

# 基于三重移相控制的双有源桥变换器研究

郭雨霏,李一梁,王懿杰,徐殿国

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**为了加快“碳中和”及“碳达峰”的进程,可再生能源逐渐取代了化石能源,成为了未来主要的发电方式。储能系统与双向变换器的组合成为了维持微网电压稳定、削峰填谷的核心组件。针对这一背景,对具有较强双向调节能力的双有源桥变换器展开研究。采用三重移相控制,详细分析了变换器在特定工作模式下的工作过程。此工作模式适用于轻载条件,具有双向能量传输的能力。建立了相应的电流应力、传输功率和软开关特性的数学模型。基于电流应力的变化情况,提出了一种基于三重移相控制的电流应力优化策略。以电流应力为目标函数,以软开关范围和模式边界为限制条件,求解得到了最优移相比组合。该优化控制策略可以在保证软开关运行条件下减小变换器的电流应力,提高变换器的性能。最后通过实验测试验证了理论分析的正确性。

**关键词:**双有源桥变换器;三重移相控制;软开关;优化控制

**中图分类号:**TM923.6 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24705

## Research on Dual Active Bridge Converter Based on Triple Phase Shift Control

GUO Yufei, LI Yiliang, WANG Yijie, XU Dianguo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology,  
Harbin 150001, Heilongjiang, China)

**Abstract:** In order to speed up the process of "carbon neutrality" and "peak carbon dioxide emissions", fossil energy has been gradually replaced by renewable energy, and renewable energy will become the main power generation mode in the future. The combination of energy storage system and bidirectional converter become the core component to maintain the voltage stability of microgrid, and realize peak shaving and valley filling. In view of this background, the dual active bridge (DAB) converter with strong energy bidirectional regulation capability was studied. The working process of the DAB converter in a specific working mode was analyzed in detail by using triple phase shift control. This working mode is suitable for light load conditions and has the capability of bidirectional energy transmission. The corresponding mathematical models of current stress, a current stress optimization strategy which is based on triple phase shift control was proposed. The current stress was taken as the optimization objective, and the soft switching range and mode boundary were taken as the constraints, and the optimal phase shift combination was obtained. The optimal control strategy can reduce the current stress of the converter and improve the performance of the converter under the condition of ensuring the soft-switching operation. Finally, the correctness of the theoretical analysis was verified by experimental tests.

**Key words:** dual active bridge(DAB)converter; triple phase shift(TPS)control; soft switching; optimal control

在能源危机和环境污染的双重压力下,世界范围内的能源趋势呈现低碳化趋势。诸如太阳能、风能等清洁、可再生的新型能源将逐渐取代传统的化石能源,成为未来能源发展的主要方向<sup>[1]</sup>。但是传统的太阳能发电、风力发电受环境影响因素大,稳定性较差。风光发电的直接并网还会对电网系统造成扰动,降低电网的安全性。

此外,由于风光发电的能源分布不均,发电功率不平衡,会发生较大的风光弃电现象,造成了资源浪费<sup>[2]</sup>。

为了解决上述问题,人们提出了直流微网的概念。直流微网将光伏板、风机等不同的发电设备和储能系统及相应的直流/交流变换器有效地组织起来。储能系统与功率变换器组成的能量

调节模块成为了解决新能源发电间歇性问题的有效手段,能够用于电网能量的削峰填谷、不间断供电及电能智能调度等<sup>[3-4]</sup>。

双有源桥(dual active bridge, DAB)变换器作为一种高性能的隔离双向变换器,有良好的软开关特性,能量双向流动控制能力强,系统惯性较小,在智能电网、电动汽车入网技术(vehicle-to-grid, V2G)、能量路由器等领域已经得到了广泛应用<sup>[5-7]</sup>。常见的DAB控制策略采用单相(single phase shift, SPS)控制,调整变压器原、副边方波电压之间的相位,实现传输功率方向和大小的调节<sup>[8]</sup>。当DAB变换器工作在电压匹配状态附近时,电路可以在全负载范围内实现软开关,具有较高的效率。但是SPS控制只有一个自由度,控制灵活性较低。在轻载条件下,电路的软开关范围减小,电流应力提高,系统效率降低<sup>[9]</sup>。

