DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.84 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

实现全范围软开关的 DAB 变换器调制轨迹优化研究

张贵辰(中国电源学会会员)，兰云政，周京华(中国电源学会高级会员)，
陈明城(中国电源学会学生会员)
(变频技术北京市工程研究中心(北方工业大学电气与控制工程学院)，北京 100144)

摘要：随着可再生能源的发展，直流微电网越来越受到关注。双有源桥 DAB(dual active bridge)变换器具有零电压导通等优点，能够实现控制的高效率，因此在直流微电网中起着重要作用。针对电压传输比不匹配时，单移相控制使得部分开关管失去零电压导通的能力，提出了一种多工作模式切换方法，以实现全负载范围的零电压开通。首先，分析并推导了扩展移相内部、外部模式下传输功率和电感电流的有效值表达式；其次，通过拉格朗日极值法获得移相比和传输功率的优化曲线，以保证 DAB 变换器实现全范围软开关的同时，满足全负载范围下的切换；最后，搭建了硬件在环平台，通过该平台验证了优化调制策略的可行性和优越性。

关键词：双有源桥变换器；软开关；优化曲线；硬件在环；拉格朗日极值法

Research on Optimization of Modulation Trajectory for DAB Converter with Full-range Soft Switching

ZHANG Guichen, *Member*, *CPSS*, LAN Yunzheng, ZHOU Jinghua, *Senior Member*, *CPSS*,
CHEN Mingcheng, *Student Member*, *CPSS*
(Inverier Technology Engineering Research Center of Beijing, School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: With the development of renewable energy, DC microgrids are receiving increasing attention. Dual active bridge (DAB) converters have advantages such as zero voltage conduction and can achieve a high control efficiency, thus playing an important role in DC microgrids. To address the issue of single phase shift control which causes some switching tubes to lose their capability of conducting at zero voltage when the voltage transmission ratio is mismatched, a multi-mode switching method was proposed to achieve zero voltage turn-on across the entire load range. First, the expressions for the effective values of transmission power and inductance current in the internal and external modes of extended phase shift were analyzed and derived. Second, the optimization curves of phase shift ratio and transmission power were obtained through the Lagrange extremum method to ensure that the DAB converter can satisfy switching under full-load range while achieving soft switching in the full range. Finally, a hardware-in-the-loop platform was built to verify the feasibility and superiority of the optimized modulation strategies.

Keywords: Dual active bridge (DAB) converter; soft switching; optimization curve; hardware-in-the-loop; Lagrangian multiplier method

收稿日期：2024-05-22；**修回日期**：2024-07-17；**录用日期**：2024-08-02；**网络首发日期**：2024-08-16
基金项目：北方工业大学毓秀创新资助项目(2024NCUTYXCX103)；北方工业大学毓杰团队资助项目(107051360024XN155)
This work is supported by the Yuxiu Innovation Project of North China University of Technology under the grant 2024NCUTYXCX103; the North China University of Technology Yujie Team under the grant 107051360024XN155

风能、太阳能、潮汐能等可再生能源的爆炸性增长给电网带来了许多益处，但由于可再生能源具有分部性和间歇性，故交流电网无法应对其高渗透性。直流微电网具有结构简单、效率高、响应迅

速等优势，为多类型的可再生能源系统 RES (renewable energy system)和储能系统 ESS(energy storage system)提供了更为高效的接口[1]。

双向 DC-DC 变换器是直流微电网中备受关注的拓扑，其中，双有源桥 DAB(dual active bridge)变换器作为 DC-DC 典型拓扑之一，具有高功率密度、宽电压转换增益范围、易于实现软开关和自动调节双向功率流等特点，在储能系统、固态变压器 SST(solid state transformer)、微电网和电动汽车等领域中得到了广泛的应用。

单移相 SPS(single phase shift)控制是 DAB 变换器最广泛的调制策略。但当输入电压、输出电压不匹配时，电流应力和回流功率增大，为降低电流应力和回流功率，研究人员提出了扩展移相 EPS (extended-phase-shift)、双移相 DPS(dual-phase-shift)、三移相 TPS(triple-phase-shift)[2-6]等优化调制策略。另外，输入输出电压不匹配时[7]，部分器件无法实现零电压开通，进而使得系统损耗增加、变换器效率降低。为降低系统损耗，文献[8]提出了将不同模式结合以发挥各模式的优势，实现了变换器的高效率运行。

针对优化回流功率和电流应力的问题，文献[9]采用拉格朗日极值法降低了电感电流应力，但需要实时计算传输功率；文献[10]采用改进的拉格朗日极值法，避免了求解外移相比和内移相比及电压调节比方程的过程，该方法降低了电感电流应力，但并没有对软开关进行分析；文献[11]采用改进的拉格朗日极值法，既降低了回流功率又降低了电流应力，但只分析了扩展移相内部模式，且没有对软开关进行分析。对于双重移相控制，文献[12]对 DAB 变换器进行动态建模，提出了满足软开关条件的基于回流功率最小的双重移相控制；文献[13]针对 DAB 变换器回流功率和电流应力最小化进行对比，分析软开关约束条件对优化效果的影响，结果表明相比于回流功率最小化，电流应力最小化使得 DAB 变换器获得更高的效率；文献[14]对双重移相模式下的回流功率进行优化，提出了变频加移相混合控制模式；文献[15]提出了在 4 种不同 DAB 运行状态下无功功率最小的最优移相比；文献[16]提出了一种具有高增益、软开关的新型谐振变换器，该谐振变换器使用耦合电感来提高电压增益，升压比不仅取决于占空比，还取决于耦合电感的变比，具有高增益的优点；文献[17]提出了电感电流有效值跟踪控制策略，克服了寄生电阻和开关损耗对最优工作点的影响；文献[18]研究了三重移相控制下的流应力优化策略；文献[19]以电流应力最小为优化目标，提出了一种变频的控制策略。

本文利用单移相控制、扩展移相控制的内部模式和扩展移相的外部模式各自的优点，通过模式切换保证在全负载范围内所有器件实现零电压开通，以电感电流有效值为优化目标，通过拉格朗日极值法推导出最优化轨迹曲线，并保证了轻载到重载的切换，最后基于硬件在环平台验证了控制策略的优越性。

1　工作原理

双有源桥式 DC-DC 变换器拓扑如图 1 所示。此拓扑包括 2 个 H 桥，通过高频变压器连接，其中 L 为变压器漏感与辅助电感之和，为简化分析过程，假设功率从输入侧 U_1 传输到输出测 U_2。

