故障实际状态整改同相单元相邻载波间的移位，采用载波相移脉宽调制对三电平双向直流变换器进行载波调制。仿真实验结果表明：所提调制方法可有效控制三电平双向直流变换器输出波形，且变换器正常运行时，幅度调制比大于1.0，相电压出现饱和现象，调制信号产生过调现象。

关键词：中性点移位；三电平双向直流变换器；载波调制；相位角方式

Research on Carrier Modulation of Three-level Bidirectional DC Converter Based on Neutral Point Shift

FENG Yangzhou[1], YANG Xu[2,3], ZHANG Haiping[4], LI Huiyong[4]
(1. Construction Department, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730000, China; 2. Department of Computer Science and Technology, School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. The Key Laboratory of Embedded System and Service Computing of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 4. Econonic and Technological Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730000, China)

Abstract: When a three-level bidirectional DC converter is under carrier modulation, the switching between its forward and reverse operations is not smooth and the dynamic response is slow, which will easily cause harmonics in the resonant circuit. To solve these problems, a carrier modulation method for the three-level bidirectional DC converter based on neutral point shift is proposed. The working principle for the bidirectional DC converter is analyzed. Based on the principle of neutral point shift, the phase angle mode of three-phase output voltage from the converter is adjusted. On the basis of constant switching frequency, the neutral point shift voltage with different amplitude modulation ratios is calculated. According to the actual fault state, the shift between adjacent carriers in the same phase unit is rectified, and the carrier phase shift pulse width modulation is used to modulate the carrier of the three-level bidirectional DC converter. Simulation results show that the proposed modulation method can effectively control the output waveform of the three-level bidirectional DC converter. When the converter operates normally, the amplitude modulation ratio is greater than 1.0, the phase voltage is saturated, and the modulation signal is overshoot.

Keywords: Neutral point shift; three-level bidirectional DC converter; carrier modulation; phase angle mode

收稿日期：2022-07-13；**修回日期**：2022-09-30；**录用日期**：2022-10-21；**网络首发日期**：2023-01-16
基金项目：国网甘肃省电力公司科技资助项目(SGTYHT/16-JS-198)
This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Gansu Electric Power Company under the grant SGTYHT/16-JS-198

为提升并优化可再生能源的利用率，直流配电网以其线路成本低、输电损耗小、供电可靠性高、

分布式能源接入电网更容易等诸多优势被广泛应用[1-3]。在三电平双向直流变换器正向、反向运行时，存在动态响应慢、母线电压过冲等问题，导致三电平双向直流变换器不能安全、稳定运行，电能利用率较低。光伏微电网中，三电平双向直流变换器连接着高压侧直流母线和低压侧储能系统，可以实现两者之间能量稳定地双向流动，是光伏微电网的重要组成部分，变换器的输出开关管作二极管不控整流时，会导致导通损耗增加，阻碍高功率密度实现。采取可缩减损耗、增加效率的同步整流方式也难以满足变换器整体需求。所以，载波调制方法并非最有效的三电平双向直流变换器调制方法。

文献[4]提出 1 种隔离型多谐振双向三端口直流变换器，变换器采用移相控制方法实现 3 个端口间功率的灵活控制，对变换器中的基频和三倍频能量进行传递，并且通过调节不同负载情况下的驱动频率，保证了全负载范围内 3 个端口的零电压软开关 ZVS(zero voltage switching)特性，削弱了变压器寄生参数对电路特性的影响；文献[5]提出 1 种高压侧移相的调制策略，采用定频 PWM 控制，调节变换器功率和增益，控制漏电感电流有效值，实现低压侧开关管的自然换流和零电流开关关断，抑制关断电压尖峰。但上述 2 种方法无法有效保障三电平双向直流变换器输出稳定性。