为了优化DAB变换器的性能,人们通过增加控制自由度,提出了扩展移相(extended phase shift, EPS)控制<sup>[10]</sup>、双重移相(double phase shift, DPS)控制<sup>[11]</sup>和三重移相(triple phase shift, TPS)控制<sup>[12]</sup>,利用不同的移相组合实现特定的传输功率。TPS控制具有通用性和普遍性,SPS, EPS和DPS控制可以看作是TPS控制策略的特例。通过优化设计,TPS控制可以获得最小的电流应力和最宽的软开关范围<sup>[13-14]</sup>。

本文以双有源桥变换器具有双向能量传输能力的工作模式为例,对基于TPS控制的DAB变换器进行了研究。详细分析了双有源桥变换器在该工作模式下的工作过程,建立了变换器的电流应力、传输功率及软开关特性的数学模型,并做出了优化设计。搭建了相应的双有源桥变换器的实验样机,完成了实验验证。

## 1 DAB的工作模式分析

双有源桥变换器的电路拓扑如图1所示,电路包括了两个全桥电路、电感L及隔离变压器。在TPS控制下,DAB变换器共有3个控制自由度,包括原边侧的桥内移相比 $D_1$ 、副边侧的桥内移相比 $D_3$ 和原副边全桥间的移相比 $D_2$ 。在三个移相比的调节下,两个全桥电路输出的波形为两组相移的三电平方波。通过移相比的不同组合方式,DAB变换器具有不同的工作模式,对应不同的工作特性。图2所示为DAB变换器的一个正向模式的电路波形图,此时移相比的条件为

$$\begin{cases} D_2 + D_3 \leq D_1 \leq 1 \\ 0 \leq D_2 \leq 1 - D_3 \\ 0 \leq D_3 \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

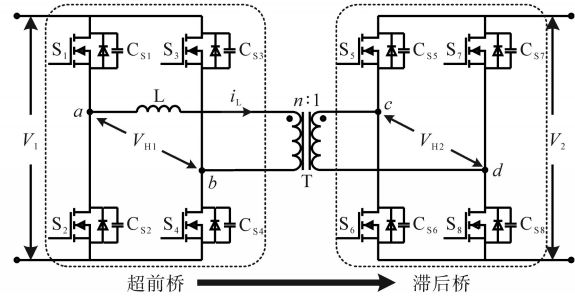


图1 双有源桥变换器电路拓扑

Fig.1 Dual active bridge converter circuit topology

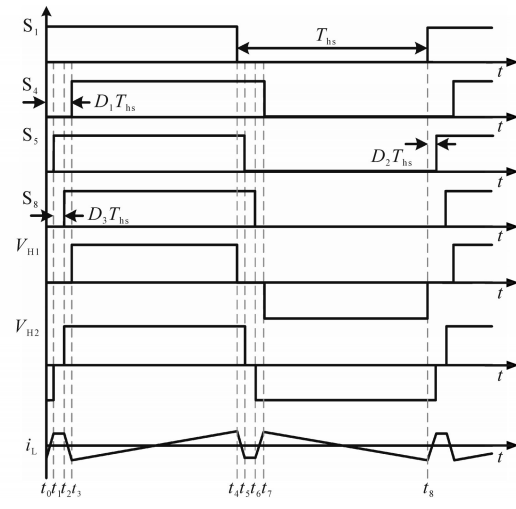


图2 驱动信号、电压和电感电流波形图

Fig.2 Drive signal, voltage and inductor current waveforms

以此工作模式为例,对DAB变换器的工作模式进行分析。在1个工作周期内,DAB变换器具有8个工作模式,在正向工作模式下的模式等效电路图如图3所示。

模态1( $t_0-t_1$ ):如图3a所示,在 $t_0$ 时刻之前,开关管 $S_1, S_4, S_5, S_8$ 关断, $S_2, S_3, S_6, S_7$ 导通,流经L的漏感电流为负。在 $t_0$ 时刻,开关管 $S_1$ 导通、 $S_2$ 关断。电容 $C_{S2}$ 充电至两端电压为 $V_1$ ,电容 $C_{S1}$ 放电至两端电压为零,开关管 $S_1$ 实现ZVS开通。

模态2( $t_1-t_2$ ):如图3b所示,在模态1中,反向的电感电流 $i_L$ 在模态结束时变为正向。在 $t_1$ 时刻,开关管 $S_5$ 开通、 $S_6$ 关断。此时正向的电感电流完成对开管寄生电容的充放电,流经开关 $S_5$ 的体二极管,开关 $S_5$ 能够实现ZVS开通。此模态中,电感L工作在续流状态,输出电容 $C_2$ 维持输出端电压的稳定。

