

双有源桥 DC-DC 变换器升降压功率特性优化控制*

姜汉尧¹, 于志军², 张安强¹, 任育杰¹, 鲍宇挺¹

(1. 中节能工业节能有限公司, 北京 100082; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084)

摘要: 双有源桥 DC-DC 变换器工作在升压、降压状态下时, 在传统单移相控制下, 电压的不匹配程度会影响变换器的超前桥、滞后桥以及电感上的功率分布情况, 进而增加变换器的通态损耗。引入内移相角的双重移相控制可以改变输入、输出侧的电压波形, 进而优化流过超前桥、滞后桥的无功功率, 在改变变换器的功率特性的同时增加了控制的自由度和灵活性。在此基础上提出了变换器工作在升压、降压状态下, 以电感上的无功功率为优化目标的双重移相控制策略, 减小了变换器的整体无功功率和通态损耗, 从而提高变换器的效率。最后通过试验验证了该双重移相控制方式的有效性和优越性。

关键词: 双有源桥 DC-DC 变换器; 移相控制; 升压、降压特性; 无功功率优化

中图分类号: TM 46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)08-0068-07

doi: 10.12177/emca.2020.085

Boost and Buck Power Characteristic Optimization Control of Dual-Active-Bridge DC-DC Converter*

JIANG Hanyao¹, YU Zhijun², ZHANG Anqiang¹, REN Yujie¹, BAO Yuting¹

(1. CECEP Industrial Energy Conservation Co., Ltd., Beijing 100082, China;

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: When the dual-active-bridge DC-DC converter works in the boost and buck state, under the traditional single-phase-shift control, the voltage mismatch will affect the power distribution of the converter's leading bridge, lagging bridge and inductor, which in turn increases the on-state loss of the converter. The dual-phase-shift control with internal phase-shift angle can change the voltage waveforms on the input and output sides, thereby optimizing the reactive power flowing through the leading and lagging bridges, increasing the degree of freedom and flexibility of control, and changing the power characteristics of the converter. On this basis, a dual-phase-shift control strategy is proposed that the converter works in the boost and buck state, and the reactive power on the inductor is the optimization goal, which is set to reducing the overall reactive power and on-state loss of the converter, thereby improving the efficiency of the converter. Finally, the effectiveness and superiority of the dual-phase-shift control method are verified through experiments.

Key words: dual-active-bridge DC-DC converter; phase-shift control; boost and buck characteristics; reactive power optimization

收稿日期: 2020-05-22; 收到修改稿日期: 2020-06-29

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0600700)

作者简介: 姜汉尧(1992—), 男, 硕士, 研究方向为 DC-DC 变换技术。

于志军(1973—), 男, 博士研究生, 教授级高级工程师, 研究方向为 DC-DC 变换技术和废弃煤矿瓦斯综合治理。(通信作者)

0 引言

能量路由器作为分布式发电、清洁能源并网、可控负载灵活接入的接口设备,是能源互联网构架的重要组成部分。双有源桥(DAB)DC-DC 变换器以其电压调节灵活、控制策略简单、软开关易实现、功率密度高、故障隔离、能量双向流动等优点成为近年来学术界研究的热点内容之一^[1-4]。

1991 年 De Doncker^[5]提出了单相拓扑结构 DAB 变换器,并介绍了变换器在传统单移相控制(SPS)下的工作原理,即系统能量传输方向和大小由超前桥与滞后桥的方波电压移相角控制。文献[6]进一步分析了传统 SPS 方式下变换器软开关实现条件并建立了变换器的小信号模型。但传统 SPS 控制方式简单,只有一个控制自由度,无法优化变换器的功率特性、软开关特性,并且当变换器直流侧输入输出电压不匹配时,流过高频变压器电感电流有效值、峰-峰值都会增大,增加了开关管应力和变换器的无功功率,降低了变换器效率和功率因数。

为了改善变换器的功率特性,增加变换器的控制自由度,继而引入了双重移相控制(DPS)方式。文献[7-8]提出使用内移相角控制超前桥的 DPS 方式。文献[9-10]进一步深入,提出使用内移相角来控制超前桥和滞后桥的 DPS 方法,通过调节超前桥或滞后桥内移相角度,改变变换器交流环节电压波形,改善其功率特性,从而达到降低变换器超前桥无功功率的目的。在此基础上文献[11]采用状态空间平均的方法对变换器进行动态建模,在保证软开关条件的基础上,提出了超前桥最小无功功率控制方法。但是进一步研究发现,在传输相同的有功功率时,即便使超前桥无功功率最小也不能保证滞后桥无功功率和电感上的无功功率最小,更不能保证变换器整体无功功率

