

基于 MMC 的高升压比直流变压器 调制策略研究

史书怀,王 丰,朱彦霖,朱田华,卓 放
(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学),西安 710049)

摘要: 现有的高压大功率 DC/DC 变换器研究开始更多地关注基于模块化多电平换流器 MMC(modular multilevel converter)的 face-to-face(F2F)拓扑。该拓扑由变压器连接两个模块化多电平换流器,易于根据电压等级扩展模块数量,因此,基于 F2F 的拓扑开始研究并应用在直流电网互联、新能源并网等领域。目前,基于该结构的直流变压器主要由其中频变压器提供变比。针对上述拓扑的特点,提出不依赖变压器变比的调制策略。采用该调制策略,可以灵活调节拓扑中各桥臂模块的通断改变电压变比,同时兼顾升压、降压功能。最后,在 Matlab/Simulink 中给出仿真算例,验证提出的方法的可行性。

关键词: 直流电网;电力电子变压器;直流变压器;模块化多电平变换器;调制策略

Research on Modulation Strategy of High Voltage Ratio MMC Based DC Transformer

SHI Shuhuai, WANG Feng, ZHU Yanlin, ZHU Tianhua, ZHUO Fang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The present research on high-voltage and high-power DC/DC converter begins to pay more attention to the modular multi-level converter based on face-to-face(F2F) topology. The topology consists of two modular multi-level converters connected by a transformer, which is easy to expand the number of modules according to the voltage level. Therefore, in the DC power grid interconnection, renewable power integration and other fields topology based on F2F began to have more research and application. At present, DC transformer based on this structure mainly provide variable ratio with the intermediate frequency transformer. Based on the characteristics of the topology above, this paper proposes a modulation strategy which does not depend on the transformer ratio. Using this modulation strategy, the voltage ratio can be adjusted by flexibly turning on/off the bridge arm module, which can make it have boost and buck function. Finally, a simulation example is given in Matlab/Simulink to verify the feasibility of the proposed method.

Keywords: DC power grid; power electronics transformer; DC transformer; modular multilevel converter; modulation strategy

在能源消耗日增的情况下,通过长距离、高电压、大功率的远程输电成为解决能源需求的主要方式。而随着输电距离的增加,直流输电在能量损耗、

建造成本等方面的优势凸显^[1,2]。在高压直流输电领域,目前的输电方式主要为点对点输电,还没有实现在不同电压等级直流电网之间连接。由于传统变压器只能连接交流电路,因此为了实现直流线路互联,高压、大功率直流变压器将成为主要的解决方式。与传统变压器相比,直流变压器有如下特点:可实现直流电路联网,且有利于分布式能源接入;体积小、便于运输安装;控制及稳定性好,可通过不同的控制策略使系统运行在不同的需求下;可实现自

收稿日期:2017-05-29;修回日期:2017-08-08

基金项目:大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室开放基金资助课题:高压大功率直流变压器关键技术研究(SKLLDJ 022016003)

Project Supported by State Key Laboratory of Large Electric Drive System and Equipment Technology: Key Technologies in High Voltage DC/DC Converter Research(SKLLDJ022016003)

检、自保护等智能功能,易于实现设备间通信。

而随着全控型半导体器件(如 IGBT 等)的兴起,以电压源型换流器为核心的柔性高压直流输电的研究与应用日益广泛。在国家电网的进一步规划中,直流输电线路的组网将是交直流混联的第一步^[3]。因此,直流变压器需要承担直流组网的核心功能。模块化多电平换流器 MMC(modular multilevel converter)因为其模块化、良好的扩展性、电压等级高、输出谐波含量小等特点在高压领域广泛应用^[4,5]。在文献[6]中直流变压器的变比分为低变比($k < 1.5$, $k = V_{dc \text{ high voltage side}} / V_{dc \text{ lower voltage side}}$)、中变比($1.5 \leq k \leq 5$)和高变比($k \geq 5$)。为了实现高压、大功率的 DC/DC 变换器,现有的研究主要提出两种拓扑:多变换器级联结构^[7,8]和基于 MMC 的 face-to-face(F2F)结构^[9],即使用变压器连接两个 MMC 电路。多个小容量变换器级联的方法可以达到较高的电压等级,但随着电压等级的升高,各变换器之间容易产生较大的环流,对控制策略的要求也较高,处于高电位的隔离变压器绝缘要求也随之增大。因此多变换器级联结构主要用于中压场合,而在中高压领域 F2F 结构受到更多关注。在新能源直流并网等应用场合,则需要高高压比的直流变压器用于新能源直接接入直流电网,减少交直流变换带来的损耗和设备成本^[3,10,11]。在现有的研究中,F2F 结构采用的调制方法多为应用于 MMC 的最近电平逼近调制、载波移相调制等方法^[12-14],且直流变压依赖变压器的变比。相对于采用最近电平逼近调制 NLM(nearest level modulation)、载波移相调制 CPS(carrier phase shift)等调制方法,方波调制使用更高的频率而不增加器件损耗,而且基波电压的利用率最大。但实现直流变压时,文献[12, 15, 16]的调制方法依然依赖于变压器的变比。文献[9]提出了“ $N_{\text{upper}}/N_{\text{lower}}$ ”的调制方法,该方法在不同时刻各桥臂导通的子模块数不同,可以不依赖变压器变比实现直流变压。但其控制子模块均压时采用开关表,没有考虑模块的电压大小,难以达到较好的均压效果,且当 N_{upper} 与 N_{lower} 变化时,需重新制定开关表,扩展性很差。