模态3( $t_2-t_3$ ):如图3c所示,在 $t_2$ 时刻,开关管 $S_8$ 开通、 $S_7$ 关断。模态初期,电感电流 $i_L$ 保持正

向,流经开关 $S_8$ 的体二极管。 $S_8$ 两端电压被钳位为零,实现了软开关。此时电感 $L$ 上储存的能量通过开关管 $S_5$ 和 $S_8$ 形成的回路,将能量向输出端传递。在此模式中,电感 $L$ 两端电压为 $-nV_2$ ,电感电流逐渐下降。

模态4( $t_3-t_4$ ):如图3d所示,在模态3结束时,正向的电感电流 $i_L$ 变为反向,输出端对电感 $L$ 进行充电。在 $t_3$ 时刻,开关管 $S_4$ 开通、 $S_3$ 关断。反向的电感电流使得开关 $S_4$ 的寄生电容完全放电,实现了ZVS开通。此时输出端对电感 $L$ 进行充电,并且部分功率向输入侧传递。

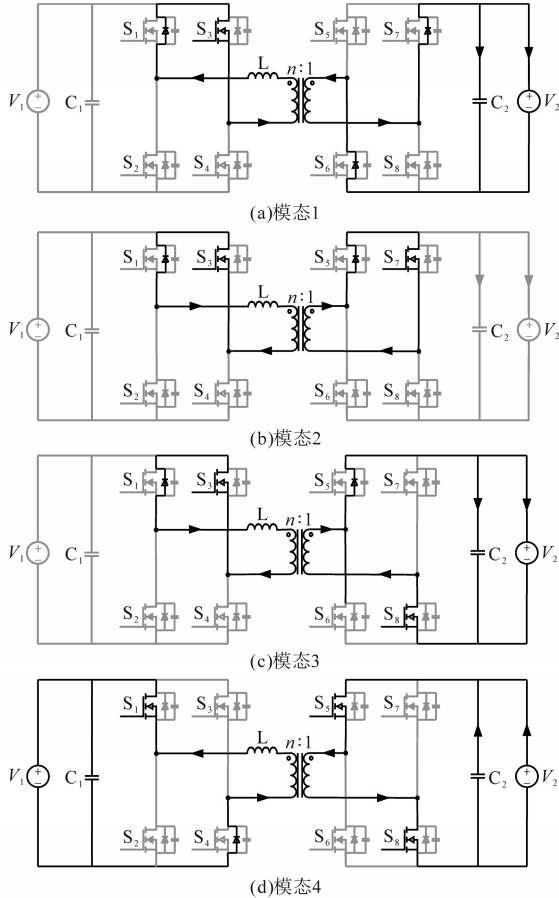


图3 正向工作周期的等效电路

Fig.3 Equivalent circuit for the forward operating cycle

根据图2的波形图可知,基于TPS控制下,DAB变换器的正、负半个周期对称工作。因为负半周期的工作过程与正半周期的工作过程相似,故不再展开讨论。

## 2 DAB变换器的特性分析

### 2.1 电流应力特性分析

正、负半周期均由4个不同的时间间隔组成,通过时间参数 $t_1, t_2, t_3$ 和 $t_4$ 进行调整。假设变换器工作在稳定状态,且初始时刻 $t_0$ 为零,则4个时刻

对应的表达式为

$$\begin{cases} t_1 = D_2 T_{hs} \\ t_2 = (D_2 + D_3) T_{hs} \\ t_3 = D_1 T_{hs} \\ t_4 = T_{hs} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T_{hs}$ 为半个开关周期。

根据图3中的模态分析,计算开关时间 $t_0$ 到 $t_4$ 对应的电感电流表达式如下:

$$\begin{cases} i_L(t_1) = i_L(t_0) + \frac{nV_2}{L} D_2 T_{hs} \\ i_L(t_2) = i_L(t_1) \\ i_L(t_3) = i_L(t_2) - \frac{nV_2}{L} (D_1 - D_2 - D_3) T_{hs} \\ i_L(t_4) = i_L(t_3) + \frac{V_1 - nV_2}{L} (1 - D_1) T_{hs} \end{cases} \quad (3)$$