最小。文献[12-14]提出了基于傅里叶级数求和的建模方法,建立变换器的复功率模型,然而该文献只对变换器的软开关特性和直流侧电压完全匹配时的功率特性进行了分析,并没有考虑当变换器直流侧电压不匹配时,超前桥、滞后桥无功功率分布较大且分布不均的问题。当变换器工作在上述状态下时,以降低变换器超前桥无功功率为优化目标,无法全面反应变换的无功功率特性,存在一定的局限性。

针对以上研究不足,本文在建立移相控制下 DAB 变换器统一的功率模型的基础上,对工作在电压变换和电压平衡情况下使用的传统 SPS 的变换器超前桥、滞后桥、电感上的功率特性进行综合对比与分析。在此基础上,提出以电感上无功功率这一更全面反映变换器无功功率特性的变量作为优化指标,针对电压变化状态下的 DAB 变换器,在高压侧使用内移相角的 DPS,从而对整体无功功率特性进行优化。通过以变换器工作在降压状态为例进行试验验证,证明了该控制方式既能减小变换器电感的无功功率,又能增加变换器的灵活调节特性,进而提高了变换器的整体效率。

1 DAB 变换器功率模型

图 1 为典型的双有源桥 DC-DC 变换器拓扑结构。主要由 2 个对称的 H 桥, HB_1 、 HB_2 和中间高频隔离变压器 T 、辅助电感 L_s 共同组成。图 1 中, U_{in} 为输入侧直流电压, U_{out} 为输出侧直流电压, C_1 、 C_2 为输入侧电容, C_3 、 C_4 为输出侧电容, R_L 为辅助漏感等效电阻, i_L 为漏感电流, U_{ab} 和 U_{cd} 分别为变压器一次侧和二次侧的交流方波电压。将超前桥 HB_1 中 HB_{11} 桥臂的电压作为参考的零相位, α_1 为 HB_{12} 桥臂与 HB_{11} 桥臂移相角, α_2 为 HB_{21} 桥臂与 HB_{11} 桥臂移相角, α_3 为 HB_{22} 桥臂与 HB_{11} 桥臂移相角。其中,超前桥 HB_1 的内移相

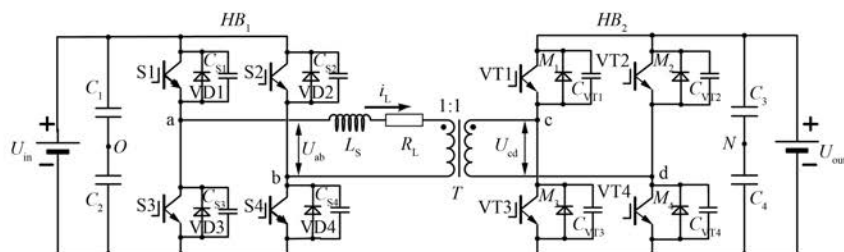


图 1 双有源桥直流变换器拓扑结构图

角用 α_1 表示,超前桥 HB_1 与滞后桥 HB_2 之间的外移相角用 $\alpha_2 - \alpha_1$ 表示,滞后桥 HB_2 的内移相角用 $\alpha_3 - \alpha_2$ 表示,具体如图 2 所示。

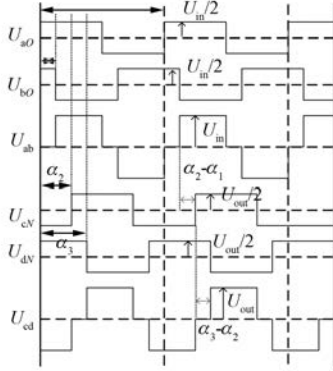


图2 波形叠加原理图

其中,超前桥 HB_1 的 a、b 相对于 O 点的电压是 $U_{ao}(t)$ 、 $U_{bo}(t)$;滞后桥 HB_2 的 c、d 相对于 N 点的电压是 $U_{cn}(t)$ 、 $U_{dn}(t)$;超前桥 HB_1 与滞后桥 HB_2 交流侧正负对称方波电压分别是 $U_{ab}(t)$ 、 $U_{cd}(t)$,通过傅里叶级数建模可得电压相量表达式:

$$\begin{cases} \dot{U}_{ab(2n+1)} = \frac{\sqrt{2}U_{in}}{\pi(2n+1)} [\angle 0 + \angle(2n+1)(-\alpha_1)] \\ \dot{U}_{cd(2n+1)} = \frac{\sqrt{2}U_{out}}{\pi(2n+1)} \cdot [\angle(2n+1)(-\alpha_2) + \angle(2n+1)(-\alpha_3)] \end{cases} \quad (1)$$

当忽略高频变压器电感的阻抗,即 $R_L=0$,漏感电流为 $I_L(t)$,可得漏电感上的电流相量表达式:

$$\dot{I}_{L(2n+1)} = \frac{(\dot{U}_{ab(2n+1)} - \dot{U}_{cd(2n+1)})}{\pi(2n+1)^2 j\omega L_s} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得 DAB 变换器的复功率数学模型:

DAB 变换器超前桥功率表达式为

$$\bar{S}_{ab(2n+1)} = \dot{U}_{ab(2n+1)}^* \dot{I}_{L(2n+1)} = P_{ab(2n+1)} + jQ_{ab(2n+1)} \quad (3)$$

DAB 变换器滞后桥功率表达式为

$$\bar{S}_{cd(2n+1)} = \dot{U}_{cd(2n+1)}^* \dot{I}_{L(2n+1)} = P_{cd(2n+1)} + jQ_{cd(2n+1)} \quad (4)$$

DAB 变换器漏电感功率表达式为

$$Q_{L(2n+1)} = IM(\dot{U}_{L(2n+1)}^* \dot{I}_{L(2n+1)}) = j(Q_{ab(2n+1)} - Q_{cd(2n+1)}) \quad (5)$$

式中: $\dot{U}_{ab(2n+1)}^*$ 为 $\dot{U}_{ab(2n+1)}$ 的共轭复数; $\dot{U}_{cd(2n+1)}^*$ 为 $\dot{U}_{cd(2n+1)}$ 的共轭复数; $\dot{U}_{L(2n+1)}^*$ 为 $\dot{U}_{L(2n+1)}$ 的共轭复数;超前桥实部 $P_{ab(2n+1)}$ 为 DAB 变换器运行时,超前桥输入有功功率,虚部 $Q_{ab(2n+1)}$ 为超前桥无功功率;同理,滞后桥实部 $P_{cd(2n+1)}$ 为输出有功功率,虚部 $Q_{cd(2n+1)}$ 为滞后桥无功功率; $Q_{L(2n+1)}$ 为漏电感上的无功功率。

2 传统单移相控制率特性分析

设定 $U_{out} = kU_{in}$ (k 为 DAB 变换器升、降压系数),由式(3)~式(5)可得,当 $k=1$ 时移相控制下的 DAB 传输最大有功功率为 $\frac{8U_{in}^2}{\omega L_s \pi^2}$,并以此为标么化基准,当 $\alpha_1=0$ 且 $\alpha_2=\alpha_3$ 时,可得到传统 SPS 下 DAB 变换器功率标么化数学模型:

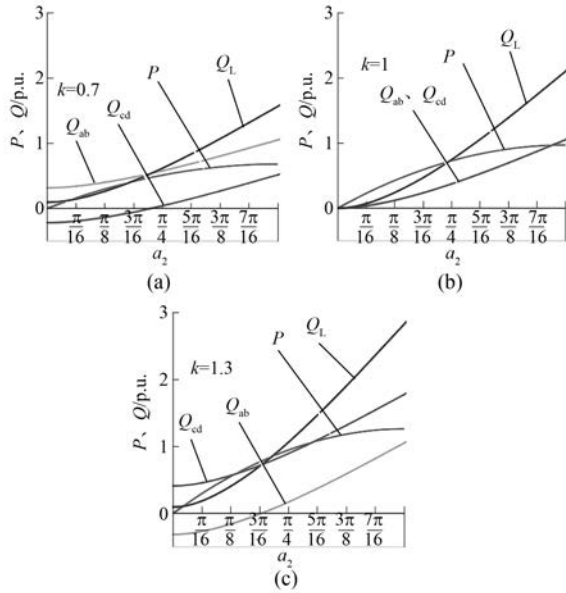
$$\begin{cases} \bar{P}_{ab_SPS} = \bar{P}_{cd_SPS} = k \sum_{n=0}^N \frac{\sin(2n+1)\alpha_2}{(2n+1)^3} \\ \bar{Q}_{ab_SPS} = k \sum_{n=0}^N \frac{\frac{1}{k} - \cos(2n+1)\alpha_2}{(2n+1)^3} \\ \bar{Q}_{cd_SPS} = k \sum_{n=0}^N \frac{\cos(2n+1)\alpha_2 - k}{(2n+1)^3} \\ \bar{Q}_{L_SPS} = \bar{Q}_{ab_SPS} - \bar{Q}_{cd_SPS} = k \sum_{n=0}^N \frac{\frac{1}{k} + k - 2\cos(2n+1)\alpha_2}{(2n+1)^3} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\bar{P}_{ab_SPS}$ 为超前桥输入的有功功率; $\bar{Q}_{ab_SPS}$ 超前桥无功功率; $\bar{P}_{cd_SPS}$ 为滞后桥输出的有功功率; $\bar{Q}_{cd_SPS}$ 滞后桥无功功率; $\bar{Q}_{L_SPS}$ 为漏电感上的无功功率。

根据式(6)可得,DAB 变换器在传统 SPS 下传输有功功率,超前桥、滞后桥、电感上的无功功率与 k 和外移相角 α_2 的关系,如图 3 所示。

当 DAB 变换器工作在直流侧电压不匹配状态时,变换器超前桥、滞后桥、电感上无功功率的分布情况发生改变:

(1) 变换器工作在降压状态(即 $k<1$),从图 3(a)可以看出,在传输功率较小时,超前桥同时

图3 不同 k 值功率关系图

为电感和滞后桥提供无功功率,随着传输功率的增加超前桥向滞后桥提供的无功功率逐渐减小直到零,随后超前桥和滞后桥同时向电感提供无功功率;

(2) 变换器工作在电压匹配状态(即 $k=1$),从图 3(b)可以看出,超前桥和滞后桥同时为电感提供无功功率,并且超前桥和滞后桥提供的无功功率相等且为电感上无功功率的 1/2;

(3) DAB 工作在升压状态(即 $k>1$),从图 3(c)可以看出,在传输功率较小时,滞后桥同时为漏电感和超前桥提供无功功率,随着传输功率的

增加滞后桥向超前桥提供的无功功率逐渐减小直到零,随后滞后桥和超前桥同时为漏电感提供无功功率。

并且无论变换器工作在什么情况下,在传输相同的有功功率时电感上的无功功率总是大于零,超前桥和滞后桥上的无功功率会随着变换器电压的不匹配程度变换而变换。因此,只将超前桥或者滞后桥的无功功率作为评价变换器无功功率特性的指标,并不能全面体现变换器的无功功率特性,并且由以上结果可以得出,电感上的无功功率是连接超前桥、滞后桥无功功率的纽带。因此,本文提出以电感上无功功率这一更全面反应变换器无功功率特性的变量作为评价指标,来优化变换器整体无功功率特性。

3 双移相控制功率特性

传统 SPS 方式仅有一个控制自由度,无法灵活调节变换器的功率,同时也无法对工作在升、降压状态下变换器的功率特性进行优化。为了使 DAB 变换器工作时的功率特性更加灵活,本文提出一种 DPS 策略,仅在电压等级高的一侧引入内移相角的 DPS 方式。通过引入内移相角调节变换器 $U_{ab}(t)$ 或者 $U_{cd}(t)$ 等效成的各不同频率正弦电压幅值的大小,优化变换器的功率特性。

