



某型出口机车双向储能变流器控制策略

陈哲^{1,2}, 吴兴超³, 袁芳³, 曾明高³

(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001;

3. 株洲中车时代软件技术有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 双有源桥式 (dual active bridge, DAB) 变流器目前广泛应用于直流微网、燃料电池、电动汽车等领域, 其具有功率密度高、能量双向流动、电气隔离、易于实现软开关等优点, 但目前轨道交通变流器领域应用较少。针对轨道交通领域高压大功率、模块化应用场景的特殊需求, 文章创新性地设计了一种基于单移相控制的 ISOP-DAB (input-series output-parallel, ISOP) 双向储能变流器, 将其应用于某型出口机车项目, 能够实现动力电池与牵引直流母线之间的能量双向流动, 并针对性地解决了 ISOP-DAB 的输入侧均压与输出侧均流的问题, 系统性地分析了在此控制策略下, 双向储能变流器的基本工作原理和功率传输特性。通过引入动态解耦控制算法, 实现了输出电压稳定与模块均衡的双目标协同控制。最后, 通过 MATLAB 搭建仿真模型进行仿真试验, 并且完成了包含充放电切换、动态负载等实物整柜型式试验, 验证了该控制策略的有效性与可行性, 为轨道交通领域双向储能变流器的模块化设计提供了理论依据和工程实践参考。

关键词: 储能变流器; 双有源桥; 单移相; 动力电池; 仿真

中图分类号: U264.3⁺7

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)03-0104-09

0 引言

20 世纪 90 年代初, 双有源桥 (dual active bridge, DAB) DC-DC 变换器由 Doncker 提出, 相较于其他双向隔离型 DC-DC 变换器, DAB 变换器通过电感传递能量, 一般通过移相控制, 控制简单, 自由度高, 优化潜力大, 功率范围宽, 易于实现软开关和高功率密度, 在高压大功率场合实用性高。因此在直流微网^[1]、燃料电池^[2]、电动汽车^[3-4]等领域得到了广泛应用。

DAB 变换器一般采用移相控制, 单移相 (single-phase-shift, SPS) 控制仅利用 1 个外移相比实现对 DAB 变换器传输功率大小和流向的控制, 具有控制简单、易实现的优点^[5]。但是, 当变换器的输入和输出电压不匹配时, SPS 控制 DAB 变换器会产生较大的回流功率, 效率降低^[6]。通过在 SPS 控制中引入桥内移相比, 相关学者提出了一系列 DAB 变换器的多自由度控制方法^[7]。

扩展移相 (extended-phase-shift, EPS) 控制通过控制 DAB 变换器两个 H 桥间的外移相比和一次侧 H 桥内的内移相比两个控制自由度, 实现对变换器回流功率或电流应力的优化, 有效地提高了变换器效率^[8]。三重移相 (triple-phase-shift, TPS) 控制通过控制 3 个自由度 (DAB 变换器 H 桥间的外移相比和 2 个 H 桥内的内移相比), 实现对 DAB 变换器效率等稳态性能的综合提升, 但是 TPS 控制 DAB 变换器存在开关模式复杂, 控制难度大与复杂度大的缺点^[9-10]。

本文在单移相 SPS 控制的基础上, 设计一种针对 ISOP-DAB 变换器的均衡控制策略, 在确保输出电压稳定的同时, 实现子模块之间的功率均衡, 具有电气隔离、能量双向流动的优点。

本文将首先分析 DAB 变换器的基本工作原理, 并通过对变换器的模态分析, 推导一个开关周期内的电感电流表达式以及传输功率的表达式; 然后对 ISOP-DAB 的均衡特性进行分析, 提出一种均衡控制方法;

通信作者: 吴兴超, 男, 硕士, 主要从事大功率 DC/DC 与 DC/AC 控制方面的研究; E-mail: wuxc31@csrzc.com

引用格式: 陈哲, 吴兴超, 袁芳, 等. 某型出口机车双向储能变流器控制策略[J]. 机车电传动, 2025(3): 104-112. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.013.

Citation: CHEN Zhe, WU Xingchao, YUAN Fang, et al. Research on control strategy of bidirectional energy storage converter for a certain type of export locomotive[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 104-112. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.013.

最后搭建 ISOP-DAB 的仿真模型和实物模型, 通过仿真模拟和实物试验验证控制策略的可行性和有效性。

1 ISOP-DAB 变换器原理分析

1.1 DAB 变换器的基本工作原理

移相控制 DAB 变流器的主要波形图如图 1 所示。

某型出口机车项目的双向储能变流器主电路拓扑如图 2 所示, 该双向储能变流器由 2 个高压侧串联低压侧并联的 DAB 变换器共同组成一个 ISOP-DAB 双向储能变流器, 其低压侧连接动力电池, 高压侧连接牵引直流母线。正常工况下, 列车制动能量可通过双向储能变流器为动力蓄电池充电, 从而将部分制动能量回收至动力电池, 然后在列车启动/加速/爬坡阶段时, 动力电池可通过双向储能变流器放电, 将动力电池输出的 DC 645~739 V 电压转换成 DC 1 700 V 牵引直流母线电压, 为牵引电机提供峰值功率, 如此可以实现制动能量的回收和再利用, 也可使牵引直线母线电压稳定。

单个 DAB 变流器模块的拓扑如图 3(a)所示, 由两个 H 全桥以及一个高频变压器组成, 变压器的一次侧、二次侧匝数比为 $n:1$, U_1 与 U_2 分别为变换器的输入输出电压, U_{h1} 与 U_{h2} 分别为两个 H 桥的输出电压, i_L 为电感 L_s 的电流, i_1 与 i_2 为两个 H 桥的输出电流。 C_1 、 C_2 分别为输入与输出侧的滤波电容。 $v_{p1} \sim v_{p8}$ 为开关管 $S_1 \sim S_8$ 的

