

# 直流配网 DC/DC 变压器设计与调试

李国胜, 向保林

(武汉电力职业技术学院 电力工程系, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 直流配电技术适用于园区供电以及多个园区之间的微网互联, 是未来配电网发展的方向, 而多电压等级直流配电网互联的关键设备是直流变压器。提出一种模块化多电平的 DC/DC 变压器, 该变压器无需交流设备介入, 可以直接通过控制子模块的投切进行变压。通过与常规模块化多电平直流变压器的对比得出, 所提方案具有成本低、损耗小、体积小等优势。为验证所提出的变压器拓扑的可行性, 搭建了 20 电平 10 kV/15 kV 直流变压器仿真模型以及 8 电平 50 V/75 V 直流变压器实验样机, 通过仿真和实验, 证明了所提方案的可行性, 可以应用于实际直流配电网。

**关键词:** 直流配电网; 变压器; 模块化多电平; 子模块; 经济性

**中图分类号:** TM 721.3   **文献标识码:** A   **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd21704

## Design and Test of DC/DC Transformer in DC Distribution Network

LI Guosheng, XIANG Baolin

(Department of Electrical Engineering, Wuhan Electric Power Technical College, Wuhan 430079, Hubei, China)

**Abstract:** DC distribution technology is suitable for power supply in the park and micro network interconnection among multiple parks, which is the future direction of distribution network development, and the key equipment of multi voltage level DC distribution network interconnection is DC transformer. A modular multilevel DC / DC transformer was proposed. The transformer can directly change the voltage by controlling the switching of sub modules without the intervention of AC equipment. Compared with the conventional modular multilevel DC transformer, the proposed scheme has the advantages of low cost, small loss and small size. In order to verify the feasibility of the proposed transformer topology, a 20-level 10 kV / 15 kV DC transformer simulation model and an 8-level 50 V / 75 V DC transformer experimental prototype were built. The feasibility of the proposed scheme was proved through the simulation and the test, which can be applied to the actual DC distribution network.

**Key words:** DC distribution network; transformer; modular multilevel; sub-module(SM); economy

目前,随着直流负荷的广泛应用,直流配电技术开始成为一种备受关注的配电形式。柔性直流配电网具备在交流侧提供无功支撑的能力,并且谐波含量低<sup>[1-2]</sup>,能够更加高效地将光伏和风电等分布式电源、储能装置以及各类负荷整合到配电网中<sup>[3]</sup>,适用于园区供电以及多个园区之间的互联,是未来配电网发展的方向。

为构建完整的直流配电网,直流变压器(DC transformer, DCT)成为连接多电压等级直流配电系统的关键设备<sup>[4-6]</sup>。目前,国内外研究机构对直流变压器的拓扑结构及控制策略展开了大量研

究,相继提出了基于非隔离型结构的方案<sup>[7]</sup>、基于三电平扩容的方案<sup>[8]</sup>、自耦型方案<sup>[9]</sup>、多端口方案<sup>[10]</sup>、多电平方案<sup>[11]</sup>等多种拓扑结构。

文献[12]设计了一种将多重化三电平和模块化多电平相结合的电气拓扑,能够满足直流汇集的要求,但其中涉及到了大量的交流变压器,其本质仍是针对交流进行变压,若将其应用于直流配电网,成本较高。文献[13]依据 LC 串联谐振原理,提出了一种模块化直流变压器,该设备具有中、低压直流配电系统间双向导通的能力,并使用了高频变压器,以缩小设备占地面积,但其选

**基金项目:**湖北省技术创新专项重大项目(2017ACA087)

**作者简介:**李国胜(1965—),男,硕士,高级工程师,Email:1097995976@qq.com

用两电平换流器为交直流能量转换设备,将增大系统谐波含量。文献[14]采用了基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的直流变压器,以降低谐波含量,文献[15]在其基础上对MMC直流变压器的控制系统进行了设计,同时引入了全桥型子模块(full bridge sub-module, HBSM)以实现直流故障隔离职能。但上述两种MMC直流变压器所需子模块(sub-module, SM)较多,经济性较低。此外,诸如大连海事大学<sup>[16]</sup>、天津大学<sup>[17]</sup>等高校亦开展了相关研究,并研制了兼备科研及教学功能的DC/DC变压器动模样机。