本文针对 F2F 拓扑的特点,以及 $N_{\text{upper}}/N_{\text{lower}}$ 调制方法中使用开关表控制系统通断的方法,对其进行了改进,电压的通断利用软件的逻辑判断直接控制,引入各模块的电压值并进行排序,以达到更好的均压效果,并且可以随时改动各桥臂子模块的通断数而无需重新制定开关表。同时,根据两侧桥臂子模块数目的改变,可以实现系统的大变比升压或降压的功能。最后,使用 Matlab/Simulink 对该方法进行仿真,验证方法的可行性。

1 基于模块化多电平换流器的 F2F 拓扑介绍

F2F 结构是应用于中高压直流输电中的直流变压器中较为认可的一种结构,其主电路拓扑如图 1 所示。本文采用单相结构,由变压器连接 MMC 的整流器和逆变器,直流侧连接不同等级直流母线,形成 F2F 系统。一次侧和二次侧结构基本相同,以一次侧结构为例进行分析。MMC 逆变器的基本结构单元为半桥子模块。正常运行时,子模块有 2 个工作状态,投入和切除状态,表示电路中投入或切除子模块的电容。每个桥臂由 n 个子模块串联 1 个桥臂电感构成,上下两个桥臂构成一个相单元。直流侧母线电压为 U_{dc1} ,交流侧相电压为 U_{va} 和 U_{vb} 。本文系统的输入为直流电压源,输出侧接负载,控制为恒电压输出。根据控制和调制策略的不同,整流侧与逆变侧各桥臂的子模块数可以不相同。系统的

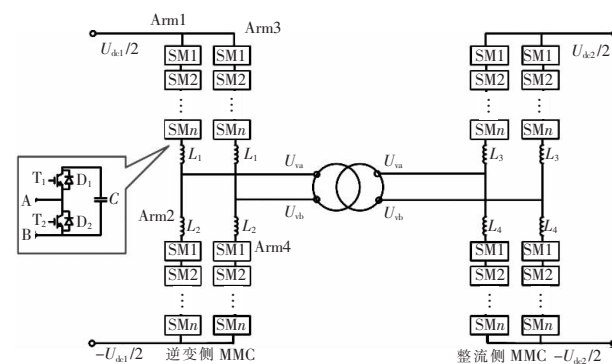


图 1 主电路拓扑

Fig.1 Topology of main circuit

升压或者降压模式由调制方式决定。

2 控制与调制算法设计

基于模块化多电平换流器 MMC 的直流变压器通常将系统当做两个独立的 MMC 进行控制,即控制中频变压器的输入电压为定值,经过变压器后作为整流侧 MMC 的输入,进而控制整流侧 MMC 的直流侧输出。在上述控制思路下,交流侧电压通常为正弦波,两个 MMC 也通常采用最近电平逼近、载波移相等控制策略。但该结构 DC/DC 变换器的交流电压在系统内部,因此交流侧电压为方波时传输效率最高^[16]。因此本文采用移相角控制,将 F2F 型直流变压器看做一个双向有源桥式电路 DAB(dual active bridge)。以输入 2 kV 的系统为例,每桥臂 4 个半桥模块,进行恒电压输出控制。交流侧的电压由每个桥臂开通和关断的模块数决定。

2.1 控制算法

移相角控制可通过控制变压器两端的相角差传输功率,由于系统输出直流,因此只需要考虑有功功率的传输。桥臂电感 L_1, L_2, L_3, L_4 和变压器漏感等可以等效为一个电感 L_{tot} , 变压器两侧电压的相角差即为功率调节值,系统的功率变化与电压升降,由系统自动调节电压的相角差 δ 。变压器简化模型如图 2 所示,交流侧的有功传输^[17]为

$$P = U_{out} I_{out} = \frac{U_{ac1} U_{ac2} \sin \delta}{2\omega L_{tot}} \quad (1)$$