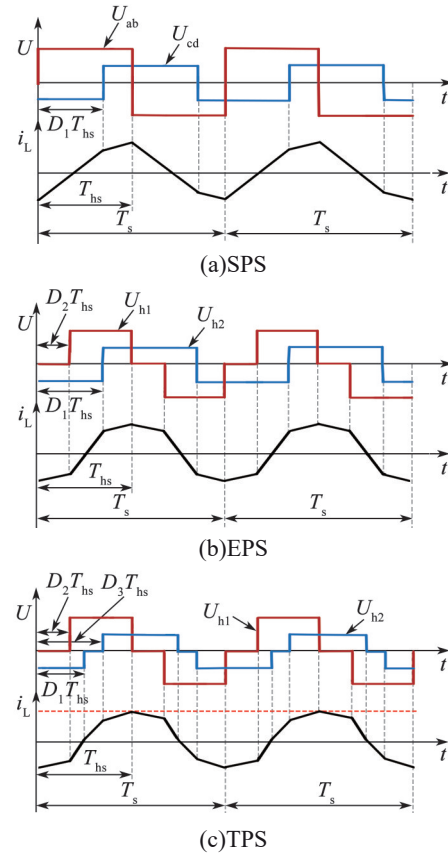


图 1 移相控制 DAB 变流器的主要波形图

Fig. 1 Main waveforms of DAB converter based on phase shift control

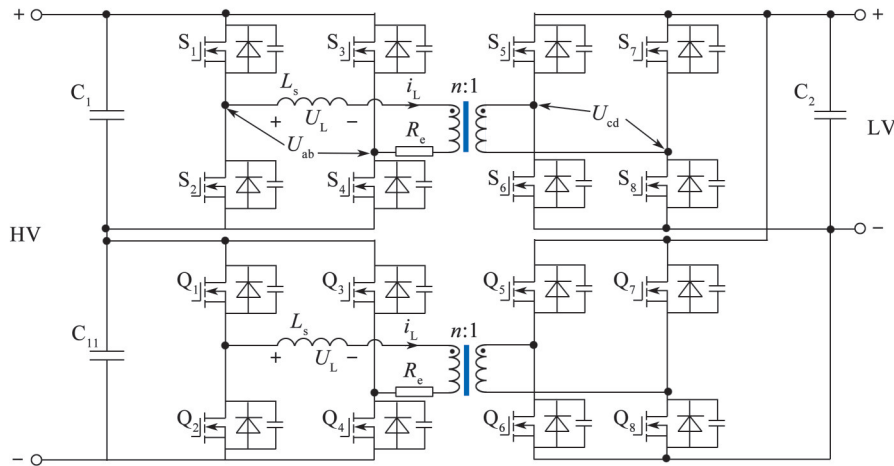


图 2 ISOP-DAB 双向变流器电路拓扑图

Fig. 2 Circuit topology of ISOP-DAB bi-directional converter

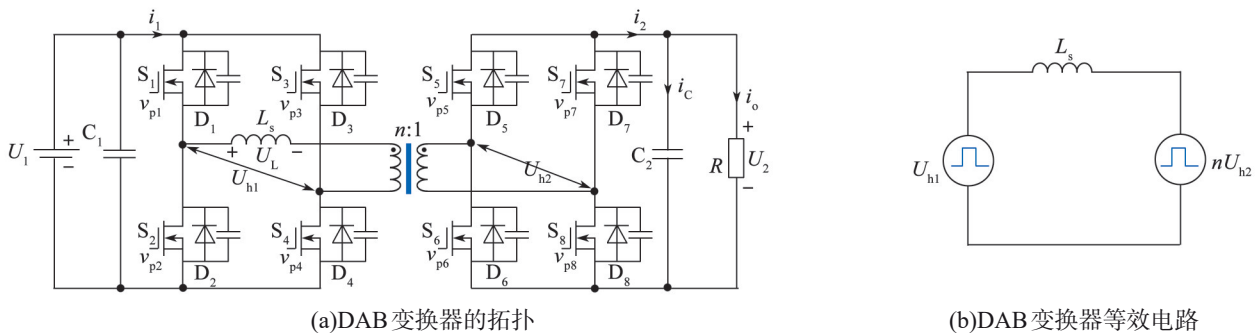


图 3 DAB 变换器拓扑及其等效电路

Fig. 3 Topology and equivalent circuit of DAB converter

控制信号, L_s 为辅助电感, 其大小等于外加电感与变压器的漏感之和, U_L 为辅助电感 L_s 的电压。 R 为负载电阻, i_o 为输出电流, i_2 为二次侧 H 桥的输出电流, i_c 为电容 C_2 的电流。

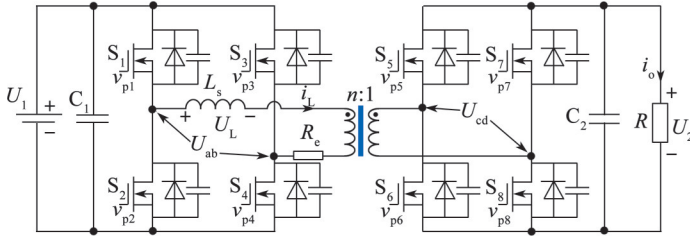
定义 DAB 变换器的理想开关函数为:

$$S_a = \begin{cases} 1, & S_1, S_4 \text{ 导通}, S_2, S_3 \text{ 关断} \\ 0, & S_1, S_3 \text{ 导通或 } S_2, S_4 \text{ 导通} \\ -1, & S_2, S_3 \text{ 导通}, S_1, S_4 \text{ 关断} \end{cases} \quad (1)$$

