

引用格式:张伟,滕婕,罗世刚,等.具备低电压穿越能力的自均压型混合直流变换器研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):240-248.

Citation: ZHANG Wei, TENG Jie, LUO Shigang, et al. An adaptive-voltage-sharing hybrid DC-DC converter with low voltage ride-through capability [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 240-248.

具备低电压穿越能力的自均压型混合 直流变换器研究

张伟¹, 滕婕², 罗世刚¹, 李秀慧¹, 白永利¹, 谭庄熙³

(1. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730030; 2. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730030;

3. 湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411100)

摘要: 输入串联输出并联型 (input-series output-parallel, ISOP) 直流变换器广泛应用于能源互联网中的直流电网场景, 其关键在于解决系统模块间输入电压不均衡。为此, 结合谐振型和移相型双有源桥 (dual active bridge, DAB) 变换器, 提出一种具备自适应均压能力的混合型模块化 ISOP 型直流变换器, 系统同时具备谐振型 DAB 的高效率和移相型 DAB 的灵活控制能力。通过在 DAB 源端的滞后桥臂中点增设无源的 LC 谐振支路, 该谐振支路与相邻子模块的 2 个半桥模块共同构成非隔离型双有源半桥, 以此来实现系统输入电压的自适应均衡。此外, 提出一种低电压穿越 (low voltage ride-through, LVRT) 方法, 在 DAB 前端连接电压调整模块, 模块内部的高频变压器的副边串联电感, 当系统输入输出侧发生电压跌落时具备故障穿越的能力, 提高系统的暂态可控性。最后, 在 MATLAB/SIMULINK 环境下搭建模型进行验证, 可以证明系统的自适应均压性能及故障穿越方法的有效性。

关键词: 输入串联输出并联型变换器; 双有源桥; 电压跌落; 自适应均压; 低压穿越

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.027 中图分类号: TM46 文章编号: 1673-9140(2024)02-0240-09

An adaptive-voltage-sharing hybrid DC-DC converter with low voltage ride-through capability

ZHANG Wei¹, TENG Jie², LUO Shigang¹, LI Xiuhui¹, BAI Yongli¹, TAN Zhuangxi³

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, China;

2. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, China; 3. School of Information and Electrical

Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411100, China)

Abstract: Input-series-output-parallel (ISOP) DC converters are widely used in DC grid scenarios for energy interconnection. The key challenge lies in addressing the input voltage imbalance among system modules. To address this issue, a hybrid modular ISOP DC converter with adaptive voltage balancing capability is proposed, combining resonant-type dual active bridge (SR-DAB) converters and phase-shifting dual active bridge (PS-DAB) converters. This system combines the high efficiency of SR-DAB and the flexible control capabilities of PS-DAB. By adding a passive LC resonant branch at the midpoint of the lagging arm of DAB, this resonant branch and the two half-bridge modules of adjacent sub-modules together form a non-isolated dual active half-bridge, thereby achieving adaptive voltage balancing for the system input. Additionally, a low voltage ride-through (LVRT) method is presented, which involves connecting a voltage adjustment module to the front end of DAB. The secondary side of the high-frequency transformer inside VAM is connected in series with an inductor, providing fault ride-through capability during voltage dips on the input and output sides of the system, thereby improving the transient controllability of the system. Finally, a model is built and

收稿日期: 2023-07-18; 修回日期: 2023-11-21

基金项目: 国网总部科技项目 (52272810005); 湖南省自然科学基金 (2022JJ40150)

通信作者: 谭庄熙 (1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事储能电力应用研究; E-mail: aower313@126.com

validated in the MATLAB/SIMULINK environment, demonstrating the effectiveness of the adaptive voltage balancing performance and fault ride-through method.

Key words: input-series output-parallel converter; dual active bridge; voltage drop; adaptive voltage sharing; low voltage ride-through

近年来,随着全球化石能源稀缺、生态环境污染问题的日益突出^[1],能源互联网作为大规模分布式能源及储能设备并网的有效途径,是未来能源转型和能源革命的新突破口^[2-3]。其中,直流电网能够解决新型电力系统中高比例新能源的并网和消纳问题,是能源互联网的重要组成部分,受到世界各国的广泛关注^[4-5]。

直流电网中母线间的功率传输容量较大,单个变换器的容量有限且功率开关电压应力的限制,难以满足功率需求。因此,国内外直流配电网中的直流变压器普遍采用多重模块化结构来实现扩容,即输入串联输出并联(input-series output-parallel, ISOP)型拓扑结构。ISOP系统的输入侧以串联的形式来提高电压等级,输出侧采用并联方式提升功率水平。其中,相较于其他直流变换环节,双有源桥(dual active bridge, DAB)具有电气隔离、功率双向传输及零电压软开关等诸多优点^[6-9],广泛应用于交直流微电网^[10-11]、电动汽车^[12]及固态变压器^[13-14]等应用场景,可作为ISOP系统中直流变换单元。