式中: ω 为交流电压角频率; U_{ac1}, U_{ac2} 为变压器两侧交流电压幅值。

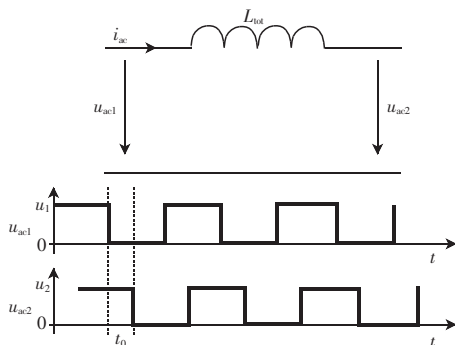


图 2 变压器简化模型

Fig.2 Simplified model of transformer

当功率单向传输且负载固定时, δ 与功率、输出电压正相关。采用控制策略的控制回路设计如图 3 所示。其中 arm- x 表示图 1 中相应侧的任一桥臂。同一侧中各桥臂的调制策略将在下文中详述。确定输出模块数后,一次侧各模块由方波信号直接驱动,二次侧的驱动信号由一次侧的驱动信号延迟 Δt 得到,其中 Δt 为电压反馈计算出的移相角所对应的移相时间。

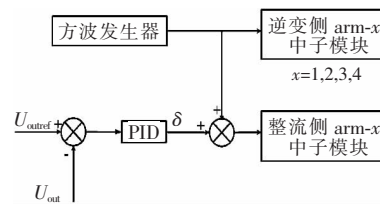


图 3 控制回路设计

Fig.3 Control loop design

2.2 调制算法

以图 1 中逆变侧为例,交流侧的输出电压 U_{ac} 与直流侧电压 U_{dc} 的比值可以由每桥臂在不同时刻的模块通断数决定。假设在 t_1 时刻,第 1、4 桥臂导通的模块数是 s ,第 2、3 桥臂导通的模块数是 m ,则交流侧电压 U_{ac} 的计算公式为

$$\begin{cases} U_{va} = \frac{m}{m+s} U_{dc} + \left(-\frac{U_{dc}}{2}\right) \\ U_{vb} = \frac{s}{m+s} U_{dc} + \left(-\frac{U_{dc}}{2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{U_{ac}}{U_{dc}} = \frac{m-s}{m+s} \quad (3)$$

在 t_2 时刻,第 1、4 桥臂导通的模块数为 m ,第 2、3 桥臂导通的模块数是 s ,则此时交流侧电压幅值不变,方向相反。因此,可通过改变 s 与 m 改变交流侧的输出电压,记作 s/m 调制方式。整流侧与逆变侧类似,但 s 与 m 的取值不相同,则整流侧与逆变侧将会有不同的电压变比,二者相乘即为直流变压器的变比。在系统运行时,根据系统的变比需求,选取两侧变比相乘接近直流变压器变比的 m 与 s 值,以减小 PI 调节的范围。如系统设置变比为 2,每桥臂模块数为 4,逆变侧可采用 3/1 调制,逆变侧变比为 0.5;整流侧采用 2/1 调制,整流侧变比 3。此时系统依靠模块的变比为 1.5,超调的部分可依靠 PI

调节。两侧也可选取其余 m 与 s 的数值,使之接近系统变比即可。

2.3 均压控制策略

由于各个桥臂导通的模块数 s 、 m 与每个桥臂导通的模块总数 n 没有约束关系,因此每个开通或关断间隔都需要计算桥臂导通的模块数并进行均压 (voltage-sharing) 计算,否则会有模块长时间处于开通或关断状态,造成子模块电容过充等问题。本文所用第 1、第 4 桥臂电容均压算法流程如图 4 所示。

逆变侧第 1、4 两个桥臂导通状态始终相同。在 t_1 时刻,即标志位置 1 时,对第 1 和第 4 桥臂中各子模块的电容电压进行排序,而后根据系统运行要求确定的参数 s 和 m ,将该桥臂中电压较小的 s 个模块导通;此时,第 2 和第 3 桥臂对应开通 m 个模块。在标志位置 0 时,各桥臂通断模块相反。