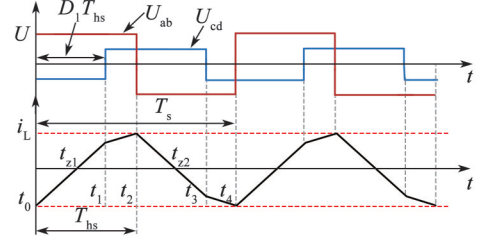
$$S_b = \begin{cases} 1, & S_5, S_8 \text{ 导通}, S_6, S_7 \text{ 关断} \\ 0, & S_5, S_7 \text{ 导通或 } S_6, S_8 \text{ 导通} \\ -1, & S_6, S_7 \text{ 导通}, S_5, S_8 \text{ 关断} \end{cases}$$

两个 H 桥的输出电压 U_{h1} 、 U_{h2} 以及电感电压 U_L 可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} U_{h1} &= S_a U_1 \\ U_{h2} &= S_b U_2 \\ U_L &= S_a U_1 - n S_b U_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$



(a) DAB变换器拓扑



(b) 波形

图4 单移相控制DAB变换器主要波形图

Fig. 4 Main waveforms of DAB converter based on single phase shift control

$t_0 \sim t_4$ 的完整周期内共包括6个工作模式, 由于电感电流波形具有对称性, 前3个工作模式和后3个工作模式加在电感两端的电压大小相等、极性相反, 因此本文只分析前3个工作模式, 如图5(a)~图5(c)所示。

工作模式1: 在 $[t_0, t_{z1})$ 阶段, 变换器的电流流向如图5(a)所示。在 t_0 时刻之前, 一次侧开关管 S_2 、 S_3 开通, 此时电感电流为负值, 一次侧电流通过开关管 S_2 和 S_3 形成闭合回路, 二次侧电流则通过二极管 D_6 、 D_7 续流。在 t_0 时刻, 开关管 S_1 和 S_4 开通, S_2 和 S_3 关断, 此时电感电流仍然为负值, 所以一次侧电流经过二极管 D_1 和 D_4 续流, 二次侧二极管仍然通过 D_6 和 D_7 续流, 电感电流流向一次侧和二次侧, 电感电流在不断减小, 该阶段一次侧 H 桥输出电压 U_{ab} 为 U_1 , 二次侧 H 桥输出电压 U_{cd} 为 $-U_2$, 加在电感两端的电压为 $U_1 + nU_2$, 因此电感电流可以表示为

$$i_L(t) = i_L(t_0) + \frac{U_1 + nU_2}{L_s}(t - t_0) \quad (3)$$

工作模式2: 在 $[t_{z1}, t_1)$ 阶段, 变换器的电流流向如图5(b)所示。 t_{z1} 时刻是电感电流的过零点, 电感电流由负值变为正值, 由于开关管 S_1 和 S_4 在上一个阶段已经导通, 一次侧电流从二极管 D_1 和 D_4 换流至开关管 S_1 和

在图3(b)中, 忽略损耗的影响, 可以将DAB变换器等效为两个交流电压源与辅助电感 L_s 相连的电路模型。从该电路模型可以看出, 可以通过控制 U_{h1} 与 U_{h2} 两个电压源的占空比以及相位差来控制传输功率的大小和方向。

1.2 DAB变换器的基本工作特性

1.2.1 工作模式分析

下面以图4所示的单移相控制为例对DAB变换的工作模式进行分析, 由于DAB变换器一次侧、二次侧具有对称性, 本文只考虑 $U_1 \geq nU_2$ 的情况, $U_1 < nU_2$ 的情况与之分析方法类似, 在分析变换器的工作模式之前, 先作如下假设: ①变换器已经达到稳态; ②忽略死区效应的影响, 认为开关管导通和关断过程是瞬间完成的并且忽略开关管的结电容; ③认为高频隔离变压器为理想变压器。根据图4的工作波形图可知, 在每个开关周期中, 变换器的工作过程分6个模式。

S_4 , 二次侧开关管 S_6 和 S_7 也已经导通, 二次侧电流从二极管 D_6 和 D_7 换流至开关管 S_6 和 S_7 , 能量从一次侧和二次侧传输至电感, 电感电流过零后开始正向增大, 将能量储存起来。该阶段一次侧 H 桥输出电压 U_{ab} 为 U_1 , 二次侧 H 桥输出电压 U_{cd} 为 $-U_2$, 相当于加在电感两端的电压仍为 $U_1 + nU_2$, 因此电感电流可以表示为

$$i_L(t) = i_L(t_{z1}) + \frac{U_1 + nU_2}{L_s}(t - t_{z1}) \quad (4)$$

工作模式3: 在 $[t_1, t_2)$ 阶段, 变换器的电流流向如图5(c)所示。在 t_1 时刻, 二次侧开关管 S_6 和 S_7 关断, S_5 和 S_8 导通, 由于此时的电感电流已经为正值, 二次侧电流将从开关管 S_6 和 S_7 换流至二极管 D_5 和 D_8 续流, 一次侧电路状态并未发生改变, 与工作模式2相同, 一次侧的能量向电感和二次侧传输, 电感电流继续正向增大, 该阶段一次侧 H 桥输出电压 U_{ab} 为 U_1 , 二次侧 H 桥输出电压 U_{cd} 为 U_2 , 加在电感两端的电压为 $U_1 - nU_2$, 因此电感电流可以表示为