模块化的组合系统能有效提升输送的功率容量、降低开关管应力并增强系统的冗余能力。然而,在实际系统中,难以保证各DAB模块的参数完全一致,模块间的功率不等将导致ISOP型变换器的模块输入电压不均衡。各模块共用占空比^[15]是解决均压问题最为简单有效的方法,通过电压闭环来控制总输出电压,产生占空比信号可实现多组模块的共同控制。但各模块的参数不可能完全一致,因此需要额外的控制电路来均压。基于此,相关文献提出了双环^[16]和三环控制^[17-18]策略。基于共用占空比控制,双环控制增加了输入均压闭环来补偿各模块间的输入电压偏移量,以实现输入电压的均衡^[16]。将电路输入或输出电流反馈到控制回路中,即可将双环控制改进为三环控制策略。其中,内环控制又可以进一步采用电荷控制、峰值电流控制及平均电流控制等方案^[17]。文献[20]提出一种主从结构电流差分控制,能避免主模块故障时系统整体发生故障,提高了运行可靠性;文献[21]提出了分散下垂控制策略,利用各模块的反向下垂外特性来校正参考信号,实现系统的输入侧均压。可见,以上的均

压方法都是利用各种多环控制策略实现的。

此外,关于DAB的故障特性及故障穿越方面还有待研究。文献[22]介绍了DAB故障下输出电流直流偏置的原因及抑制手段,但该方法难以抑制故障电流的幅值;文献[23]改进了故障阶段DAB的控制方法,能限制DAB短路电流的大小,实现低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)。但该方法将DAB副边H桥闭锁,不利于系统的故障恢复,同时,现阶段对DAB输入端故障穿越的研究较少。文献[24]提出一种具有升降压功能的四开关变换器,与常规Buck-Boost、Cuk等电路相比,具有结构简单、无源器件少以及输入输出电压极性相同等优点;将其作为电压调整模块(voltage adjustment module, VAM)级联于DAB前端,当发生电压跌落时抬升模块输出电压,以维持DAB两侧的电压大小,在保证软开关的同时实现故障穿越。

本文提出一种具备自适应均压的混合模块化ISOP(hybrid modular-ISOP, HM-ISOP)型直流变换器,模块间通过LC支路连接来保证输入电压的自均衡,无需额外的均压控制,系统兼备谐振型DAB(series resonant-DAB, SR-DAB)和移相型DAB(phase shift-DAB, PS-DAB)的优势,能够高效灵活地传输功率。针对DAB两端的双极故障所引起的电压跌落,本文提出相应的LVRT方法。在DAB前端级联VAM模块,故障发生时模块以Boost模式维持LVDC母线电压恒定,实现源端的故障穿越。在高频变压器的副边串联电感,并限制电容放电,从而抑制出口双极故障时的暂态过流,实现荷端的故障穿越。在MATLAB/SIMULINK中搭建仿真模型,表明HM-ISOP系统的输入电压自均衡能力和LVRT方法的有效性,改善系统的运行性能。

1 HM-ISOP系统的基本工作原理

1.1 HM-ISOP系统的拓扑结构

在直流配电网场景中,本文所提出的HM-ISOP系统如图1所示。该系统由 n 个直流变换单元以输入侧串联、输出侧并联的方式组成,根据实际场景的电压等级或功率调节范围来选择模块的数量以及具体参数。

SR-DAB变换器工作在谐振状态,可实现高效率的功率传输,功率管具有软开关特性,但也因此不具功率或电压的能控性^[25-26]。PS-DAB变换器具有控制灵活、功率密度高的优点,但存在软开关范围受限、回流功率损耗等问题^[27-28]。因此,为了同时满足效率高和灵活控制的要求,变换器采用两者兼用的混合式系统,包括 $n-1$ 个开环控制的SR-DAB变换器及1个闭环控制的PS-DAB变换器。绝大部分功率通过SR-DAB来传输,确保系统运行的高效率,故模块配置数量较多;PS-DAB则负责系统的灵活控制。

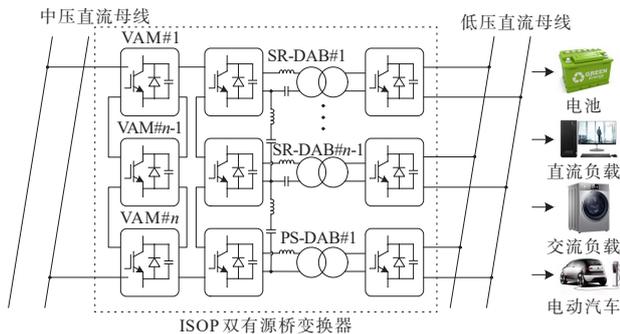


图1 基于所提的HM-ISOP系统的直流配网模型

Figure 1 Model of DC distribution grid based on proposed HM-ISOP system

以SR-DAB和PS-DAB所构成的两模块HM-ISOP系统为例分析,负载用电阻来等效,其拓扑结构如图2所示。SR-DAB采用开环控制,变换器的谐振频率与开关频率相同,变换器稳态下处于

谐振状态,高频变压器原副边电压均为占空比50%的方波电压,实现了理想变压器的功率高效传输。

以高频变压器两侧电压的移相角为对象,PS-DAB采用单移相(single phase shift, SPS)控制稳定低压直流(low voltage DC, LVDC)母线电压。因此,所有模块的原边开关信号应保持同步,SPS控制本质是控制PS-DAB的副边开关管的通断相角。然而,轻载时SPS控制难以实现零电压开关(zero voltage switch, ZVS)^[29],因此,将VAM模块与DAB模块级联,维持DAB模块输入电压恒定,保证高频变的原副边电压比 k 始终为1,DAB可以实现全负载范围的软开关。其中,VAM模块以输入串联输出串联(input-series output-series, ISOS)的方式组合。此外,增加的VAM可以使系统中压直流(medium voltage DC, MVDC)侧发生双极故障时实现LVRT。在高频变压器副边串联电感(电感两端并联2个方向相反的功率管),DAB输出侧电容反向串联功率管,作为输出侧LVRT的故障处理单元,在正常运行时管子处于导通状态,电感处于旁路状态,不影响电路的正常运行状态。在相邻模块的原边H桥滞后桥臂中点处串联LC谐振支路,可构成非隔离型双有源半桥(non-resonant dual active half bridge, NR-DAHB)结构。类似SR-DAB,每个NR-DAHB都表现出变比为1:1的类理想变压器工作特征,可以实现模块间的输入侧自然均压。

