

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.5.86

中图分类号: TM46

文献标志码: A

# 双有源桥变换器双移相控制动态特性优化方法

李善寿<sup>1</sup>, 王浩<sup>1</sup>, 叶伟<sup>2</sup>

(1. 安徽建筑大学智能建筑与建筑节能安徽省重点实验室, 合肥 230022; 2. 安徽南瑞继远电网技术有限公司, 合肥 230088)

**摘要:** 为了提高双移相控制的双有源桥 DAB(dual active bridge)变换器负载切换的动态响应性能及减小电流应力, 研究了 1 种改进型双移相 NDPS(novel dual phase shift)控制方法, 通过改变传统双移相 TDPS(traditional dual phase shift)控制内移相角移动方向, 重构了传输功率与移相比的关系, 增大了移相比调节范围。研究了电流应力最小化条件下双移相控制最优移相比的求解方法, 对比分析 NDPS 与 TDPS 控制方式负载切换时的动态响应特性。最后搭建了 DAB 变换器实验平台对理论分析进行实验验证, 实验结果表明, 轻载条件下, 基于电流应力最小化方法得到的最优移相比组合可以有效减小电流应力, 同时 NDPS 比 TDPS 控制方式有更好的动态响应特性。

**关键词:** 双有源桥变换器; 双移相控制; 电流应力; 动态特性

## Dynamic Characteristic Optimization Method of Dual Phase Shift Control for Dual Active Bridge Converter

LI Shanshou<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, YE Wei<sup>2</sup>

(1. Anhui Province Key Laboratory of Intelligent Building and Building Energy Saving, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China; 2. Anhui Nari-Jiyuan Electric Power System Technology Co., Ltd, Hefei 230088, China)

**Abstract:** To improve the dynamic response performance of a dual active bridge(DAB) converter with dual phase shift(DPS) control during load switching and reduce the current stress, a novel dual phase shift(NDPS) control method is studied. By changing the shifting direction of the internal phase shift angle in traditional dual phase shift(TDPS), the relationship between the transmission power and phase shift ratio is reconstructed, and the adjusting range of phase shift ratio is extended. The solving method for the optimal phase shift ratio of DPS control under the condition of current stress minimization is studied, and the dynamic response characteristics of NDPS and TDPS control under load switching conditions are compared and analyzed. Finally, an experimental platform of DAB converter was built to verify the theoretical analysis, and experimental results show that the optimal phase shift ratio combination based on current stress minimization can effectively reduce the current stress under light load conditions. At the same time, NDPS control has better dynamic response characteristics than TDPS control.

**Keywords:** Dual active bridge(DAB) converter; dual phase shift(DPS) control; current stress; dynamic characteristics

储能系统是解决可再生能源发电间歇性及随机

波动性的有效途径<sup>[1]</sup>。双有源全桥 DAB(dual active bridge)变换器由于具有功率密度高、能量双向流动和电气隔离等特点, 是适用于储能系统的变换器基本拓扑结构之一<sup>[2-3]</sup>。

通常 DAB 变换器采用移相的控制方式来实现能量的双向流动。单移相 SPS(single phase shift)是最基本的控制方式<sup>[4]</sup>, 然而 SPS 控制方式只有 1 个控制变量, 且该变量直接由变换器的输出功率决

收稿日期: 2021-09-19; 修回日期: 2021-11-02; 录用日期: 2021-11-19; 网络首发日期: 2022-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61901006); 博士科研启动资助项目(2020QDZ40)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 61901006; Doctoral Research Support Project under the grant 2020QDZ40