$$i_L(t) = i_L(t_1) + \frac{U_1 - nU_2}{L_s}(t - t_1) \quad (5)$$

1.2.2 传输功率特性

结合式(3)~式(5), 可以得到一个开关周期内电感

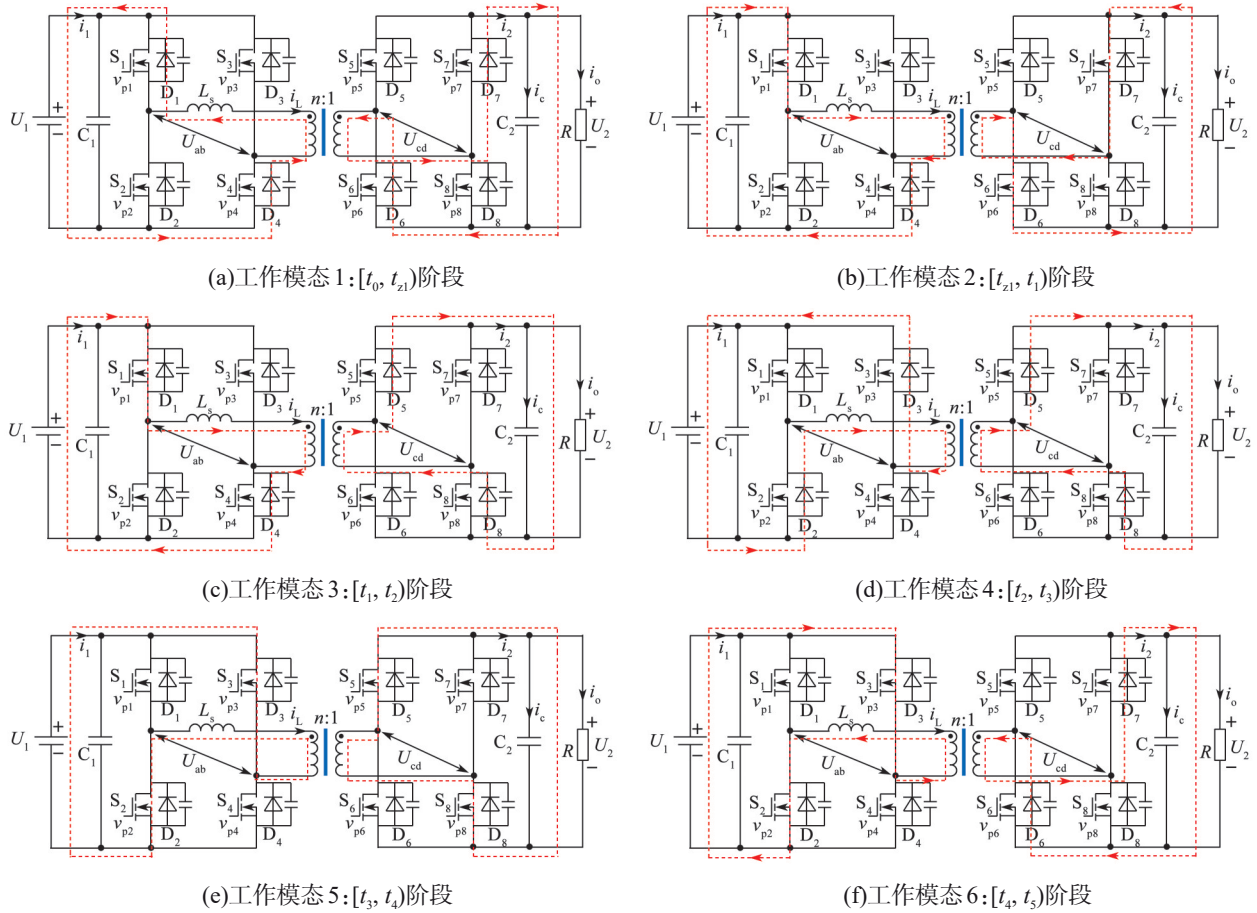


图5 DAB变换器的6个基本工作模式图

Fig. 5 Diagram of six basic operating modes for DAB converter

电流的表达式为

$$i_L(t) = \begin{cases} i_L(t_0) + \frac{U_1 + nU_2}{L_s}(t - t_0), & t \in [t_0, t_1] \\ i_L(t_1) + \frac{U_1 - nU_2}{L_s}(t - t_1), & t \in [t_1, t_2] \\ i_L(t_2) + \frac{-U_1 - nU_2}{L_s}(t - t_2), & t \in [t_2, t_3] \\ i_L(t_3) + \frac{-U_1 + nU_2}{L_s}(t - t_3), & t \in [t_3, t_4] \end{cases} \quad (6)$$

式中, 设 $t_0=0$ 为零时刻, 则一个开关周期的各个时刻可以表示为: $t_1=D_1T_{hs}$, $t_2=T_{hs}$, D_1 为外移相角。由于电路达到稳态后, 电感电流在一个开关周期的平均值为 0, 因此电感电流具有对称性, 可以得出: $i_L(t_2)=-i_L(t_0)$, $i_L(t_3)=-i_L(t_1)$ 。定义为输入输出电压传输比为 $k=U_1/(nU_2) > 1$, 因此可以得出一个开关周期内各个时刻的电感电流表达式为:

$$\left. \begin{aligned} i_L(t_0) &= \frac{nU_2}{4f_s L_s} (1 - 2D_1 - k) \\ i_L(t_1) &= \frac{nU_2}{4f_s L_s} [1 - k(1 - 2D_1)] \\ i_L(t_2) &= -\frac{nU_2}{4f_s L_s} (1 - 2D_1 - k) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据式(7)可以得出, 单移相控制 DAB 变换器在一个开关周期内的传输功率可以表示为

$$P_o = \frac{1}{T_s} \int_{t_n}^{t_n+T_s} U_{h1}(t) i_L(t) dt = \frac{nU_1 U_2}{2f_s L_s} D_1 (1 - D_1) \quad (8)$$