定义电压传输比为

$$K = nU_2 / U_1 \tag{1}$$

式中，n 为变压器的变比。

EPS 模式包括 2 个自由度，D_1 为桥内移相比，D 为桥间移相比；由 D_1 和 D 的大小，EPS 控制分为内部模式($0 \leqslant D \leqslant D_1 \leqslant 1$)和外部模式($0 \leqslant D_1 \leqslant D \leqslant 1$)，图 2(a)、(b)为稳态时内部模式和外部模式电量波形图。其中：T_h 为半个开关周期；u_{H_1} 为前桥 H_1 的两端电压；u_{H_2} 为后桥 H_2 的两端电压；u_L 为电感两端电压；i_L 为流过电感的电流。

当 DAB 变换器达到稳态时，电感电流在 1 个周期的平均值为 0，由图 2(a)得，外部模式下各个

时刻的电感电流值为

$$\begin{cases} i_L(t_0)=\dfrac{nU_2}{4Lf}[K(D_1-1)-2D+1] \\ i_L(t_1)=\dfrac{nU_2}{4Lf}[K(D_1-1)+2D_1-2D+1] \\ i_L(t_2)=\dfrac{nU_2}{4Lf}[K(2D-D_1-1)+1] \end{cases} \tag{2}$$

外部模式下电感电流有效值为

$$\begin{aligned} I_{Lrms}=I_N[&1-2K+K^2+12KD^2-8KD^3- \\ &12KDD_1+12KD^2D_1-3D_1^2+6KD_1^2- \\ &12KDD_1^2+2D_1^3+4KD_1^3)]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{3}$$

式中，I_N 为标幺化电流有效值平方的基准值，$I_N=U_1^2/(48f^2L^2)$。

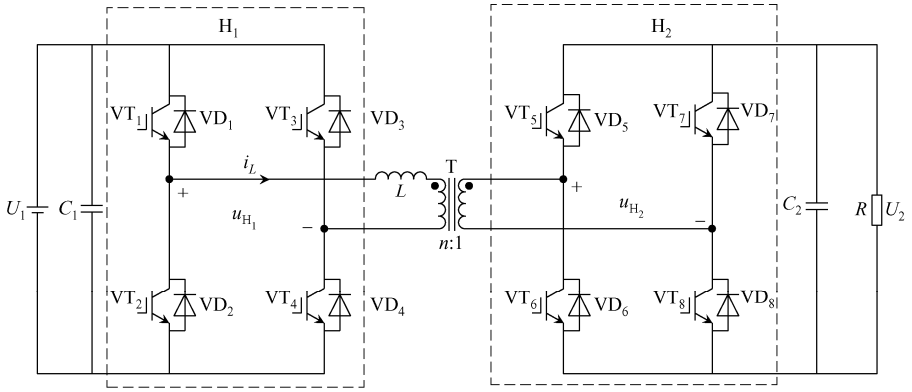
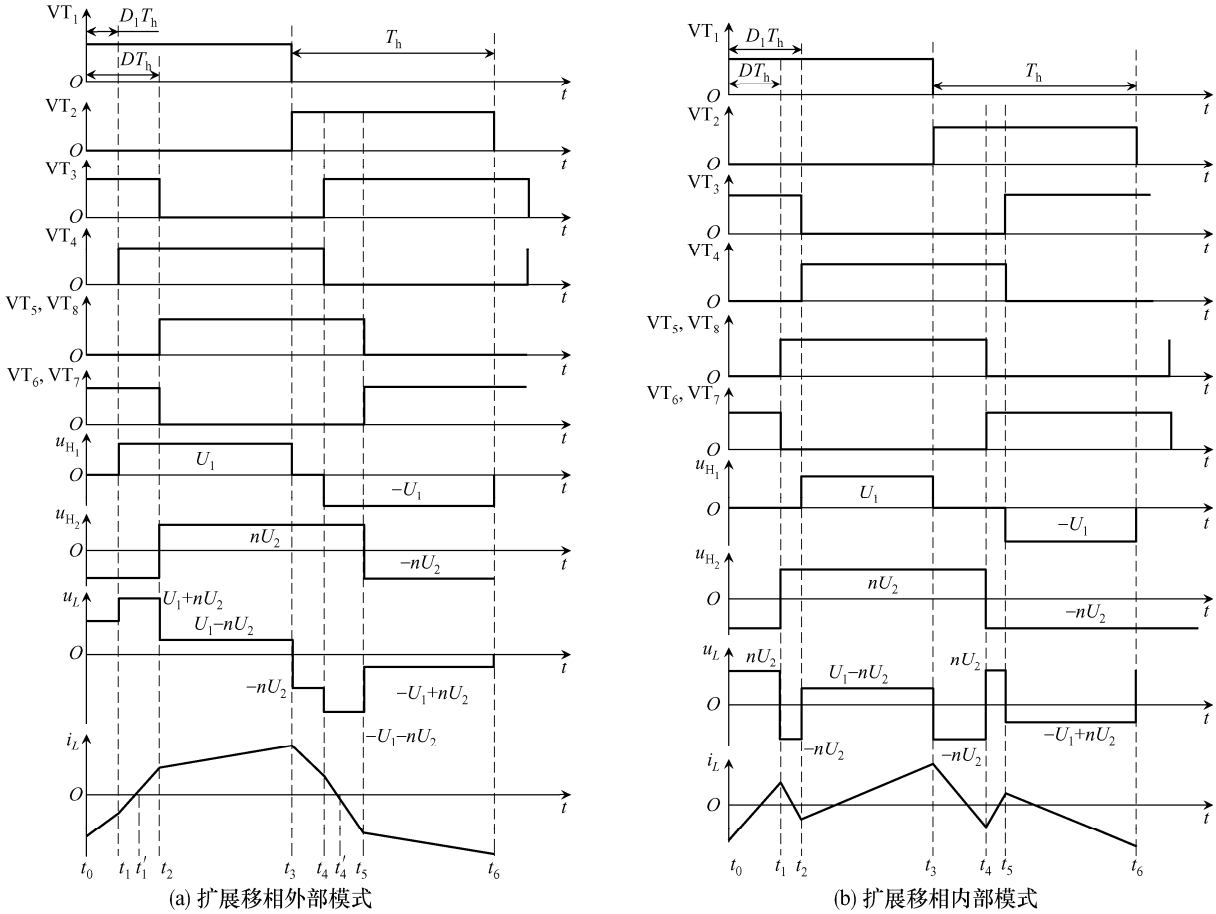