在上述背景下,本文设计了一种新型DC/DC变压器,该拓扑可以实现直流直接变压,结构简单,体积小,无需体积庞大的交流变压器,经济性较高。依次进行了变压器主电路拓扑结构设计、子模块电容取值计算、变压器工作机理分析、调制策略设计、与常规模块化多电平直流变压器对比等工作,最后进行了软件仿真校验以及物理实验验证,证明了所提出的直流变压器能够连接不同电压等级的直流线路,并可以双向配电,响应速度较为灵敏,能够用于直流配网工程实际。

## 1 变压器拓扑结构及工作机理

### 1.1 变压器拓扑结构

模块化DC/DC变压器拓扑如图1a所示,该变压器由 $n$ 个子模块构成,各个子模块内部结构如图1b所示。

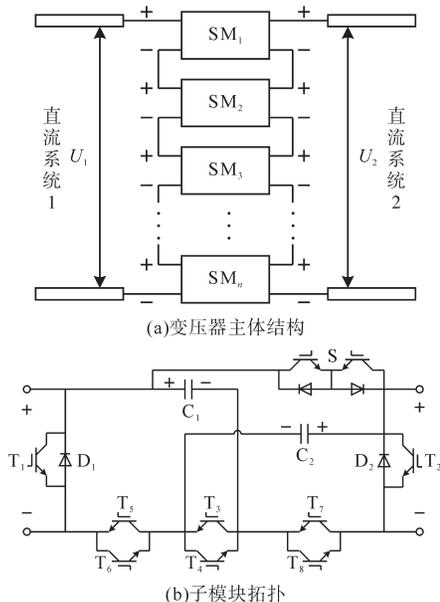


图1 直流变压器拓扑结构

Fig.1 DC transformer topology

图1中, $U_1, U_2$ 分别为一、二次侧的直流电压; $C_1, C_2$ 分别为子模块内部一、二次侧电容,负责支撑两侧的直流电压; $T_1 \sim T_4$ 为负责控制 $C_1, C_2$ 投切的IGBT开关; $D_1, D_2$ 为与IGBT反并联的二极管,负责续流; $T_5 \sim T_8$ 为负责隔离子模块两端口之间电流的IGBT开关; $S$ 为电力电子开关群组,能够正反双向导通, $S$ 与 $T_3, T_4$ 相配合负责对 $C_1, C_2$ 均压。

若变压器正常工作时,一次侧投入子模块数为 $n_1$ ,二次侧投入子模块数为 $n_2$ ,两侧等效电容 $C_{eq1}$ 和 $C_{eq2}$ 为

$$\begin{cases} C_{eq1} = \frac{C_1}{n_1} \\ C_{eq2} = \frac{C_2}{n_2} \end{cases} \quad (1)$$

同时变压器一、二次侧投入子模块所储存的能量应相等,即

$$\frac{1}{2} C_{eq1} U_1^2 = \frac{1}{2} C_{eq2} U_2^2 \quad (2)$$

故 $C_1, C_2$ 取值应满足的关系为

$$C_1 = \frac{n_1}{n_2} \frac{U_2^2}{U_1^2} C_2 \quad (3)$$

### 1.2 变压器工作机理

各SM的 $C_1, C_2$ 两电容投切状态由 $T_1 \sim T_4$ 四个IGBT控制,故各个SM总共有三种工作模式,假设功率从一次侧向二次侧传递,则各个工作模式下的电流路径如图2所示。

工作模式1:导通 $T_2, T_3, T_5$ 三个IGBT,其余IGBT保持关断,使一次侧 $C_1$ 投入,二次侧 $C_2$ 切除。在该状态下,直流电流为 $C_1$ 充电, $C_1$ 电压上升, $C_2$ 无电流流过,其电压保持恒定。

工作模式2:导通 $T_1, T_3, T_7$ 三个IGBT,其余IGBT保持关断,使一次侧 $C_1$ 切除,二次侧 $C_2$ 投入。在该状态下,直流电流由 $C_2$ 放电提供, $C_2$ 电压下落, $C_1$ 无电流流过,其电压保持恒定。

