

基于双有源桥电路移相控制配置和内移相中心对称叠加补偿方法的研究

张珈晨, 高李阳, 李浩兵, 杜秋怡, 殷祺儒, 李子恒, 方宇, 曹松银, 周柳明

扬州大学信息工程学院(人工智能学院), 江苏 扬州

收稿日期: 2025年5月9日; 录用日期: 2025年6月2日; 发布日期: 2025年6月9日

摘要

随着可再生能源和直流微网发展, 双有源桥电路成为研究热点, 精确移相控制对其至关重要。传统单移相控制轻载性能差, 双移相和三重移相控制算法复杂、适应性弱, 现有方法均存在不足。为此, 本文提出基于双有源桥电路移相控制配置和内移相中心对称叠加补偿方法的方案。该方案通过ePWM模块的配置、外移相角动态生成、内移相自适应配置及前馈量对称补偿抑制电流畸变。文中详细阐述了双有源桥电路拓扑、ePWM模块配置、外移相信号配置器设计、内移相配置及补偿算法原理。仿真实验表明, 该方案能实现高低压侧高效双向能量传输, 满足不同场景移相控制需求。内移相中心对称叠加补偿方法可实时补偿移相角误差, 提升系统稳定性、响应速度和控制精度。且该技术有望扩展应用于双通道、多通道及其他类型的双有源桥电路, 从而最大限度地提高电路效率以优化系统性能。

关键词

双有源桥电路, ePWM模块, 移相控制, PSIM仿真

Research on Phase Shifting Control Configuration Based on Dual Active Bridge Circuit and Symmetric Overlapping Compensation Method for Internal Phase Shifting Center

Jiachen Zhang, Liyang Gao, Haobing Li, Qiuyi Du, Qiru Yin, Ziheng Li, Yu Fang, Songyin Cao, Liuming Zhou

College of Information Engineering (College of Artificial Intelligence), Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Received: May 9th, 2025; accepted: Jun. 2nd, 2025; published: Jun. 9th, 2025

文章引用: 张珈晨, 高李阳, 李浩兵, 杜秋怡, 殷祺儒, 李子恒, 方宇, 曹松银, 周柳明. 基于双有源桥电路移相控制配置和内移相中心对称叠加补偿方法的研究[J]. 电路与系统, 2025, 14(2): 9-19. DOI: [10.12677/ojcs.2025.142002](https://doi.org/10.12677/ojcs.2025.142002)

Abstract

With the development of renewable energy and DC microgrids, dual active bridge circuits have become a research hotspot, and precise phase shift control is crucial for them. Traditional single phase shifting control has poor light load performance, and dual phase shifting and triple phase shifting control algorithms are complex and have weak adaptability. Existing methods all have shortcomings. Therefore, this article proposes a scheme based on dual active bridge circuit phase shift control configuration and internal phase shift center symmetric superposition compensation method. This scheme suppresses current distortion through the configuration of ePWM module, dynamic generation of external phase angle, adaptive configuration of internal phase shift, and symmetrical compensation of feedforward. The article provides a detailed explanation of the dual active bridge circuit topology, ePWM module configuration, external phase shift signal configurator design, internal phase shift configuration, and compensation algorithm principles. Simulation experiments show that this scheme can achieve efficient bidirectional energy transmission on the high and low voltage sides, meeting the requirements of phase shifting control in different scenarios. The symmetrical superposition compensation method with internal phase shift center can compensate for phase shift angle errors in real time, improving system stability, response speed, and control accuracy. And this technology is expected to be extended to dual channel, multi-channel, and other types of dual active bridge circuits, thereby maximizing circuit efficiency to optimize system performance.

Keywords

Dual Active Bridge Circuit, ePWM Module, Phase Shifting Control, PSIM Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着可再生能源渗透率的提高与直流微网的快速发展,高效双向DC/DC变换器成为能量管理的核心设备。双有源桥电路因其高效率、软开关特性及双向功率传输能力,被广泛应用于新能源储能、电动汽车及直流微网系统[1][2],成为研究热点。其核心控制目标是通过调节高低压侧全桥电路的移相角,实现能量的精确调控。所以,在双有源桥电路的实际运行中,精确的移相控制至关重要。传统单移相(Single Phase Shift, SPS)控制虽简单易行,但在轻载时电流应力大、效率低,且电压增益突变时易引发电流畸变[3]。

近年来,双移相(Dual Phase Shift, DPS)与三重移相(Triple Phase Shift, TPS)控制通过引入内移相角优化功率传输特性,但算法复杂度高且缺乏对非理想工况的适应性[4][5]。文献[6]提出基于电压前馈的移相角预测方法,但未考虑变压器漏感与寄生参数的影响;文献[7]采用模型预测控制(MPC)提升动态性能,但计算资源消耗限制了其高频应用。由此见得,在传统移相控制策略上,固定移相模式无法根据实时工况动态调整移相角度,使得电路在面对负载变化、输入电压波动时,能量转换效率降低,甚至出现系统失稳现象。同时,在DSP的ePWM模块配置方面,常规做法灵活性差,难以适应电路应用场景和工作条件的变化,导致系统性能下降[8]。为此,本文提出一种基于双有源桥电路移相控制配置和内移相中心对称叠加补偿方法的研究方案。该方案通过外移相角 Φ 的动态生成与内移相D的自适应配置,结合前馈量F的对称补偿,有效抑制电流畸变。旨在实现双有源桥电路精确移相控制,提升能量传输效率和功率调节