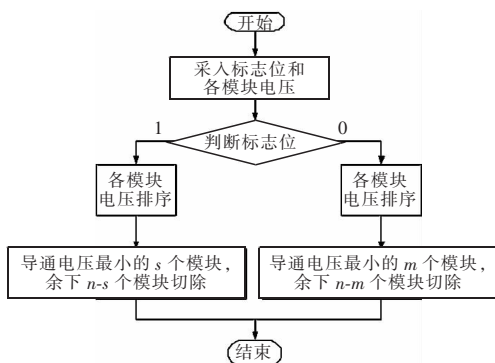


图 4 第 1、第 4 桥臂电容均压算法流程

Fig.4 Flow chart of voltage balancing in the first and fourth arm

3 仿真结果与分析

本文在 Matlab/Simulink 中搭建单相的 DC/DC 变换器仿真模型,即逆变侧由 4 个桥臂构成单相 MMC,整流侧由 4 个桥臂构成单相 MMC,每桥臂有 4 个半桥子模块。原边的直流侧接入 2 kV 的直流电压源,副边直流侧接入负载,中频变压器变比为 1:1。主电路仿真参数如表 1 所示。

图 5 所示为直流变压器原、副边的输入、输出电压。直流变压器各子模块电容初始电压为 0,经充电过程和系统调节过程后。由图 5 中可以看出,在 3.5 s 左右系统达到稳态。各子模块的电压平衡

表 1 主电路仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of the system

参数	数值
输入电压/kV	2
输出电压/kV	10
每桥臂模块数	4
逆变侧调制方式	4/1 调制
整流侧调制方式	3/2 调制
负载/ Ω	50

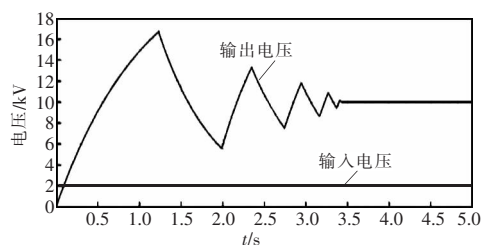


图 5 直流变压器输入、输出电压

Fig.5 Input and output voltages of DC/DC converter

策略由软件自动调节和分配各模块开通关断。当增加系统中各子模块电容电压预充电时,可减小系统的调节时间及系统超调量,其输入、输出电压如图 6 所示。系统在 3 s 左右进入稳态,且最大超调量小于未经过电压预充电时。

逆变器第 1 桥臂各模块电压如图 7 所示。由图 7 可以看出,桥臂子模块的电容电压分配平均,电

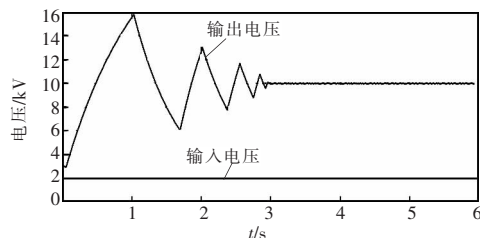


图 6 子模块预充电后输入、输出电压

Fig.6 Input and output voltages with submodules precharge

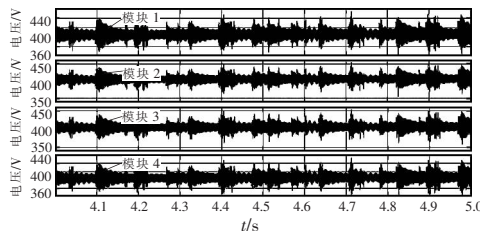


图 7 逆变侧第 1 桥臂各模块电压

Fig.7 Voltage of SMs in the first arm of the inverter

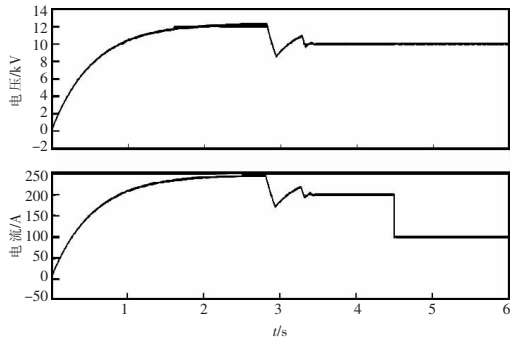


图 8 负载切换时电压、电流波形

Fig.8 Voltage and current waveforms with load changing

压波动范围在 10%以内。图 8 是系统进入稳态后,在 4.5 s 时刻,负载由 50 Ω 切换至 100 Ω 时的电压、电流。由图可见,经过短暂的调节过程,系统电压依然稳定在 10 kV 的指令电压附近,而电流则由 200 A 降至 100 A。根据仿真结果可以看出,系统所用调制方法能够在中、高压领域实现高升压比。