定,很难对变换器控制过程进行优化,导致 SPS 控制方式存在电流应力大、无功环流大以及变换器效率低的问题<sup>[5-6]</sup>。传统双移相 TDPS(traditional dual phase shift)有内移相角及外移相角 2 个控制变量,可以通过 2 个移相角的优化组合来改进变换器的控制过程<sup>[7-8]</sup>。文献[9]对比分析了 TDPS 及 SPS 控制方式下变换器的工作特性,结果表明,在相同功率条件下,DPS(dual phase shift)控制下的 DAB 工作效率明显优于 SPS 控制,但是并未研究移相角的优化组合问题;文献[10]对比分析了 DPS 方式下减小无功环流与减小电流应力对变换器效率的影响,结果表明,减小电流应力能够更好地提高 DAB 变换器效率;文献[11]研究了 TDPS 控制下以电流应力最小化为目标的确定最优移相比组合的方法,使用最优移相比对 DAB 变换器进行控制可以有效减小电流应力,然而 TDPS 方法存在内外移相角调节范围小,变换器动态特性较差的不足;文献[12]提出 1 种改进双移相控制策略 NDPS(novel dual phase shift),该控制策略扩大传统双移相的内外移相角调节范围,然而没有进一步研究 NDPS 控制方式电流应力优化方法及扩大相角调节范围对变换器切换负载动态能力的影响。

本文在文献[12]的基础上,进一步研究 NDPS 控制方式的电流应力优化控制方法,以及扩大移相角调节范围后对负载切换动态响应能力的影响,最后搭建以 TMS320F28335 为核心控制器件的 DAB 变换器实验平台,通过实验对理论分析进行验证。

### 1 DAB 变换器拓扑结构

DAB 变换器主拓扑结构如图 1 所示,由全桥 H<sub>1</sub> 和 H<sub>2</sub>、输入输出电容 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub>、辅助电感 L、变比为 n:1 的高频变压器构成,其中 u<sub>1</sub> 和 u<sub>2</sub> 为全桥 H<sub>1</sub> 和 H<sub>2</sub> 的输出交流电压,i<sub>L</sub> 为流经电感 L 的电流,U<sub>L</sub> 为电感上的电压。定义 k=U<sub>in</sub>/nU<sub>o</sub> 为电压传输比,其中 U<sub>in</sub> 和 U<sub>o</sub> 分别为输入电压和输出电压。

