

文章编号: 2095-2163(2022)10-0107-06

中图分类号: TM743

文献标志码: A

基于电压跟随的模块化 DAB 控制策略

秦 袁, 郝正航, 陈 卓, 滕 飞, 孔德政, 崔子轩

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 针对双有源全桥 DC-DC 变换器其输入电压和输出电压不成比例以及由此引起的模块化 DAB 传输功率不平衡的现象, 文章以单移相控制下的 DAB 为研究对象, 以功率正向流动为例, 提出一种电压跟随的控制策略。通过设置输入电压反馈系数和输出电压反馈系数, 保证 DAB 输出电压与输入电压始终成比例, 在控制输出电压的同时, 稳定输入电压, 并针对基于模块化直流侧电压不均衡的问题, 设计加入均压环节。同时对系统存在静差、动态性能不稳定的问题, 在反馈环节加入控制器, 改善了系统的性能。最后搭建模型, 通过仿真实验, 验证所提出方法可以在模块化前提下实现直流侧均压, 输出电压与输入电压始终符合给定的比例, 提高系统运行的稳定性, 改善系统的动态性能。

关键词: 模块化; 双有源全桥 DC-DC 变换器; 电压跟随; 反馈系数

Modular DAB control strategy based on voltage following

QIN Yuan, HAO Zhenghang, CHEN Zhuo, TENG Fei, KONG Dezheng, CUI Zixuan

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

【Abstract】 Aiming at the phenomenon that the input voltage and output voltage of dual active full bridge DC-DC converter are not proportional and the modularized DAB transmitted power imbalance caused by this phenomenon, this paper takes DAB under the control of single phase shift as the research object, and takes forward power flow as an example to propose a voltage following control strategy. Input voltage feedback coefficient and output voltage feedback coefficient are set to ensure that the DAB output voltage is always proportional to the input voltage, and the input voltage is stabilized while the output voltage is controlled. In view of the problem of voltage imbalance on the modular DC side, voltage equalization is designed and added. At the same time, to solve the problems of static error and dynamic performance instability of the system, the controller is added in the feedback link to improve the performance of the system. Finally, the model is built and the simulation experiment is carried out to verify that the proposed method can realize voltage equalization on the DC side under the modularization premise, and the output voltage and input voltage always conform to the given ratio, so as to improve the stability of system operation and dynamic performance of the system.

【Key words】 modular; dual active full bridge DC-DC converter; voltage following; feedback coefficient

0 引言

随着现在社会各行业对用电需求的上升, 传统的火力发电使用的化石能源不断增多, 对于环境造成的影响也越来越大。在此背景下, 对于风电、光伏、核电、水电等清洁能源的研究也日渐引起国际社会的高度重视。目前, 有研究者提出了以风电、光伏等清洁能源作为分布式电源的发电模式。采用这种发电模式可以有效地降低化石能源在发电结构中占据的比例, 减少煤炭等对环境污染较大的化石能源的使用, 实现发电的环保。但是, 使用清洁能源的发

电方式的发电厂多是分散、不稳定的分布式电源, 这会影响电网运行的稳定, 降低电能质量。为了使清洁能源能够大规模地并网, 已有研究者提出了智能电网和能源互联网的概念。而新型电力电子变压器无疑是智能电网和能源互联网中至关重要的关键设备。

双有源全桥 (Dual Active Bridge, DAB) DC-DC 变换器^[1-2]自身有诸如实现电气隔离、模块化耐高压超高压、功率密度高、功率传输可以双向流动及软开关易实现等诸多优点而被广泛应用于光伏发电^[3]、风电并网^[4]、电动汽车^[5]及不间断供电设备等新兴的能源变换系统。传统的工频变压器可以满

基金项目: 第二批国家级新工科研究与实践项目 (E-NYDQHGC20202227)。

作者简介: 秦 袁 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 有源配电网故障定位; 郝正航 (1972-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 新能源发电与智能电网以及电力系统实时仿真等; 陈 卓 (1980-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 电力系统稳定与控制; 滕 飞 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 双有源全桥变换器建模仿真; 孔德政 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统优化运行; 崔子轩 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统故障保护。

