DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.63 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

DAB变换器三重移相电流应力全局优化策略分析

叶 伟[1]，王 浩[2]，李善寿[2]，陶 勇[2]
(1.安徽南瑞继远电网技术有限公司，合肥 230088；2.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)

摘要：为实现双有源桥DAB(dual active bridge)变换器电流应力全功率范围最小化，研究了三重移相TPS(triple phase shift)控制下电流应力全局优化策略。首先分析三重移相控制下变换器的工作原理及工作过程，并建立传输功率和电流应力与移相比的关系模型；然后基于所建立的关系模型，以电流应力全局最小化为目标，通过寻求最优移相比组合对TPS控制进行优化，并从电流应力及回流功率2个方面将优化结果与双重移相DPS(dual phase shift)控制做了对比；最后通过实验进行验证，理论和实验结果证明电流应力全局优化的TPS控制在全功率范围内进一步减小电流应力的同时减小了回流功率。

关键词：双有源桥变换器；三重移相控制；电流应力；全局优化

Analysis of Global Optimization Strategy for Current Stress of DAB Converter under Triple Phase Shift Control

YE Wei[1], WANG Hao[2], LI Shanshou[2], TAO Yong[2]
(1. Anhui Nari-Jiyuan Power Grid Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Intelligent Building and Building Energy Saving, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China)

Abstract: To minimize the current stress of a dual active bridge (DAB) converter in its full power range, a global optimization strategy for the current stress under triple phase shift (TPS) control is studied. First, the operation principle and process of the converter under TPS control are analyzed, and a model of the relationship among its output power, current stress and phase-shift ratio is established. On this basis, the TPS control is optimized by seeking the optimal phase shift ratio combination with the goal of global minimization of current stress. In addition, the optimization results are compared with those under the dual phase shift (DPS) control in terms of current stress and reactive power. Finally, verification was performed by carrying out an experiment. The theoretical and experimental results show that the TPS control with the global optimization of current stress further reduces the current stress and reactive power in the full power range.

Keywords: Dual active bridge (DAB) converter; triple phase shift (TPS) control; current stress; global optimization

收稿日期：2022-05-06；**修回日期**：2022-08-01；**录用日期**：2022-08-22；**网络首发日期**：2022-10-31
基金项目：南瑞集团有限公司《智慧型站用交直流电源关键设备研制》资助项目(SGNR0000KJJS2106316)；国家重点研发计划资助项目(2017YFC0704100)
This work is supported by Development of Key Equipment of Intelligent Station AC/DC Power Supply Project of NARI Group Co., Ltd. under the grant SGNR0000KJJS2106316; National Key Research and Development Project under the grant 2017 YFC0704100

配备一定容量的储能是解决可再生能源发电随机波动性的有效途径，双向DC-DC变换器是储能系统的关键设备，双有源桥DAB(dual active bridge)变换器由于功率密度高、电气隔离、能量双向流动等特点是适用于储能系统的拓扑之一。单移相SPS(single phase shift)扩展控制是DAB变换器的基本控制方式[1]，然而SPS控制下的DAB变换器在高频变压器两侧电压不匹配时电感电流会增

大[2-3]，增大的电流对开关器件有更高的要求。为克服 SPS 控制的不足，相关文献从电流应力、回流功率及软开关等方面研究了具有 2 变量的双重移相 DPS(dual phase shift)及扩展双重移相 EPS(extended phase shift)控制及其优化控制。文献[4]研究了 DPS 控制下电流应力优化方法，该方法可以有效减小变换器的电流应力，然而该文献仅将优化结果与 SPS 控制做对比；文献[5]研究了 1 种变频移相的混合控制方法来减小回流功率，但该方法只针对输出功率较高的情况，且该方法控制分为变频和移相 2 个阶段，控制较为复杂；文献[6]研究了储能系统中双有源桥变换器的软开关优化控制，该方法只适用于超级电容器作为储能装置的场合，并不具备普遍适应性；文献[7]研究了 EPS 控制下回流功率优化方法，该方法减小了回流功率的同时降低了电流应力，然而该文献仅将优化结果与 SPS 控制做对比；文献[8]研究了全功率范围内 EPS 控制的软开关实现方法，但并未涉及电流应力及回流功率分析；文献[9]研究了 EPS 控制下通过实现软开关及减小电感电流有效值的方法减小了变换器的损耗，但未涉及电流应力及回流功率分析。以上文献的研究虽然取得了相应的成果，但都未提及 TPS 控制，DPS 及 EPS 控制是三重移相 TPS(triple phase shift)控制的特殊形式，其优化控制只能得到局部最优，结果可以进一步优化，因此相关文献对 TPS 的优化控制展开了研究。文献[10]以电感电流有效值最小化为目标研究了 TPS 控制的全局优化控制策略，然而电感电流有效值计算复杂，不便于分析；文献[11]研究了 TPS 控制的全功率范围零电压开关 ZVS(zero voltage switch)控制策略，然而该策略需要结合电感电流有效值最优化策略，不便于分析。