为提升三电平双向直流变换器应用效果，本文提出基于中性点移位的三电平双向直流变换器载波调制方法。分析双向直流变换器原理及存在的问题，根据电流平衡的特点选择应用研究对象，以实现三端口双向直流变换器独立控制。仿真实验结果验证了本文方法的正确性，可为提升三电平双向直流变换器的应用效果提供一定帮助。

1　基于中性点移位的三电平双向直流变换器载波调制

1.1　双向直流变换器原理

双向直流变换器在有效继承了传统直流变换器在软开关方面显著优势的同时，还可实现能量的正向及反向传输，且可有效保障正向、反向运行时具备相同特性[6]。双向直流变换器主电路原理[7]如图 1 所示。

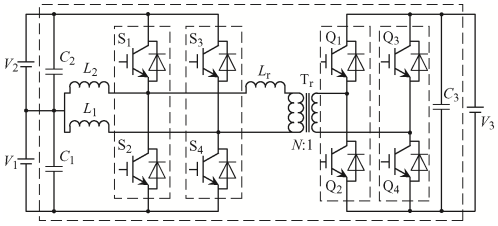


图 1　双向直流变换器主电路原理

Fig. 1 Schematic of main circuit in bidirectional DC converter

图 1 中，变压器连接原、副边开关网络，和谐振网络共同形成双向直流变换器；C_1、C_2、C_3 均为电容；谐振网络由原边谐振电感 L_r、副边谐振电感 L_1、L_2 共同组成；V_1、V_2 分别为变换器的输入电压，V_3 为变换器的输出电压[8-9]。上述双向直流变换器可实现能量的正向及反向传输。

1.2　三电平双向直流变换器载波调制方法

由于变频调制方法不能有效实现三电平双向直流变换器的正向、反向功率平滑无间断切换，并且当切换发生时会产生的大量谐波，为此本文采用基于中性点移位进行三电平双向直流变换器的载波调制[10-11]。

1.2.1　中性点移位原理和参数计算

中性点移位是有效利用变换器星型点的浮动特点，即星型点可以偏离电机中性点，不与电机中性点连接。对于变换器存在三相输出电压不平衡的现象，可采用调整变换器三相输出电压相位角的方式[12-13]改进。中性点移位矢量如图 2 所示。

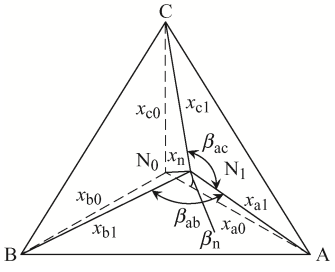


图 2　中性点移位矢量

Fig. 2 Vector of neutral point shift

图 2 中，N_1 为变换器星型点，N_1 所对应的变

换器三相输出电压分别为 $x_{a1}=A_m\sin(\omega t+\beta_a)$、$x_{b1}=B_m\sin(\omega t+\beta_a-\beta_{ab})$、$x_{c1}=C_m\sin(\omega t+\beta_a+\beta_{ac})$，其中，$A_m$、$B_m$、$C_m$分别为 A、B、C 相电压幅值，$\omega$为角频率；$N_0$ 为电机中性点，N_0 所对应的三相输出电压分别为 $x_{a0}=X_m\sin(\omega t)$、$x_{b0}=X_m\sin(\omega t-2\pi/3)$、$x_{c0}=X_m\sin(\omega t+2\pi/3)$，其中，$X_m$ 为电机相电压幅值。星型点 N_1 相对于电机中性点 N_0 的电压表示为 $x_n=X_n\sin(\omega t+\beta_n)$。

为获取最大对称母线电压，初始相位角 β_a、A 相和 B 相之间的相位差 β_{ab}、A 相和 C 相之间的相位差 β_{ac} 应满足

$$\begin{cases}\beta_a=\arg\sin\dfrac{C_m^2-B_m^2}{\sqrt{2}A_m\sqrt{\sigma^2+\sqrt{12\gamma^4-3\sigma^4}}}\\ \beta_{ab}=\arg\cos\dfrac{(\sigma^2-2C_m^2)-\sqrt{12\gamma^4-3\sigma^4}}{4A_mB_m}\\ \beta_{ac}=\arg\cos\dfrac{(\sigma^2-2B_m^2)-\sqrt{12\gamma^4-3\sigma^4}}{4A_mC_m}\end{cases}\tag{1}$$