工作模式3:导通 $T_1, T_2, T_4$ 三个IGBT,以及开关 $S$ 中的IGBT,使 $C_1, C_2$ 均处于切除状态,外部电路将不会影响 $C_1, C_2$ 电压, $C_1, C_2$ 通过 $T_4$ 及 $S$ 构成闭合回路,进行均压,直至 $C_1, C_2$ 电压相等。

必须注意的是, $C_1, C_2$ 两电容不可同时投入,即 $T_2, T_3, T_7$ 三个IGBT或 $T_4, T_6, T_8$ 三个IGBT不可同时导通,否则子模块一次侧和二次侧将直接构成闭合回路,将产生极大的过电流,烧毁电力电子开关器件。

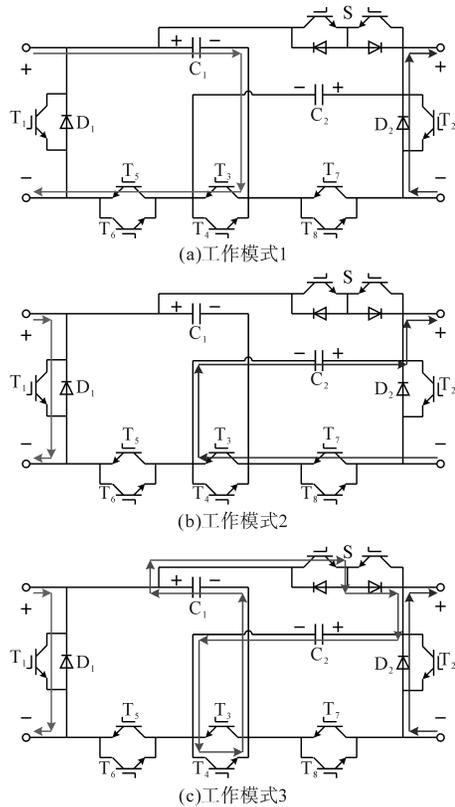


图2 子模块工作模式

Fig.2 Sub module operation mode

假定功率从一次侧向二次侧传递, SM处于工作模式1或工作模式2时,  $C_1$  的电压  $U_{C1}$  处于上升或恒定状态, 而  $C_2$  的电压  $U_{C2}$  处于下降或恒定状态。若变压器各个SM仅处于工作模式1或工作模式2会造成  $U_{C1}$  逐渐升高,  $U_{C2}$  逐渐下降, 能量无法从一次侧向二次侧传输。当SM处于工作模式3时, SM内部电容  $C_1$  和  $C_2$  均为切除状态, 此时, 两电容不参与支撑变压器一、二次侧直流电压  $U_1$  和  $U_2$ , 而是以两电容均压的方式形成了一、二次侧能量流通回路, 两电容电压均衡过程中  $U_{C1}$  下降,  $U_{C2}$  上升。工作模式3实现了功率由一次侧向二次侧的传递, 该模式是维持SM两侧电容电压均衡的关键环节。在变压器工作过程中, 应有一定数目的子模块处于工作模式3状态, 确保  $C_1$  和  $C_2$  电压均衡, 实现一、二次侧能量流通。

## 2 变压器调制策略

经采集的  $C_1, C_2$  电压信号应首先在控制器中按照从小到大的顺序进行排序, 由于应用于配电网的直流变压器所需子模块数量较少, 排序算法采用经典冒泡排序法即可,  $n$  个子模块需要进行