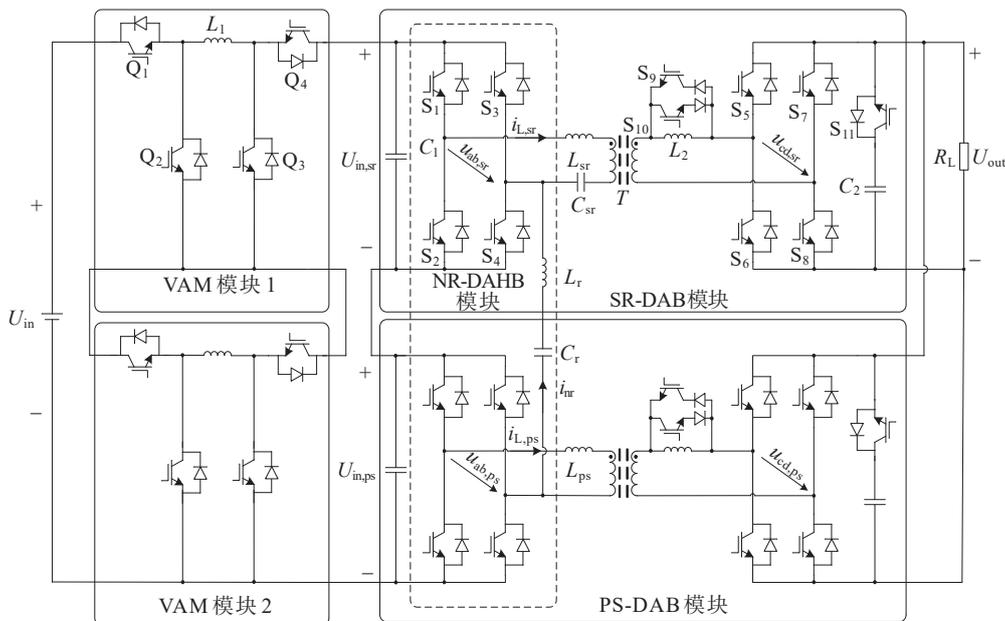


图2 HM-ISOP系统的拓扑

Figure 2 Topology of HM-ISOP system

1.2 HM-ISOP 系统的工作原理

HM-ISOP 系统的开关信号及工作波形如图 3 所示, T_s 表示半个开关周期, i_L 是各模块交流侧的电感电流。在图 3 中, 系统所有模块每个桥臂的 2 只开关管均是 180° 互补导通, H 桥斜对角的开关管的开关状态相同。

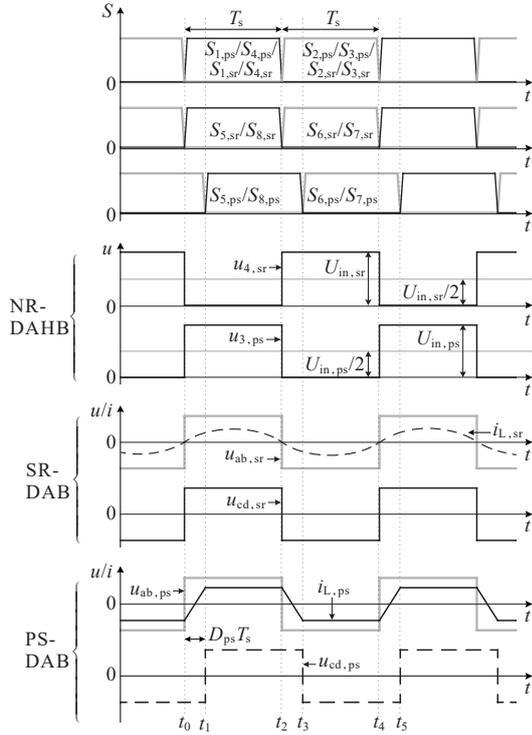


图 3 HM-ISOP 系统的工作波形

Figure 3 Operation waveforms of HM-ISOP system

SR-DAB 模块运行于定占空比的开环控制下, 每个模块在高频变压器两侧都产生 50% 占空比的同步方波电压, 电压之比等于变压器变比 K , 可满足系统对功率传输的高效率要求。为确保系统能够自适应均压, NR-DAHB 模块中 LC 支路两侧所连接的相邻模块半桥的交流侧电压应当同步 (如图 2 中 SR-DAB 的开关管 S_3 两侧电压 $u_{3,sr}$ 和 PS-DAB 的开关管 S_3 两侧电压 $u_{3,ps}$ 应保持同步), 因此, SR-DAB 和 PS-DAB 模块的原边 H 桥功率管使用相同的开关信号。

在 SPS 控制下, PS-DAB 模块原副边 H 桥桥臂中点电压 $u_{ab,ps}$ 和 $u_{cd,ps}$ 间的移相角 D_{ph} 和传输功率 P_{ph} 之间所满足的关系式^[29]为

$$P_{ph} = \frac{KU_{in,ps}U_{out,ps}}{2L_{ph}f_s} \cdot D_{ph}(1 - |D_{ph}|) \quad (1)$$