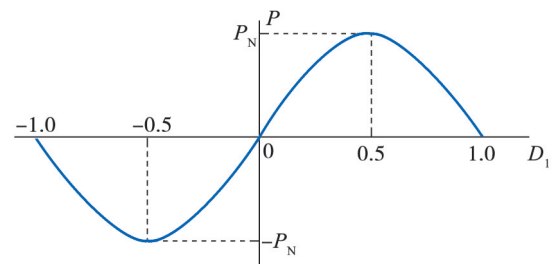
为了便于后续分析, 取外移相比 $D_1=0.5$ 时的传输功率为功率基准值, 计算公式如下:

$$P_N = \frac{nU_1 U_2}{8f_s L_s} \quad (9)$$

则标么化后的传输功率可以表示为

$$p = \frac{P_o}{P_N} = 4D_1(1 - D_1) \quad (10)$$

根据式(10)可以绘制出外移相比 D_1 与传输功率 P 的关系曲线, 如图6所示。由图6可知, 外移相比 D_1 的正负决定了传输功率 P 是正向的还是反向的, 当外移相比 $D_1 \in [0, 0.5]$ 时, 传输功率 P 为关于移相比 D_1 的单调递增函数, 即移相比越大, 对应的传输功率 P 越大。

图6 传输功率 P 与外移相比 D_1 的关系曲线Fig. 6 Correlation curve of transmission power (P) versus outward phase shift ratio (D_1)

2 ISOP-DAB 变换器控制策略分析

2.1 ISOP-DAB 均衡特性理论分析

为了实现高压大功率传输的要求，通常将多个

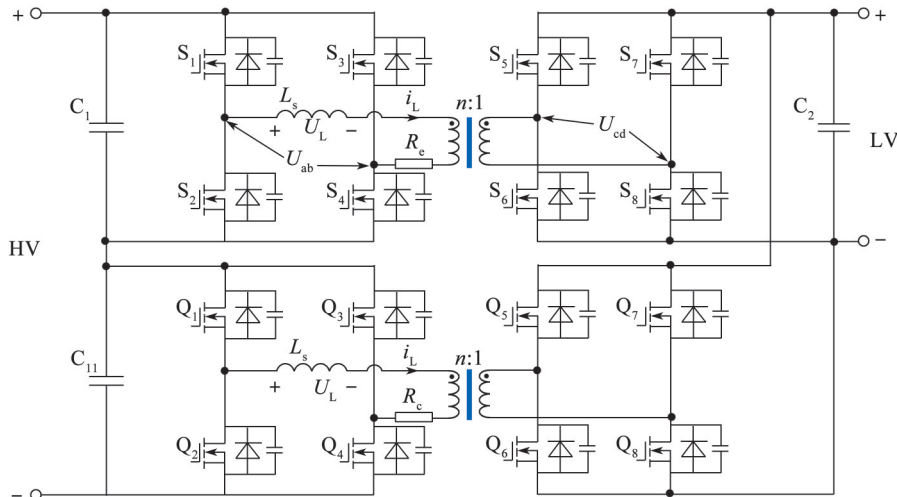


图7 两模块ISOP-DAB变换器主电路拓扑图

Fig. 7 Main circuit topology of two-module ISOP-DAB converter

此类ISOP-DAB变换器各模块之间的功率均衡是变换器能正常工作的基本前提，否则就可能产生某个模块过压或过流等问题，造成器件损毁，甚至使得整个系统失稳，因此关于各模块功率均衡的研究至关重要。针对ISOP结构，各模块对应的输入电流、输出电压恒相等，因此需要解决的问题就是输入均压与输出均流，而根据能量守恒定律，假设各模块的传输功率相等时，输入均压即可保证输出均流，输出均流即可保证输入均压，即输入均压与输出均流互为等价关系。

2.2 ISOP-DAB 均衡控制策略分析

考虑到即使每个模块的电路参数在设计时相同，但是受限于制作工艺以及一致性的问题，实际运行过程中参数也会有微小的偏差，如果仅采用单电压闭环控制，很可能会由于运行过程中参数不匹配而失稳，换言之，要保证ISOP-DAB变换器正常工作，至少需要两个闭环控制：其中一个环路用于实现输出电压闭环控制，另一个环路实现输入均压控制。

因为两个闭环控制环路都是通过调节移相占空比实现的，因此，两个环路之间如果存在耦合，控制参数的设计将会变得十分复杂，为此需要采用一种解耦控制策略，从而实现输出电压环与输入均压环的解耦控制。现以两个DAB组成的ISOP-DAB变换器进行分析，其整体控制框图如图8所示，其中 U_2^* 是输出电压参考值，输出电压环产生基本外移相比 D_0 ，输入均压环产生均压补偿移相比 d_0 ，作用于第一个DAB变换器模块的移相比为 $D_1=D_0-d_0$ ，作用于第二个DAB变换器模块的移相比为 $D_1=D_0+d_0$ ，从而实现输出电压环与输

DAB变换器模块组合起来，输入侧各模块之间进行串联，保证能承受高输入电压，而输出侧并联在低压母线上，从而实现大电流输出，图7为两模块ISOP-DAB变换器主电路拓扑图。

入均压环的解耦控制。

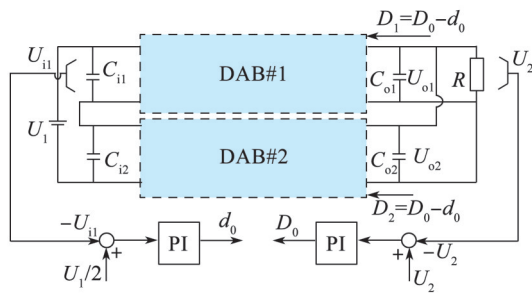


图8 ISOP-DAB变换器均衡控制框图

Fig. 8 Block diagram of ISOP-DAB converter equilibrium control

3 ISOP-DAB 均衡控制策略验证

3.1 仿真模型验证

在MATLAB/Simulink中搭建电路模型进行仿真，验证ISOP-DAB均衡控制策略的有效性。

在MATLAB/Simulink中搭建主电路仿真模型，如图9所示。直流电压经过ISOP-DAB变换器后，通过输出电路和负载输出直流电压。

控制电路主要通过S-function模块，使用C语言编程实现ISOP-DAB单移相电压闭环及其均衡控制算法，如图10所示。

仿真参数为：直流输入电压1 800 V，输出675 V，负载100 kW，开关频率为10 kHz。为了验证均衡控制策略的可行性，将DAB模块1的传输电感设置为60.00 μH ，将DAB模块2的传输电感设置为63.92 μH ，模拟电路参数的不平衡。