能力, 增强系统稳定性和可靠性, 以满足不同应用场景的需求。

2. 双有源桥电路及移相控制配置方法

2.1. 双有源桥电路拓扑与工作原理

双有源桥电路主要由低压侧(电池侧)全桥电路、高压侧(母线侧)全桥电路、高频隔离变压器、谐振电感和隔直电容等部分组成, 其基本结构如图 1 所示。低压侧全桥电路由功率开关管 $Q_1 \sim Q_4$ 组成, 高压侧全桥电路由功率开关管 $Q_5 \sim Q_8$ 组成。通过控制这些开关管的导通和关断, 实现能量在高低压侧之间的双向传输。能量传输方向由外移相角 Φ 决定: $\Phi > 0$ 时, 能量从低压侧流向高压侧, 即放电模式; $\Phi < 0$ 时, 能量从高压侧流向低压侧, 即充电模式。

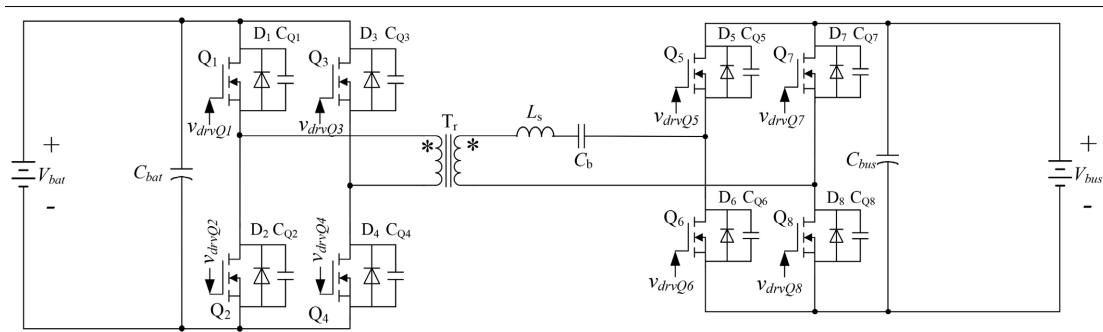


Figure 1. Dual active bridge circuit topology structure

图 1. 双有源桥电路拓扑结构

在图 1 中, V_{bat} 为电池电压, 是低压侧的电源; C_{bat} 为低压侧滤波电容, 用于稳定低压侧电压; $D_1 \sim D_8$ 为开关管的体二极管, 在电路中起到续流等作用; $C_{Q1} \sim C_{Q8}$ 为开关管的寄生电容, 会影响开关管的开关特性; C_b 为隔直电容, 防止变压器直流偏磁; L_s 为谐振电感, 参与电路的谐振过程; T_r 为高频变压器, 实现高低压侧的电气隔离和电压变换; C_{bus} 为高压侧母线电容, 稳定高压侧母线电压; V_{bus} 为母线电压, 是高压侧的输出电压。

2.2. ePWM 模块配置

基于 DSP 的 ePWM 模块生成双有源桥移相控制驱动信号的具体步骤如下:

设置 ePWM 模块的时钟源和频率, 配置计数器模式并选择合适计数方向和周期值满足移相需求; 设置比较器功能, 采样低压侧电池的电压反馈量 V_{batf} 和高压侧母线电压反馈量 V_{busf} 送到双有源桥电路的外移相信号配置器形成触发信号, 从而触发两侧全桥电路中对应开关管 ePWM 脉冲信号之间的相位移;

其中关键配置如下:

ePWM 模块时钟源和频率配置: 设置 ePWM 模块的时钟源和频率与双有源桥电路工作频率匹配。将 ePWM 口配置为异步输入, 并选择异步采样时钟作为输入采样的时钟源, 确保时钟源和频率的配置与电路工作频率精确同步。这一配置为后续的移相控制提供了稳定的时间基准, 是实现精确移相的基础。

计数器模式配置: 计数器模式选择增减计数模式。设置定时器的周期值为开关周期的半周期值, 初始相位为零。在该模式下, 计数器的计数过程与移相控制紧密相关。当计数器递增时, 可用于控制开关管的导通时间; 计数器递减时, 可控制开关管的关断时间。通过合理设置周期值和初始相位, 能够精确调整开关管的导通和关断时刻, 满足移相需求。

使能配置: 设置了特定输出比较事件 A 使能, 同时可以根据需求配置中断使能和中断选择, 并通过

事件触发预分频器设置，控制事件触发的频率。设置 ePWM 的相位使能，0 为禁止移相，1 为允许移相，并且可以根据需要调整所述中断的使能和触发频率。通过灵活调整中断使能和触发频率，可以优化系统的响应速度和控制精度，提高系统的整体性能。

比较器功能配置：设置比较控制寄存器 CMPCTL，当双有源桥电路反馈信号与预设参考值相等时，生成触发信号作为时基相位寄存器 TBPHS 的触发事件。根据 TBCTL 时基控制寄存器的周期，当计数器在上升(下降)过程中和比较控制寄存器 CMPCTL 中的值进行比较，数值相同时会输出低电平(高电平)；比较器的输出电平信号送入死区产生模块从而输出 ePWM 互补的信号，分别送到双有源桥电路中的桥臂开关管。通过这种方式，实现了根据反馈信号精确控制开关管的驱动信号，确保移相控制的准确性。

2.3. 外移相信号配置器的设计

外移相信号配置器的主要原理如图 2 所示，将双有源桥电路反馈电压与预设参考值比较产生的误差，即将低压侧电池的恒压充电参考电压 V_{bat_ref} 与低压侧电池的电压反馈量 V_{batf} 相减后产生的误差和高压侧母线参考电压 V_{bus_ref} 与高压侧母线电压反馈量 V_{busf} 相减后产生的误差，经电压调节器生成双有源桥电路的两侧全桥电路中对应开关管驱动信号的外移相角 Φ ，所述外移相角 Φ 送到 DSP 的 ePWM 模块移相寄存器中形成触发信号，从而触发两侧全桥电路中对应开关管 ePWM 脉冲信号之间的相位移。