通讯作者: 郝正航 Email: 983135026@qq.com

收稿日期: 2022-03-07

足电气隔离与电压匹配^[6-8]等需求,但是由于其具有体积庞大、质量沉重、对环境的污染性大、对电压、电流没有连续调节和综合控制功能等一系列缺点,使之渐渐不能满足科技社会高速发展的需求。在这一发展前提下,由于电力电子变压器(Power Electronic Transformer, PET)具有电气隔离、电压变换、无功补偿等优势功能的特点,因此引起众多国内外专家学者的广泛关注^[9]。单相级联多电平整流器(cascaded H-bridge, CHB)、双有源全桥 DC-DC 变换器以及三相逆变器这 3 部分组成了 PET 传动系统^[10-11],被国内外专家学者广泛采用。如图 1 所示。

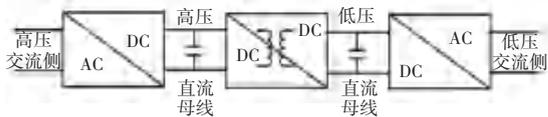


图 1 三级 PET 示意图

Fig. 1 Three-level PET schematic diagram

本文着重于对三级式 PET 的中间级并联双有源全桥 DC-DC 变换器展开研究。作为三级式电力电子变压器的中间级, DAB 通过一个高频变压器, 将输入端的逆变电路与输出端的整流电路连接, 实现功率传输和能量传递的目的, 而基于 DAB 在拓扑结构上的高度对称性, 在工作状态下则可以实现能

量的双向传输。在实际应用中, 对于该级联结构的 PET, 各个模块的主电路参数不能保证完全一致, 所以传输功率不平衡现象是无法避免的^[12], 尤其是输出电压与输入电压的失调问题, 对于传输功率偏大的模块, 相应的电流应力也偏大, 由于较大的电流应力就可能失去变换器的软开关特性, 导致器件在电压等级变化、甚至正常工作时的故障率出现大幅增加^[13]。

文中介绍了 DAB 的拓扑结构, 并对其在单移相控制下的工作模式进行了详细分析, 对电压跟随控制原理进行阐述, 搭建电压跟随控制模型。以三模块 DAB 为例, 基于模块参数不匹配导致的前级输出电压波动问题, 提出均压改进方法。在此基础上, 在仿真环节, 针对系统存在的静差、动态性能不稳定的问题, 加入控制器, 改善系统的性能。通过仿真实验, 将所提出方法与传统方法进行对比验证, 验证了所提出方法的有效性。

1 DAB 结构及工作模式

DAB 变换器的电路拓扑如图 2 所示。由图 2 可知, 电路由 2 个全桥电路与一个高频变压器组成, 结构上完全对称。具有带电气隔离、能量可双向流动、结构模块化、容易并联等优点^[14]。

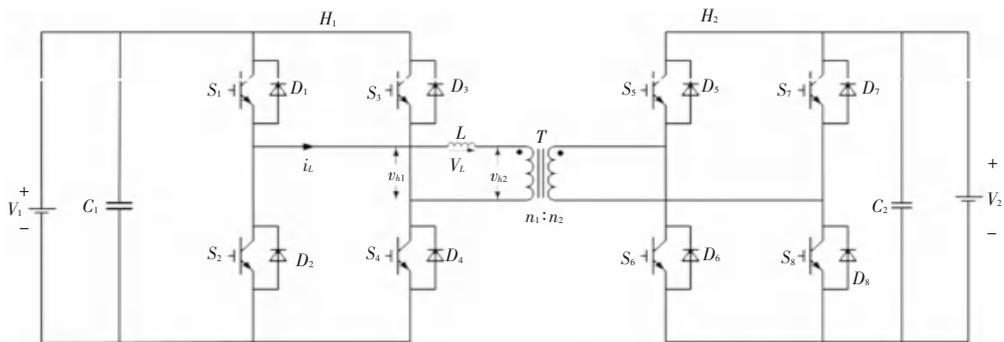


图 2 DAB 拓扑图

Fig. 2 DAB topology graph

双向 DC/DC 变换器配有许多的控制方法, 最基本的则是使用单移相角来进行控制。单移相角控制就是一次侧全桥 H_1 与二次侧全桥 H_2 都以占空比为 50% 的 PWM 波作为开关管的控制信号, 但是 2 个全桥的控制信号之间相差一个角度, 称这个角度为移相角, 通过改变这个移相角的大小, 可以改变一次侧辅助电感 V_L 上的电压与电流, 进而控制能量流动的方向与二次侧电压的大小。单移相角 DAB 电路的