基于此，本文以电感电流峰值最小化为目标对 TPS 控制进行优化，首先建立传输功率随移相比变化的关系模型，并基于该关系模型结合拉格朗日方程求得电感电流峰值最小化的移相比组合，实现电流应力的全局最优控制，然后将优化结果与 DPS 控制进行了对比，最后通过实验进行了验证。

1 DAB 变换器主拓扑与控制策略

1.1 DAB 变换器主拓扑

图 1 为 DAB 变换器的基本拓扑结构，DAB 变换器由 2 个 H 桥、隔离变压器、辅助电感、输入输出电容构成。图中：U_1 和 U_2 分别为输出电压和输入电压；C_1 和 C_2 分别为输入和输出的支撑电容；u_1 为全桥 H_1 输出的交流电压；u_2 为全桥 H_2 输出的交流电压；L 为辅助电感；i_L 为流经辅助电感的电流；L_r 为传输能量的等效辅助电感；变压器变比为 $n:1$。

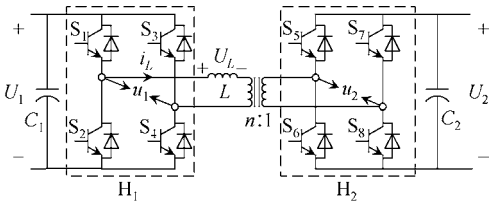


图 1 DAB 变换器主拓扑

Fig. 1 Main topology of DAB converter

文献[12]给出了 DAB 变换器在 SPS 控制方式下的工作原理及工作波形，同时给出了 SPS 控制下变换器的传输功率表达式，即

$$P=\frac{nU_1U_2}{2fL}d(1-d) \tag{1}$$

式中：f 为开关频率；d 为 2 个 H 桥开关信号移相比。由式(1)得 SPS 控制下变换器的最大功率及最大电流表达式为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{N}}=nU_1U_2/(8fL) \\ i_{\mathrm{N}}=nU_2/(8fL) \end{cases} \tag{2}$$