图 1 双有源桥式 DC-DC 变换器拓扑

Fig. 1 Topology of DAB DC-DC converter



(a) 扩展移相外部模式　　(b) 扩展移相内部模式

图 2 EPS 模式工作波形

Fig. 2 Operating waveforms in EPS mode

外部模式的传输功率平均值为

$$P=\frac{nU_1U_2}{4fL}(-D_1-D_1^2-2D^2+2D_1D+2D) \tag{4}$$

内部模式下各个时刻的电感电流值为

$$\begin{cases} i_L(t_0)=\dfrac{nU_2}{4Lf}[K(D_1-1)-2D+1] \\ i_L(t_1)=\dfrac{nU_2}{4Lf}[K(D_1-1)+1] \\ i_L(t_2)=\dfrac{nU_2}{4Lf}[K(D_1-1)-2D_1+2D+1] \end{cases} \tag{5}$$

内部模式下电感电流有效值为

$$I_{Lrms}=[I_N(1-2K-12KDD_1-12KD^2D_1+12KD^2+K^2-3D_1^2+6KD_1^2+12KDD_1^2+2D_1^3-4KD_1^3)]^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

同理，内部模式的传输功率平均值为

$$P=\frac{nU_1U_2}{4fL}(2D-2D_1D-D_1+D_1^2) \tag{7}$$

以单移相控制的最大传输功率 P_N 为基准值，$P_N=nU_1U_2/(8fL)$，式(4)和式(7)标幺化的传输功率为

$$P=\begin{cases} 2(2D-2D_1D-D_1+D_1^2) & D_1>D \\ 2(-D_1-D_1^2-2D^2+2D_1D+2D) & D_1<D \end{cases} \tag{8}$$

2　调制策略

DAB 变换器损耗主要包括开关损耗、通态损耗和变压器损耗。开关损耗与是否实现软开关能力相关，当开关频率很高时，开关损耗为主要损耗；通态损耗与线路损耗电感电流有效值相关。

因此，为减小变换器损耗，提高变换器效率，以电感电流有效值的平方为目标函数，功率传输为约束条件，采用拉格朗日极值法解决优化问题，具体为

$$L=I_{Lrms}^2+\lambda[P-P_o] \tag{9}$$

式中：λ 为拉格朗日乘子；P_o 为所需要的传输功率。

对式(9)分别求 D 和 D_1 的偏导数，并令其为 0，得到不同传输功率下电感电流有效值最小的移相比组合的曲线，即

$$\frac{\partial L}{\partial D}=\frac{\partial I_{Lrms}^2}{\partial D}+\lambda\frac{\partial P}{\partial D}=0 \tag{10}$$

$$\frac{\partial L}{\partial D_1}=\frac{\partial I_{Lrms}^2}{\partial D_1}+\lambda\frac{\partial P}{\partial D_1}=0 \tag{11}$$

$$\lambda\neq 0 \tag{12}$$

得到内部模式的最优化轨迹曲线为

$$D_1=\frac{1-K+2KD+\sqrt{-8KD^2+(-1+K-2KD)^2}}{2} \tag{13}$$

得到外部模式的最优化轨迹曲线为

$$D_1=(\sqrt{4-4K+K^2-8D+4KD-4K^2D+4D^2+4K^2D^2}-K+2D+2KD)/2 \tag{14}$$

为保证内部模式(D_1>D)和外部模式的移相比(D>D_1)的限制条件，内部模式下 D 的取值范围为

$$0<D<1-K \tag{15}$$

外部模式下 D 的取值范围为

$$1-K<D<\frac{K-1+\sqrt{1-K^2}}{2K} \tag{16}$$

当输入输出电压不匹配时，即 K 不等于 1，单移相控制在 D 比较小的情况下，DAB 变换器将不在软开关区域内工作，如图 3 所示。

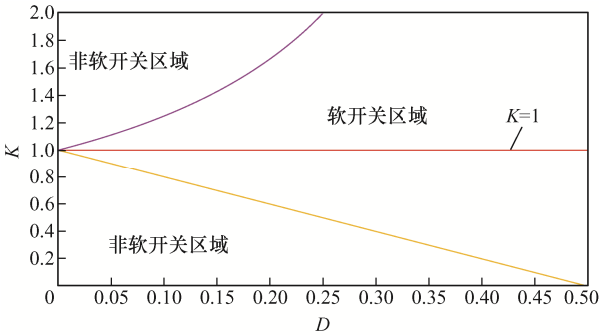


图 3　单移相调制下 DAB 变换器的软开关范围

Fig. 3 Soft switching range of DAB converter under SPS modulation

扩展移相内部、外部模式软开关的约束条件分别为

$$\begin{cases} i_L(t_0)<0 \\ i_L(t_1)>0 \\ i_L(t_2)<0 \end{cases} \tag{17}$$

$$\begin{cases} i_L(t_1)<0 \\ i_L(t_2)>0 \end{cases} \tag{18}$$

根据传输功率和软开关的约束条件，画出移相比和传输功率三维图，如图 4 所示。根据式(13)、式(14)画出内部模式和外部模式的最优化轨迹曲线。

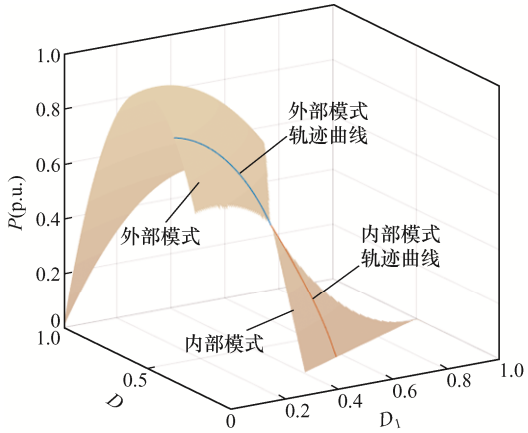


图 4 最优化轨迹曲线

Fig. 4 Optimal trajectory curve

3 仿真分析与实验验证

3.1 仿真分析

基于以上理论分析，在 MATLAB/Simulink 中搭建 DAB 变换器仿真模型，仿真模型参数见表 1。

表 1 DAB 变换器仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of DAB converter

参数	数值
输入电压 U_1/V	100
输出电压 U_2/V	70
漏感 L/μH	100
开关频率 f/kHz	10
额定功率 P/W	240
变压器变比 n	1:1
电阻 R/Ω	200
输入电容 C/μF	500