式中：σ 为变换器的调制比；γ 为变换器的阻抗。

母线电压幅值 X_L、相电压幅值 X_m 应满足

$$\begin{cases}X_L^2=\dfrac{1}{2}(\sigma^2+\sqrt{12\gamma^4-3\sigma^4})\\ X_m^2=\dfrac{1}{6}(\sigma^2+\sqrt{12\gamma^4-3\sigma^4})\end{cases}\tag{2}$$

中性点位移电压 x_n 的幅值 X_n 和相角 β_n 应满足

$$X_n^2=\frac{\sigma^2-\sqrt{12\gamma^4-3\sigma^4}}{6}\tag{3}$$

$$\beta_n=\begin{cases}\arctan\dfrac{\sigma^2+\sqrt{12\gamma^4-3\sigma^4}}{|\sigma^2-3A_m^2|} & B_m^2-C_m^2>0\\ \pi+\arctan\dfrac{\sqrt{3}(B_m^2-C_m^2)}{|\sigma^2-3A_m^2|} & B_m^2-C_m^2<0\\ 0 & B_m^2-C_m^2=0\text{且}\sigma^2-3A_m^2>0\\ \pi & B_m^2-C_m^2=0\text{且}\sigma^2-3A_m^2<0\end{cases}\tag{4}$$

设变换器每相级联单元数为 m，每相级联单元直流电压均为 1 V，若变换器三相存在故障的单元数分别为 F_a、F_b、F_c，则电平数 n=2m+1，每相有效单元数分别为 $m_a=m-F_a$、$m_b=m-F_b$、$m_c=m-F_c$。为获取不同故障下的变换器最大对称母线电压输出中性点移位参数，将 $A_m=m_a/m$、$B_m=m_b/m$、$C_m=m_c/m$ 代入式(4)进行计算。

当变换器每相级联单元数 m=2、故障单元总数小于等于 3 时，变换器不同故障的中性点移位参数见表 1。

表 1 不同故障的中性点移位参数

Tab. 1 Neutral point shift parameters of different faults

参数	中性点移位 1	中性点移位 2	中性点移位 3	中性点移位 4	中性点移位 5	中性点移位 6	中性点移位 7
F_a/个	0	1	0	2	1	0	3
F_b/个	0	0	1	0	1	1	0
F_c/个	0	0	1	0	1	2	0
β_a/(°)	0	0	0	0	0	−6	0
β_{ab}/(°)	121.1	127.5	112.3	133.6	121.1	98.0	139.6
β_{ac}/(°)	121.1	127.5	112.3	133.6	121.1	114.2	139.6
β_n/(°)	0	0	181.1	0	0	155.2	0
X_n/V	0	0.14	0.15	0.26	0	0.25	0.38
X_m/V	1.00	0.94	0.87	0.86	0.81	0.79	0.78

1.2.2 基于中性点移位的载波调制

为便于工程实际应用，通常采用载波相移脉宽调制 CPSPWM(carrier phase shift pulse width modulation)对三电平双向直流变换器进行载波调制。为实现三电平双向直流变换器电机获取最大对称母线电压载波调制，有效利用表 1 中的参数 β_n、X_n、X_m，计算不同幅度调制比 K_a 的中性点移位电压[14-16]。定义 $K_n=X_n/X_m$，则不同幅度调制比 K_a 的中性点移位电压计算公式为

$$x_n=K_aX_n/X_m\sin(\omega t+\beta_n)=$$

$$K_{\mathrm{a}}K_{\mathrm{n}}\sin(\omega t+\beta_{\mathrm{n}}) \tag{5}$$

同相单元相邻载波间的移位 φ_{a}、φ_{b}、φ_{c} 会在故障发生时依据故障实际状态进行整改，即

$$\begin{cases}\varphi_{\mathrm{a}}=\pi/m_{\mathrm{a}}\\ \varphi_{\mathrm{b}}=\pi/m_{\mathrm{b}}\\ \varphi_{\mathrm{c}}=\pi/m_{\mathrm{c}}\end{cases} \tag{6}$$