$n(n-1)/2$  次比较, 以电容  $C_1$  电压为例, 具体排序流程如图3所示。

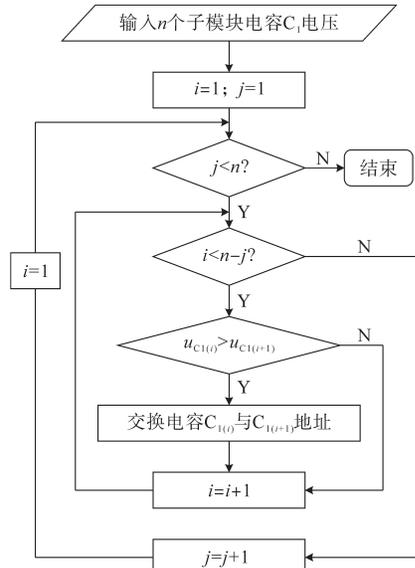


图3 冒泡排序法流程图

Fig.3 Flow chart of bubble sorting method

假定功率从一次侧向二次侧传递, 即一次侧投入的电容电压上升, 二次侧投入的电容电压下降, 则在每个控制周期内有以下投切规则: 1) 切除一次侧  $C_1$  电压最大的SM, 停止对其  $C_1$  充电, 切除二次侧  $C_2$  电压最小的SM, 停止对其  $C_2$  放电; 2) 投入一次侧  $C_1$  电压最小的SM, 对其  $C_1$  进行充电, 投入二次侧  $C_2$  电压最大的SM, 对其  $C_2$  进行放电; 3) 若出现一次侧和二次侧电容均为切除状态的子模块, 则使该子模块进入工作模式3, 均衡两电容的电压。

## 3 与常规直流变压技术对比

常规隔离型模块化多电平直流变压器的本质仍是使用高频交流变压器进行变压, 并依据变压器一、二次侧直流电压来确定SM使用数量。如图4所示的单相DC变压器, 其一、二次侧处于投入状态的子模块数量分别为  $N_1$  和  $N_2$ , 即全部子模块个数为  $4(N_1+N_2)$ 。而本文所提出的模块化多电平的DC/DC变压器(拓扑如图1a所示)所需SM数量为  $N_1+N_{S3}$ , 电容数量为  $2(N_1+N_{S3})$ ,  $N_{S3}$  为工作模式3的SM数量, 为了降低  $N_{S3}$ , 可在控制阀选取额定电流较高的IGBT, 即使选取与低压侧额定电流相同的IGBT,  $N_{S3}$  与  $N_2$  相等, 本文所提的直流变压器所需的SM数量、电容数量也远小于常规直流变压器, 应用于直流配电网成本较低, 体积较小。

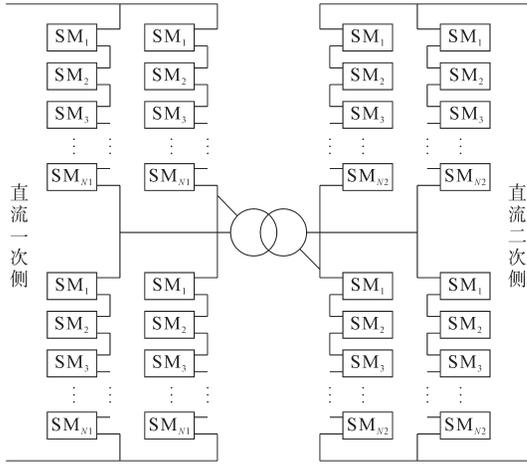


图4 常规模块化多电平直流变压器

Fig.4 Conventional modular multilevel DC transformer

常规隔离型模块化多电平直流变压器,每个电容需要2个IGBT进行控制,变压器总共需要 $8(N_1+N_2)$ 个IGBT。而本文的DC/DC变压器,每个SM中包含10个IGBT,即每个电容平均需要5个IGBT,变压器总共需要 $10(N_1+N_{s3})$ 个IGBT。由于 $N_{s3} \leq N_2$ ,所以两种方法所需IGBT数量基本一致。