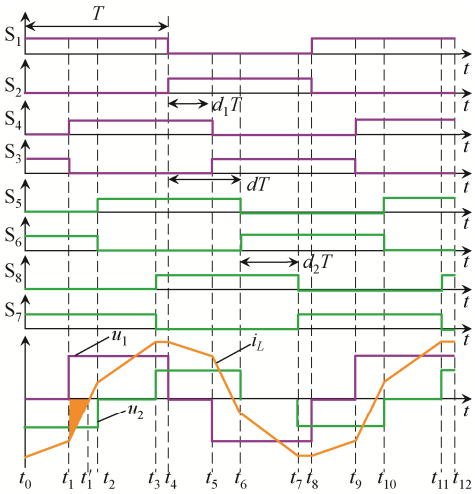
下文中的标幺化表达式均以式(2)为基准。

1.2 TPS 控制基本特性

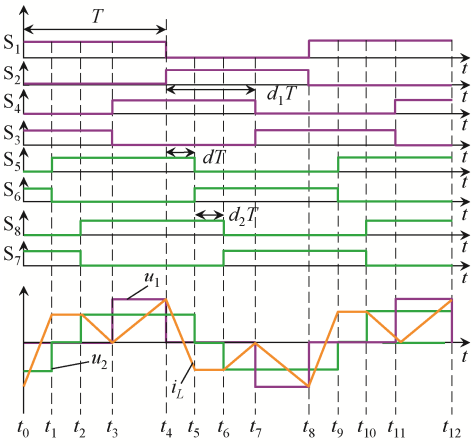
定义 2 个 H 桥之间移相角度占半开关周期比例大小为外移相比 d，2 个 H 桥内移相角度占半开关周期比例大小为内移相比 d_1、d_2，TPS 控制中 d、d_1、d_2 可调且相互独立。当 $d_1=d_2=0$ 时为 SPS 控制，当 $d_1=d_2\neq 0$ 时为 DPS 控制，根据 d、d_1 的大小关系将 DPS 控制分为 $d<d_1$ 和 $d>d_1$ 2 种工作模式；当 $d_1\neq 0$、$d_2=0$ 或 $d_1=0$、$d_2\neq 0$ 时为 EPS

控制，根据 d、d_1 的大小关系将 EPS 控制分为 $d<d_1$ 和 $d>d_1$ 2 种工作模式。而在 TPS 中，根据 d、d_1、d_2 的大小关系，在能量单向流动时，文献[13]将 TPS 控制分为 6 种工作模式，文献[14]的研究表明，模式 2、模式 3、模式 6 会产生更大的电感电流，不仅不利于变换器的优化，还会造成额外的损耗，变换器应该避免工作在模式 2、模式 3、模式 6。本文仅对 TPS 控制模式 1、模式 4、模式 5 进行分析，TPS 控制模式 1、模式 4、模式 5 移相比的约束条件分别为：模式 1，$d>d_1$、$d+d_2<1$；模式 4，$d_1>d$、$d+d_2<d_1<1$；模式 5，$d_1>d$、$d_1<d+d_2<1$。模式 1、模式 4、模式 5 的工作波形如图 2 所示，图中 T 为半开关周期时间。

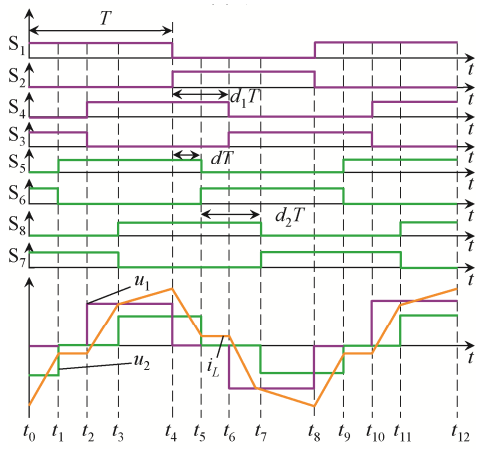
定义电压传输比 $k=U_1/nU_2$，当 $k>1$ 时变换器降压运行，当 $k<1$ 时变换器升压运行，为简化分析，本文仅对 $k>1$ 的情况进行分析。$k<1$ 的情况



(a) 模式1



(b) 模式4



(c) 模式5

图 2　TPS 控制工作波形

Fig. 2 Working waveforms under TPS control

分析过程相同，不再赘述。

以 TPS 控制的模式 1 为例对变换器的基本特性进行分析，其余模式分析过程相同。变换器电流应力大小取决于电感电流 i_L 的峰值大小。图 2 表明，在 t_4 时刻电感电流 i_L 取得最大值，认为 t_0 为起始时间，则 t_1、t_2、t_3、t_4 时刻的表达式分别为 $t_1=d_1T$、$t_2=(d-d_1)T$、$t_3=(d+d_2)T$、$t_4=(1-d-d_2)T$，则 $T=1/2f$。根据伏秒平衡原理，变换器在稳态运行时电感电流满足 $i_L(t_0)=-i_L(t_4)$，根据此关系可求得电感电流峰值表达式为

$$i=i_L(t_4)=\frac{nU_2}{4fL}(k+2d-kd_1+d_2-1) \tag{3}$$

同理求得 TPS 控制下模式 4 及模式 5 的电感电流峰值同式(3)。

TPS 控制下变换器的传输功率为电感电流平均值与电压乘积的积分，可以求得模式 1、模式 4、模式 5 的传输功率表达式为

$$P=\begin{cases}\dfrac{nU_2}{4fL}(2d-2d^2+2dd_1-2dd_2-d_1-d_1^2+\\ \qquad d_1d_2+d_2-d_2^2) & \text{模式1}\\ \dfrac{nU_2}{4fL}(2d-d_1-2dd_1+d_1^2+d_2-d_1d_2) & \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \text{模式4}\\ \dfrac{nU_2}{4fL}(2d-d^2-d_1+d_2-2dd_2+d_1d_2-d_2^2) & \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \text{模式5}\end{cases} \tag{4}$$