根据式(1)可得, PS-DAB 模块在一个开关周期内的平均输入电流和平均输出电流为

$$\begin{cases} i_{in,ph} = \frac{P_{ph}}{U_{in,ps}} = \frac{KD_{ph}(1 - |D_{ph}|)}{2L_{ph}f_s} \cdot U_{out,ps} \\ i_{out,ph} = \frac{P_{ph}}{U_{out,ps}} = \frac{KD_{ph}(1 - |D_{ph}|)}{2L_{ph}f_s} \cdot U_{in,ps} \end{cases} \quad (2)$$

在 HM-ISOP 系统输入侧, 各模块具有相同的输入电流, 因此整个系统总功率可表示为

$$P_{HM-ISOP} = I_{in}U_{in} = I_{in,ps}U_{in} \quad (3)$$

此外, PS-DAB 模块输出电压与系统总输出电压相同, 即 $U_{out,ps} = U_{out}$ 。基于此, 将式(2)代入式(3)中可得:

$$P_{HM-ISOP} = \frac{KU_{in}U_{out}}{2L_{ph}f_s} \cdot D_{ph}(1 - |D_{ph}|) \quad (4)$$

从式(4)中可以看出, 通过控制 PS-DAB 的移相角 D_{ph} 可以实现系统总传输功率的灵活调节。

2 输入电压的自适应均衡

在 HM-ISOP 系统中, 相邻模块在其原边 H 桥滞后桥臂中点处经 LC 谐振支路相连, 所构成的 NR-DAHB 可为相邻模块提供功率交换环路。若 LC 支路的谐振点为开关频率, 则该频率下支路总阻抗接近于 0。当相邻模块输入电压间存在偏移量时, 通过 NR-DAHB 自动补偿功率来均衡电压。因此, 系统 n 个 DAB 模块通过 $n-1$ 个无源谐振链路可以实现整体的自适应输入侧均压。

以图 2 中的模型为例, NR-DAHB 由 SR-DAB 的功率管 S_4 、PS-DAB 的功率管 S_3 及谐振支路组成。模块的开关管电压应力是高频的方波电压, 可分解为直流分量和交流分量, 其中直流分量是模块输入电压的一半, 由谐振电容所支撑; 交流分量是频率为开关频率的高频交流方波。NR-DAHB 变换器交流部分可视为交流源与谐振电感 L_r 、谐振电容 C_r 以及等效电阻 R_{eq} 组成的串联等效电路, 如图 4 所示, NR-DAHB 变换器电压转换增益, 即相邻模块的输入电压之比, 可以表示为

$$M_r = \frac{U_{in,k}}{U_{in,k+1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2(f_s/f_r - f_r/f_s)^2}} \quad (5)$$

$$f_r = 1/2\pi\sqrt{L_r C_r} \quad (6)$$

$$Q = \sqrt{L_r/C_r}/R_{eq} \quad (7)$$

式(5)~(7)中, M_r 为 NR-DAHB 的电压转换增益; $U_{in,k}$ 、 $U_{in,k+1}$ 分别为第 k 、 $k+1$ 个模块的输入电压; f_s 、 f_r 分别为开关、谐振频率; Q 为品质因数。

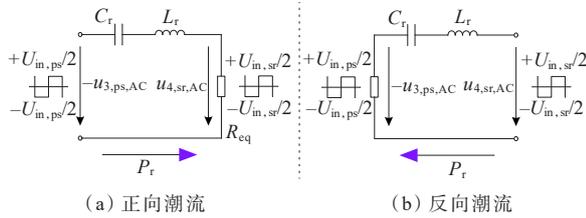


图4 NR-DAHB等效电路

Figure 4 Equivalent circuit of NR-DAHB converter

由式(5)可知,若 f_r 越接近 f_s , M_r 越接近于1, NR-DAHB两侧电压则近似相等。若模块间输入电压不均,如图4(a)的情况, NR-DAHB两侧电压会存在差值,此时谐振支路上补偿功率就会从高压侧(PS-DAB)流向低压侧(SR-DAB),使得2个模块输入侧直流电容的能量逐渐趋于平均,反之亦然。在NR-DAHB链路的校正作用下,各模块的输入电压得以自然均衡。

3 双极故障下的低电压穿越方法

3.1 输入侧低电压穿越方法

当配网中压母线侧发生双极故障时,会造成系统输入侧电压跌落,对电网安全运行造成严重影响。在DAB前端级联VAM结构,将宽范围变化的输入电压 U_{in} 调节为稳定的级联母线电压 U_1 。在稳态下,DAB的电压转换比 k (DAB两侧电压之比,即 $k=KU_{out}/U_1$)始终为1,能够保证全负载范围内的软开关,弥补了SPS控制下DAB轻载时软开关范围缩小的缺陷;当输入电压 U_{in} 发生电压暂降或电压骤升等故障情况时,VAM作为故障处理模块调整电压,使得后续DAB始终处于电压匹配状态,保证在输入电压不发生严重偏移时负荷侧保持正常并网运行,提高直流电网的供电可靠性,实现LVRT。