控制框图如图 5 所示，首先将给定参考电压 U_{ref} 和采样得到的输出电压 U_2 进行比较，给到比例积分 PI(proportional integral)控制器得到 D，将 K 和 D 给到优化的控制策略(式(13)、式(14))，得到

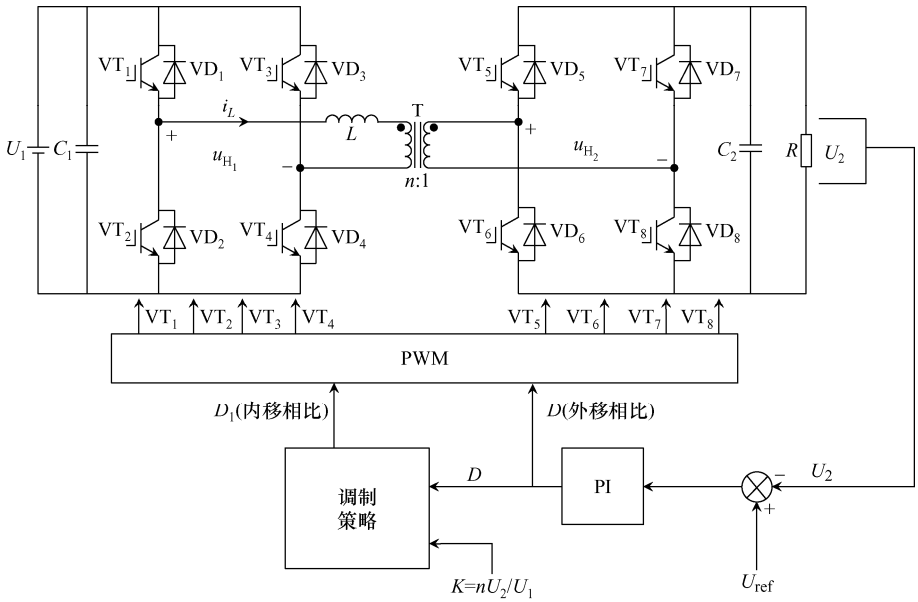


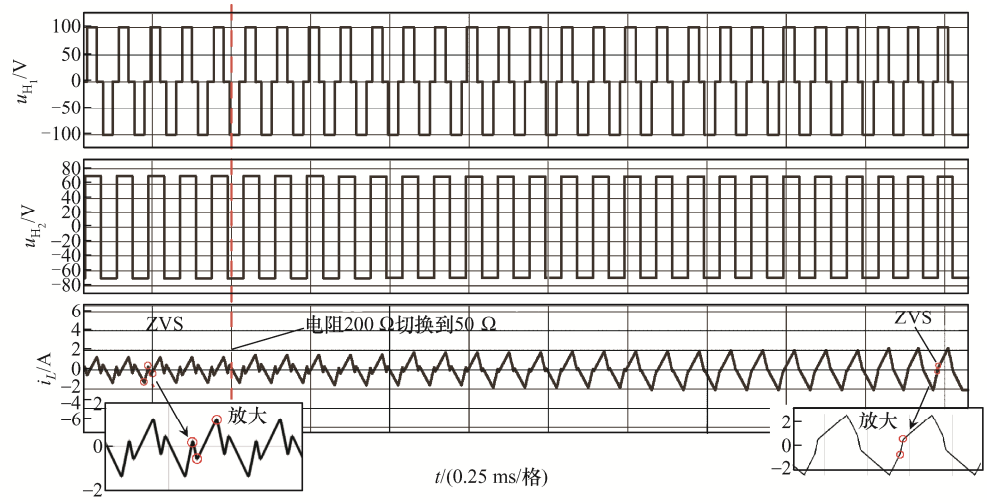
图 5 控制框图

Fig. 5 Control block diagram

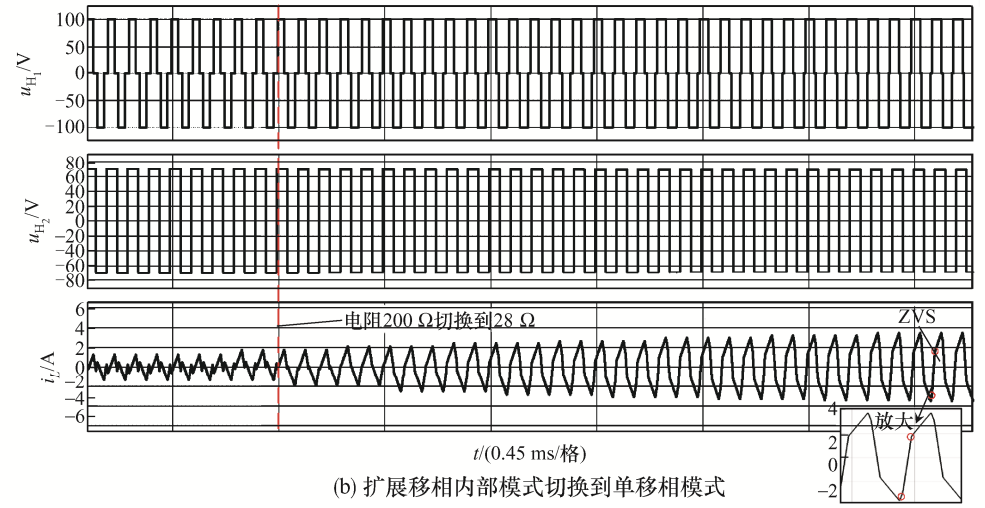
D_1，将 D 和 D_1 给到 PWM 信号，驱动开关管导通。

仿真结果如图 6 所示，图中虚线处为负载突变时刻。图 6(a)为扩展移相内部模式切换到扩展移相外部模式，传输功率由 24.5 W 变为 98.0 W；图 6(b)