根据图2中的电压电流波形图,电感电流 $i_L$ 在正、负半个周期内波形对称,1个开关周期 $T_s$ 内的平均值为零,则有:

$$i_L(t + T_s/2) = -i_L(t) \quad (4)$$

进一步计算出各时刻电感电流的表达式为

$$\begin{cases} i_L(t_0) = \frac{1}{4Lf_s} (V_1 D_1 - 2nV_2 D_2 - nV_2 D_3 - V_1 + nV_2) \\ i_L(t_1) = \frac{1}{4Lf_s} (V_1 D_1 - nV_2 D_3 - V_1 + nV_2) \\ i_L(t_2) = \frac{1}{4Lf_s} (V_1 D_1 - nV_2 D_3 - V_1 + nV_2) \\ i_L(t_3) = \frac{1}{4Lf_s} (V_1 D_1 - 2nV_2 D_1 + 2nV_2 D_2 + nV_2 D_3 - V_1 + nV_2) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f_s$ 为系统的工作频率。

电流应力定义为稳态周期中DAB的最大电流。由图2中电感电流波形可发现,电流应力一定出现在电流波形的拐点,且此时必须至少有1个开关开通或关断。电感电流应力的计算公式如下式:

$$I = \max \{ |i_L(t_0)|, \dots, |i_L(t_5)| \} \quad (6)$$

定义DAB变换器的电压转换比 $k = V_1/(nV_2)$ 。当 $V_1 \geq nV_2$ ,即 $k \geq 1$ 时,DAB变换器工作在降压模式;当 $V_1 < nV_2$ ,即 $k < 1$ 时,DAB变换器工作在升压模式。以 $1/(4Lf_s)$ 为基准对电感电流进行归一化,计算得到当前模式下的电流应力如表1所示。从表1可以看出,电流应力的大小与移相比 $D_1 \sim D_3$ 的组合及电压转换比 $k$ 有关。在降压工作模式下,当 $k \geq 1$ 时电感电流应力可能出现在特定的开

关时刻,大小由  $D_1 \sim D_3$  和  $k$  共同决定。

表1 归一化电感电流应力表达式

工作模式	电流应力
降压 ( $k \geq 1$ )	$\max \{(-kD_1 + 2D_2 + D_3 - 1 + k),$ $(kD_1 - D_3 + 1 - k),$ $[(2 - k)D_1 - 2D_2 - D_3 - 1 + k]\}$
升压 ( $k < 1$ )	$kD_1 - D_3 + 1 - k$

## 2.2 输出功率特性分析

采用分段积分法计算 DAB 变换器在 TPS 控制下的传输功率,计算公式如下:

$$P = \frac{2}{T_{hs}} \int_0^{T_{hs}} V_{H1} i_L(t) dt \quad (7)$$

式中:  $V_{H1}$  为超前全桥电路的中点输出电压。

为了简化分析,以 SPS 控制的最大传输功率为基准对 TPS 控制的传输功率进行归一化。SPS 控制下的最大传输功率为

$$P_{\max} = \frac{nV_1 V_2}{8Lf_s} \quad (8)$$

则在此移相情况下,DAB 变换器的标么化传输功率表达式为

$$P^* = 2(D_1^2 - 2D_1 D_2 - D_1 D_3 - D_1 + 2D_2 + D_3) \quad (9)$$

根据式(9),得到 DAB 变换器在此移相情况下系统功率范围随移相比的变化情况,如图4所示。

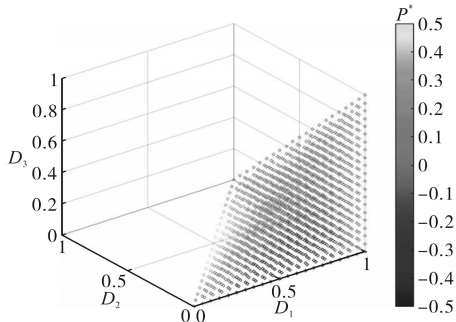


图4 DAB 变换器的功率分布

Fig.4 Power distribution of DAB converter

在此移相情况下,系统的传输功率范围是  $[-0.5, 0.5]$ ,故系统工作在轻载范围,并且通过控制移相可以实现能量的正、反向传输。

## 2.3 软开关特性分析

开关管实现软开关的原理是反向电流完成对开关管寄生电容的放电,经过其体二极管续流,将开关管两端的电压钳位为零。忽略开关管寄生电容的影响,以电感电流的极性作为软开关的判断依据。根据变换器的模态分析,各开关管的软开关条件为

$$\begin{cases} S_1/S_2: i_L(t_0) \leq 0 \\ S_3/S_4: i_L(t_3) \leq 0 \\ S_5/S_6: i_L(t_1) \geq 0 \\ S_7/S_8: i_L(t_2) \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