根据文献[13]可知双有源桥 SPS 控制方式下的工作原理及工作波形,同时可以得到 SPS 控制下变换器的传输功率表达式为

$$P = \frac{nU_{in}U_o}{2fL}d(1-d) \tag{1}$$

式中:f 为开关频率;d 为两 H 桥开关信号移相比。根据式(1)可得当 d=0.5 时功率取得最大值,即

$$P_{max} = \frac{nU_{in}U_o}{8fL} \tag{2}$$

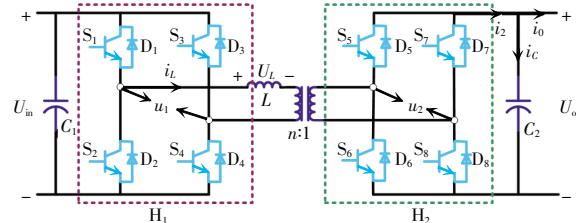


图 1 DAB 变换器主拓扑

Fig. 1 Main topology of DAB converter

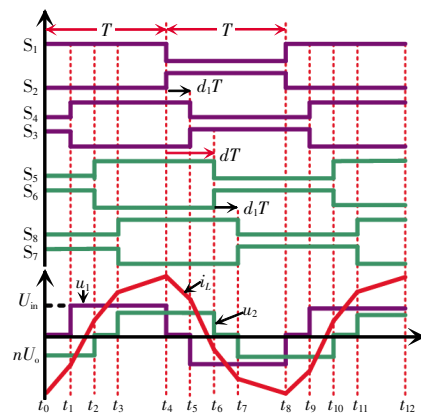
### 2 DAB 变换器双移相控制方法

#### 2.1 TDPS 控制方法

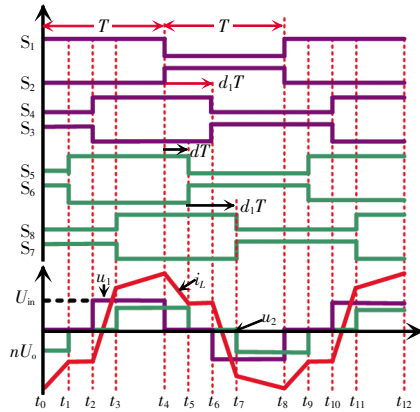
由文献[14]可知,TDPS 控制是在 SPS 控制的基础上,在 2 个 H 桥内引入方向相同的内移相比 d<sub>1</sub> 演化而来。以能量正向传输为例,可以将 TDPS 分为 2 种工作模式,模式 1:0<d<sub>1</sub><d<1;模式 2:0<d<d<sub>1</sub><1,同时需要满足 0<d+d<sub>1</sub><1,否则 d 将不能控制变换器的传输功率大小。TDPS 控制工作波形如图 2 所示。

以 SPS 控制方式最大输出功率及最大功率时的电流为基准,得到 TDPS 控制下 2 种模式标幺化传输功率表达式为

$$P^* = \begin{cases} 2(2d-2d^2-d_1^2) & \text{模式 1} \\ 2(2d-d^2-2d_1d) & \text{模式 2} \end{cases} \tag{3}$$



(a)模式 1



(b)模式 2

图 2 TDPS 控制工作波形

Fig. 2 Working waveforms under TDPS control

2 种模式下最大电感电流标么值为

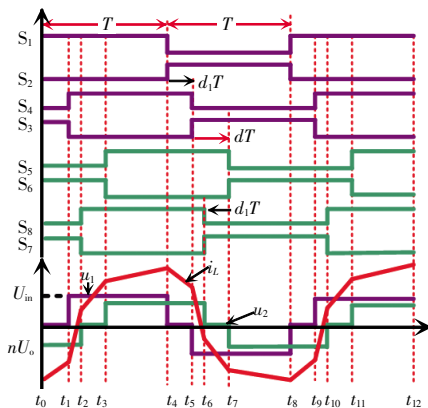
$$i_{L\max} = 2[k+2d-(k-1)d_1-1] \quad (4)$$

## 2.2 NDPS 控制方法

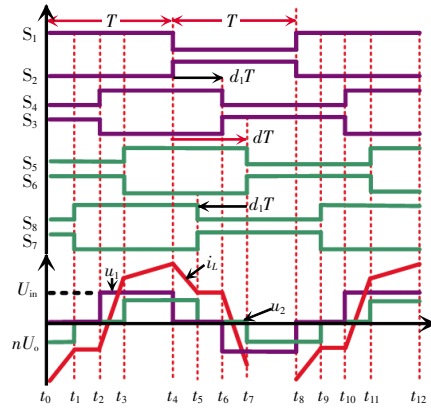
与 TDPS 不同的是, NDPS 在 SPS 控制的基础上, 分别在 2 个 H 桥内引入方向相反的内移相比  $d_1$ , 内移相角方向的不同导致 2 种双移相传输功率与移相比关系不同。根据文献[12]将 NDPS 控制方式分为 3 种工作模式, 本文仅分析其中能量正向传输的 2 种模式, 其工作波形如图 3 所示。

忽略系统损耗, 同样以 SPS 控制方式最大输出功率及最大功率时的电流为基准, 根据各个时刻电感电流关系可以求出 2 种工作模式 NDPS 标么化功率传输方程为

$$P^* = \begin{cases} 2(2d-2d^2+4d_1d-3d_1^2-2d_1) & \text{模式 1} \\ 2(2d-d^2+d_1^2-2d_1) & \text{模式 2} \end{cases} \quad (5)$$