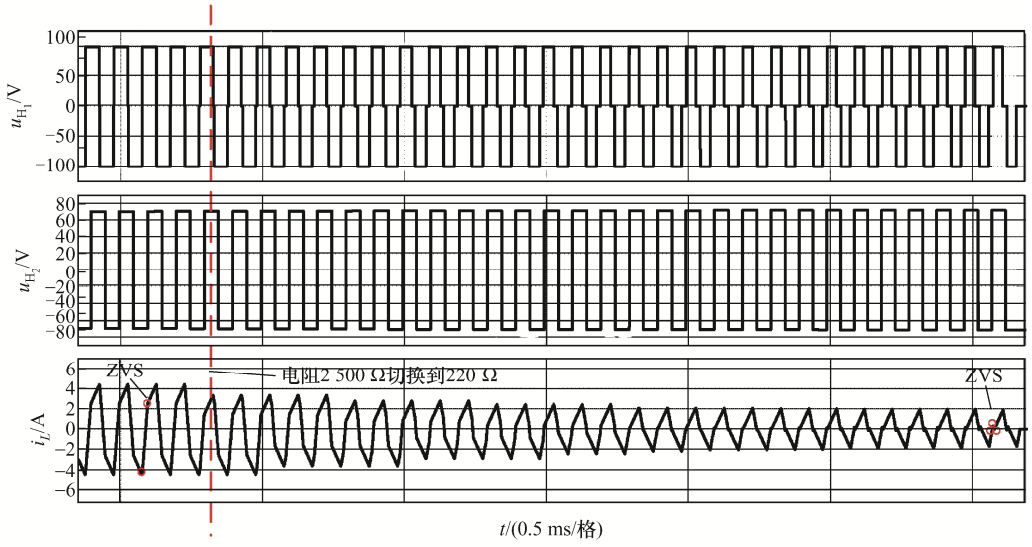
为扩展移相内部模式切换到单移相控制，传输功率由 24.5 W 变为 175.0 W；图 6(c)为单移相模式切换扩展移相内部模式，传输功率由 196.0 W 变为 22.0 W；图 6(d)为开关管的栅源电压 u_{GS}、漏



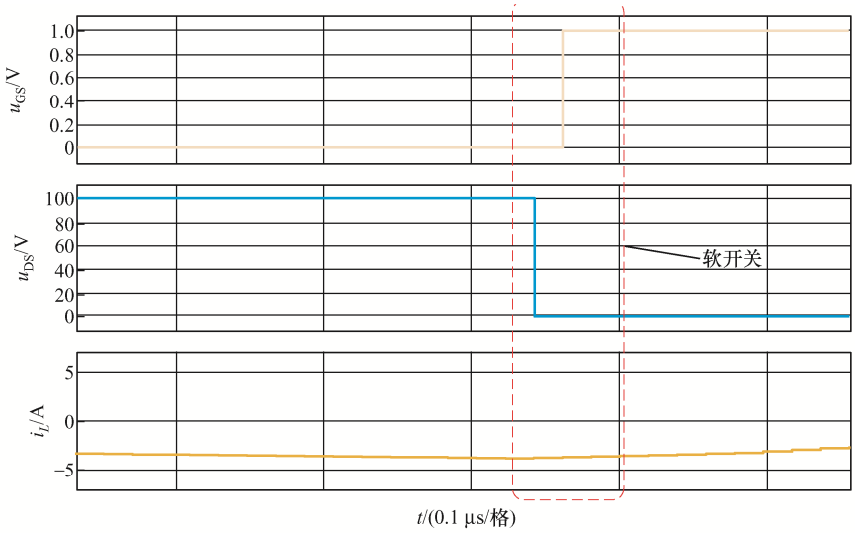
(a) 扩展移相内部模式切换到扩展移相外部模式



(b) 扩展移相内部模式切换到单移相模式



(c) 单移相模式切换到扩展移相内部模式



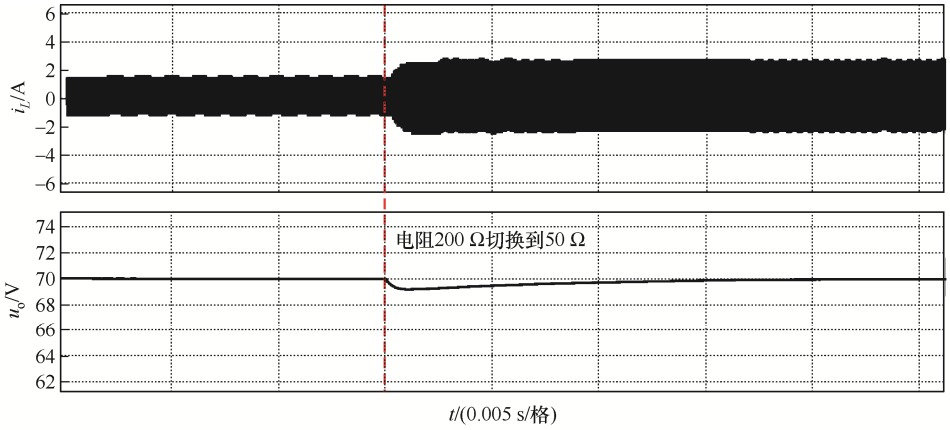
(d) 开关管u_{GS}、u_{DS}和i_L波形

图 6 仿真结果

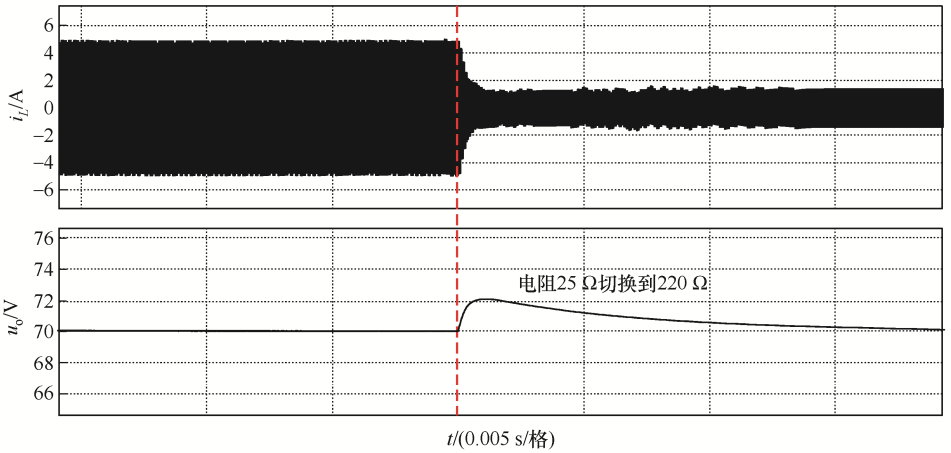
Fig. 6 Simulation results

源电压 u_{DS} 和电感电流 i_L 的波形图，由图 6(d)可知，u_{DS} 在 u_{GS} 驱动信号来之前降为 0，开关管的 u_{DS} 信号和 u_{GS} 驱动信号没有重叠，开关管实现软开关。