中性点移位三电平双向直流变换器载波调制结构如图 3 所示。

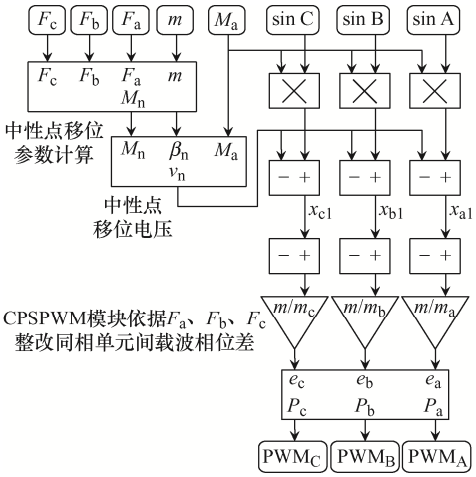


图 3　中性点移位三电平双向直流变换器载波调制结构

Fig. 3 Carrier modulation structure of neutral point shift three-level bidirectional DC converter

由图3 可见，首先计算中性点移位参数，将 M_{a} 传输至中性点移位电压中的 M_{n} 引脚，然后 CPSPWM 模块依据 F_{a}、F_{b}、F_{c} 整改同相单元间载波相位差。

2　仿真分析

在 MATALB/Simulink 环境下，根据图 1 所示的电路进行仿真分析，系统运行设置为网络延时无功发生工况，指令电流幅值为 30 A。控制系统采用 DSP+FPGA 架构，控制频率为 10 kHz。电压基准指令由模块总电压外环和无差拍电流内环获得，单载波频率为 5 Hz。开关状态反馈系数取 200，其余参数见表 2。将本文方法与文献[4]、文献[5]方法进行对比，不同方法调制后的三电平双向直流变换器正常工作时(即 F_{a}=F_{b}=F_{c}=0)的输出波形如图 4 所示。图中：母线电压为配电装置母线(汇流排)上的电压，由母线电压互感器测得；相电压为多相交流电路中在给定点的相线导体与连接系统中性点的导体之间的电压。

表 2　具体参数

Tab. 2 Specific parameters

参数	数值
每相级联单元数 m/个	2
频率调制比	10
开关频率/Hz	5
输入电压/V	60
输出电压/V	100
输入功率因数	1
幅度调制比 K_{a}	0.80~1.10
电容/μF	10
电感/mH	2.2
变压器变比	3