工作状态如图 3 所示^[15-20]。对此拟做研究分述如下。

(1) 阶段一: $t_0 \sim t_1$ 阶段。在时刻 t_0 之前, 一次侧开关管 S_2 和 S_3 导通, 二次侧通过寄生二极管 D_6 和 D_7 续流, 在这个阶段电感电流小于零; 在时刻 t_0 , 一次侧开关管 S_1 和 S_4 导通, 开关管 S_2 和 S_3 关断, 电感电流小于零, 一次侧通过二极管 D_1 、 D_4 续流, 直到 t_1 时刻, 电感电流变为零, 副边二极管 D_6 、 D_7 依旧导

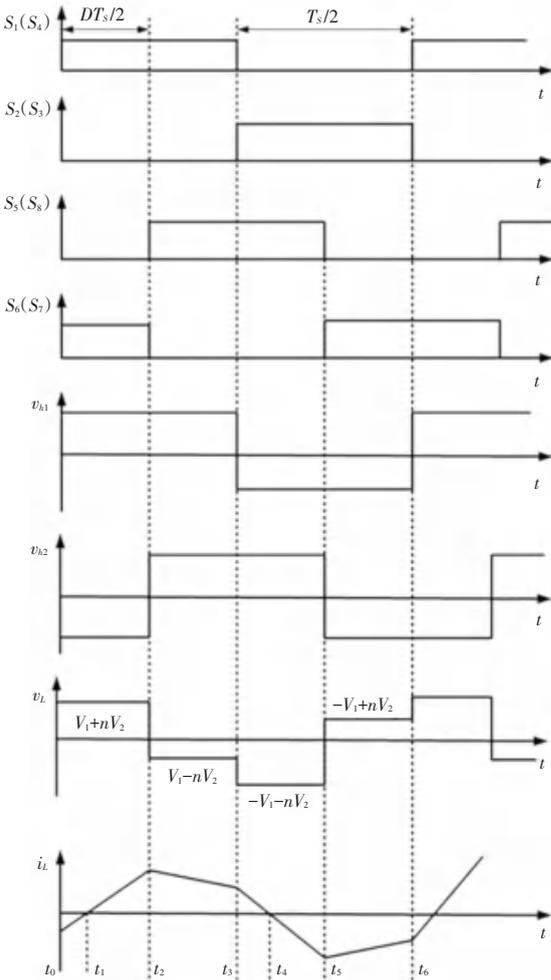


图 3 单移相控制下 DAB 变换器工作状态

Fig. 3 DAB converter working status under SPS

通,这段时间内变压器两侧的电压有 $V_{h1} = V_1, V_{h2} = -V_2$,施加到变压器一次侧辅助电感 L 两侧的电压为 $V_1 + nV_2$,并且电感电流在这段时间不断减小。

(2) 阶段二: $t_1 \sim t_2$ 阶段。在时间点 t_1 ,电感电流为零,由负值向正值变化,一次侧开关管 S_1 和 S_4 导通,二次侧开关管 S_6 和 S_7 导通,电流通过开关管完成回路,不再经过二极管,这段时间内变压器两侧的电压有 $V_{h1} = V_1, V_{h2} = V_2$,加在变压器一次侧的辅助电感两侧的电压仍为 $V_1 + nV_2$;电感电流在这段时间内不断提升。

(3) 阶段三: $t_2 \sim t_3$ 阶段。在时间点 t_2 ,二次侧开关管 S_6 和 S_7 关断,此时因电感电流值为正,二次侧通过 D_5 和 D_6 续流;一次侧仍为开关管 S_1 和 S_4 导通,这段时间内, $V_{h1} = V_1, V_{h2} = V_2$,加在变压器一次侧的辅助电感 L 两端的电压为 $V_1 - nV_2$ (假设 $V_1 < nV_2$),电感电流在这段时间内不断减小。

(4) 阶段四: $t_3 \sim t_4$ 阶段。在时间点 t_3 ,一次侧

开关管 S_1 和 S_4 关断,由于电感电流仍大于零,并且考虑到电感的特性,电感电流在这个时刻不能突变,所以通过 D_2 和 D_3 续流,直到 t_4 时刻,电感电流下降到零,二次侧通过 D_5 和 D_8 续流,这段时间内变压器两侧的电压有 $V_{h1} = -V_1, V_{h2} = V_2$,加在变压器一次侧的辅助电感 L 两侧的电压为 $-V_1 - nV_2$ (假设 $V_1 < nV_2$),电感电流在这段时间内不断减小。