3.1 DPS 控制功率特性

在 DAB 变换器超前桥引入内移相,即 $k<1$, $\alpha_1 \neq 0$ 且 $\alpha_2 = \alpha_3$,由式(3)~式(5)可得 DPS 控制下 DAB 变换器功率标么化数学模型:

$$\begin{cases} \bar{P}_{ab_DPS} = \bar{P}_{cd_DPS} = \frac{k}{2} \sum_{n=0}^N \frac{\sin(2n+1)\alpha_2 + \sin(2n+1)(\alpha_2 - \alpha_1)}{(2n+1)^3} \\ \bar{Q}_{ab_DPS} = \frac{k}{2} \sum_{n=0}^N \frac{\frac{1}{k}[1 + \cos(2n+1)\alpha_1] - [\cos(2n+1)\alpha_2 + \cos(2n+1)(\alpha_2 - \alpha_1)]}{(2n+1)^3} \\ \bar{Q}_{cd_DPS} = \frac{k}{2} \sum_{n=0}^N \frac{\cos(2n+1)\alpha_2 + \cos(2n+1)(\alpha_2 - \alpha_1) - 2k}{(2n+1)^3} \\ \bar{Q}_{L_DPS} = \bar{Q}_{ab_DPS} - \bar{Q}_{cd_DPS} = \\ \frac{k}{2} \left\{ \sum_{n=0}^N \frac{2k + \frac{1}{k}[1 + \cos(2n+1)\alpha_1] - 2[\cos(2n+1)\alpha_2 + \cos(2n+1)(\alpha_2 - \alpha_1)]}{(2n+1)^3} \right\} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\bar{P}_{ab_DPS}$ 为超前桥输入的有功功率; $\bar{Q}_{ab_DPS}$ 超前桥无功功率; $\bar{P}_{cd_DPS}$ 为滞后桥输出的有功功率;

$\bar{Q}_{cd_DPS}$ 滞后桥无功功率; $\bar{Q}_{L_DPS}$ 为漏电感上的无功功率。

根据式(7)可得,当 $k=0.7$ 时 DAB 变换器在 DPS 下传输有功功率,超前桥、滞后桥、电感上的无功功率与移相角度 α_1 、 α_2 之间的关系,如图 4 所示。

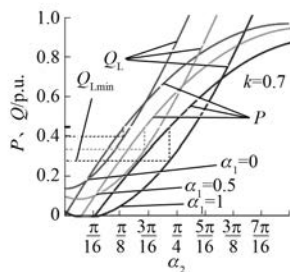


图 4 $k=0.7$ 时功率关系

通过图 4 可知,变换器直流侧超前桥电压高于滞后桥电压时,以在超前桥内引入内移相角 $\alpha_1=0.5$ 、 $\alpha_1=1$ 为例进行对比分析,在传输相同有功功率情况下,通过在直流电压较高侧引入内移相角可以有效地减小 DAB 变换器电感上的无功功率。

当 DAB 变换器工作在降压状态时(即 $k<1$),如图 5(a)所示,随着内移相角 α_1 的变化电感上的无功功率开始只由超前桥提供(超前桥同时给滞后桥提供无功),随着传输功率的增加电感上的无功功率逐渐由超前桥和滞后桥同时提供,也存在超前桥和滞后桥为电感提供无功功率最小的情况,此时可以得到电感上无功功率的最小值。

当 DAB 变换器工作在电压匹配状态时(即 $k=1$),如图 5(b)所示,随着内移相角 α_1 的变化电感上的无功功率由超前桥提供,同时超前桥给滞后桥提供无功功率。

当 DAB 变换器工作在升压状态时(即 $k>1$),如图 5(c)所示,随着内移相角 α_1 的变化电感上的无功功率由滞后桥提供,同时滞后桥给超前桥提供无功功率,这时变换器的电感上的无功功率会变得更大,说明当变换器工作在升压状态时,在超前桥引入内移相角反而会进一步增加变换器整体的无功功率。从而说明了只有在电压高的一侧引入内移相角才是合理有效的。