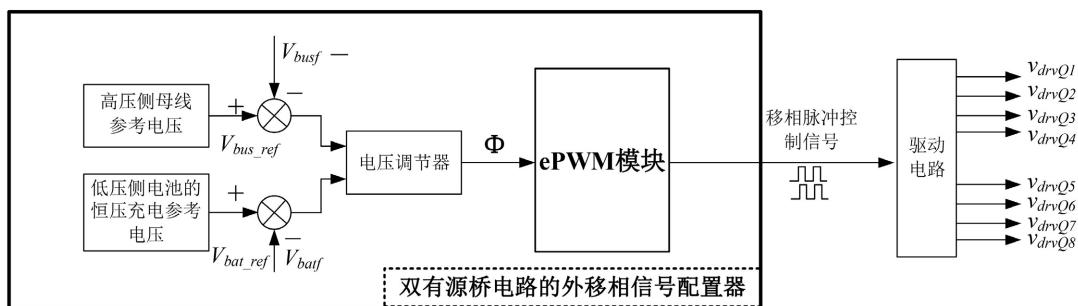


Figure 2. Schematic diagram of external phase shift signal configurator

图 2. 外移相信号配置器原理图

外移相角 Φ 根据充放电状态分别可以是正值和负值，若外移相角 Φ 是正值时对应放电状态，就会控制高压侧全桥电路中开关管的驱动信号滞后于低压侧全桥电路中所对应功率开关管的驱动信号，且移相角度为 Φ ；若外移相角 Φ 是负值时对应充电状态，就会控制高压侧全桥电路中开关管的驱动信号超前于低压侧全桥电路中所对应功率开关管的驱动信号，且移相角度为 Φ 。这种基于电压反馈的外移相控制方法，能够根据电池的充放电状态自动调整移相角度，实现高效的能量转换和功率传输。

3. 内移相中心对称叠加补偿方法原理

3.1. 内移相配置

内移相配置是基于电压增益 K 来实现的。通过滤波后的母线电压乘以高频隔离变压器匝数比的倒数，再除以滤波后的电池电压值得到电压增益 K ，其决定了内移相功能启用条件。

若 $K = 1$ ，则屏蔽内移相功能；若 $K < 1$ ，则低压侧有移相控制，高压侧无移相控制；若 $K > 1$ ，则高压侧有移相控制，低压侧无移相控制。

内移相 D 具体算法主要由式 1 实现：

$$D = \frac{NV_{bat}}{V_{bus}} \cdot \frac{T}{2} \quad (1)$$

式中, N 为变压器匝比, V_{bat} 为低压侧电池电压, V_{bus} 高压侧母线电压, T 为双有源桥的开关周期。

3.2. 内移相中心对称叠加补偿方法算法设计

实际移相角度往往与理想值存在偏差, 这会导致电流发生畸变, 影响电路的性能和稳定性。为解决这一问题, 提出内移相中心对称叠加补偿方法。通过在滞后桥叠加内移相角相关的前馈量 F , 使滞后桥和超前桥相对于它们驱动的中心点滞后后期望的外移相角。前馈量 F 的具体算法如下:

当处于放电状态时, 即高压侧全桥电路中开关管的驱动信号滞后于低压侧全桥电路中所对应功率开关管的驱动信号时, 前馈量 F 的具体算法由式(2)实现:

$$F = \frac{D_{y1} - D_{y2}}{2} \quad (2)$$

式中, D_{y1} 为低压侧内移相角, D_{y2} 为高压侧内移相角, 若 F 为正值, 则将高压侧多移出 $|F|$ 角度; 若 F 值为负, 则将高压侧少移出 $|F|$ 角度;

当处于充电状态时, 即低压侧全桥电路中开关管的驱动信号滞后于高压侧全桥电路中所对应功率开关管的驱动信号时, 前馈量 F 的具体算法由式(3)实现:

$$F = \frac{D_{y2} - D_{y1}}{2} \quad (3)$$

式中, D_{y1} 为低压侧内移相角, D_{y2} 为高压侧内移相角, 若 F 为正值, 则将低压侧多移出 $|F|$ 角度; 若 F 为负值, 则将低压侧少移出 $|F|$ 角度。

通过上述中心对称叠加补偿方法, 能够有效补偿移相角度的误差, 使电流得到理想的波形, 提高电路的能量传输效率和稳定性。在实际应用中, 根据电路的充放电状态和计算得到的内移相角, 实时计算前馈量 F , 并将其叠加到滞后桥的移相控制中, 实现对移相角的动态调整和优化。

4. 仿真验证

搭建 5 kW 双有源桥电路的仿真模型, 主要参数如下: 开关频率是 40 kHz, 谐振电感是 2.3 μ H, 母线侧滤波电容是 88.6 mF, 电池侧滤波电容是 1 mF, 隔直电容是 3.8 μ F, 变压器匝数比是 1:4; 电池电压范围是 40 V~60 V; 母线电压范围是 390 V~410 V; 额定功率是 5 kW, 搭建的 5 kW 双有源桥电路的仿真模型如图 3 所示。