(5) 阶段五: $t_4 \sim t_5$ 阶段。在时间点 t_4 ,电感电流值为零,变化趋势为由正变负,一次侧开关管 S_2 和 S_3 导通,电流流经开关管,不再通过二极管续流。二次侧开关管 S_5 和 S_8 导通,这段时间内变压器两侧的电压有 $V_{h1} = -V_1, V_{h2} = V_2$,加在变压器一次侧的辅助电感 L 两侧的电压为 $-V_1 - nV_2$ 。

(6) 阶段六: $t_5 \sim t_6$ 阶段。在时间点 t_5 ,二次侧开关管 S_5 和 S_8 关断,因为此时电感电流小于零,二次侧电流通过 D_6 和 D_7 续流;一次侧开关管 S_2 和 S_3 导通,这段时间内变压器两侧的电压有 $V_{h1} = -V_1, V_{h2} = -V_2$,加在变压器一次侧的辅助电感 L 两侧的电压为 $-V_1 + nV_2$ 。

在时间点 t_6 ,一次侧开关管 S_1 和 S_4 开通,电流通过 D_1 和 D_4 续流,此后又进入阶段一,电路的一个变换周期结束。

2 DAB 控制系统

针对模块化 DAB 进行研究,为避免模块数量过多以及控制方法过于复杂而影响实验的快速性,故文章以三模块单移相 DAB 为例,提出电压跟随控制方式,这种控制方式可以保证 DAB 输出电压与输入电压始终成比例,在控制输出电压的同时,稳定输入电压,解决了传统控制模式下由于模块参数不一致导致的 DAB 传输功率不平衡的问题。

2.1 电压跟随控制原理

DAB 变换器的对称结构可以实现能量的双向传输,文章以功率正向流动时的情况进行分析,由于 3 个模块结构相同,故用 DAB 模块 1 的控制来进行描述。电压跟随控制的控制模型如图 4 所示。

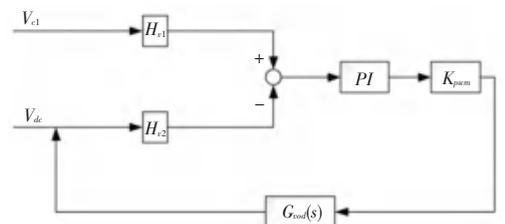


图 4 电压跟随控制模型图

Fig. 4 Voltage following control model diagram

由图4能够推得该模型的原理公式可写为:

$$V_{dc} = \frac{H_{v1}}{H_{v2}} V_1 \quad (1)$$

其中, V_{dc} 是输出电压; V_1 是输入电压; H_{v1} 是输入电压反馈系数; H_{v2} 是输出电压反馈系数; $K_{pwm} = 100$ 。

输入电压与输出电压的比例需要通过调整输入电压与输出电压的反馈系数进行控制。同时, DAB 输出级并联, 各模块的输出电压相同, 调整各模块的反馈系数, 也可以控制输入电压为均压^[21-23]。

2.2 DAB 闭环控制系统设计

DAB 闭环控制框架如图5所示。图5中, G_m 表示 PWM 调制器传递函数; H_1 与 H_2 表示输入电压与输出电压的采样系数。带入电路参数 $G_m = 1/400$, $H_1 = 1$, $H_2 = 10$, 等效电阻 $R = 480 \Omega$, 输入电容 $C_1 = 1\,000 \mu\text{F}$, 输出电容 $C_2 = 2\,000 \mu\text{F}$, 电感 $L = 40 \mu\text{H}$, 开关频率 $f = 10 \text{ kHz}$, 匝比 $n = 10$, 进而可得系统的传递函数为:

$$G_{vo}(s) = \frac{3.42}{1 + 0.46s} \quad (2)$$

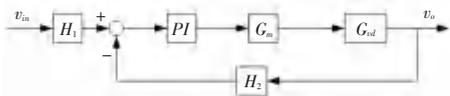


图5 DAB 闭环控制框图

Fig. 5 DAB closed-loop control block diagram

在后续仿真实验中发现系统存在静差, 同时穿越频率过低, 故设计加入 PI 控制器, 提高系统动态性能。

2.3 输入侧均压

文献[24]采用了共同占空比控制的方法对级联 H 桥整流级进行了控制, 但是这种方法只能控制第一个模块的电压为给定值, 当其余模块的负载与第一个模块不同时, 会出现直流侧电压不均衡的情况。