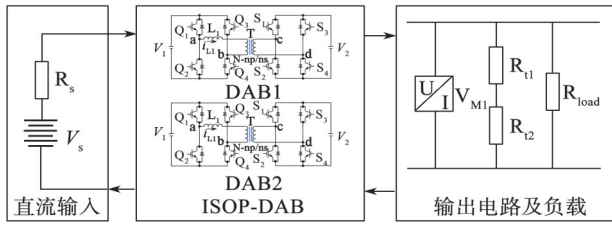


图9 主电路仿真模型图

Fig. 9 Main circuit simulation model diagram

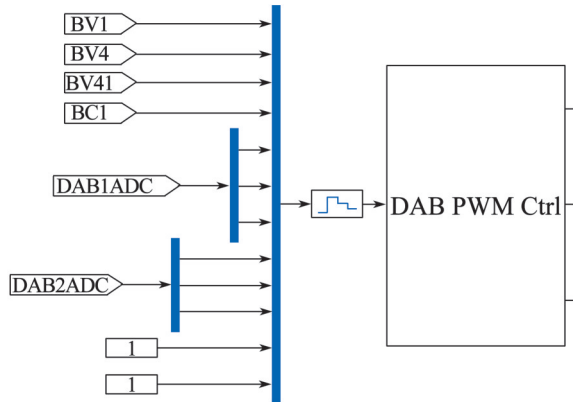


图10 控制电路仿真模型

Fig. 10 Control circuit simulation model

图11为ISOP-DAB的输入电压和输出电压波形图。从图11可以看出, 不管是否添加均衡算法, 仅靠单电压环路即可实现输出电压650 V闭环稳定输出。

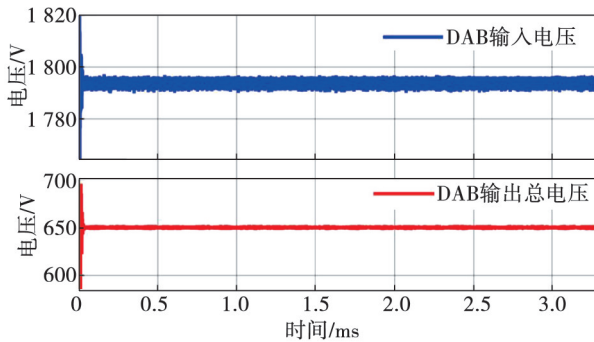


图11 ISOP-DAB输入输出电压波形图

Fig. 11 ISOP-DAB input/output voltage waveforms

添加均衡算法前后ISOP-DAB的波形图如图12、图13所示。从图12可以看出, 未添加均衡算法前, 输出电流有大于20 A左右的不均衡电流, 输入电压有近300 V的不均衡电压, 此时对于变流器的运行是十分不利的, 有损坏模块的风险; 当添加均衡控制算法后, 输入电压和输出电流都能在极短的时间内达到均衡状态, 实现了ISOP-DAB变换器的均衡控制。

综上所述, 仿真验证了ISOP-DAB的均衡控制算法可以实现闭环输出电压的稳定输出以及输入电压和输出电流的均衡控制, 验证了该控制算法的可行性。

3.2 试验验证

为验证控制策略的可行性与有效性, 借助储能变

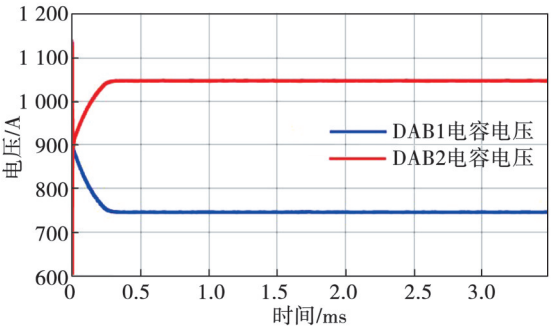
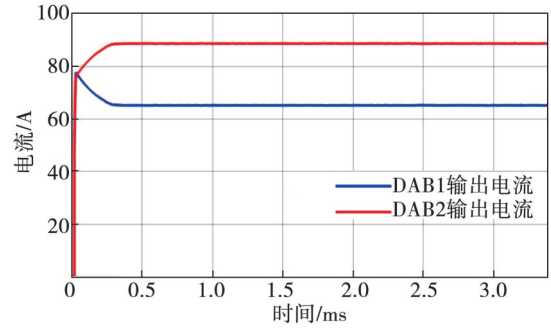