(a)模式 1



(b)模式 2

图 3 NDPS 控制工作波形

Fig. 3 Working waveforms under NDPS control

2 种模式下最大电感电流标么值为

$$i_{L\max} = 2[k+2d-(k+1)d_1-1] \quad (6)$$

## 3 双移相控制最优电流应力分析及动态响应特性对比分析

### 3.1 双移相控制最优电流应力分析

式(3)和式(5)表明, 电感电流最大值与内外移相比  $d$  和  $d_1$  的大小有关, 当输出功率确定后, 存在无数组  $d$  和  $d_1$  的组合, 通过拉格朗日乘数法可以推导出既能满足功率要求又能使电感电流最优的一组解, 设 DAB 变换器的实际输出功率标么值为  $P_0$ , 建立拉格朗日方程为

$$L(d, d_1, \mu) = i_{L\max} + \mu(P^* - P_0) \quad (7)$$

式中,  $\mu$  为拉格朗日乘数因子。令  $\partial L/\partial d = \partial L/\partial d_1 = \partial L/\partial \mu = 0$ , 解出的  $d, d_1$  即为最优解。TDPS 模式 1 及模式 2 的最优解分别为

$$\text{模式 1} \begin{cases} d = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2(1-P_0)}{k^2-2k+3}} \\ d_1 = \frac{k-1}{2} \sqrt{\frac{2(1-P_0)}{k^2-2k+3}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{模式 2} \begin{cases} d = \frac{k-1}{2} \sqrt{\frac{2P_0}{k^2+2k-3}} \\ d_1 = 1 - \frac{k+1}{2} \sqrt{\frac{2P_0}{k^2+2k-3}} \end{cases} \quad (9)$$

NDPS 模式 1 及模式 2 的最优解分别为

$$\text{模式 1} \begin{cases} d = \frac{1}{2} + \frac{k-2}{2} \sqrt{\frac{2(1-P_0)}{k^2-2k+3}} \\ d_1 = \frac{k-1}{2} \sqrt{\frac{2(1-P_0)}{k^2-2k+3}} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{模式 2} \begin{cases} d = 1 - \sqrt{\frac{2P_0}{k^2+2k-3}} \\ d_1 = 1 - \frac{k+1}{2} \sqrt{\frac{2P_0}{k^2+2k-3}} \end{cases} \quad (11)$$

将  $d$  和  $d_1$  代入式(3)和式(5)可以解得 2 种双移相模式 1 及模式 2 电感电流最优值分别对应相同,模式 1 及模式 2 的电感电流最优值分别为

$$i_{L_{\max}} = 2k - \sqrt{2(k^2-2k+3)(1-P_0)} \quad \text{模式 1} \quad (12)$$

$$i_{L_{\max}} = \sqrt{2(k^2+2k-3)P_0} \quad \text{模式 2} \quad (13)$$

根据  $d$  和  $d_1$  的约束条件可以解得 2 种双移相模式 1 及模式 2 的切换点同为

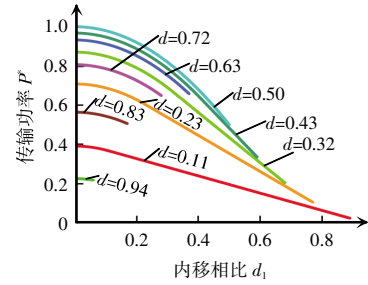
$$P_T = (k^2+2k-3)/2k^2 \quad (14)$$

为保证电流应力最优,当  $P_0 > P_T$  时变换器工作在模式 1,当  $P_0 < P_T$  时工作在模式 2。

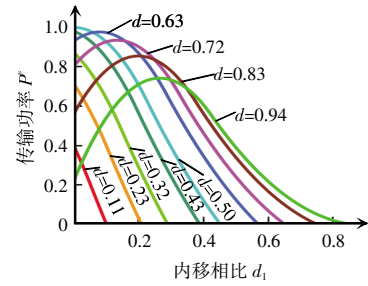
### 3.2 双移相动态响应特性对比分析

图 4 是 2 种双移相控制传输功率随移相比变换关系曲线,从图中可以看出,TDPS 控制的内移相比  $d_1$  取值范围随着外移相比  $d$  的增大而减小,NDPS 控制的内移相比  $d_1$  取值范围随外移相比  $d$  的增大而增大。根据文献[15]中双移相电流应力最优闭环控制方法,外移相比  $d$  由闭环调节器控制保持输出电压稳定,内移相比  $d_1$  根据变换器实际输出功率调节保持电流应力最优, $d$  和  $d_1$  共同决定变换器输出功率的大小。