当级联 H 桥整流器直流侧电压不均衡时, 会使某个模块工作在过压状态, 导致开关管损坏或误动作, 影响整个系统的稳定性。而作为整流级负载的 DAB 电路的功率不均衡是整流级电路电压不均衡的主要原因。

通过电压跟随控制可以通过调控反馈系数, 调节输入电压与输出电压比例, 由于输出并联, 只要使各个模块的反馈系数相同即可使 DAB 级输入电压均衡, 根据单模块 DAB 传输功率表达式可得:

$$P = \frac{nV_1V_2}{2f_sL} D(1-D) \quad (3)$$

其中, n 是高频变压器变比; V_2 是输出电压; f_s 是开关频率; D 是移相角。

可以得到使用这种控制方法 DAB 级的传输功率也是均衡的。但是这种控制方法忽略了 DAB 模块参数不匹配造成的输入电压不均衡。

故需要在级联 H 桥整流器中加入一个均压环节。以三模块级联来描述均压控制的思路, 将共同占空比控制中的直流电压反馈由第一个模块的直流侧电压更换为所有模块直流侧电压的平均值, 通过坐标变换得到 d_d 。再将模块 1 直流侧电压 V_{c1} 和模块 2 直流侧电压 V_{c2} 与给定值作差, 而后通过一个 PI 调节器得到模块 1 和模块 2 的占空比偏差 Δd_{d1} 和 Δd_{d2} , 分别同 d_d 相加得到模块 1 与模块 2 的 d 轴占空比, 对于模块 3, 由于前两个模块已经经过调整, 只需要平衡前两个模块的调整量, 即可完成均压, 故取:

$$\Delta d_{d3} = -\Delta d_{d1} - \Delta d_{d2}$$

再将各个模块的调整量 Δd_{d1} 、 Δd_{d2} 、 Δd_{d3} 与 d_d 相加, 即可得到各个模块的 d 轴占空比 d_{d1} 、 d_{d2} 、 d_{d3} , 此后又分别进行坐标逆变换得到 $d_{\alpha 1}$ 、 $d_{\alpha 2}$ 、 $d_{\alpha 3}$ 作为载波移相调制的调制信号, 就可实现输入侧均压。

3 仿真实验

DAB 电路的主要参数见表 1。

表 1 DAB 电路参数

Tab. 1 DAB circuit parameters

参数名称/单位	数值
输入电压/V	4 000
输出电压/V	400
辅助电感/ μH	40
输入侧电容/ μF	1 000
输出侧电容/ μF	2 000
开关频率/kHz	10
高频变压器匝比	10
满载功率/kW	33

3.1 电压跟随控制实验

文章使用的 DAB 控制方式为电压跟随控制, 在第 2 节中进行了详细的论述, 按照电压跟随控制的方式, 输入电压与输出电压的比值和输入电压反馈系数与输出电压的反馈系数相同。DAB 的输入电

压与输出电压如图 6 所示。

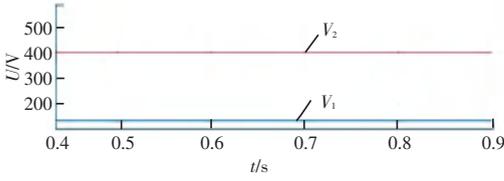


图 6 输入电压和输出电压波形

Fig. 6 Input voltage and output voltage waveform

由仿真结果可以看到,输出电压稳定在 400 V, 输入电压稳定在 40 V, 输入电压与输出电压比值为 10 : 1, 与高频变压器匝比一致, 实现电压调节比 $n = 1$, 使双向 DC/DC 变换器获得较好的动态性能。