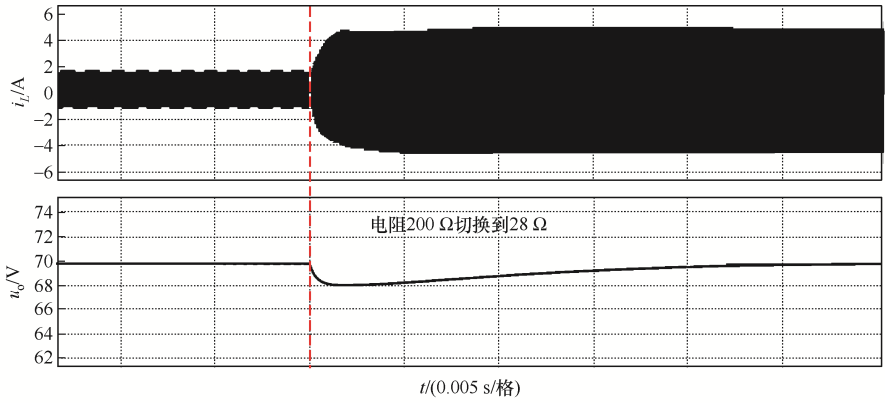
图 7 为负载和给定电压突变时输出电压和电



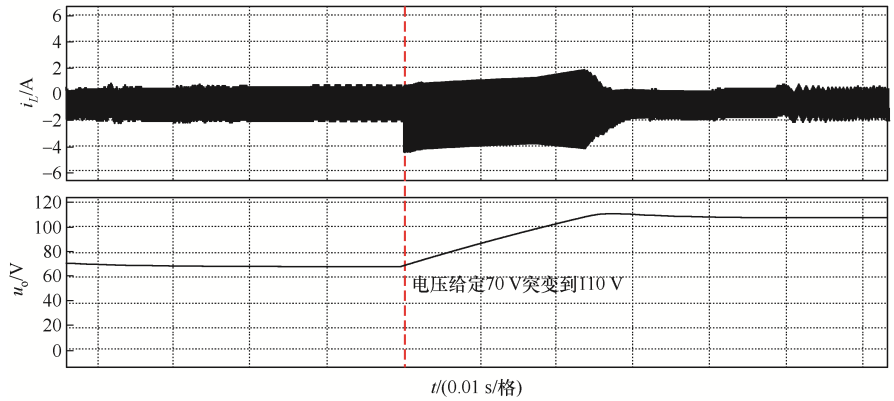
(a) 负载突变1



(b) 负载突变2



(c) 负载突变3



(d) 给定电压突变

图 7　输出电压和电感电流波形

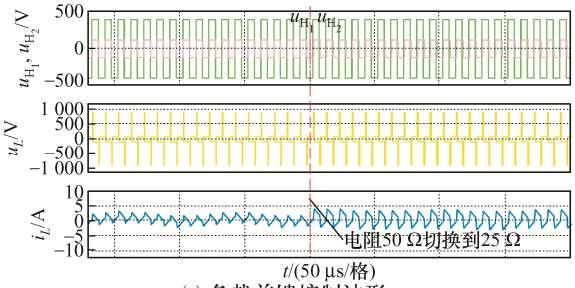
Fig. 7 Waveforms of output voltage and inductance current

感电流的稳态波形，图 7(a)~(c)为从负载突变的 3 种情况，输出电压稳定在 70 V；图 7(d)为给定电压从 70 V 突变为 110 V 的波形，输出电压能够稳定在给定电压。

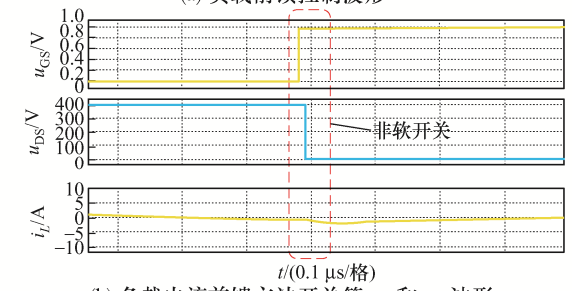
另外，与现有方法负载电流前馈控制仿真对比[20]，仿真波形如图 8 所示，电压传输比不匹配时，负载电流前馈控制的开关管 u_{DS} 和驱动信号 u_{GS} 重叠，开关失去软开关。

3.2　实验验证

为了验证上述调制策略的正确性，采用 TI 公司的 TMS320F28335 作为控制板，结合上海远宽能源科技有限公司的半实物仿真机，搭建了硬件在环 HIL (hardware-in-the-loop)平台，如图 9 所示。