从控制的过程来看,当变换器工作在稳定状态时,如果突然增大负载,为满足输出功率要求,闭环调节器会增大  $d$ ,待系统稳定后再根据实际功率调节  $d_1$  对系统进行优化。根据文献[12], $d$  和  $d_1$  需要满足  $d+d_1 < 1$ ,否则  $d$  将不能对传输功率进行控制,若  $d+d_1 > 1$ ,变换器的输出会失去控制,无法再对变换器进行优化。通常为了兼顾传输功率及电流应力,限制  $d$  的范围为 0~0.5,即使在这种情况下,若变换器稳定运行时  $d_1$  的初始值大于 0.5,增大  $d$  也会出现  $d+d_1 > 1$  的情况。而 NDPS 控制方式则不受  $d+d_1 < 1$  的约束,不会出现因  $d+d_1 > 1$  导致的变换器失控。



(a)TDPS



(b)NDPS

图 4 传输功率与内外移相比关系

Fig. 4 Relationship between transmission power and internal and external phase shift ratios

当变换器工作在稳定状态时,若负载减小,闭环调节器会减小  $d$ , $d+d_1$  也会随之减小,TDPS 控制下必然不会出现  $d+d_1 > 1$  的情况。NDPS 控制方式  $d_1$  的取值范围会随着  $d$  的减小而减小。分析图 4(b)可知,稳定工作状态下,无论  $d_1$  取何值,当负载减小,总有一个  $d$  可以满足减小后的功率要求,2 种控制方式都可以稳定减小负载。

## 4 实验

### 4.1 实验条件

为验证 NDPS 电流应力优化的有效性及控制方式切换负载能力的优越性,搭建以 TMS320F28335 为核心控制器件的 DAB 变换器数字控制实验平台进行实验研究。实验样机具体参数如表 1 所示。

表 1 实验样机参数

Tab. 1 Parameters of experimental prototype

参数	数值	参数	数值
输入电压 $U_m/V$	200	输出电压 $U_o/V$	50
变压器变比 $n$	3	辅助电感 $L/mH$	200
开关频率 $f/kHz$	15	负载 $R/\Omega$	10

由表 1 中的参数可以计算得到实际输出功率标幺值  $P_0=0.2$ , 模式 1 与模式 2 切换点  $P_1=0.4$ 。

#### 4.2 实验结果分析

图 5 是变换器工作在轻载条件下, TDPS 与 NDPS 由非最优移相比工况切换至最优移相比工况的实验波形。由图可以看出, 最优移相比工况下电感电流峰值明显小于非最优移相比工况, 证明了通过优化双移相的内外移相比可以有效降低电流应力, 且优化后的 NDPS 控制方式与 TDPS 控制方式电流应力相同。