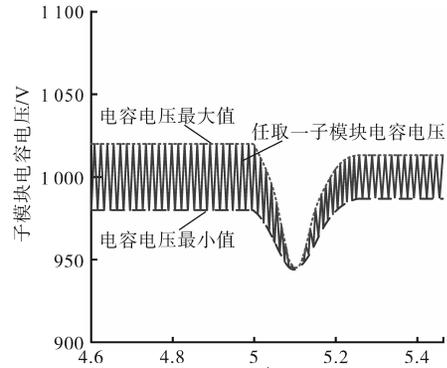
常规隔离型模块化多电平直流变压器必须使用高频交流环节实现变压,势必产生一定的交流损耗,而本文所提出的DC/DC变压器能够直接变换直流电压等级,无需交流线路及高频变压器等中间环节,降低了装置体积及运行损耗。此外,常规隔离型模块化多电平直流变压器的换流桥臂中包含高频交流分量,其IGBT动作频率通常为交流侧频率的2~3倍。而本文所提出的DC/DC变压器桥臂电流仅存在直流分量,电压波动率相同时,开关频率更低,因而开关损耗也低于隔离型直流变压器。

## 4 仿真及实验

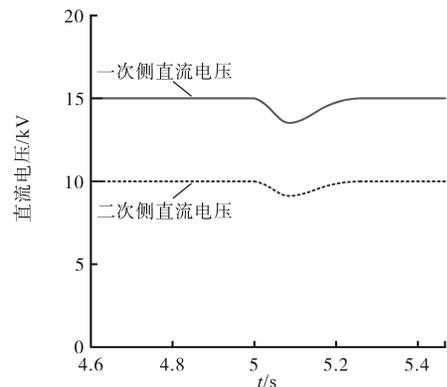
### 4.1 仿真验证

依据所述拓扑结构在PSCAD软件上构建了20电平10 kV/15 kV直流变压器模型,直流系统额定传输有功功率为5 MW,变压器参数为:子模块总数 $n=20$ ,一次侧投入子模块个数 $n_1=15$ ,二次侧投入子模块个数 $n_2=10$ ,一次侧子模块电容值 $C_1=5\ 000\ \mu\text{F}$ ,二次侧子模块电容值 $C_2=7\ 500\ \mu\text{F}$ ,一次侧直流电压值 $U_1=15\ \text{kV}$ ,二次侧直流电压值 $U_2=10\ \text{kV}$ ,额定功率 $P_N=5\ \text{MW}$ 。

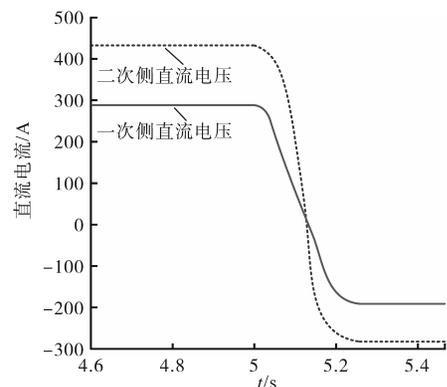
直流系统初期一次侧向二次侧稳定传输4.5 MW,在5 s时刻翻转至-3 MW,变压器各个物理量动态响应波形如图5所示。



(a)电容电压



(b)两侧直流电压



(c)两侧直流电流

图5 仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms

DC/DC变压器的一、二次侧的换流器均采用PV下垂控制。观测图5可得出,DC功率翻转后,两侧直流电压存在下滑趋势,约0.25 s后恢复额定值;直流电流约在5.12 s时刻下降至0,5.25 s时刻趋于稳定;子模块电容电压约在5.12 s时刻下降至波谷,时间基本与直流电流过零时刻相吻合,由于电流反向后传输功率较低,故电容电压波动量比翻转前相对较小。

为了进一步体现该拓扑的优势,搭建了相同容量的常规隔离型模块化多电平直流变压器模型,与本文拓扑进行仿真对比,两种变压器一、二次侧功率对比如图6所示。

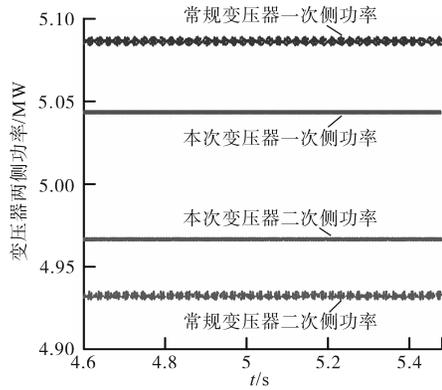


图6 两种变压器功率对比

Fig.6 Power comparison of two kinds of transformers

常规隔离型模块化多电平直流变压器一次侧和二次侧功率分别为 5.08 MW 和 4.93 MW, 损耗约为 2.95%, 本文的直流变压器一次侧和二次侧功率分别为 5.04 MW 和 4.96 MW, 损耗约为 1.59%, 常规直流变压器所产生的更多损耗主要是由交流变压器及桥臂环流产生的。另外所搭建的常规直流变压器模型为保证交流侧谐波含量较低, 采用 PWM 调制, 变压器两侧桥臂均使用了 10 个子模块, 总共需要 80 个子模块, 远多于本文所提出的直流变压器。