(a) 负载前馈控制波形



(b) 负载电流前馈方法开关管u_{GS}和u_{DS}波形

图 8　负载电流前馈方法波形

Fig. 8 Waveforms obtained using load current feedforward method

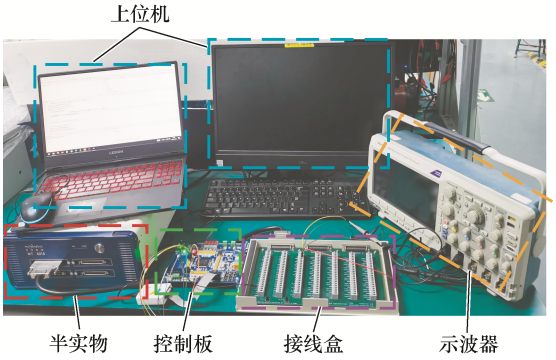


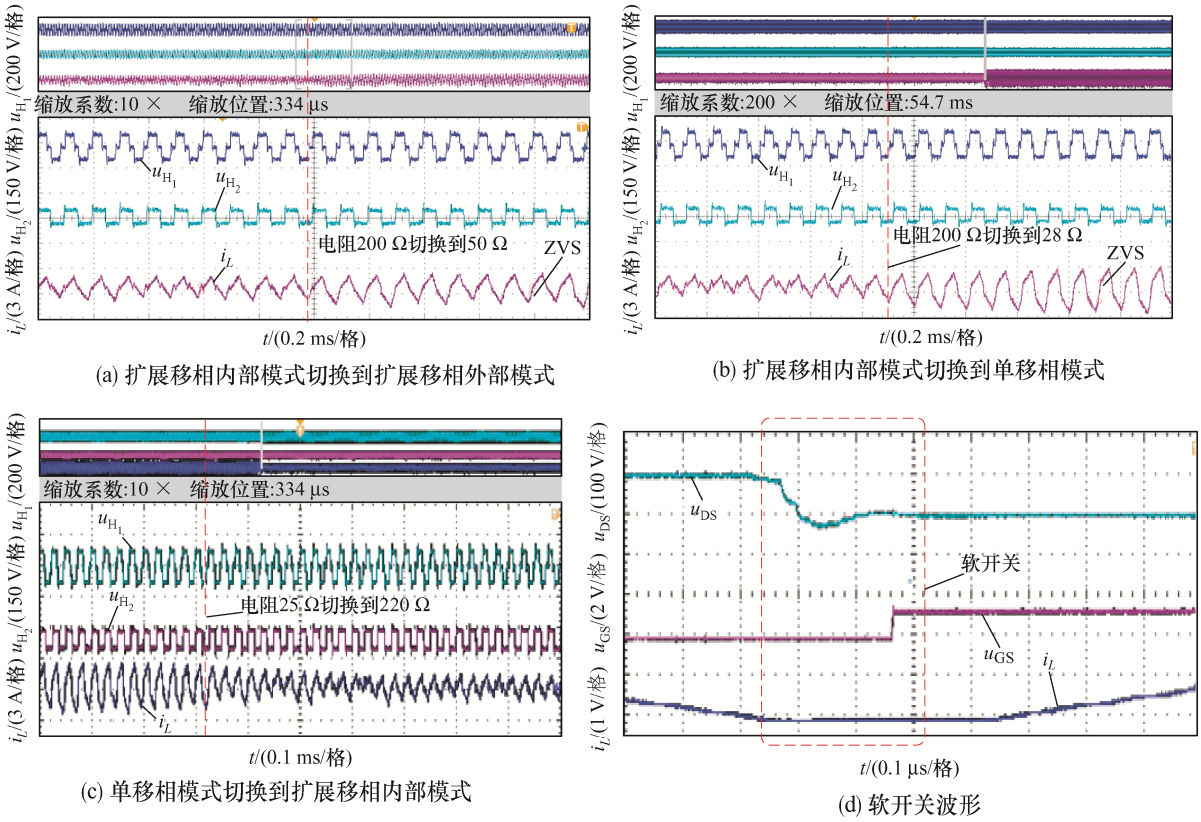
图 9 HIL 实验平台

Fig. 9 HIL experimental platform

HIL 相关参数和仿真的参数一致，见表 1。

实验结果如图 10 所示，虚线处为负载突变时刻，图 10(a)为扩展移相内部模式切换到扩展移相外部模式，功率从 24.5 W 变为 98.0 W；图 10(b)为扩展移相内部模式切换到单移相模式，功率从 24.5 W 变为 175.0 W；图 10(c)为单移相模式切换到扩展移相内部模式，功率从 196.0 W 变为 22.0 W；图 10(d)为软开关波形，开关管 u_{DS} 在驱动信号 u_{GS} 来之前降为 0，实现了软开关。

图 11 为负载和给定电压突变时，输出电压和



(a) 扩展移相内部模式切换到扩展移相外部模式

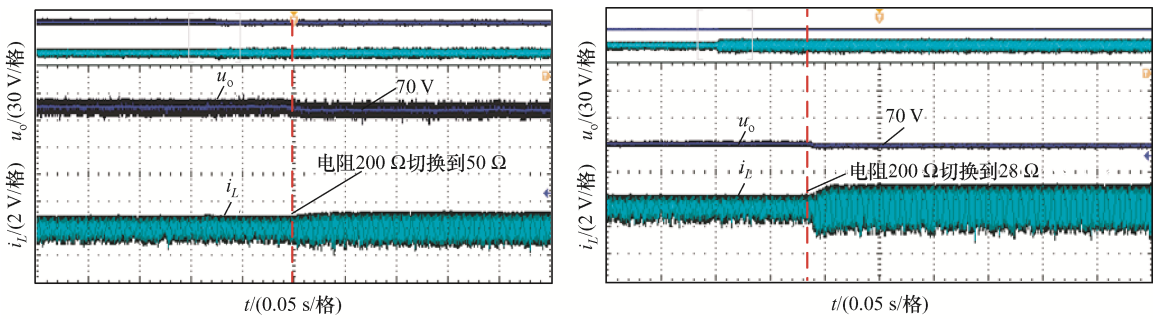
(b) 扩展移相内部模式切换到单移相模式

(c) 单移相模式切换到扩展移相内部模式

(d) 软开关波形

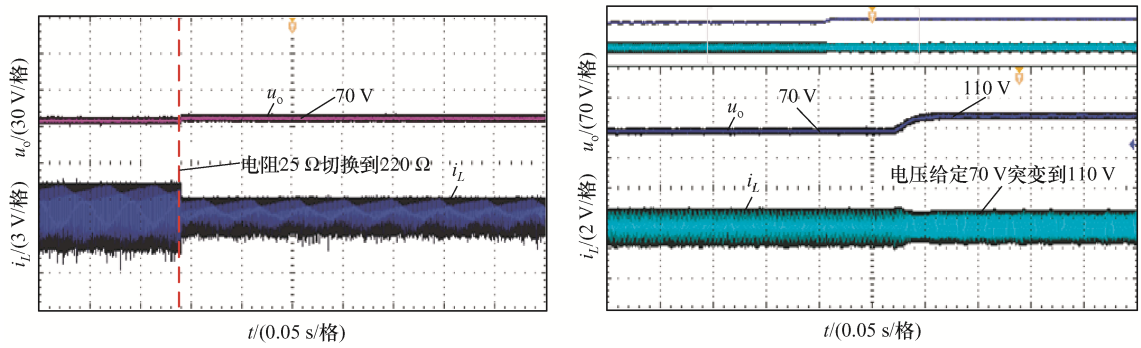
图 10 实验结果

Fig. 10 Experimental results



(a) 负载突变1

(b) 负载突变2



(c) 负载突变3　　(d) 给定电压突变

图 11　半实物的输出电压和电感电流波形

Fig. 11 Waveforms of hardware-in-the-loop output voltage and inductance current

电感电流的稳态波形，在负载突变时刻，从重载到轻载和从轻载到重载，输出电压能够稳定在 70 V，在给定电压突变时，输出电压能够稳定在给定电压。

4　结语

可再生能源的快速崛起推动着直流微电网迅速发展，DAB 变换器广泛应用在直流微电网中，但单移相模式在电压不匹配时会带来电流应力和回流功率增大的问题，本文基于拉格朗日极值法提出了 3 种模式切换方法。当负载变化时，变换器工作在不同的模式。重载时，变换器工作在单移相模式；负载变轻后，变换器工作在扩展移相外部模式；轻载时，变换器工作在扩展移相内部模式。仿真和实验验证了在全负载范围内，能够实现 3 个模式下切换，并且在不同模式下器件全部实现零电压开通。该方法验证了模式切换下的优越性和有效性。

参考文献：

[1] Dragičević T, Lu Xiaonan, Vasquez J C, et al. DC microgrids: Part I: A review of control strategies and stabilization techniques [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4876-4891.