VAM模块采用电压分段式控制,根据输入电压 U_{in} 的大小可工作于Buck、Boost及不调节模式。假设 U_N 是DAB额定输入电压, ΔU 是电压容许的波动范围,参考国家规定可取 $5\%U_N$ 。当 $U_{in} < U_N - \Delta U$ 时,VAM运行在Boost模式抬升电压;当 $U_{in} > U_N + \Delta U$ 时,VAM运行在Buck模式降低电压;当 U_{in} 为 $[U_N - \Delta U, U_N + \Delta U]$ 时,VAM运行在不调节模式,作为母线直接传递输入电压。

定义 D_1 、 D_2 分别为开关管 Q_1 、 Q_3 占空比,根据电感 L_1 的伏秒平衡关系,可以得到DAB输入电压为

$$U_1 = \frac{D_1}{1 - D_2} U_{in} \quad (8)$$

因此,通过调节 D_1 和 D_2 即可实现VAM的电压调整作用。以SR-DAB单模块电路正向潮流为例,VAM不同的工作模式如图5所示。

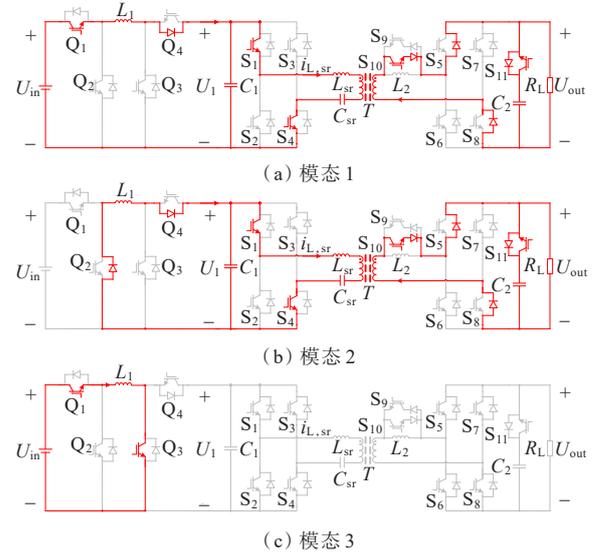


图5 VAM各工作模式

Figure 5 Operation modes of VAM

当VAM工作在不调节模式时,其工作模式为模式1,此时 $D_1=1$ 且 $D_2=0$,VAM可近似认为是变比为1的理想变压器,可直接传递输入电压。当发生电压暂降时,VAM工作在Boost模式,其工作模式包括模式1、2,此时 D_1 始终为1,通过调节 D_2 来实现抬压。当发生电压骤升时,VAM工作在Buck模式,其工作模式包括模式1、3,此时 D_2 始终为0,此时控制对象为 D_1 。以输入电压 U_{in} 为输入量,占空比 D_1 和 D_2 为输出量,对VAM采用开环控制,具体的控制算法关系式如表1所示。

表1 VAM控制算法

Table 1 Control algorithm of VAM

U_{in}/V	D_1	D_2	模式
$U_{in} < U_N - \Delta U$	1	$(U_1 - U_{in})/U_1$	Boost
$U_{in} > U_N + \Delta U$	U_1/U_{in}	0	Buck
$[U_N - \Delta U, U_N + \Delta U]$	1	0	不调节

在实际系统中,VAM采用ISOS组合结构来提升直流电压等级,以 U_{in}/n 为控制输入量保证VAM的模块输出均衡。当发生故障时,需在上述开环控制算法的基础上添加 U_1 的定电压闭环控制来稳定电压,补偿控制信号反馈给不同模式下的调节量(如Boost模式下需补偿给 D_2),具体控制框图如图6所示。

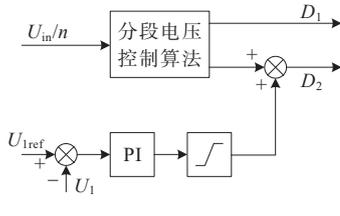


图 6 VAM 控制框图

Figure 6 Control block diagram of VAM

3.2 输出侧低电压穿越方法

当模块输出侧发生双极故障时,会在负载侧造成电压跌落,电路中会产生故障过电流,导致 DAB 闭锁停止工作。为了提高系统的暂态恢复能力,在 DAB 的高频变压器副边串联电感 L_2 ,电感两侧并联上反并联的开关管组 (S_9 和 S_{10}),开关管串联二极管来承受反压,负荷侧电容 C_2 反串联开关管 (S_{11})。正常工作情况下功率管开关信号均为 1,电感 L_2 被旁路,不会对系统正常工作造成影响;当发生输出侧双极短路故障时,开关信号转变为 0,开关管关断,阻塞副边电容放电,同时投入电感 L_2 来限制短路电流峰值,实现故障穿越,如图 7 所示。

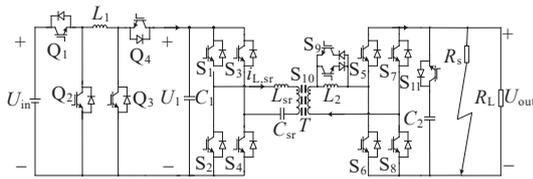


图 7 输出侧双极故障下的低电压穿越方法

Figure 7 LVRT method of bipolar fault on output side

假设 HM-ISOP 系统输出电压额定值为 U_{oN} ,输出电流额定值为 I_{oN} ,可以采用输出侧阻抗作为 LVRT 方法动作的阈值,开关信号从 1 到 0 跳变的条件为

$$Z_{set} \leq \frac{U_{oN}}{1.85I_{oN}} \quad (9)$$

为了保证动作的灵敏性,动作范围增加一定裕度,本文取额定值的 $1/18.5$ 。当故障发生时, LVRT 方法启动,将限流电感投入到电路中,从而抑制故障电流的峰值,实现系统的 LVRT。