#### 4.2 实验验证

为贴合工程实际, 依据所述拓扑结构搭建了 8 电平 50 V/75 V 直流变压器物理动态模拟系统, 直流系统额定传输功率为 150 W, 由于电压等级较低, 样机采用 IRF530A 替代 IGBT, 其耐压与耐流能力分别为 100 V 和 14 A, 变压器具体参数为: 子模块总数  $n=8$ , 一次侧投入子模块个数  $n_1=6$ , 二次侧投入子模块个数  $n_2=4$ , 一次侧子模块电容值  $C_1=1\ 000\ \mu\text{F}$ , 二次侧子模块电容值  $C_2=1\ 500\ \mu\text{F}$ , 一次侧直流电压值  $U_1=75\ \text{V}$ , 二次侧直流电压值  $U_2=50\ \text{V}$ , 额定功率  $P_N=150\ \text{W}$ 。实验布线如图 7 所示。

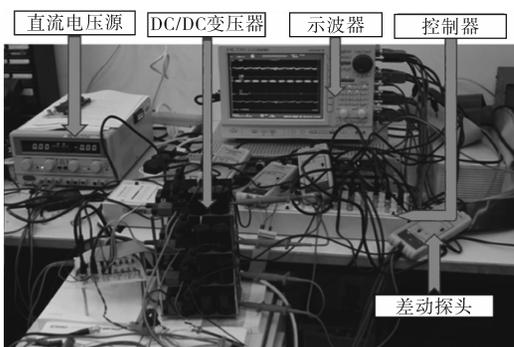
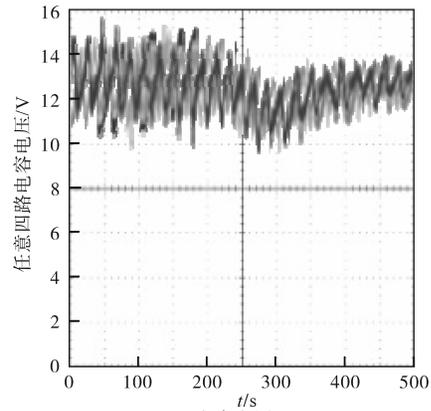


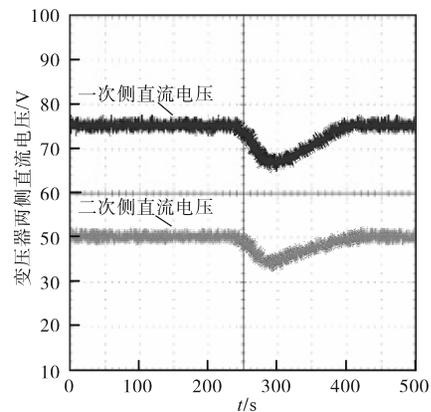
图7 实验平台

Fig.7 Experimental platform

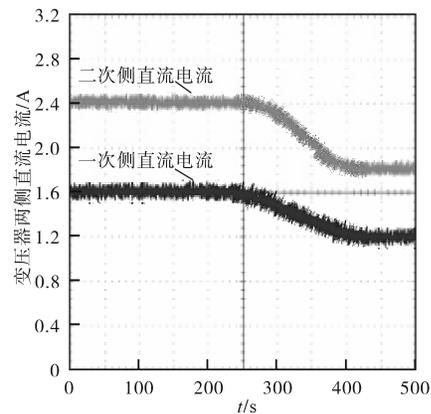
变压器一次侧与直流电源相连接, 二次侧与四象限功率放大器连接, 在运行初期一次侧向二次侧稳定传输 120 W 有功功率, 一段时间后下降至 90 W 有功功率, 变压器各个物理量动态响应波形如图 8 所示。由于实验室所用直流电源无法吸收功率, 所以暂时未进行功率翻转实验。