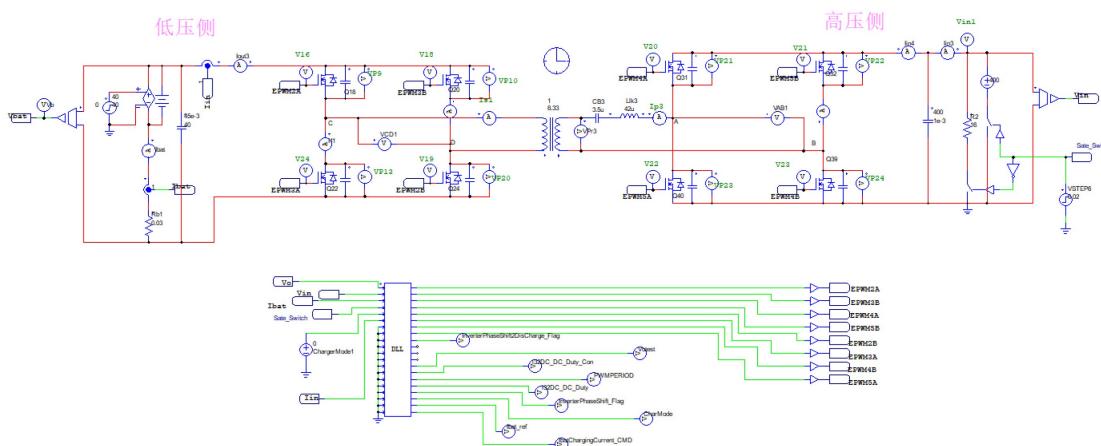


Figure 3. Simulation model of 5 kW dual active bridge circuit
图 3. 5 kW 双有源桥电路的仿真模型

按照本文提出 DSP 的 ePWM 配置方法进行 ePWM 模块的配置。其中关键寄存器配置如表 1 所示。

Table 1. ePWM module key register configuration
表 1. ePWM 模块关键寄存器配置

寄存器	位	配置	作用
	CTRMODE	0x2	设置计数器模式为增减计数 (up-down mode)
TBCTL 时基控制	TBPRD	PWM_HALF_P ERIOD	设置定时器的周期值, 实际周期为 $2 * \text{PWM_HALF_PERIOD}$
	TBPHS.half.TBP HS	0x0	设置定时器的相位为零
	PRDLD	0x0	设置在计数器为 0 时从影子寄存器重新加载周期值
	SYNCOSEL	0x1	不产生软件同步脉冲。
	HSPCLKDIV	0x0	设置高速时钟预分频器和分频系数
CMPCTL 比较控制	PHSDIR	0x0	设置在同步事件后计数器向下计数
	CMPCTL.all	0x0000	设置比较控制寄存器的各个字段。其中包括设置影子寄存器模式 为正常的影子模式, 以及比较寄存器的加载模式为在 TBCTR = TBPRD 时加载比较寄存器 A 和 B 的值。
	AQCTLA 动作限定	CAU、CAD	AQ_CLEAR、 AQ_SET 配置在计数器递增且等于比较寄存器值(CMPA)时输出低电平, 在计数器递减且等于比较寄存器值(CMPA)时输出高电平。
AQCTLB 动作限定	CBU、CBD	AQ_CLEAR、 AQ_SET	配置在计数器递增且等于比较寄存器值(CMPB)时输出低电平, 在计数器递减且等于 CMPB 时输出高电平。
AQSFRC 强制输出控制	RLDCSF	0x3	设置比较寄存器的加载模式为立即加载。
DBFED、 DBRED 死区控制	DBFED、 DBRED	DeadBand_Du- ration	设置上升沿和下降沿的死区持续时间。
PCCTL 斩波控制	CHPEN	0	禁用 PWM 斩波单元。
ETPS 事件触发 预分频控制	ETPS.all	0x0A00	配置为两次事件启动 AD 转换
ETSEL 事件触 发选择控制	ETSEL.all	0x0900	配置使能 SOCA 信号, 并使之中断, 用于启动 AD 转换或其他 相关操作。

再根据电路参数, 在 PSIM 仿真软件中搭建了基于动态链接库的仿真模型, 动态链接库中采用 Visual Studio 编写代码来实现本文提出双有源桥电路的外移相信号配置器、内移相 D 配置流程和内移相中心对称叠加补偿方法的流程, 从而完成移相控制。将双有源桥电路反馈电压与预设参考值比较产生的误差, 即将低压侧电池的恒压充电参考电压 V_{bat_ref} 与低压侧电池的电压反馈量 V_{batf} 相减后产生的误差和高压侧母线参考电压 V_{bus_ref} 与高压侧母线电压反馈量 V_{busf} 相减后产生的误差, 经电压调节器生成双有源桥电路的两侧全桥电路中对应开关管驱动信号的外移相角 Φ , 所述外移相角 Φ 送到 DSP 的 ePWM 模块移相寄存器中形成触发信号。

当电池充电时, 产生如图 4 所示的移相脉冲控制信号, 再经驱动电路生成相应开关管的驱动信号。图 4 给出的移相脉冲控制信号是双有源桥电路中开关管的通断时序, 移相脉冲控制信号给出的是双有源桥电路的低压侧全桥和高压侧全桥对应开关管的控制信号, 由图 4 知当电池充电时, 移相脉冲控制信号