4 仿真验证

为了验证本文所提 HM-ISOP 系统以及低电压穿越方法,在 MATLAB/SIMULINK 中搭建由 2 个 SR-DAB 和 1 个 PS-DAB 所组成的仿真模型,系统参数如表 2 所示。

表 2 HM-ISOP 变换器电路参数

Table 2 Parameters of HM-ISOP converter

模块数		额定电压/V		开关频率	高频变压
SR-DAB	PS-DAB	输入 U_{iN}	输出 U_{oN}	f_s/kHz	器变比 K
2	1	600	150	10	4:3
NR-DAHB 谐振		SR-DAB 谐振		PS-DAB 功率交	
电感 $L_r/\mu\text{H}$		电容 $C_r/\mu\text{F}$		换电感 $L_{ps}/\mu\text{H}$	
2.6	100	17	15	150	

HM-ISOP 系统在稳态运行中的工作波形如图 8 所示,可知在正常运行情况下,直流系统的输入电压为 600 V,其中各模块的输入电压均维持在 200 V,电压最大偏差在 1 V 以内,能够实现模块间电压的有效均衡;输出电压在 SPS 控制下,经过 20 ms 后维持于 150 V,误差范围不超过 1.2%,控制算法精度高,直流纹波小,仅为 0.03%,具备快速动态和高效精准的直流电压控制能力。

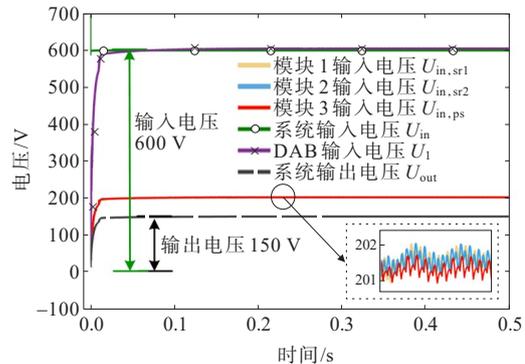


图 8 HM-ISOP 系统稳态工作波形

Figure 8 Steady-state operation waveforms of HM-ISOP

为了验证 HM-ISOP 系统更良好的传输效率性能,将 HM-ISOP 与传统 ISOP 系统进行比较,如图 9 所示,将 HM-ISOP 系统和仅有 PS-DAB 模块组成的 ISOP 系统的传输效率进行比较,选取有功功率输出范围为 500~3 000 W。从图 9 中可以看出,由于 SR-DAB 能够实现零电流开关 (zero current switch, ZCS), ISOP 系统经过混合模块化的结构改造后,传输效率能力得到显著提升,系统兼具了 SR-DAB 的高效率和 PS-DAB 的控制灵活性。此外, VAM 模块处于不调节状态,使得后级 DAB 始终处于 $k=1$ 的电压匹配状态,拓宽了变换器的软开关运行范围,减少了系统运行损耗,进一步提升系统的传输效率。HM-ISOP 系统各模块输入电压波形如图 10 所示。

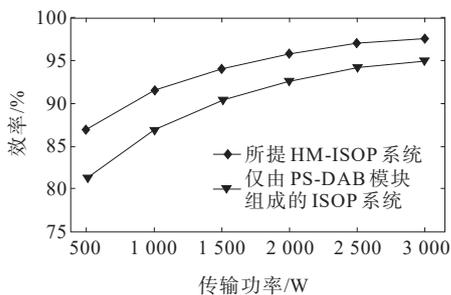
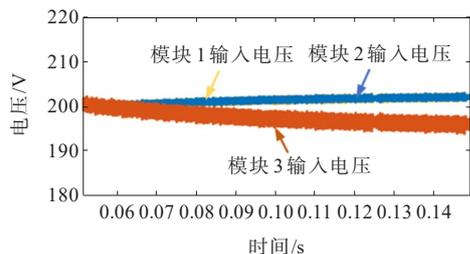
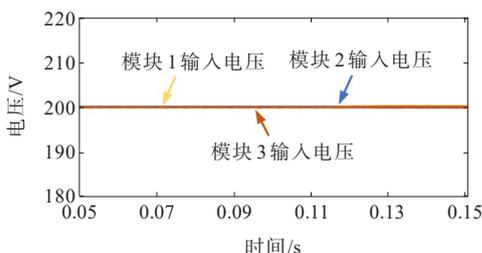


图9 HM-ISOP系统和仅有PS-DAB模块组成的ISOP系统的传输效率比较

Figure 9 Efficiency comparison of HM-ISOP and ISOP constituted only by PS-DAB modules



(a) 未投入NR-DAHB



(b) 投入NR-DAHB

图10 HM-ISOP系统的各模块输入电压波形

Figure 10 Input voltage waveforms of each module of HM-ISOP

由于实际应用场景中算法误差、器件工艺等因素影响,各模块之间难免存在差异。由图10(a)可知,在未使用NR-DAHB链路的情况下,因模块间软硬件的细微差别因素,导致模块间输入电压依旧存在电压偏差,最大值达10 V,并且存在4 V左右的直流纹波。由图10(b)可知,在使用NR-DAHB链路后,在NR-DAHB链路的作用下,图10(a)的电压偏差情况得到有效抑制,3个模块输入电压均保持在200 V,最大电压偏差不超过0.5 V,直流纹波峰值低于0.1 V,各模块输入电压能够实现自适应的均衡,并有效抑制系统运行中的直流纹波。