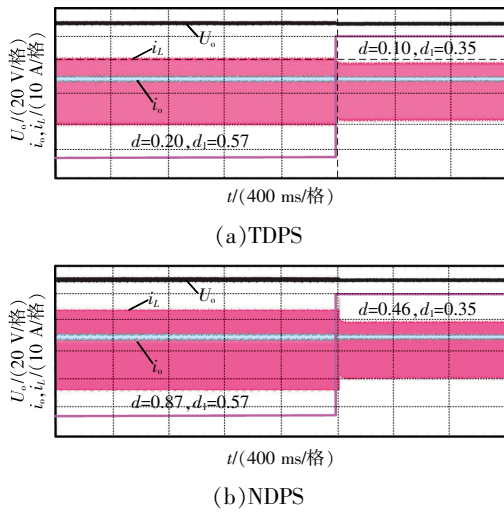


图 5 最优移相比切换实验波形

Fig. 5 Experimental waveforms during optimal phase shift ratio switching

图 6 是负载  $R=10\ \Omega$  时, DAB 变换器原边全桥输出电压  $u_1$ 、副边全桥输出电压  $u_2$  及电感电流  $i_L$  的实验波形, 从图中可以看出, 优化前电感电流  $i_L$  峰值约为 15 A, 优化后降低至约 10 A, 进一步证明了通过优化移相比降低电流应力的有效性。

图 7 是 TDPS 和 NDPS 控制方式下内移相比  $d_1=0.45$ , 负载由  $R=10\ \Omega$  切换为  $R=5\ \Omega$  时电感电流  $i_L$ 、输出电流  $i_o$ 、输出电压  $U_o$  的动态响应实验波形。由图可以看出, TDPS 在负载切换前正常工作, 负载切换后变换器失控; NDPS 控制在负载切换前后都能保持稳定输出, 证明了 NDPS 控制方式负载切换的动态能力优于 TDPS 控制方式。

根据上述分析, 造成图 7 所示的情况是由于负载切换后功率增大, 闭环调节器输出  $d$  增大, 导致

TDPS 控制方式下  $d+d_1>1$ , 变换器失去控制, 而 NDPS 则不受  $d+d_1>1$  的约束仍然正常运行。

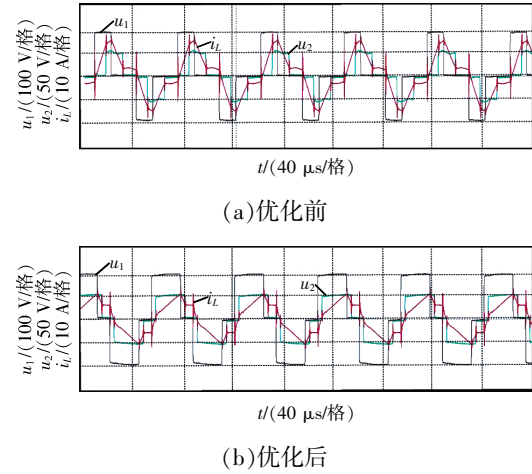


图 6 电流应力优化前后实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms before and after current stress optimization

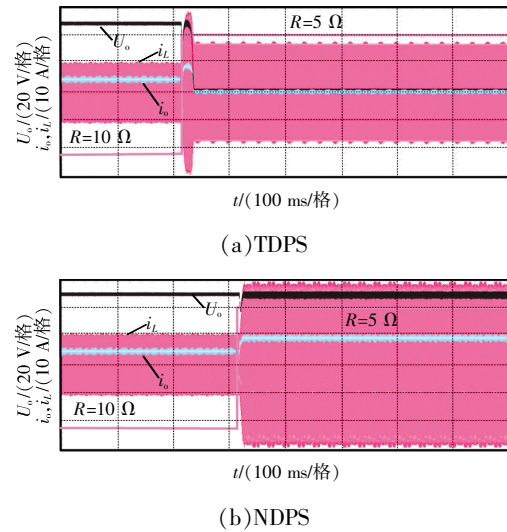


图 7 负载由  $10\ \Omega$  切换为  $5\ \Omega$  实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms with load changing from  $10\ \Omega$  to  $5\ \Omega$

## 5 结语

本文研究了 TDPS 及 NDPS 控制下 DAB 变换器电流应力最优的移相比组合问题, 同时对 2 种双移相控制方式下的负载切换能力进行了对比研究。实验结果表明, TDPS 控制方式下优化 DAB 变换器电流应力的方法同样适用于 NDPS 控制方式; NDPS 控制方式负载切换动态能力优于 TDPS 控制方式。