中的双有源桥电路的低压侧全桥电路开关管的通断滞后高压侧全桥对应开关管 Φ 相位角。

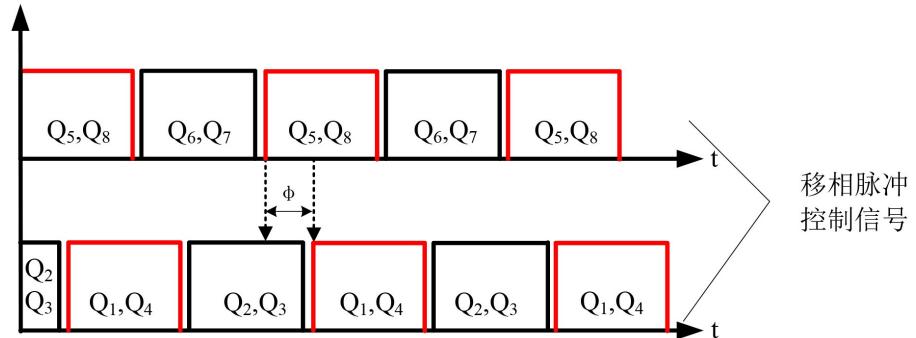


Figure 4. Timing diagram of phase-shift pulse control signal for battery charging
图 4. 电池充电的移相脉冲控制信号时序图

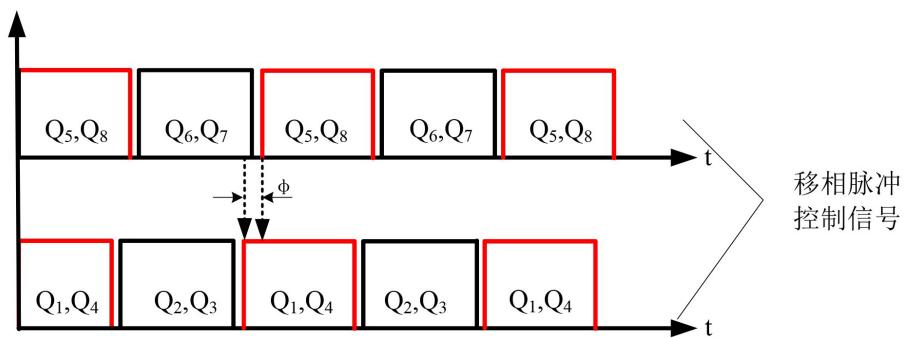


Figure 5. Timing diagram of phase-shift pulse control signal for battery discharge
图 5. 电池放电的移相脉冲控制信号时序图

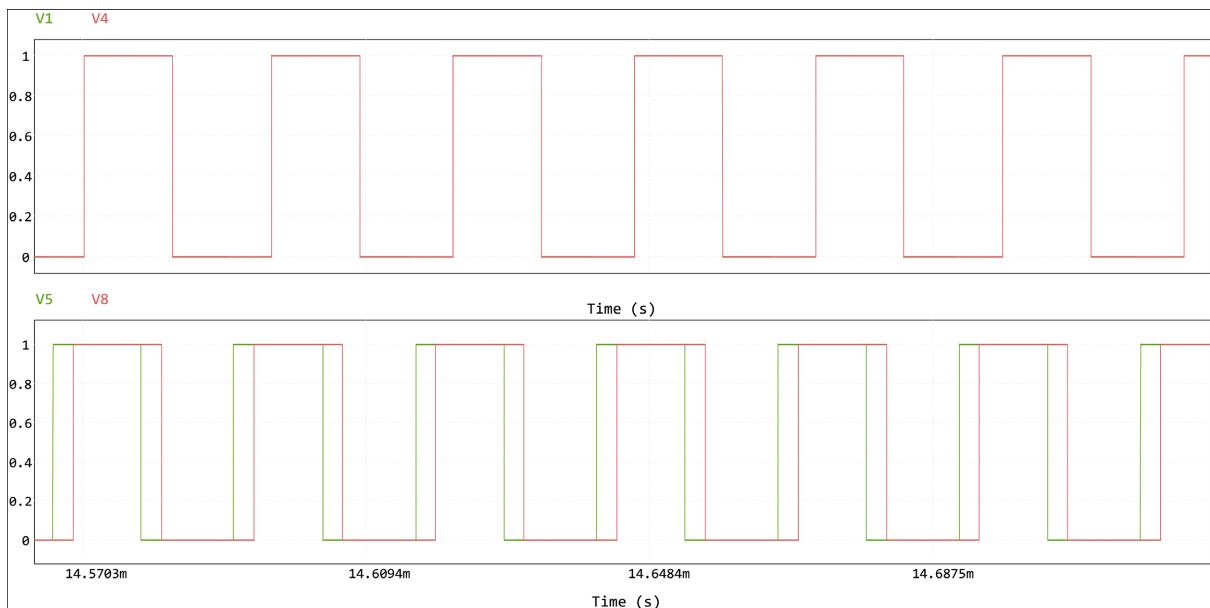


Figure 6. Simulation waveform of power switch driving when battery charging voltage gain $K > 1$
图 6. 电池充电电压增益 $K > 1$ 时功率开关管驱动仿真波形

当电池放电时, 产生如图 5 所示的移相脉冲控制信号, 再经驱动电路生成相应开关管的驱动信号。

图 5 给出的移相脉冲控制信号是双有源桥电路中开关管的通断时序，移相脉冲控制信号给出的是双有源桥电路的低压侧全桥和高压侧全桥对应开关管的控制信号，由图 5 知当电池放电时，移相脉冲控制信号中的双有源桥电路的低压侧全桥电路开关管的通断超前高压侧全桥对应开关管 Φ 相位角。