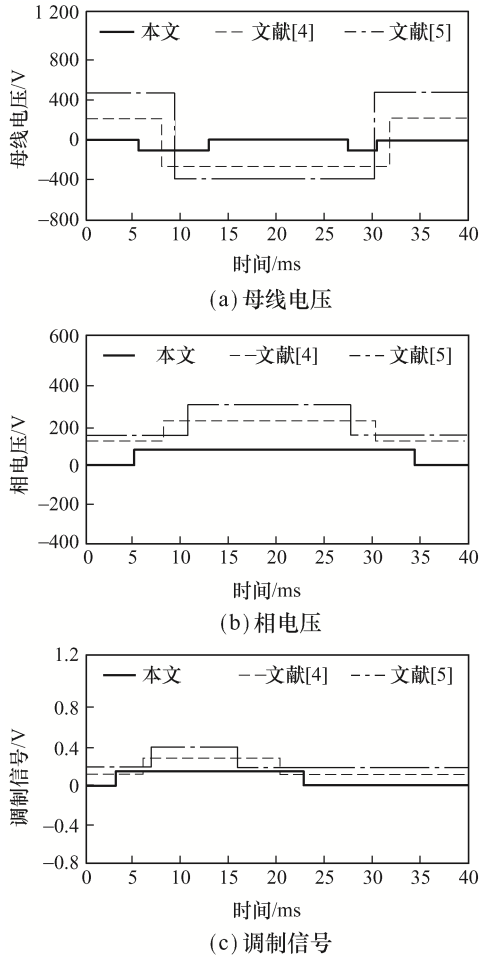


图 4　正常工作时 K_{a}=0.90 条件下的输出波形

Fig. 4 Output waveforms under normal working conditions with K_{a}=0.90

图 4 为 K_{a}=0.90、其余参数不变条件下的输出

波形。由图 4 可见，相比文献[4]和文献[5]的方法，采用本文调制方法可有效控制三电平双向直流变换器。

三电平双向直流变换器在 B、C 相各有 1 个单元发生故障，即 F_a=0、F_b=F_c=1 时，采用不同方法调制后的输出波形如图 5 所示，其中 K_a=0.86，其余参数不变。

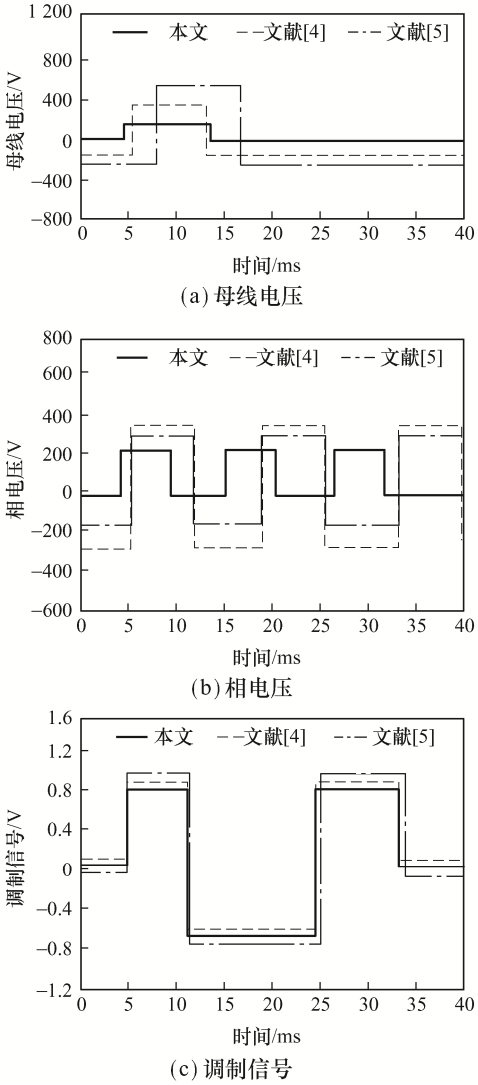


图 5 二单元故障中 K_a=0.86 时输出波形

Fig. 5 Output waveforms under fault of two units with K_a=0.86

结合表 1 数据，由图 5 可见，与文献[4]和文献[5]方法相比，本文方法在 B、C 相各有 1 个单元发生故障，变换器幅度调制比 K_a 比表 1 中故障类型所对应的相电压幅值 X_m 大时，会产生饱和现象，步入过调制区。采用本文调制方法可在故障发生时保障母线电压对称输出，对称输出电压质量与幅度调制比相关，非饱和状态下，幅度调制比与输出电压质量成正比，幅度调制比越大，输出电压质量越好。相与相之间故障器件数量差距与输出电压质量成反比，即差距越小，输出电压质量越好。

为了验证基于中性点移位的三电平双向直流变换器载波调制方法的可行性，本文搭建了 200 W 三电平双向直流变换器实验装置。其中，输入电压、输出电压分别为 60 V 和 100 V，开关频率为 10 Hz，频率调制比为 20，电容为 15 μF，电感为 2.5 mH。