[2] Zhao Biao, Yu Qingguang, Sun Weixin. Extended-phase-shift control of isolated bidirectional DC-DC converter for power distribution in microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4667-4680.

[3] Gu Qing, Yuan Liqiang, Nie Jintong, et al. Current stress minimization of dual-active-bridge DC-DC converter within the whole operating range [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1): 129-142.

[4] Calderon C, Barrado A, Rodriguez A, et al. General analysis of switching modes in a dual active bridge with triple phase shift modulation [J]. Energies, 2018, 11(9): 2419.

[5] 谷泓杰. 隔离型双向全桥 DC-DC 变换器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
Gu Hongjie. Research on isolated bidirectional full-bridge DC-DC converter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)

[6] Hou Nie, Li Yunwei. Overview and comparison of modulation and control strategies for a nonresonant single-phase dual-active-bridge DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(3): 3148-3172.

[7] Rodríguez A, Vázquez A, Lamar D G, et al. Different purpose design strategies and techniques to improve the performance of a dual active bridge with phase-shift control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 790-804.

[8] Garcia-Bediaga A, Villar I, Rujas A, et al. DAB modulation schema with extended ZVS region for applications with wide input/output voltage [J]. IET Power Electronics, 2018, 11(13): 2109-2116.

[9] 郭华越, 张兴, 赵文广, 等. 双有源桥DC/DC变换器的最小电流应力优化[J]. 电力电子技术, 2019, 53(3): 120-122.
Guo Huayue, Zhang Xing, Zhao Wenguang, et al. Optimization of minimum current stress for dual active bridge DC/DC converters [J]. Power Electronics, 2019, 53(3): 120-122. (in Chinese)

[10] 王鹏, 李彦鹏, 樊生文, 等. DAB 变换器移相优化控制

策略研究[J]. 电力电子技术, 2021, 55(7): 117-119, 122.
Wang Peng, Li Yanpeng, Fan Shengwen, et al. Research on optimal control strategy of phase shift for DAB converter [J]. Power Electronics, 2021, 55(7): 117-119, 122. (in Chinese)

[11] 王金浩, 宋述勇, 李瑞, 等. 双向全桥DC/DC变换器电流应力和回流功率优化[J]. 电力电子技术, 2022, 56(6): 120-122, 133.
Wang Jinhao, Song Shuyong, Li Rui, et al. Current stress and backflow power optimization of bidirectional full-bridge DC/DC converter [J]. Power Electronics, 2022, 56(6): 120-122, 133. (in Chinese)

[12] 程红, 高巧梅, 朱锦标, 等. 基于双重移相控制的双向全桥 DC-DC 变换器动态建模与最小回流功率控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 245-253.
Cheng Hong, Gao Qiaomei, Zhu Jinbiao, et al. Dynamic modeling and minimum backflow power controlling of the bi-directional full-bridge DC-DC converters based on dual-phase-shifting control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 245-253. (in Chinese)

[13] 胡燕, 张天晖, 杨立新, 等. 双重移相 DAB 变换器回流功率优化与电流应力优化的对比研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 243-253.
Hu Yan, Zhang Tianhui, Yang Lixin, et al. Comparative study of reactive power optimization and current stress optimization of DAB converter with dual phase shift control [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2020, 40(S1): 243-253. (in Chinese)

[14] 任伊昵, 高祎韩, 韩旭, 等. 基于双有源桥DC/DC变换器回流功率优化的变频移相混合控制策略[J]. 电源学报, 2018, 16(6): 27-33.
Ren Yini, Gao Yihan, Han Xu, et al. Variable-frequency phase-shift hybrid control strategy for DAB DC/DC converter to optimize reactive power [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(6): 27-33. (in Chinese)

[15] Shao Shuai, Jiang Mingming, Ye Weiwen, et al. Optimal phase-shift control to minimize reactive power for a dual active bridge DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 10193-10205.

[16] 王哲, 李驰, 郑泽东, 等. 一种基于耦合电感的高增益软开关谐振变换器[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 194-205.
Wang Zhe, Li Chi, Zheng Zedong, et al. A high step-up ZVS/ZCS resonant converter based on coupled inductor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 194-205. (in Chinese)

[17] 邓丹阳, 陈艳慧. 双有源桥直流变换器三电平扩展移相控制下电感电流有效值最优跟踪控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(18): 5800-5815.
Deng Danyang, Chen Yanhui. Optimal tracking control strategy of inductive current RMS for dual-active bridge DC converter with three-level extended phase-shift control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18): 5800-5815. (in Chinese)

[18] 叶伟, 王浩, 李善寿, 等. DAB 变换器三重移相电流应力全局优化策略分析[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 63-69.
Ye Wei, Wang Hao, Li Shanshou, et al. Analysis of global optimization strategy for current stress of DAB converter under triple phase shift control [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 63-69. (in Chinese)

[19] 贺伟, 刘晓芳. 双有源桥变换器的最小电流应力变频控制[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 92-99.
He Wei, Liu Xiaofang. Minimum current stress control with varying switching frequency for dual-active-bridge converter [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 92-99. (in Chinese)

[20] 李沫霖, 郭志强. 负载电流前馈闭环控制的快速动态响应双有源桥式变换器的输出阻抗分析[J]. 电源学报, 2020, 18(3): 55-62.
Li Molin, Guo Zhiqiang. Output impedance analysis of dual active bridge converter with load current feedforward closed-loop control for fast dynamic response [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(3): 55-62. (in Chinese)



张贵辰

作者简介：

张贵辰(1987—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：新能源控制与电力电子变换。E-mail：zgc@ncut.edu.cn。

兰云政(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：隔离型 DC-DC 变换器调制策略。E-mail：1650091184@qq.com。

周京华(1974—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：新能源控制与电力电子变换。E-mail：zjh@ncut.edu.cn。

陈明城(1996—)，男，中国电源学会学生会员，博士研究生。研究方向：新能源控制与电力电子变换。E-mail：15711491140@163.com。

(责任编辑：孙美菊)