再根据内移相 D 配置流程和内移相中心对称叠加补偿方法的流程进行仿真实验。

当电池充电时，高压侧全桥电路为超前桥，低压侧全桥电路为滞后桥：

当电压增益 $K > 1$ ，则高压侧有内移相，低压侧无内移相，功率开关管驱动波形如图 6 所示。

当电压增益 $K < 1$ 时，则低压侧有内移相，高压侧无内移相，功率开关管驱动波形如图 7 所示。

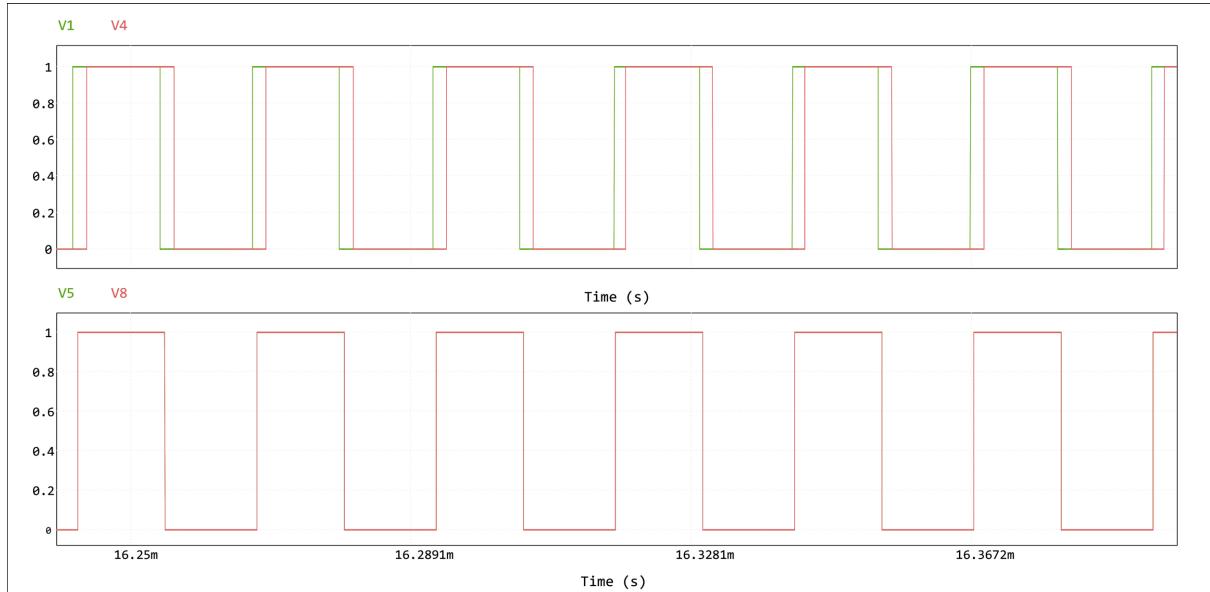


Figure 7. Simulation waveform of power switch driving when battery charging voltage gain $K < 1$
图 7. 电池充电电压增益 $K < 1$ 时功率开关管驱动仿真波形

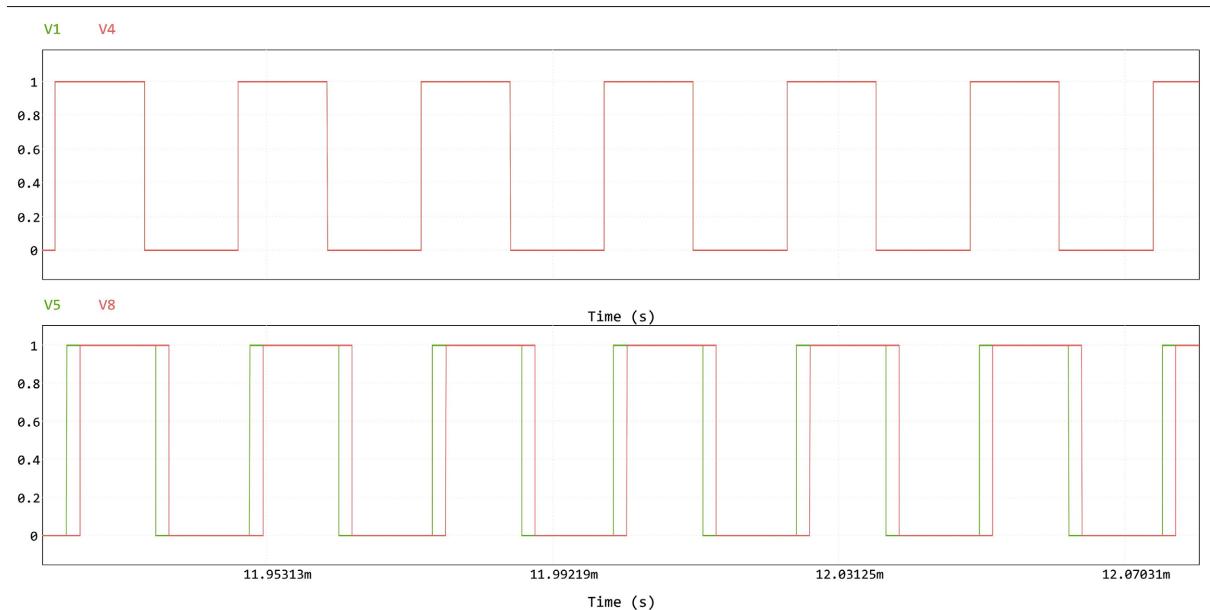


Figure 8. Simulation waveform of power switch driving when battery discharge voltage gain $K > 1$
图 8. 电池放电电压增益 $K > 1$ 时功率开关管驱动仿真波形

当电池放电时, 低压侧全桥电路为超前桥, 高压侧全桥电路为滞后桥:

当电压增益 $K > 1$ 时, 则高压侧有内移相, 低压侧无内移相, 功率开关管驱动波形如图 8 所示。

当电压增益 $K < 1$ 时, 则低压侧有内移相, 高压侧无内移相, 功率开关管驱动波形如图 9 所示。

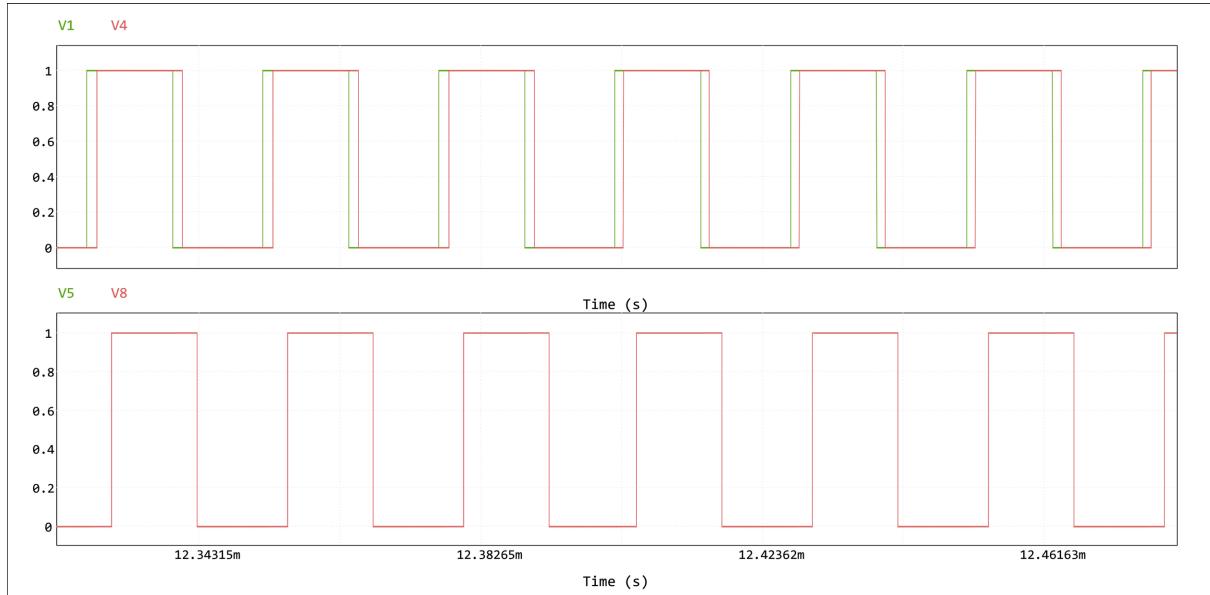
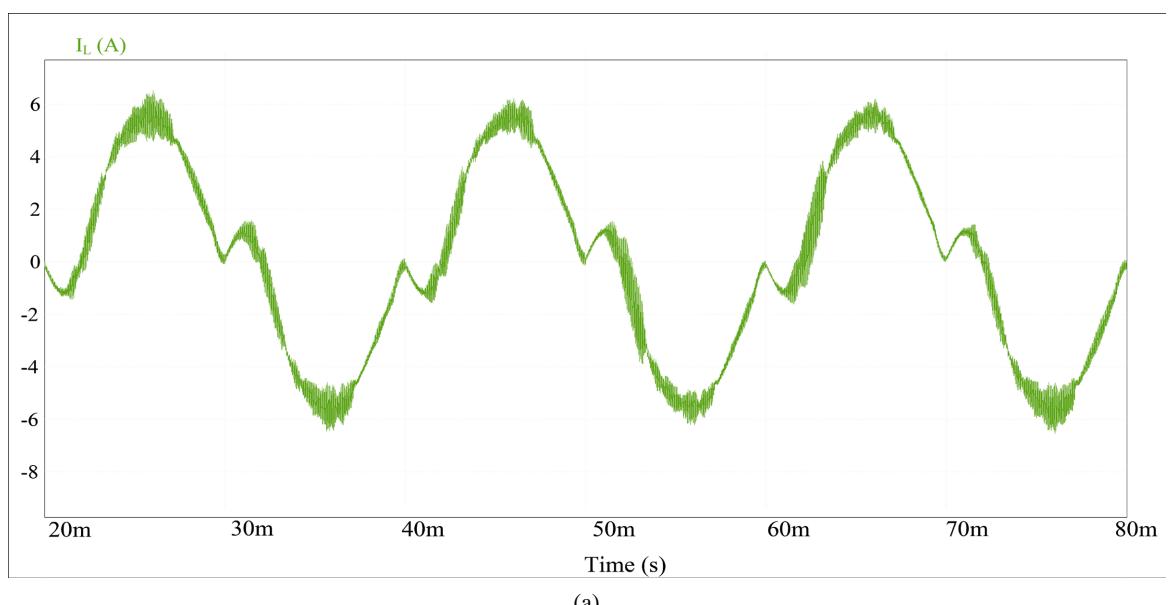


Figure 9. Simulation waveform of power switch driving when battery discharge voltage gain $K < 1$

图 9. 电池放电电压增益 $K < 1$ 时功率开关管驱动仿真波形

其中, V_1 、 V_4 分别为低压侧功率开关管 Q_1 、 Q_4 的驱动波形, V_5 、 V_8 分别为高压侧功率开关管 Q_5 、 Q_8 的驱动波形。由上述仿真结果可见, 在本文移相控制配置和内移相中心对称叠加补偿方法下, 使滞后桥和超前桥相对于它们驱动的中心点滞后期望的外移相角。且如图 10 所示, 与传统移相控制方法相比, 本文内移相中心对称叠加补偿方法下, 电感电流在过零点处的畸变得到抑制, 从而确保系统的稳定性, 验证了本文方法的可行性和先进性。



(a)