(a) 电容电压



(b) 两侧直流电压



(c) 两侧直流电流

图8 实验波形

Fig.8 Test waveforms

由图 8 可知, 传输功率下降后直流电压稍有下滑趋势, 但能够迅速恢复并保持稳定, 同时直流电流能够较快速地达到设定值, 待电容电压恢复稳定后, 其波动量较功率下降前有所降低。

综上所述, 所设计的 DC/DC 变压器在仿真软

件和实验平台中均有良好的稳态及动态特性,且两者的动态响应趋势大致相同,证明了该DC/DC变压器拓扑结构及其控制流程的正确性。

## 5 结论

本文设计了一种适用于直流配电网的DC/DC变压器,无需交流设备,能够依靠电容实现直流直接变压,并且具备双向配电能力,经济性较高。针对所设计的拓扑结构,推导了两电容器的容值关系,并根据不同工作模式的子模块设计了相应的调制策略。通过与常规模块化多电平直流变压器的对比,得出本文的方案具有成本低、损耗小、体积小等优势。最后该DC/DC变压器通过了PSCAD仿真模型验证以及8电平实验样机验证,具有一定的工程适用性。

### 参考文献

- [1] 曾杰,张弛,袁志昌,等.实现分区均衡的直流配电系统控制方法研究[J].电气传动,2019,49(9):46-51.
- [2] 陈景文,张东,党宏社.基于下垂控制的直流微网多储能系统研究[J].电气传动,2018,48(1):42-46.
- [3] 辛业春,王威儒,李国庆,等.海上风电MMC-HVDC联网系统控制策略[J].太阳能学报,2019,40(6):1731-1738.
- [4] 刘瑞煌,杨景刚,贾勇勇,等.中压直流配电网中直流变压器工程化应用[J].电力系统自动化,2019,43(23):131-140.
- [5] 刘海涛,熊雄,季宇,等.直流配电网下多微网系统集群控制研究[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7159-7167.
- [6] 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.
- [7] 孙长江,蔡旭,张建文,等.电压自均衡直接耦合式模块化多电平直流变压器[J].中国电机工程学报,2018,38(21):6401-6410.
- [8] Deng F J, Chen Z. Control of improved full-bridge three-level DC/DC converter for wind turbines in a DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 314-324.
- [9] 李梦柏,向往,左文平,等.具备无闭锁穿越直流故障能力的直流自耦变压器[J].电力系统自动化,2018,42(4):82-88.
- [10] Gu C Y, Zheng Z D, Xu L, et al. Modeling and control of a multiport power electronic transformer (PET) for electric traction applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2):915-927.
- [11] Zhao B, Song Q, Li J, et al. High-frequency-link modulation methodology of DC-DC transformer based on modular multilevel converter for HVDC application: comprehensive analysis and experimental verification [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5):3413-3424.
- [12] 王新颖,汤广福,贺之渊,等.远海风电场直流汇集用DC/DC变换器拓扑研究[J].中国电机工程学报,2017,37(3):837-847.
- [13] 张中锋,谢晔源,许烽,等.适用于直流配电网的直流变压器技术研究[J].电力电子技术,2019,53(5):13-15,20.
- [14] 李胜,李春叶,李辉,等.模块化多电平高频直流变压器类方波调制[J].电气传动,2019,49(8):43-46.
- [15] 马保慧,程盛,史书怀,等.基于混合子模块MMC结构的直流变压器控制策略[J].电气传动,2019,49(10):75-79.
- [16] 张勤进,刘彦呈,牛京威,等.模块化双向直流变换器实验平台探索与实践[J].实验技术与管理,2019,36(9):87-91.
- [17] 李斌,张伟鑫.新型模块化多电平动态投切DC/DC变压器[J].中国电机工程学报,2018,38(5):1319-1328.

收稿日期:2020-04-01

修改稿日期:2020-04-14