对式(3)和式(4)标幺化，得到 TPS 控制的标幺化电感电流峰值 i_{TPS} 及传输功率 P_{TPS} 表达式分别为

$$i_{\mathrm{TPS}}=2(k+2d-kd_1+d_2-1) \tag{5}$$

$$P_{\mathrm{TPS}}=\begin{cases}2(2d-2d^2+2dd_1-2dd_2-d_1-d_1^2+\\ \quad d_1d_2+d_2-d_2^2) & \text{模式1}\\ 2(2d-d_1-2dd_1+d_1^2+d_2-d_1d_2) & \text{模式4}\\ 2(2d-d^2-d_1+d_2-2dd_2+d_1d_2-\\ \quad d_2^2) & \text{模式5}\end{cases} \tag{6}$$

2 电流应力优化

2.1 电流应力分析

式(4)和式(5)表明电感电流峰值 i_{TPS} 及传输功率 P_{TPS} 与移相比 d、d_1、d_2 有关，d、d_1、d_2 有无数种组合，每种组合对应的 i_{TPS} 及 P_{TPS} 不同，为得到既能满足功率要求又可以使电感电流峰值最小的移相比组合，建立拉格朗日方程为

$$L(d,d_1,d_2)=i_{\mathrm{TPS}}+\mu(P_{\mathrm{TPS}}-P_0) \tag{7}$$

式中：μ 为乘数因子；P_0 为给定传输功率值。令

$$\begin{cases}\partial L/\partial d=0\\ \partial L/\partial d_1=0\\ \partial L/\partial d_2=0\\ \partial L/\partial \mu=0\end{cases} \tag{8}$$

将式(5)和式(6)代入式(7)，并结合式(8)可以得知模式 4 无解。

模式 1 的最优移相比组合为

$$\begin{cases}d=\dfrac{1}{2}+\dfrac{(k-2)}{2}\sqrt{\dfrac{1-P_0}{k^2-2k+2}}\\ d_1=(k-1)\sqrt{\dfrac{1-P_0}{k^2-2k+2}}\\ d_2=0\end{cases} \tag{9}$$

模式 5 的最优移相比组合为

$$\begin{cases}d=\sqrt{\dfrac{(k-1)P_0}{2}}\\ d_1=1-\sqrt{\dfrac{P_0}{2(k-1)}}\\ d_2=1-k\sqrt{\dfrac{P_0}{2(k-1)}}\end{cases} \tag{10}$$

由于模式 1 移相比的约束条件为 $d>d_1$，结合式(9)可以得到模式 1 工作的功率范围为

$$2(k-1)/k^2<P_0\leqslant 1 \tag{11}$$

模式 5 移相比的约束条件为 $d<d_1$、$d<d_2$，结合式(10)可以得到模式 5 工作的功率范围为

$$0<P_0\leqslant 2(k-1)/k^2 \tag{12}$$

将式(9)和式(10)代入式(5)可以得到电流应力优化后电感电流峰值随传输功率 P_0 变化的表达式为

$$i_{\mathrm{TPS}}=\begin{cases}2[\sqrt{2(k-1)P_0}]\\ \quad 0\leqslant P_0<2(k-1)/k^2\\ 2[k-\sqrt{(1-P_0)(k^2-2k+2)}]\\ \quad 2(k-1)/k^2\leqslant P_0\leqslant 1\end{cases} \tag{13}$$