图 6 为调制信号的实验波形与仿真波形的对比，可以看出，实验波形的形状和分布与理论及仿真情况基本一致。

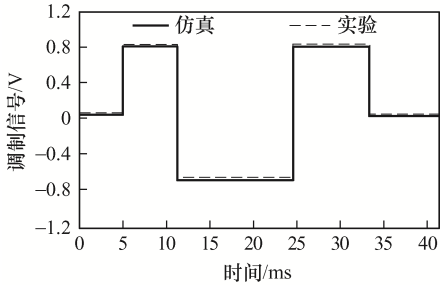


图 6 载波实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms of carriers

3 结语

本文引入中性点移位方法，提出了 1 种基于中性点移位的三电平双向直流变换器载波调制方法，优化变换器三相输出电压相位角的调整方式，有效利用中性点移位原理和参数计算，进行三电平双向直流变换器载波调制，实现了三电平双向直流变换器的正向、反向功率平滑、无间断切换。仿真实验通过研究变换器正常工作状态下和发生单元故障时，在本文调制方法控制下的输出波形变化，验证本文载波调制方法的正确性。本文研究的三电平双向直流变换器载波调制方法可以提高可再生能源发电的稳定性和利用率，解决直流变换器载波调制时存在谐振回路产生谐波的问题，为今后变换器研究提供一定的数据支持。

参考文献：

[1] 崔冬冬, 葛琼璇, 谭强, 等. 背靠背五电平二极管钳位型变流器直流环节的电压偏移机理及其载波调制均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2735-2748.
Cui Dongdong, Ge Qiongxuan, Tan Qiang, et al. Voltage drift phenomenon of back-to-back five-level diode-clamped converters and its carrier-based voltage balance strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2735-2748. (in Chinese)

[2] 杨惠, 骆姗, 孙向东, 等. 光伏储能双向 DC-DC 变换器的自抗扰控制方法研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(5): 1342-1350.
Yang Hui, Luo Shan, Sun Xiangdong, et al. Research on ADRC method for bidirectional DC-DC converter of solar energy storage system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(5): 1342-1350. (in Chinese)

[3] 胡灿, 付超, 王毅. 直流配电网中 MMC 的谐波分析与调制方法设计[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 81-88.
Hu Can, Fu Chao, Wang Yi. Harmonic analysis and modulation design of MMC in DC distribution network [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 81-88. (in Chinese)

[4] 李微, 王议锋, 韩富强, 等. 一种隔离型三端口双向 LCLC 多谐振直流变换器[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3231-3244.
Li Wei, Wang Yifeng, Han Fuqiang, et al. An isolated three-port bidirectional LCLC multi-resonant DC-DC converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3231-3244. (in Chinese)

[5] 孙孝峰, 潘尧, 申彦峰, 等. 一种基于两电感变换器的高压侧移相调制策略[J]. 太阳能学报, 2018, 39(7): 1885-1892.
Sun Xiaofeng, Pan Yao, Shen Yanfeng, et al. A high-voltage-side phase-shift modulation strategy based on two-inductor converter [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(7): 1885-1892. (in Chinese)

[6] 赖臻, 曾君, 刘俊峰. 基于耦合滤波电感的电流源型双有源桥式直流变换器的研究[J]. 电源学报. 2025, 23(2): 11-20.
Lai Zhen, Zeng Jun, Liu Junfeng. Study on current-fed dual-active-bridge DC-DC converter based on coupling filter inductance [J]. Journal of Power Supply. 2025, 23(2): 11-20. (in Chinese)

[7] 刘计龙, 陈鹏, 肖飞, 等. 面向舰船综合电力系统的 10 kV/2 MW 模块化多电平双向直流变换器控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 983-997.
Liu Jilong, Chen Peng, Xiao Fei, et al. Control strategy of 10 kV/2 MW modular multilevel bidirectional DC-DC converter for vessel integrated power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 983-997. (in Chinese)