DAB 电感电流仿真波形如图 7 所示, 由仿真结果可以看出, 与理论分析基本一致。

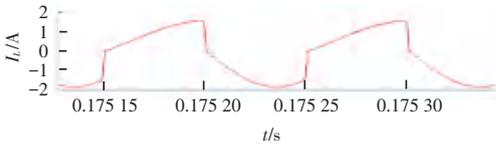


图 7 电感电流 I_L 波形

Fig. 7 Inductive current I_L waveform

3.2 稳定性对比实验

系统初始运行伯德图如图 8 所示, 使用奈奎斯特稳定判据对开环传递函数进行判断, 同时结合伯德图, 可以分析到该系统是稳定的, 由伯德图可以看出系统的低频增益较低, 会使系统稳定运行时出现静差, 同时穿越频率过低, 系统动态性能较差。

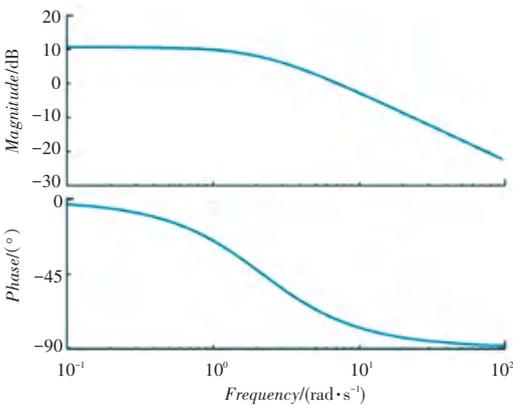


图 8 系统初始运行伯德图

Fig. 8 System initial running Bode diagram

设计 PI 控制器为:

$$G_{PI} = \frac{150(1 + 0.46s)}{s} \quad (4)$$

加入 PI 调节后, 系统的开环传递函数为:

$$G_{vo}(s) = \frac{513}{s} \quad (5)$$

加入 PI 调节后的伯德图如图 9 所示。由图 9

可知, 加入 PI 调节后, 低频增益理论无穷大, 可以达到无静差控制, 穿越频率得到提高, 系统动态性能得到较大改善。

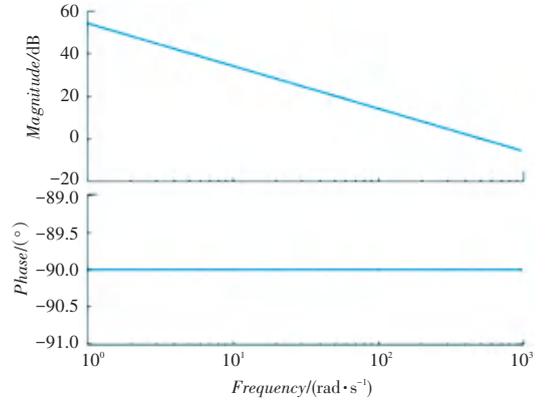


图 9 加入 PI 调节后的伯德图

Fig. 9 Bode diagram after adding PI adjustment

3.3 输入侧均压实验

在未加上均压环节时, 改变输入侧负载分别为 480 Ω 、550 Ω 、400 Ω , 仿真得到 3 个模块的直流电压如图 10 所示。3 个模块的占空比一样, 但负载不一样, 故 3 个模块的输入侧电压不能都保持在给定值上。

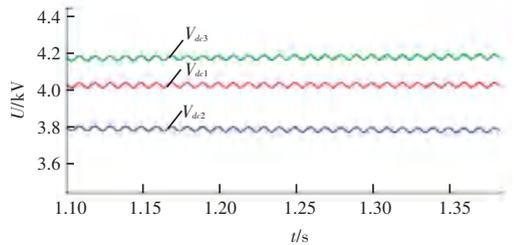


图 10 3 种负载下输入侧电压

Fig. 10 Input side voltage under three loads

加上均压环节后, 带不同负载的情况下 3 个模块的直流电压波形变化如图 11 所示。从图 11 中可以看到, 由于负载不同, 3 个模块的直流电压波形在暂态时有所不同, 但是在稳定后, 3 个模块的电压均稳定在 4 000 V 左右。