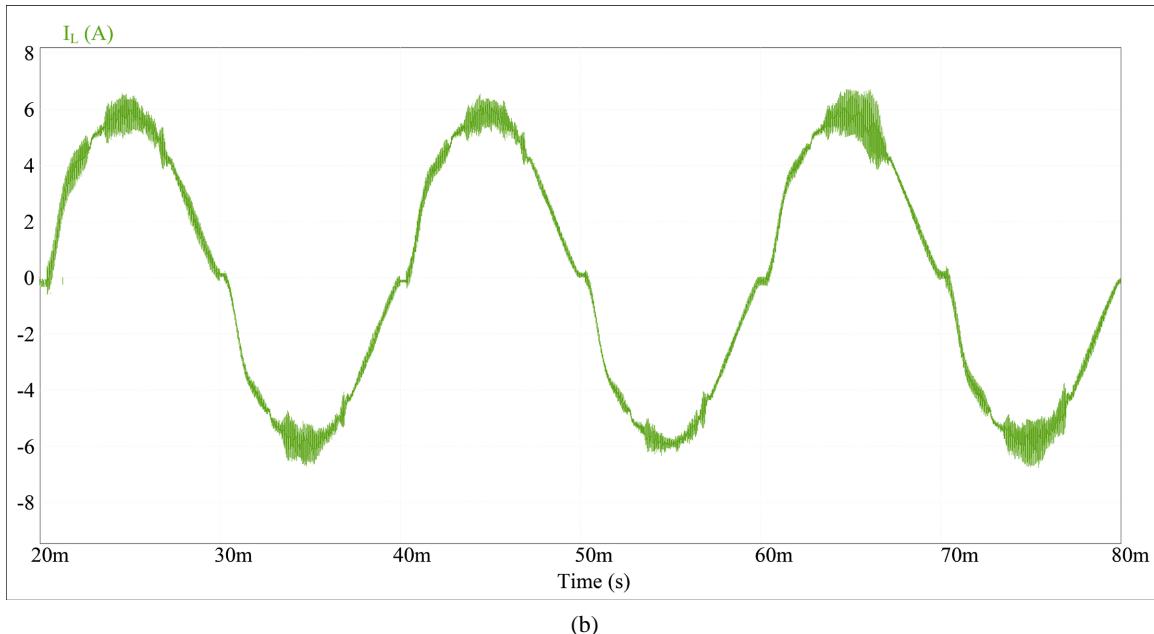


Figure 10. Comparison of inductive current simulation experiments between internal phase shift center symmetric overlay compensation method and traditional phase shift control method. (a) Simulation waveform of inductor current using traditional phase-shift control method; (b) Simulation waveform of inductor current using internally shifted center symmetric superposition compensation method

图 10. 内移相中心对称叠加补偿方法和传统移相控制方法下的电感电流仿真实验对比。(a) 采用传统移相控制方法下电感电流仿真波形; (b) 采用内移相中心对称叠加补偿方法下电感电流仿真波形

5. 结论

本文针对双有源桥电路移相控制技术展开研究, 提出了一种基于 DSP 的 ePWM 模块配置和内移相中心对称叠加补偿方法的移相控制方案。通过详细阐述双有源桥电路的基本结构、移相控制配置方法以及内移相中心对称叠加补偿方法的原理, 深入分析了该方案的工作机制。

且从仿真实验结果表明, 该方案能够满足不同场景下双有源桥电路移相控制的需求, 实现高压侧与低压侧之间能量的高效双向流通。内移相中心对称叠加补偿方法作为主要创新点, 能够计算前馈量实时补偿移相角的误差, 使滞后桥和超前桥相对于它们驱动的中心点滞后期望的外移相角, 有效抑制了电感电流过零点畸变, 确保了系统的稳定性, 提高了系统的响应速度和控制精度, 最终实现了对系统需求的有力保障。

此外, 基于本文的研究思路, 该技术可扩展应用于双通道、多通道及其他类型的双有源桥电路, 从而最大限度地提高电路效率以优化系统性能。

基金项目

国家级大学生创新训练计划项目(202411117085Z); 国家自然科学基金(61873346)。

参考文献

- [1] 杜接澳, 张裕铭, 等. 双有源桥变换器多移相调制模型预测控制研究[J]. 电力电子技术, 2024, 58(12): 99-101.
- [2] Chauhan, S. and Tummuru, N.R. (2024) An Improvised Modulation and Control Approach for Dual Active Bridge DC-DC Converter System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **71**, 3572-3582. <https://doi.org/10.1109/tie.2023.3273248>
- [3] 史伟超, 张海燕. 双有源桥变换器的优化控制研究[J]. 电源学报, 2024, 22(z1): 18-24.

-
- [4] 王祺, 张泽轲, 等. 双重移相控制下双有源桥变换器最小回流功率全局优化控制[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3921-3930.
 - [5] 王攀攀, 徐泽涵, 等. 新扩展移相角下的双有源桥 DC-DC 变换器优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 727-737.
 - [6] Aguirre, M., Vazquez, S., Alcaide, A.M., Portillo, R., Kouro, S., Leon, J.I., *et al.* (2024) Period Control Approach Finite Control Set Model Predictive Control Switching Phase Control for Interleaved DC/DC Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71, 8304-8312. <https://doi.org/10.1109/tie.2023.3325548>
 - [7] 孙孝哲, 张祯滨, 等. 双有源全桥变换器无电流传感器鲁棒预测控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(10): 3093-3104, 3140.
 - [8] 刘述喜, 陈鹤铭, 等. 基于双重移相控制的 DC-DC 变换器电流应力优化策略[J]. 电子器件, 2024, 47(5): 1281-1287.