根据 2.1 节中的电感电流表达式,计算可得此移相情况下,关于移相比和电压转换比的软开关范围为

$$\begin{cases} 1 - D_3 - k(1 - D_1) \geq 0 \\ 1 - 2D_1 + 2D_2 + D_3 - k(1 - D_1) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

根据式(11),可以看出 DAB 变换器的软开关范围与各移相比  $D_1 \sim D_3$  及电压转换比  $k$  相关。随着电压转换比  $k$  的增加,超前桥的软开关范围逐渐减小,而滞后桥的软开关范围逐渐增加。

## 2.4 电流应力优化

根据上述分析,在固定的电压转换比  $k$  的条件下,移相比  $D_1 \sim D_3$  同时影响着系统的电流应力和软开关范围。可以通过各移相比之间的优化组合方式,DAB 变换器在获得较小的电流应力的同时实现软开关。

在电压转换比  $k \geq 1$  的条件下,由于解析模型中电流应力的不确定性,很难直接求解该模式下的最优移相比组合。在确定传输功率、电压转换比和移相比之后,可以相应地确定电流应力。为了简化分析,取此模式的边界  $D_2 + D_3 = D_1$  为移相比的优化区间。采用拉格朗日乘子法(lagrange multiplier method, LMM)进行求解,以功率传递函数为等式约束,以软开关条件为不等式约束,根据 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件进行计算,如下式所示:

$$L(D_1, D_2, D_3, \lambda, \mu_1, \mu_2) = I_m + \lambda(P_o - P) + \mu_1(i_{S1} - i_L) + \mu_2(i_{S5} + i_L) \quad (12)$$

KKT 条件如下:

$$\begin{cases} \partial L / \partial D_1 = 0 & \partial L / \partial \lambda = 0 \\ \partial L / \partial D_2 = 0 & \partial L / \partial \mu_1 = 0 \\ \partial L / \partial D_3 = 0 & \partial L / \partial \mu_2 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $L(D_1, D_2, D_3, \lambda, \mu_1, \mu_2)$  为拉格朗日函数;  $I_m$  为电流应力;  $P_o$  为系统的传输功率;  $i_{S1}, i_{S5}$  分别为超前桥和滞后桥的软开关条件,对应式(11);  $\lambda, \mu_1, \mu_2$  分别为 KKT 条件的等式约束乘子和不等式约束乘子。

通过微分运算,得到此移相情况下,在电压转换比  $k \geq 1$  的条件下,三个最优移相比之间的关系为

$$\begin{cases} D_2 = (k - 1)(1 - D_1) \\ D_3 = -k(1 - D_1) + 1 \end{cases} \quad (14)$$



此时系统的优化电流应力表达式为

$$I_m = -kD_1 + 2D_2 + D_3 - 1 + k \quad (15)$$

将此移相情况下的最优移相比关系式(14)代入系统的软开关条件式(11),可解得此移相情况下DAB变换器的所有开关管均实现ZVS时,最优移相比 $D_{1,opt}$ 需要满足的约束范围为

$$0 \leq D_{1,opt} \leq 1 \quad (16)$$

根据上述分析,采用优化控制后系统具有良好的软开关特性。将上述分析的移相比最优解代入系统的电流应力表达式(式(15))和传输功率表达式(式(9)),可得优化后的系统电流应力和传输功率:

$$\begin{cases} I_m = 2(1-k)D_{1,opt} + 2(k-1) \\ P_o = 2(k-1)D_{1,opt}^2 + 4(1-k)D_1 + 2(k-1) \end{cases} \quad (17)$$

根据式(17),当给定功率 $P_o$ ,可解得此移相情况下移相比 $D_1$ 的最优解 $D_{1,opt}$ ,相应地可以得到该模式下的优化电流应力 $I_{m,opt}$ 。将最优解 $D_{1,opt}$ 代入式(14),可以得到TPS控制的其他两个移相比 $D_2$ 和 $D_3$ 的优化解,从而对DAB变换器进行控制。