式(13)表明优化后的 TPS 控制在模式 1 及模式 5 就可以实现电流应力的全局最小化。

同理得到 DPS 控制下电流应力优化后电感电流峰值随传输功率 P_0 变化的表达式为

$$i_{\mathrm{DPS}}=\begin{cases}\sqrt{2(k^2+2k-3)P_0}\\ \quad 0\leqslant P_0<\dfrac{k^2+2k-3}{2k^2}\\ 2k-\sqrt{2(k^2-2k+3)(1-P_0)}\\ \quad \dfrac{k^2+2k-3}{2k^2}<P_0\leqslant 1\end{cases} \tag{14}$$

根据式(13)及式(14)得到如图 3 所示的 DPS 及 TPS 控制下电感电流峰值随电压传输比 k 及传输功率 P_0 变化三维关系图，由于 k 有多种取值可能，为简化分析，本文仅取 $k=[2,3]$。图 3 表明，k 值

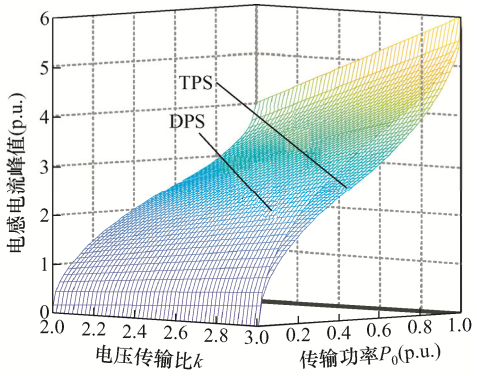


图 3 DPS 及 TPS 电流应力曲线

Fig. 3 Current stress curves under DPS and TPS control

越大，电感电流峰值越大，与 DPS 控制相比，TPS 控制在全功率范围内减小了电感电流峰值，并且随着 k 值增大，TPS 控制优化的效果更好。

2.2 回流功率分析

根据文献[15]，变换器在工作过程中存在电感电压为正、流经电感电流为负的阶段，如图 2 中 (t_1, t_1') 时段，该阶段电感中储存的能量回流至电源，称该阶段回流至电源的能量为回流功率，据此可以求得 TPS 控制下模式 1、模式 4、模式 5 的回流功率的标幺化表达式为

$$Q_{\mathrm{TPS}}=\begin{cases}\dfrac{[k(1-d_1)+2d-2d_1+d_2-1]^2}{2k+2} & \text{模式1}\\ \dfrac{[1+2d+(k-2)d_1+d_2-k]^2}{2k+2} & \text{模式4}\\ \dfrac{[k(1-d_1)+d_2-1]^2}{2k} & \text{模式5}\end{cases} \tag{15}$$

将式(9)和式(10)代入式(15)，可以得到电流应力优化后的回流功率 Q_{TPS} 随传输功率 P_0 变换的表达式为

$$Q_{\mathrm{TPS}}=\begin{cases}0 & 0\leqslant P_0<2(k-1)/k^2\\ \dfrac{[k-k^2\sqrt{(1-P_0)/(k^2-2k+2)}]^2}{2k+2} & \\ & 2(k-1)/k^2\leqslant P_0\leqslant 1\end{cases} \tag{16}$$

同理求得 DPS 控制下电流应力优化后回流功率 Q_{DPS} 随传输功率 P_0 变化的表达式为

$$Q_{\mathrm{DPS}}=\begin{cases}\dfrac{\left[\dfrac{k^2-1}{2}\sqrt{\dfrac{2P_0}{k^2+2k-3}}\right]^2}{2k} & \\ & 0\leqslant P_0<\dfrac{k^2+2k-3}{2k^2}\\ \dfrac{\left[k-\dfrac{k^2-1}{2}\sqrt{\dfrac{2(1-P_0)}{k^2-2k+3}}\right]^2}{2k+2} & \\ & \dfrac{k^2+2k-3}{2k^2}\leqslant P_0\leqslant 1\end{cases} \tag{17}$$

根据式(16)及式(17)得到如图 4 所示的 DPS 及 TPS 控制下回流功率随电压传输比 k 及传输功率 P_0 变化三维关系图，由于 k 有多种取值可能，同样为简化分析仅取 $k=[2, 3]$。图 4 表明，随着 k 值增大，DPS 及 TPS 控制的回流功率增加，TPS 控制的回流功率较 DPS 小，在较小功率区域内，TPS 控制的回流功率为 0。随着 k 值增加，TPS 减小回流功率的优势更加明显。