3.2 优化控制策略

由于 DAB 变换器工作在升压状态与降压状态分析方法一致,为了使电感上的无功功率最小,以 DAB 变换器工作在降压状态($k=0.7$)为例进

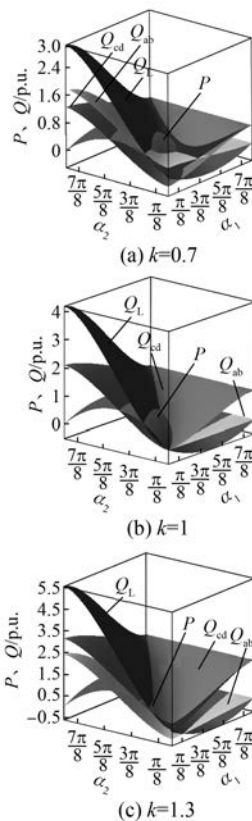


图 5 功率分布图

行电感无功功率优化分析。

在传输相同有功功率 P 时,以基波传输功率为参考进行近似分析,根据式(7)可得 α_1 、 α_2 与 $\bar{P}_{ab_DPS}$ 的关系式:

$$\alpha_1 = \alpha_2 + \arcsin\left(\frac{k\sin(\alpha_2) - 2\bar{P}_{ab_DPS}}{k}\right) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)可得在传输相同有功功率时,超前桥,滞后桥,电感上的无功功率功率随着引入内移相角度之间的关系如图 6 所示。

当 DAB 变换器工作在升、降压状态时,采用在直流电压较高一侧引入内移相角的方式,在传输相同有功功率的情况下,可以降低电感上的无功功率,得到使变换器电感上无功功率最小的最优工作点。

4 试验分析

以 TI 公司生产的 DSP 芯片 TMS320F28335 为控制系统,搭建 DAB 变换器系统试验平台,主要电路参数为:外串电感与高频变压器漏感之和

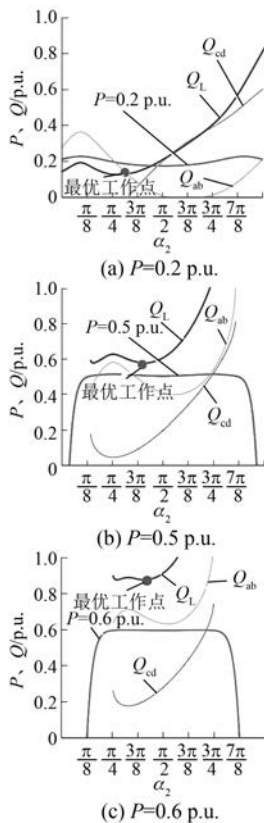


图6 传输功率为 P 时 DAB 变换器无功分布

$L_s = 50 \mu\text{H}$, 直流侧电容 $C = 2\,200 \mu\text{F}$, 高频变压器变比 $T = 1:1$, 开关频率 $f_s = 20 \text{ kHz}$ 。试验平台如图 7 所示。

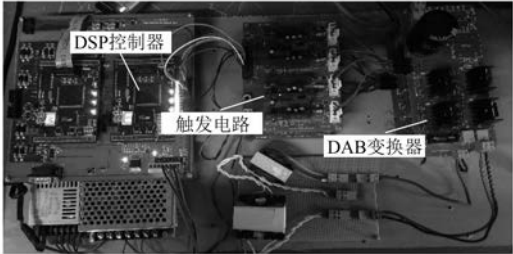


图7 试验样机

该试验通过调节 α_2 进而调节外移相角,使得输出电压稳定到给定值;通过调节 α_1 使得内移相角匹配 DAB 变换器中间交流环节电压。试验控制结构框图如图 8 所示。其中, U_{ref} 为 DAB 变换器直流输出侧电压给定; f 为移相角控制函数。

输入电压为 200 V, 输出电压为 140 V, 变换器工作在降压状态时, 传输功率为 1.5 kW。图 9 为 DAB 变换器工作在降压状态时, 引入不同内移