系统输入、输出侧发生双极故障的工作波形分别如图11、12所示。由图11可知,故障发生在0.25 s并持续0.05 s。在未投入VAM的情况下,DAB两端电压均发生了电压暂降,负载端电压跌落了

40%,仅维持在90 V,严重影响负荷侧的安全供电。在使用VAM后,VAM将DAB的输入电压维持在600 V,系统的负载电压稳定在150 V,基本不受影响,系统具备输入侧低电压穿越能力。

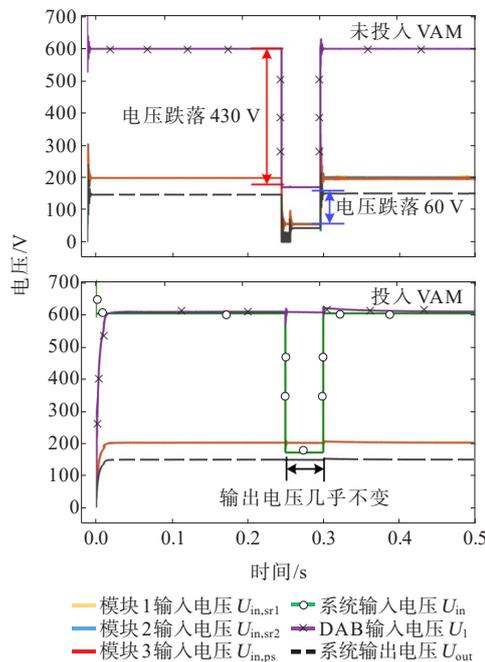
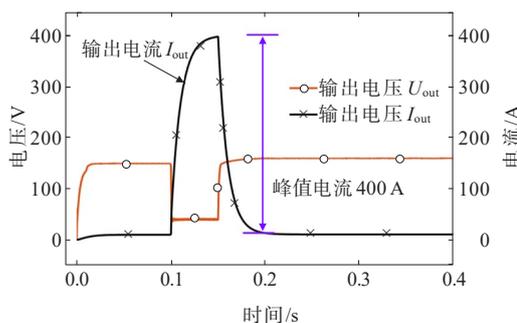
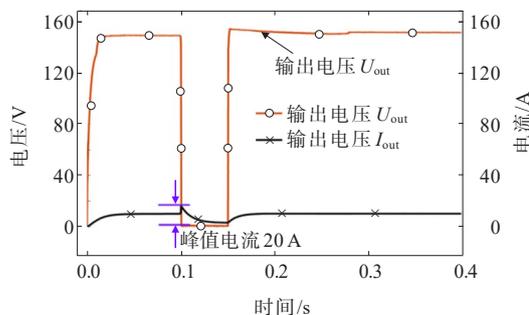


图11 输入侧双极故障下HM-ISOP工作波形

Figure 11 Operation waveforms of HM-ISOP under bipolar fault on input side



(a) 未投入限流支路



(b) 投入限流支路

图12 输出侧双极故障下HM-ISOP工作波形

Figure 12 Operation waveforms of HM-ISOP under bipolar fault on output side

由图12可知,在0.1 s时二次侧发生故障,时间持续0.05 s。通过图12(a)、(b)的对比可知,在未使用限流支路时,系统输出电流峰值超400 A,将对负荷带来严重冲击。在使用限流支路后,极大地抑制了故障电流尖峰,最大值仅为20 A,在改善系统暂态故障恢复能力的同时,将故障期间的系统输出电压有效地支撑在预设的150 V,提升了负荷的故障抵御能力。可见,该故障穿越方法的效果十分显著。

5 结语

本文提出一种由SR-DAB模块和PS-DAB模块组成的HM-ISOP直流变换器。该系统兼备SR-DAB的工作高效率以及PS-DAB的灵活控制能力。在NR-DAHB链路的作用下,模块输入电压可以实现自适应均衡。此外,本文还提出了一种LVRT方法,在系统输入侧和输出侧因双极故障而发生电压跌落时产生影响,能够较好地实现故障穿越。

参考文献:

- [1] RUIZ-ROMERO S, COLMENAR-SANTOS A, GIL-ORTEGO R, et al. Distributed generation: the definitive boost for renewable energy in Spain[J]. *Renewable Energy*, 2013, 53: 354-364.
- [2] 尹积军,夏清. 能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(2): 486-497.
YIN Jijun, XIA Qing. Conceptual design and exploration of multi-factor integrated high-elastic power grid in energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 486-497.
- [3] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光. 能源互联网:理念、架构与前沿展望[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(19): 1-8.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. *Automation of power systems*, 2015, 39(19): 1-8.
- [4] 王跃球,唐杰. DBD型臭氧发生器电源的频率跟踪移相PWM控制技术及其实现[J]. *长沙电力学院学报(自然科学版)*, 2006(4): 52-55.
WANG Yueqiu, TANG Jie. Frequency tracking phase-shift PWM control technique and its implementation for DBD-type ozone generator power supply[J]. *Journal of Changsha Electric Power College(Natural Science Edition)*, 2006(4): 52-55.
- [5] 林圣,兰菲燕,刘健等. 高压直流输电送端电网暂态过电压机理与抑制策略综述[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(6): 3-16.
- [6] LIN Sheng, LAN Feiyan, LIU Jian et al. A review of transient overvoltage mechanisms and suppression strategies in high-voltage direct current transmission feeder grids[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(6): 3-16.
- [6] 葛磊蛟,刘航旭,孙永辉,等. 智能配电网多元电力用户群体特性精准感知技术综述[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(20): 174-191.
GE Leijiao, LIU Hangxu, SUN Yonghui, et al. Review on accurate awareness technology for characteristics of diversified power user groups in smart distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(20): 174-191.
- [7] 李博通,刘涛,杨昕陆,等. 故障自清除型直流配电网新型双极短路故障元件识别方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(17): 4423-4434.
LI Botong, LIU Tao, YANG Xinlu, et al. New fault element identification method of bipolar short-circuit fault in DC distribution network with fault self-clearing[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(17): 4423-4434.
- [8] 刘智超,吐松江·卡日,马小晶,等. 基于云相似度与证据融合的电力变压器状态评价方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(20): 79-90.
LIU Zhichao, TU SONGJIANG·Kari, MA Xiaojing, et al. Condition assessment method for power transformers based on cloud similarity and evidence fusion[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(20): 79-90.
- [9] 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+418.
ZHAO Biao, AN Feng, SONG Qiang, et al. Development and application of dual active bridge DC transformer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 288-298+418.
- [10] CHOI H J, JUNG J H. Enhanced power line communication strategy for DC microgrids using switching frequency modulation of power converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(6): 4140-4144.
- [11] 张勤进,牛淼,刘彦呈,等. 储能双向DC/DC变换器自适应充放电无缝切换策略[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(2): 186-195.
ZHANG Qinjin, NIU Miao, LIU Yancheng, et al. Seamless switching strategy of adaptive charge and discharge for bidirectional DC/DC converter with storage energy[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(2): 186-195.
- [12] 贾俊,范炜豪,吕志鹏,等. 用于电动汽车集群并网的直流变压器启动研究[J]. *发电技术*, 2023, 44(6): 875-882.
JIA Jun, FAN Weihao, LÜ Zhipeng, et al. Research on startup of DC transformer for electric vehicle cluster

- grid-connection[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 875-882.
- [13] SHI J J, GOU W, YUAN H, et al. Research on voltage and power balance control for cascaded modular solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1154-1166.
- [14] 李子欣, 高范强, 赵聪, 等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1274-1289.
LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceeding of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.
- [15] GIRI R, CHOUDHARY V, AYYANAR R, et al. Common-duty-ratio control of input-series connected modular DC-DC converters with active input voltage and load-current sharing[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(4): 1101-1111.
- [16] RUAN X B, CHEN W, CHENG L L, et al. Control strategy for input-series-output-parallel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(4): 1174-1185.
- [17] 路广才, 竺炜, 唐颖杰. 基于映射弹性势能增量的电网主振荡路径识别[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 25-34.
LU Guangcai, ZHU Wei, TANG Yingjie. Identification of main oscillation paths in power grid based on mapping elastic potential increment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 25-34.
- [18] 卞蓓蕾, 宋振浩, 吕志鹏, 等. 一种新型拓扑的三电平变换器及其损耗分析[J]. 供用电, 2022, 39(4): 2-10.
BIAN Beilei, SONG Zhenhao, LÜ Zhipeng, et al. A new type of three-level converter and analysis of losses calculation[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(4): 2-10.
- [19] 程东, 夏世威, 李庚银, 等. 含 SVG 的直驱风电场高频振荡分析及抑制策略[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 115-124.
CHENG Dong, XIA Shiwei, LI Gengyin, et al. Analysis and suppression strategy of high frequency oscillation in PMSG based wind farm with SVG[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 115-124.
- [20] QU L, ZHANG D H, BAO Z Y. Output current-differential control scheme for input-series-output-parallel-connected modular DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5699-5711.
- [21] XU G, SHA D S, LIAO X Z. Decentralized inverse-droop control for input-series - output-parallel DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(9): 4621-4625.
- [22] ZHAO B, SONG Q, LIU W, et al. Transient DC bias and current impact effects of high-frequency-isolated bidirectional DC-DC converter in practice[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 3203-3216.
- [23] ZHUO C R, ZHANG X T, ZHANG X, et al. Research on fault current limitation and active control for power electronic transformer in direct current grid[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2021, 15(1): 121-134.
- [24] 任小永, 唐钊, 阮新波, 等. 一种新颖的四开关 Buck-Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 17-21.
REN Xiaoyong, TANG Zhao, RUAN Xinbo, et al. A novel four switch Buck-Boost converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 15-19.
- [25] HUANG J J, XIAO J F, WEN C Y, et al. Implementation of bidirectional resonant DC transformer in hybrid AC/DC micro-grid[J]. IEEE Transactions on Smart grid, 2019, 10(2): 1532-1542.
- [26] HUANG J J, ZHANG X, SHUAI Z K, et al. Robust circuit parameters design for the CLLC-type DC transformer in the hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(3): 1906-1918.
- [27] DE DONCKER R W, 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): 63-73.
- [28] HOU N, LI Y. Overview and comparison of modulation and control strategies for non-resonant single-phase dual-active-bridge DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(3): 3148-3172.
- [29] 李冰, 李岚, 王浩, 等. 一种改善直流微电网负荷电流分配的下垂控制[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 48-54.
LI Bing, LI Lan, WANG Hao et al. A sag control for improving load current distribution in DC microgrids[J]. Journal of Power Science and Technology, 2022, 37(1): 48-54.