图12 未添加均衡算法时ISOP-DAB不均衡波形图

Fig. 12 ISOP-DAB unbalanced waveform without equilibrium algorithm

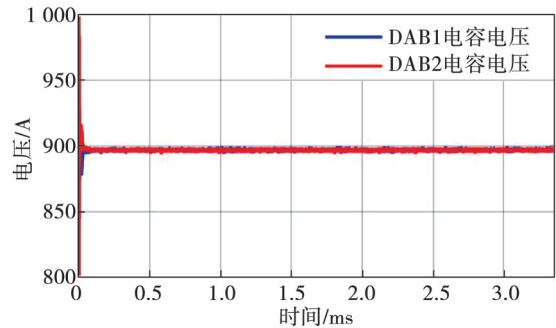
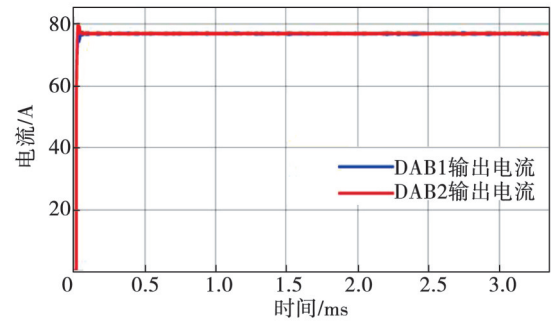


图13 添加均衡算法后ISOP-DAB均衡波形图

Fig. 13 ISOP-DAB balanced waveform with equilibrium algorithm

流器整柜进行实物试验, 试验平台电路结构示意图及实物分别如图14、图15所示。

其中能馈电源提供直流输入电压, 储能柜取直流输入后, 经过预充电电路、ISOP-DAB模块再到低压侧动力电池。控制单元采用成熟平台, 使用DSP+FPGA进行控制, 其接受上位机指令并参与上位机通信, 同时采集主电路模拟信号, 并发送脉冲给驱动板控制IGBT模块运行。