### 3 实验验证与结论

基于上述理论分析,搭建并测试了一台额定功率200 W的实验样机,如图5所示。图中,①~④模块分别为超前全桥、滞后全桥、平面变压器和功率电感,所用器件参数如下:高压380 V,低压48 V,匝比8:1,电感 $L=3.3 \mu\text{H}$ ,传输功率160 W,开关频率100 kHz。

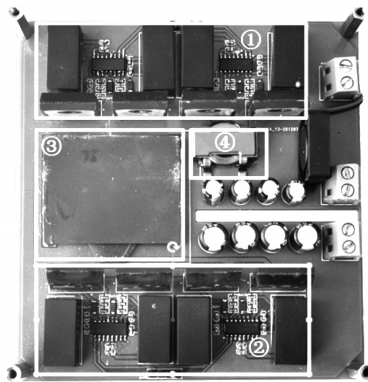


图5 DAB变换器的样机示意图

Fig.5 Prototype diagram of DAB converter

当电压转换比 $k=1.5$ 、传输功率 $P_o=160 \text{ W}$ 时,基于SPS控制和TPS控制下的DAB变换器的电流应力波形如图6所示。相较于SPS控制,TPS控制下的电流应力得到了优化。此时DAB工作在边界状态, $D_2+D_3=D_1$ ,符合理论分析。基于优化TPS控制下的DAB变换器软开关波形如图7所示。

DAB变换器的8个开关管均满足ZVS导通,证明了系统在优化电流应力的同时具有良好的软开关特性。

图8所示为DAB变换器在额定传输功率,不同电压转换比 $k$ 的条件下,TPS控制比SPS控制效率提升情况。根据实验结果可以看出,在 $k$ 接近1的附近时,TPS控制下系统效率略高于SPS控制下系统效率。此时两种控制下电流应力接近,

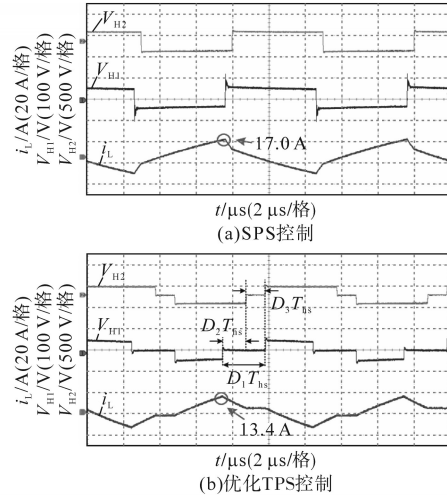


图6 不同控制策略下的电流应力实验波形对比

Fig.6 Comparison of experimental waveforms of current stress under different control strategies

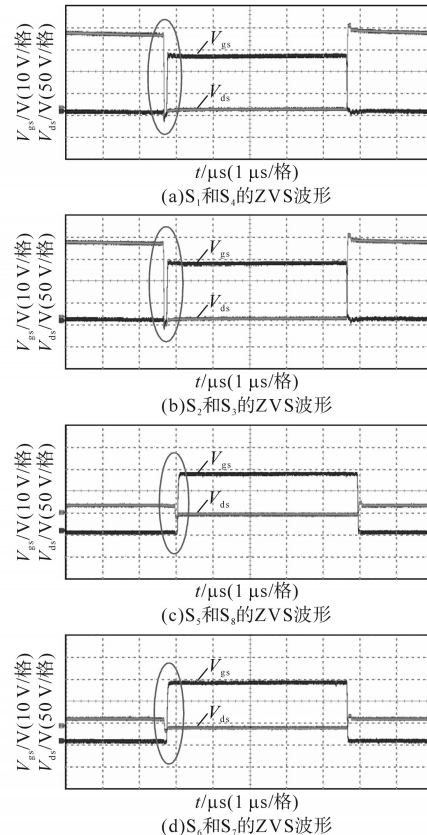


图7 实验样机的软开关波形图

Fig.7 Soft switching waveforms of experimental prototype

TPS控制降低了电路中的无功回流损耗。当电压不匹配时,传统SPS控制下DAB变换器的电流应力和无功损耗大,软开关困难,系统效率较低。此时TPS控制优化了电流应力和软开关范围,降低了无功损耗,系统效率得到明显提升。