## 参考文献:

- [1] 胡石阳, 刘国荣, 金楠, 等. 双有源桥直流储能系统软开关优化控制[J]. 电源学报, 2020, 18(5): 140-147.  
Hu Shiyang, Liu Guorong, Jin Nan, et al. Soft-switching optimal control for dual active bridge DC energy storage system [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(5): 140-147 (in Chinese).
- [2] 杨向真, 陈曦, 杜燕, 等. 基于动态矩阵控制的双有源桥 DC-DC 变换器电流应力优化策略[J]. 电源学报, 2020, 18(6): 105-114.  
Yang Xiangzhen, Chen Xi, Du Yan, et al. Optimal current stress control strategy for dual active bridge DC-DC converter based on dynamic matrix control [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(6): 105-114 (in Chinese).
- [3] Xuan Yang, Yang Xu, Chen Wenjie. A novel NPC dual-active-bridge converter with blocking capacitor for energy storage system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 10635-10649.
- [4] De Doncker R W A A, Divan D M, Kheraluwala M H, et al. A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1991, 27(1): 63-73.
- [5] Shi Haochen, Wen Huiqing, Chen Jie, et al. Minimum-backflow-power scheme of DAB-based solid-state transformer with extended-phase-shift control [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3483-3496.
- [6] 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.
- [7] 肖子衡, 何志兴, 陈峻岭, 等. 双有源桥直流变换器相平面分析与优化[J]. 电源学报, 2021, 19(2): 81-92.  
Xiao Ziheng, He Zhixing, Chen Junling, et al. Phase-plane analysis and optimization of dual active bridge converter [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(2): 81-92 (in Chinese).
- [8] 胡燕, 张宇, 张天晖, 等. 考虑不同软开关模式的双有源桥变换器电流应力优化方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 58-64.  
Hu Yan, Zhang Yu, Zhang Tianhui, et al. Optimization method of current stress for dual active bridge converter considering different soft switching modes [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 58-64 (in Chinese).
- [9] 许正平, 李俊. 双向全桥 DC-DC 变换器高效能控制研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 140-146.  
Xu Zhengping, Li Jun. Research and implementation of bidirectional full bridge DC-DC converter with high-efficiency control [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 140-146 (in Chinese).
- [10] 胡燕, 张天晖, 杨立新, 等. 双移相 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 CSEE, 2020, 40(S1): 243-253 (in Chinese).
- [11] 宋建国, 李向诚, 张振路. 双有源桥变换器电感电流的全局最优控制建模[J]. 电力电子技术, 2021, 55(3): 97-100.  
Song Jianguo, Li Xiangcheng, Zhang Zhenlu. Global optimal control model of inductor current in double active bridge converter [J]. Power Electronics, 2021, 55(3): 97-100 (in Chinese).
- [12] Liu Xu, Zhu Z Q, Stone D A, et al. Novel dual-phase-shift control with bidirectional inner phase shifts for a dual-active-bridge converter having low surge current and stable power control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 4095-4106.
- [13] Zhao Biao, Song Qiang, Liu Wenhua. Power characterization of isolated bidirectional dual-active-bridge DC-DC converter with dual-phase-shift control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 4172-4176.
- [14] Zhao Biao, Song Qiang, Liu Wenhua, et al. Current-stress-optimized switching strategy of isolated bidirectional DC-DC converter with dual phase shift control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4458-4467.
- [15] Hebala O M, Aboushady A A, Ahmed K H. Generic closed-loop controller for power regulation in dual active bridge DC-DC converter with current stress minimization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4468-4478.



李善寿

## 作者简介:

李善寿(1979—),男,通信作者,博士,副教授。研究方向:电力电子变换技术及新能源发电。E-mail:xlisq79@163.com。

王浩(1993—),男,硕士研究生。研究方向:电力电子变换技术。E-mail:787869506@qq.com。

叶伟(1984—),男,本科,高级工程师。研究方向:电能质量治理及直流配电。E-mail:leaf\_yw@sina.com。