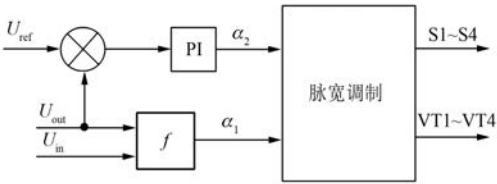


图8 控制框图

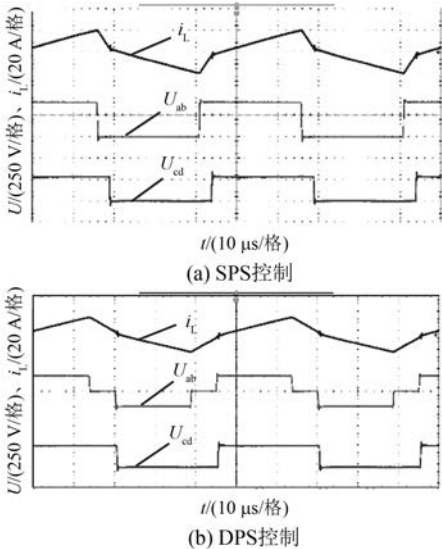


图9 试验波形图

相角度情况下 DAB 变换器交流环节的试验波形图。

超前桥、滞后桥、电感上的无功功率随内移相角的变化情况如图 10 所示。由试验结果可以得出, 在电压输入输出电压不匹配时, 传输相同的功率, 在高电压一侧引入内移相, 可以有效减小变换器电感上的无功功率。

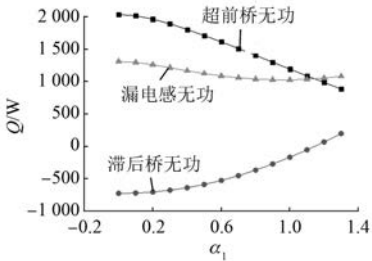


图10 无功功率变化图

5 结 语

本文描述了 DAB 变换器的传输功率、超前桥无功功率、滞后桥无功功率、电感上无功功率之间

的功率关系。提出以电感上无功功率作为变换器整体无功功率特性的优化评价指标,优化了变换器整体无功功率特性。针对工作在升压、降压状态下的 DAB 变换器,提出在高压侧引入内移相角的 DPS 方式,有效地降低了变换器的整体无功功率,提高了变换器的效率。

【参考文献】

- [1] XU Y, ZHANG J, WANG W, et al. Energy router: architectures and functionalities toward energy internet[C]//2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011.
- [2] GU C, ZHENG Z, LI Y. Power characteristics of isolation units in a novel power electronic transformer (PET) for locomotive traction applications[C]//2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014.
- [3] 王成山,王丹,周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化,2015,39(9): 1.
- [4] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1): 2.
- [5] DE DONCKER R W A A, DIVAN D M, KHERALUWALA M H. 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.
- [6] ALONSO A R, SEBASTIAN J, LAMAR D G, et al. An overall study of a dual active bridge for bidirectional DC/DC conversion[C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010.
- [7] 赵彪,于庆广,孙伟欣. 双重移相控制的双向全桥

DC-DC 变换器及其功率回流特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 43.

- [8] OGGIER G, GARCIA G O, OLIVA A R. Modulation strategy to operate the dual active bridge DC-DC converter under soft switching in the whole operating range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1228.
- [9] BAI H, MI C. Eliminate reactive power and increase system efficiency of isolated bidirectional dual-active-bridge DC-DC converters using novel dual-phase-shift control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 2905.
- [10] BAI H, NIE Z, MI C C. Experimental comparison of traditional phase-shift, dual-phase-shift, and model-based control of isolated bidirectional DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(6): 1444.
- [11] 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.
- [12] SEGARAN D, MCGRATH B P, HOLMES D G. Adaptive dynamic control of a bi-directional DC-DC converter [C] // 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010.
- [13] RIEDEL J, HOLMES D J, TEIXEIRA C, et al. Harmonic-based determination of soft switching boundaries for 3-level modulated single-phase dual active bridge converters [C] // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015.
- [14] 王聪,沙广林,程红,等. 移相 PWM 控制的双有源桥 DC-DC 变换器统一相量分析法[C]//2015 中国电工技术学术年会, 2015.

(上接第 56 页)

【参考文献】

- [1] 张小红. 基于光电伺服系统的复合控制仿真分析[J]. 现代导航, 2016, 7(3): 219.
- [2] 官伯林. 一种雷达伺服系统的复合控制策略[J]. 科技视界, 2016(12): 3.
- [3] 郭绪猛. 雷达转台神经网络控制仿真研究[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(5): 565.
- [4] 文云,刘启辉,董琦昕. 光电跟踪系统前馈速度求

解方法[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(6): 29.

- [5] 郭光荣,薛斌,张云龙,等. 复合控制在高速高精度跟踪控制系统中的应用[J]. 兵工自动化, 2006(10): 60.
- [6] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2001: 105-107, 261-265.
- [7] 丁求启,陶敏,张桂平. 船载雷达天线复合控制技术[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(15): 4197.