4 结语

本文研究了基于模块化多电平变换器的直流变压器拓扑的运行方式,讨论了该结构常用的调制控制策略。经过分析,本文提出不依赖变压器变比的调制策略,可以灵活调节拓扑中各桥臂模块的通断改变电压变比;从电容均压、控制调节等方面进行了优化,实现了 F2F 结构直流变压器的高升压比调节。最后,本文在 Matlab/Simulink 中进行仿真,算例结果验证了所提方法的可行性。

参考文献:

- [1] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15):3-14.
Tang Guangfu, He Zhiyuan, Pang Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15):3-14(in Chinese).
- [2] 陈霞,林卫星,孙海顺,等. 基于多端直流输电的风电并网技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7):60-67.
Chen Xia, Lin Weixing, Sun Haishun, et al. LCC-MTDC technology for wind farms integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7):60-67(in Chinese).
- [3] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34):6007-6020.
Yao Liangzhong, Wu Jing, Wang Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34):6007-6020(in Chinese).
- [4] Lesnicar A, Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C] // Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna. IEEE, 2004, 3:6.
- [5] 石绍磊,李彬彬,张毅,等. 模块化多电平型高压 DC/DC 变换器的研究[J]. 电源学报, 2015, 13(6):110-116.
Shi Shaolei, Li Binbin, Zhang Yi, et al. Research on modular multilevel high voltage DC/DC converter[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(6):110-116(in Chinese).
- [6] Barker C, Davidson C, Trainer D, et al. Requirements of DC-DC Converters to facilitate large DC Grids[C]. Cigre, SC B4 HVDC and Power Electronics, 2012.
- [7] Engel S P, Stieneker M, Soltan N, et al. Comparison of the modular multilevel DC converter and the dual-active bridge converter for power conversion in HVDC and MVDC grids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(1): 124-137.
- [8] Lachichi A. DC/DC converters for high power application: A survey[C]// International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. IEEE, 2013:1-4.
- [9] Kenzelmann S, Rufer A, Dujic D, et al. Isolated DC/DC structure based on modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(1):89-98.
- [10] 鲁宗相,蒋锦峰. 解读美国"Grid"2030"电网远景设想[J]. 中国电力企业管理, 2004, 5:38-41.
Lu Zongxiang, Jiang Jinfeng. Explain American "Grid2030" power grid's perspective plan[J]. China Power Enterprise Management, 2004, 5:38-41(in Chinese).
- [11] Blaabjerg F, Ma Ke. Future on power electronics for wind turbine systems[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(3):139-152.
- [12] Gowaid I A, Adam G P, Massoud A M, et al. Quasi two-level operation of modular multilevel converter for use in a high-power DC transformer with DC fault isolation capability

- ity[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(1): 108-123.
- [13]徐政, 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [14]Li Zixin, Wang Ping, Zhu Haibin, et al. An improved pulse width modulation method for chopper-cell-based modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(8):3472-3481.
- [15]Cui Yuqing, Chen Yu, Kang Yong, et al. Comparison study of the fundamental switching frequency modulation for Dc-Dc modular multilevel converter[C]// Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, 2015:6798-6803.
- [16]Zhao Biao, Song Qiang, Li Jianguo, 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, 2016, 32(5):3413-3424.
- [17]Kenzelmann S, Rufer A, Vasiladiotis M, et al. A versatile DC-DC converter for energy collection and distribution using the Modular Multilevel Converter[C]//European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2011: 1-10.



史书怀

作者简介:

史书怀(1991-),男,通信作者,博士研究生,研究方向:高压大功率 DC/DC 变换器的拓扑、控制及调制策略等,E-mail: shishuhuai@126.com。

王丰(1983-),男,博士,讲师,研究方向:电力电子技术在新能源发电中的应用,直流电力电子变流器,E-mail: fengwang ee@xjtu.edu.cn。

朱彦霖(1994-),男,硕士研究生,研究方向:高压大功率 DC/DC 变换器建模与调制策略,E-mail: jsqdzyl@hotmail.com。

朱田华(1992-),女,博士研究生,研究方向:宽禁带半导体器件、光伏最大功率跟踪技术、分布式最大功率跟踪等,E-mail: 1242394177@qq.com。

卓放(1962-),男,中国电源学会高级会员,博士,教授,研究方向:电能质量控制技术,新能源发电并网技术,直流电力电子变流器,微型电网变流器控制技术,微网系统阻抗测量方法及其稳定性分析技术,E-mail: zffz@mail.xjtu.edu.cn。