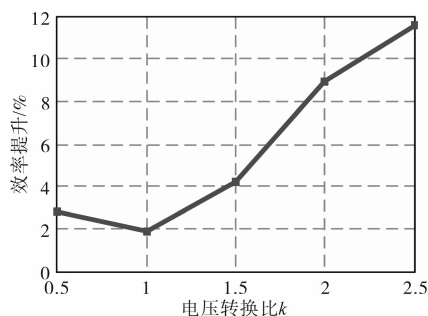


图8 TPS控制比SPS控制效率提升情况

Fig.8 Control efficiency improvement of TPS control compared with SPS control

本文基于TPS控制的工作原理,分析了双有源桥变换器的一种移相情况。该工作模式适用于轻载状态,能够实现能量的双向功率传输。采用分段分析的方法,建立了DAB变换器的传输功率、软开关和电流应力的数学模型,并对电流应力进行优化控制,提升DAB变换器的性能。实验结果证明了优化的TPS控制能够降低系统的电流应力,同时电路具有良好的软开关特性。

#### 参考文献

- [1] 王冕,田野,李铁民,等. 应用于储能系统的双向DC-DC变换器研究[J]. 电工技术学报,2013,28(8):66-71.  
WANG Mian, TIAN Ye, LI Tiemin, et al. Study of bidirectional DC-DC converter applied to energy storage system[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2013, 28(8): 66-71.
- [2] XUAN Yang, YANG Xu, CHEN Wenjie, et al. 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.
- [3] KONDRATH N. Bidirectional DC-DC converter topologies and control strategies for interfacing energy storage systems in microgrids: an overview[C]//2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). Oshawa, Canada: IEEE, 2017: 341-345.
- [4] TSENG Kuo-Ching, CHANG Shih-Yi, CHENG Chun-An. Novel isolated bidirectional interleaved converter for renewable energy applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 66(12):9278-9287.
- [5] 赵彪,安峰,宋强,等. 双有源桥式直流变压器发展与应用[J]. 中国电机工程学报,2021,41(1):288-298.  
ZHAO Biao, AN Feng, SONG Qiang, et al. Development and application of DC transformer based on dual active bridge[J].

Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1):288-298.

- [6] 周兵凯,杨晓峰,张智,等. 能量路由器中双有源桥直流变换器多目标优化控制策略[J]. 电工技术学报,2020,35(14):3030-3040.  
ZHOU Bingkai, YANG Xiaofeng, ZHANG Zhi, et al. Multi-objective optimization control strategy of dual active-bridge DC-DC converter in electric energy router application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 3030-3040.
- [7] ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC-DC converter for high frequency link power-conversion system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8):4091-4106.
- [8] 李婧,袁立强,谷庆,等. 一种基于损耗模型的双有源桥DC-DC变换器效率优化方法[J]. 电工技术学报,2017,32(14):66-76.  
LI Jing, YUAN Liqiang, GU Qing, et al. An efficiency optimization method in dual active bridge DC-DC converter based on loss model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14):66-76.
- [9] 王聪,沙广林,王俊,等. 基于双重移相控制的双有源桥DC-DC变换器的软开关[J]. 电工技术学报,2015,30(12):106-113.  
WANG Cong, SHA Guanglin, WANG Jun, et al. The analysis of zero voltage switching dual active bridge DC-DC converters based on dual-phase shifting control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12):106-113.
- [10] SHI Haochen, WEN Huiqing, CHEN Jie, et al. Minimum-back-flow-power scheme of DAB-based solid-state transformer with extended-phase-shift control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4):3483-3496.
- [11] 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.
- [12] WU K, DE SILVA C W, DUNFORD W G. Stability analysis of isolated bidirectional dual active full bridge DC-DC converter with triple phase-shift control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4):2007-2017.
- [13] HARRYE Y A, AHMED K H, ADAM G P, et al. Comprehensive steady state analysis of bidirectional dual active bridge DC/DC converter using triple phase shift control[C]//2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics. Istanbul, Turkey: IEEE, 2014:437-442.
- [14] WANG Cong, SHA Guanglin, CHENG Hong, et al. Unified phasor analytical method for dual-active-bridge DC/DC converter under phase-shift control[C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei, China: IEEE, 2016:348-355.

收稿日期:2022-10-23

修改稿日期:2022-11-29