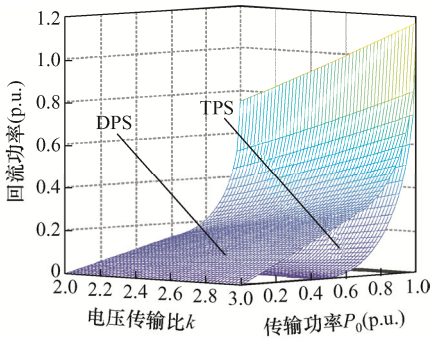


图 4　DPS 及 TPS 回流功率曲线

Fig. 4 Reactive power curves under DPS and TPS control

结合对电流应力及回流功率的分析可以得到，相较于 DPS 控制，电流应力全局优化的 TPS 控制在减小了电流应力的同时也减小了回流功率。

3　实验验证

3.1 实验条件

搭建如图 5 所示的基于 28335 的实验平台进行实验验证，实验参数为：输入电压 200 V，输入输出电容 440 μF，电感 0.3 mH，变压器变比 n=3，开关频率 15 kHz，负载 10 Ω。为验证 DPS 及 TPS 控制不同 k 值条件下电流应力优化结果，输出电压分别取 30 V 及 40 V 对 DPS 及 TPS 控制进行实验验证。

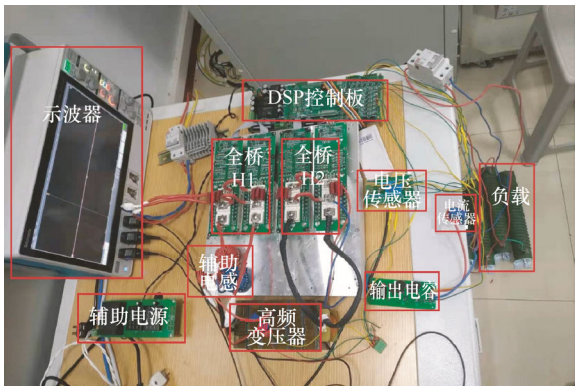


图 5　实验平台

Fig. 5 Experimental platform

3.2 实验结果分析

图 6 为输出电压 40 V 时 DPS 及 TPS 控制的实验波形，此时 $k=1.667$ 。变换器工作在稳态时，DPS 控制下 i_L 峰值约为 4.5 A，TPS 控制下 i_L 峰值约为 3.0 A。DPS 控制存在回流功率，而 TPS 控制回流功率为 0。

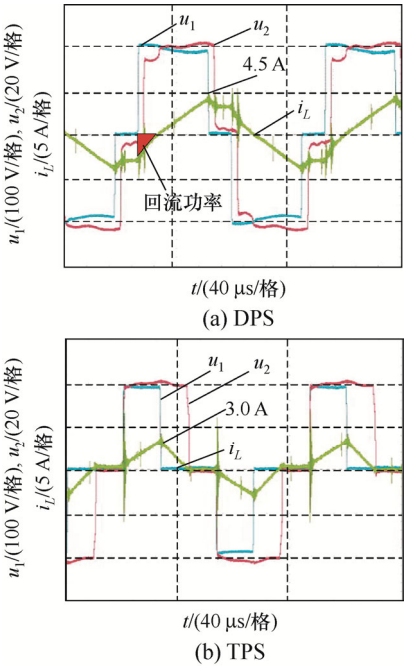
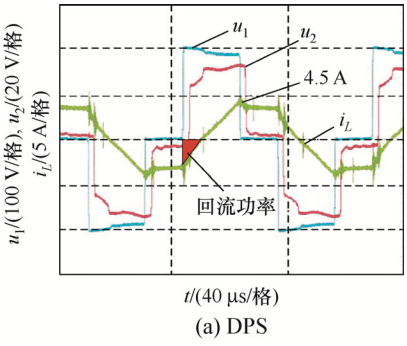


图 6 k=1.667 实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms when k equals 1.667

图 7 为输出电压 30 V 时 DPS 及 TPS 控制的实验波形，此时 $k=2.222$ 。DPS 控制下变换器工作在稳态时 i_L 峰值约为 4.5 A，TPS 控制下稳态时 i_L 峰值约为 2.5 A，DPS 控制存在回流功率，而 TPS 控制回流功率为 0。