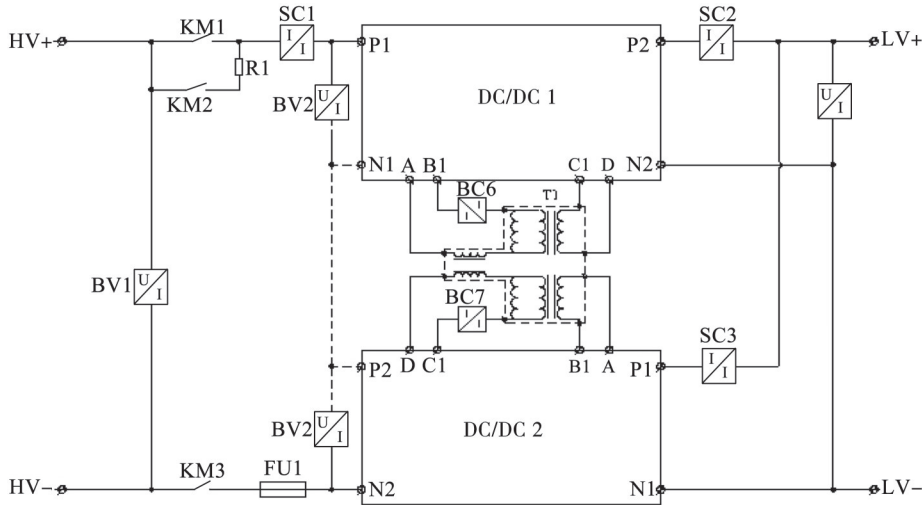


图 14 试验平台电路结构示意图

Fig. 14 Circuit structure diagram of test platform



图 15 试验样机实物图

Fig. 15 Photo of test prototype

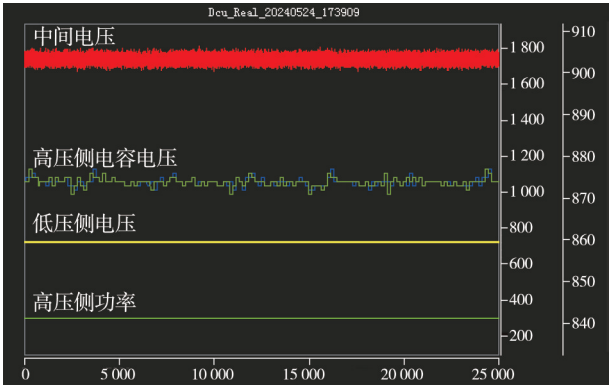


图 17 满载 300 kW 放电波形

Fig. 17 Full load 300 kW discharging waveform

3.3 试验结果

3.3.1 满载 300 kW 充电试验

满载 300 kW 充电波形如图 16。

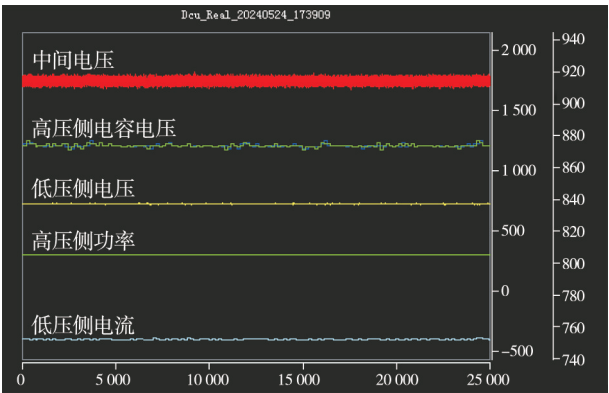


图 16 满载 300 kW 充电波形

Fig. 16 Full load 300 kW charging waveform

3.3.2 满载 300 kW 放电试验

满载 300 kW 放电波形如图 17。

3.3.3 满载充放电实时切换试验

满载 300 kW 充放电波形如图 18。

由图 16~图 18 所示的波形可以看出，在满载 300 kW 的条件下，变换器均可实现对变换器的稳定充放电，且输入电容电压相对均衡，并且充放电能够快速

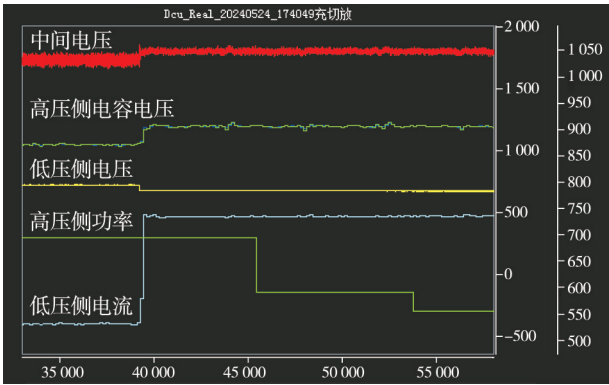


图 18 满载 300 kW 充放电波形

Fig. 18 Full load 300 kW charging and discharging waveform

实时切换。

综上所述，本文所设计的 ISOP-DAB 单移相均衡控制策略能够实现对动力电池的满载稳定充放电、功率均衡控制，并且具备正方向实时切换的功能。

4 结论

本文以双有源桥 DC-DC 变换器为研究对象，设计了一种基于单移相控制的 ISOP-DAB 均衡控制策略，本文工作总结如下：

①建立了 ISOP-DAB 系统的多目标优化模型, 分析了 DAB 变换器的基本工作原理, 通过对变换器的工作模态分析, 推导出了一个开关周期内的电感电流表达式以及传输功率的表达式, 为控制策略设计提供了理论依据。

②揭示了参数失配条件下功率不均衡的内在机理, 分析了 ISOP-DAB 的均衡特性, 得出了输入均压与输出均流互为等价关系的结论, 并创新性地设计了一种基于动态解耦的均衡控制策略, 能够在稳定输出电压的同时, 确保输入电容均压。

③构建了“仿真-实物”的两级验证体系, 基于 Simulink 仿真环境和 DSP+FPGA 的成熟控制平台搭建了相关控制算法的仿真模型和实物平台。300 kW 满载试验证明, 系统可快速完成充放电模式切换, 动态性能优异, 充分验证了控制方法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 迈克尔罗伊. 能源——展望、挑战与机遇[M]. 王聿绚, 郝吉明, 鲁玺, 译. 北京: 科学出版社, 2011.
MICHAEL M B. Energy: perspectives, problems, and prospects[M]. WANG Yuxuan, HAO Jiming, LU Xi, translated. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] 周龙华, 舒杰, 张先勇, 等. 分布式能源微网电压质量的控制策略研究[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 17-22.
ZHOU Longhua, SHU Jie, ZHANG Xianyong, et al. Control strategy of voltage quality in distributed energy microgrids[J]. Power system technology, 2012, 36(10): 17-22.
- [3] 赵新宽. 含异构电源的微电网功率分配优化控制研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(7): 84-88.
ZHAO Xinkuan. Research on optimal control of power distribution in microgrid with heterogeneous power supply[J]. Foreign electronic measurement technology, 2020, 39(7): 84-88.
- [4] 雷志方, 汪飞, 高艳霞, 等. 面向直流微网的双向 DC-DC 变换器研究现状和应用分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 137-147.
LEI Zhifang, WANG Fei, GAO Yanxia, et al. Research status and application analysis of bidirectional DC-DC converters in DC micro-grids[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2016, 31(22): 137-147.
- [5] 安峰, 宋文胜, 杨柯欣. 基于扩展相移的双有源全桥 DC-DC 变换器多目标优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 822-831.
AN Feng, SONG Wensheng, YANG Kexin. Multi-objective optimization control scheme based on extended phase-shift of dual-active-bridge DC-DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 822-831.
- [6] ZHAO Biao, YU Qingguang, SUN Weixin. Extended-phase-shift control of isolated bidirectional DC-DC converter for power distribution in microgrid[J]. IEEE transactions on power electronics, 2012, 27(11): 4667-4680.
- [7] 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.
- [8] SHA Jin, XU Duo, CHEN Yiming, et al. A peak-capacitor-current pulse-train-controlled buck converter with fast transient response and a wide load range[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2016, 63(3): 1528-1538.
- [9] 谷庆, 袁立强, 聂金铜, 等. 基于开关组合规律的双有源桥 DC-DC 变换器传输功率特性[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 69-79.
GU Qing, YUAN Liqiang, NIE Jintong, et al. Transmission power characteristics of dual-active-bridge DC-DC converter based on the switching combination rules[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2017, 32(13): 69-79.
- [10] 翟敬宇. 双有源桥 DC-DC 变换器的调制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
ZHAI Jingyu. Research on modulation strategy of dual active bridge DC-DC converter[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.

Research on control strategy of bidirectional energy storage converter for a certain type of export locomotive

CHEN Zhe^{1,2}, WU Xingchao³, YUAN Fang³, ZENG MingGao³

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

3. Zhuzhou CRRC Times Software Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Dual active bridge (DAB) converters are widely used in DC microgrids, fuel cells, electric vehicles, and other fields, due to their advantages of high power density, bi-directional energy flow, electrical isolation, and the ease of soft switching. However, their application in rail transit remains limited. This paper presents an innovative input-series output-parallel dual active bridge (ISOP-DAB) converter design based on single phase shift control, to address special requirements in rail transit scenarios featuring high voltage, high power, and modularization. The application of this converter design to an export locomotive model enables bi-directional energy flow between the power batteries and the traction DC busbars, and offers a targeted solution to achieve input voltage balancing and output current sharing for the ISOP-DAB configuration. The paper systematically analyzed the fundamental operating principles and power transfer characteristics of bidirectional energy storage converter under this control strategy. The introduction of a dynamic decoupling control algorithm allowed for achieving the dual-objective cooperative control of output voltage stabilization and module equilibrium. Results from simulations conducted using a MATLAB-based simulation model and type tests using complete cabinets including charge-discharge switching and dynamic load conditions validated the effectiveness and feasibility of the control strategy. The findings provide a theoretical foundation and engineering reference for the modular design of bidirectional energy storage converters in rail transit applications.

Keywords: energy storage converter; dual active bridge; single phase shift; power battery; simulation