[8] 杨帆, 杨晓峰, 高逸飞, 等. 谐振式模块化高增益升压型直流变换器[J]. 南方电网技术, 2019, 13(8): 15-24.
Yang Fan, Yang Xiaofeng, Gao Yifei, et al. Resonant modular high-gain step-up DC/DC converter [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(8): 15-24. (in Chinese)

[9] 张纯江, 李旭明, 刘明, 等. 三电平双向全桥多谐振 DC-DC 变换器研究[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 1-10.
Zhang Chunjiang, Li Xuming, Liu Ming, et al. Research on three-level bidirectional full-bridge multi-resonant DC-DC converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 1-10. (in Chinese)

[10] 王弘珺, 郁专, 谢少军. 双向 CLLC 谐振变换器的参数设计方法研究[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 11-20.
Wang Hongjun, Yu Zhuan, Xie Shaojun. Study on parameter design method for bi-directional CLLC resonant converters [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 11-20. (in Chinese)

[11] 刘婷婷, 刘仕钊, 胡荣华, 等. 基于改进 SVPWM 策略的双直流端口整流器功率分配方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 160-167, 191.
Liu Tingting, Liu Shizhao, Hu Ronghua, et al. Power distribution method of rectifier with two DC ports based on modified SVPWM strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 160-167, 191. (in Chinese)

[12] 刘高, 陈强, 马红波, 等. 三相 Buck 整流器级联直流变换器控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2019, 53(9): 1-5.
Liu Gao, Chen Qiang, Ma Hongbo, et al. The research on the control strategy of three-phase current rectifier cascaded with buck DC/DC converter [J]. Power Electronics,

2019, 53(9): 1-5. (in Chinese)

[13] 李伟伟, 张学广, 万梓燊, 等. 考虑最佳开关序列的三电平变换器非正交坐标系空间矢量调制简化算法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 181-188.
Li Weiwei, Zhang Xueguang, Wan Zishen, et al. Simplified implementation of optimal switching sequences for nonorthogonal space vector modulation of three level converter [J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2019, 34(S1): 181-188. (in Chinese)

[14] 王金平, 翟飞, 姜卫东, 等. 一种全范围内中点电压平衡的中点钳位型三电平变换器的扩展非连续脉宽调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1770-1782, 1873.
Wang Jinping, Zhai Fei, Jiang Weidong, et al. An extended DPWM for neutral point clamped three-level converter with a full range of neutral point voltage balance [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1770-1782, 1873. (in Chinese)

[15] 朱文杰, 陈昌松, 段善旭. 一种改善 Vienna 整流器输入电流品质的载波钳位调制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1677-1688.
Zhu Wenjie, Chen Changsong, Duan Shanxu. A carrier-based modulation method with clamped area for input current performance of Vienna rectifier [J]. Tran-sactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1677-1688. (in Chinese)

[16] 白志红, 李奕飞, 王伯荣, 等. 基于子模块组合的模块化多电平变换器简化空间矢量调制策略[J]. 电源学报, 2022, 20(3): 21-26.
Bai Zhihong, Li Yifei, Wang Borong, et al. Simplified space vector modulation strategy for modular multilevel converter based on grouping submodules [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(3): 21-26. (in Chinese)



冯扬州

作者简介：

冯杨州(1979—)，男，硕士，正高级工程师。研究方向：电网建设技术研究和管理。E-mail：masvon@163.com。

杨旭(1977—)，男，博士，高级工程师。研究方向：电网建设技术和管理。E-mail：1610482@tongji.edu.cn。

张海平(1986—)，男，通信作者，本科，工程师。研究方向：变电站建设设计。E-mail：zhp727@126.com。

李惠庸(1973—)，女，本科，高级工程师。研究方向：变电站设计技术研究及管理。E-mail：373878716@qq.com。

(责任编辑：陈国珍)