结合图 6 及图 7 可知，当 $k=1.667$ 时 TPS 控制下的电流应力相对于 DPS 控制降低了 1.5 A，当 $k=2.222$ 时 TPS 控制下的电流应力相对于 DPS 控制降低了 2.0 A，2 种情况下 DPS 控制都存在回流功率，而 TPS 控制回流功率为 0。证明了随着 k 值增大，TPS 优化控制效果更好。



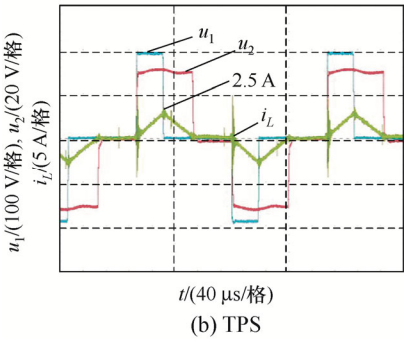


图 7 k=2.222 实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms when k equals 2.222

4 结论

针对 DAB 变换器存在电流应力较大的问题，给出了 TPS 控制下电流应力的全局优化方法，实现了 TPS 控制电流应力的全局最优控制，并将优化结果与 DPS 控制做了对比，通过理论分析与实验证明，得出如下结论。

(1)TPS 电流应力全局优化控制在 DPS 控制的基础上进一步降低电流应力。

(2)TPS 电流应力全局优化控制在减小电流应力的同时也减小了回流功率。

(3)随着电压传输比 k 值的增大，TPS 控制的优化效果更好。

参考文献：

[1] 李善寿, 王浩, 叶伟. 双有源桥变换器双移相控制动态特性优化方法[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 86-91.
Li Shanshou, Wang Hao, Ye Wei. Dynamic characteristic optimization method of dual phase shift control for dual active bridge converter [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 86-91. (in Chinese)

[2] Wu Fengjiang, Feng Fan, Gooi H B. Cooperative triple-phase-shift control for isolated DAB DC-DC converter to improve current characteristics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9): 7022-7031.

[3] Hou Nie, Song Wensheng, Wu Mingyi. Minimum-current-

stress scheme of dual active bridge DC-DC converter with unified phase-shift control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(12): 8552-8561.

[4] 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.

[5] 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)

[6] 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)

[7] 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.

[8] Xu Guo, Li Liting, Chen Xiaoying, et al. Optimized EPS control to achieve full load range ZVS with seamless transition for dual active bridge converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8379-8390.

[9] Liu Bochen, Davari P, Blaabjerg F. An optimized hybrid modulation scheme for reducing conduction losses in dual active bridge converters [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 921-936.

[10] 童安平, 杭丽君, 李国杰. 三重移相控制下 DAB 变换器全局优化控制策略及分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 6037-6049.
Tong Anping, Hang Lijun, Li Guojie. Global optimized control strategy of dual active bridge converter controlled by triple-phase-shift modulation scheme and its analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 6037-6049. (in Chinese)

[11] 邵持, 童安平, 钱语安, 等. 三重移相调制下 DAB 变换器全功率范围统一 ZVS 控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5644-5655, 5892.
Shao Chi, Tong Anping, Qian Yu'an, et al. Triple-phase-shift based unified ZVS modulation strategy of dual active bridge converter for full operation range [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5644-5655, 5892. (in Chinese)

[12] 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.

[13] Tong Anping, Hang Lijun, Li Guojie. Optimized control strategy for minimum ohmic loss of dual acitve bridge converter [C]// 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Tampa, FL, USA, 2017: 1103-1110.

[14] Ma Xiaonan, Tong Anping, Li Bin, et al. ZVS operation of DAB converter based on triple-phase-shift modulation scheme with optimized inductor current [C]// IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, China, 2017: 4702-4707.

[15] 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 on reflux power optimization and current stress optimization of dual phase-shifted DAB converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 243-253. (in Chinese)



叶伟

作者简介：

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。

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

李善寿(1979—　)，男，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。

陶勇(1994—　)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子变换技术。E-mail：versatile0608@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)