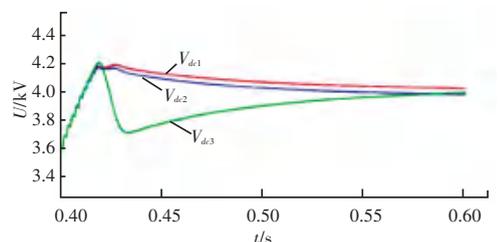


图 11 均压后输入侧电压

Fig. 11 Input side voltage after voltage equalization

4 结束语

文章针对电力电子变压器中的 DAB 变换器,分析其在单移相控制下的工作模式,提出了电压跟随的控制方法,并设计搭建电压跟随模型控制器,该方法可以在不改变 DAB 变换器正常工作模式情况下,使其输出电压与输入电压始终以给定比例运行,同时对输入侧加入均压环节,避免了模块化 DAB 由于自身或前级整流器各个模块的主电路参数无法保证完全一致导致的传输功率不平衡现象。此外,为了改善系统的动态性能,设计了一种 DAB 闭环控制器。仿真实验结果表明:该方法可以达到无静差控制,穿越频率得到提高,系统动态性能得到较大改善。同时文章研究还有如下的不足亟待改进:

(1) 使用载波移相调制的方法使得所有模块均工作在高频 PWM 模式,使得开关损耗变得比较大,影响了系统整体的传输效率。

(2) 由于使用的是模拟控制方式进行电路设计,没有额外设计安全保护与启动保护。

(3) 没有使用软开关技术,可能在运行时出现冲击电压或冲击电流影响系统运行的稳定性。

参考文献

- [1] 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(05):1274-1289.
- [2] 安峰,王嵩,杨柯欣. 输入串联输出并联双有源全桥 DC-DC 变换器多模块优化功率平衡控制方法[J]. 电工技术学报,2018,33(16):3732-3742.
- [3] INOUE S, AKAGI H. A bidirectional DC-DC converter for an energy storage system with galvanic isolation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 22(6): 2299-2306.
- [4] 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.
- [5] 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, 2018, 27(9): 4172-4176.
- [6] 孙帮成,李明高,安超,等. 高速列车节能降耗关键技术研究[J]. 中国工程科学,2015,17(04):69-82.
- [7] 金莉,刘邦银,段善旭. 三电平双有源全桥 DC-DC 变换器回流功率最小的移相控制[J]. 电工技术学报,2018,33(24):5864-5873.
- [8] 孙建锋,徐云飞,周哲,等. C-MMC 型电力电子变压器直流故障分析与保护方法研究[J]. 电测与仪表,2020,57(17):123-128.
- [9] 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):43-50.
- [10] STEINER M, REINOLD H. Medium frequency topology in railway applications [C]//European Conference on Power Electronics and Applications. Denmark, Aalborg: IEEE, 2017:1-10.
- [11] 宋平岗,钟润金,谭景辉. 基于微分平坦理论的双有源桥式变换器的单移相控制[J]. 电测与仪表,2019,56(11):115-121.
- [12] SHI Jianjiang, GOU Wei, YUAN Hao, 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.
- [13] ZUMEL P, ORTEGA L, LÁZARO A, et al. Modular dual-active bridge converter architecture [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3):2444-2455.
- [14] 黄雷. 双有源全桥型 DC-DC 变换器建模及控制[J]. 天津职业技术师范大学学报,2019,29(04):17-20.
- [15] 梁承权,吕德深,黄世玲,等. 隔离式双向 DC/DC 变换器的研究[J]. 信息技术与信息化,2019(04):135-137.
- [16] 周路遥. 双有源全桥双向 DC-DC 变换器典型拓扑研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [17] 张勋. 双向隔离式 DC/DC 变换器[D]. 济南:山东大学,2015.
- [18] HOEG W, LAUTERBACH T. Appendix 2: Frequencies for terrestrial and satellite DAB transmission [M]//Digital audio broadcasting: Principles and applications of DAB, DAB + and DMB. USA: Wiley Telecom, 2009:387-391.
- [19] HOEG W, LAUTERBACH T. Appendix 1: DAB Parameters for Modes I, II, III and IV [M]// Digital audio broadcasting: Principles and applications of DAB, DAB + and DMB. USA: Wiley Telecom, 2009:383-385.
- [20] 宋文涛,朱才溢. 基于负反馈的变压器多直流参考电压传递技术研究[J]. 电测与仪表,2021,58(08):73-82.
- [21] 傅仕航. 模块级联型固态变压器双有源桥 DAB 控制策略的改进研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- [22] 荣强. 模块级联型固态变压器及其控制策略的研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [23] 苟伟. 一种模块级联型固态变压器及其控制策略的研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [24] 滕飞,郝正航,陈卓,等. 基于虚拟相引入的 CHB 整流器控制策略[J]. 电网与清洁能源,2021,37(08):14-22.