

模块化多电平型中高压直流变压器拓扑与控制综述

王学成¹, 段天元², 田艳军¹, 杨迪³, 徐小奇¹

(1. 华北电力大学河北省分布式储能与微网重点实验室, 河北保定 071003; 2. 国网浙江省电力有限公司舟山供电公司, 浙江舟山 316000; 3. 国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北唐山 063000)

摘要: 中高压直流变压器是直流输电系统中进行新能源发电直流汇集与电压变换的关键设备之一。模块化多电平型直流变压器(modular multilevel DC transformer, MMDCT)模块化程度高、电压扩展能力强, 是高压大功率直流电能变换的主流技术方案, 呈现出迅猛的发展趋势。首先梳理了中高压直流变压器的典型应用场景, 然后归纳整理了MMDCT的典型拓扑结构。在此基础上, 分别对MMDCT的调制策略、电容电压均衡控制方法、环流抑制策略、功率控制方案、实验样机和应用等关键技术问题进行归纳分析与总结。最后, 展望了MMDCT今后的发展趋势, 总结了在未来直流电网中MMDCT所承担的多功能角色以及多方向的技术挑战。

关键词: 直流变压器; 模块化多电平换流器; 直流电网; 拓扑结构; 控制策略

Review of Topology and Control Strategy of Modular Multilevel Medium and High Voltage DC Transformer

WANG Xuecheng¹, DUAN Tianyuan², TIAN Yanjun¹, YANG Di³, XU Xiaoqi¹

(1. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-Grid, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 2. Zhoushan Power Supply Company of State Grid Zhejiang Power Grid Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang 316000, China; 3. Tangshan Power Supply Company of State Grid Jibei Power Grid Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract: Medium and high voltage direct current (DC) transformer is one of the key equipments for DC collection of new energy generation and voltage conversion in DC transmission and distribution system. Modular multilevel DC transformer (MMDCT) has high modularity and strong voltage expansion ability, which is the mainstream technical solution of high voltage and high power DC energy conversion, showing a rapid development trend. The typical application scenarios of medium and high voltage DC transformers are summarized, and then the typical topology of MMDCT is summarized. On this basis, the key technical problems of MMDCT such as modulation strategy, capacitor voltage balancing control method, circulating current suppression strategy, power control scheme, prototype and application, are analyzed and summarized. Finally, the development trends of MMDCT in the future are prospected, and the multi-functional roles and the multi-direction technical challenges of MMDCT in the future DC power grid are summarized.

Key words: DC transformer; modular multilevel converter; DC grid; topology; control strategy

0 引言

与高压交流 (high voltage alternating current, HVAC) 输电系统相比, 高压直流 (high voltage direct current, HVDC) 输电系统在稳定特性、传输损耗等方面具有显著优势, 在远距离输电、新能源汇集并网和孤岛供电等场合具有重要的应用前景^[1-2]。当前以光伏、风电为代表的可再生能源的渗透率正在持续提升, 以 HVDC 技术为核心的直流输配电系统被视为解决大规模可再生能源接入电网时消纳问题的解决方案之一^[3-4]。

在直流输配电系统中, 电气隔离和电压变换需要借助核心设备直流变压器 (direct current transformer, DCT)^[5-6], 其通过电力电子变流器和变压器的融合实现直流电能变换。与传统的工频交流变压器不同, DCT 基于电力电子变流电路, 可实现快速电压调节、潮流控制, 以及故障隔离等功能, 有效提高了直流输配电系统的安全性和稳定性^[1-9]。可以预见, DCT 将成为传统交流电网向交直流混联、直流输配电以及智能电网迈进的关键核心装备。

DCT 需要对开关器件或者模块进行串并联才能应用于中高压直流电能变换领域, 串联开关器件 (series switching devices, SSA) 面临动态和静态的均压、均流等技术难题^[8], 同时模块内变压器的绝缘等级相应提高, 导致功率密度受限, 因而限制了其大范围应用^[9-10]。此外, 有学者研究了基于晶闸管的谐振式 DCT 和谐振开关电容 DCT, 但在大功率场合应用时, 面临开关损耗较高、无源器件应力大等技术问题^[11-12]。

模块化多电平换流器 (modular multilevel converter, MMC) 是高压大功率电能变换领域的典型拓扑之一, 主电路桥臂采用多个子模块 (submodule, SM) 串联的模式保证可扩展性, 通过设置冗余模块提高可靠性, 在高压大功率领域具有显著优势^[13]。模块化多电平型直流变压器 (modular multilevel direct current transformer, MMDCT) 通过级联 MMC 变流器与中频变压器, 实现 DC/AC-AC/DC 的间接直流变换, 是中高压直流电能变换的主流技术方案, 因而近些年开展了广泛的研究^[6, 14-19]。但是, 目前对 DCT 的研究多集中于中低压配网领域, MMDCT 仍处于计算机仿真和

实验室样机阶段, 有必要对其拓扑和运行控制技术等方面进行归纳分析与总结。

本文首先梳理了中高压直流变压器的典型应用场景, 然后归纳整理了 MMDCT 的典型拓扑结构。在此基础上, 分别对 MMDCT 的调制策略、电容电压均衡控制方法、环流抑制策略、功率控制方案、实验样机和应用等关键技术问题进行归纳分析与总结。最后, 展望了 MMDCT 今后的发展趋势, 总结了在未来直流电网中 MMDCT 所承担的多功能角色以及多方向的技术挑战。

1 中高压直流变压器典型应用场景

1.1 新能源直流汇集

目前, 新能源汇集方案可分为两种: 交流汇集和直流汇集^[14]。以海上风电为例, 在交流汇集中, 需要体积庞大的工频变压器升压, 通过长距离的交流海底电缆传输电能。交流汇集方案主要有两大劣势: 1) 大容量的工频变压器增加了海上平台的体积和重量, 导致海上平台成本昂贵; 2) 长距离交流海底电缆的电容效应需要额外的传输容量, 并且增加了交流汇集系统的损耗。

随着新能源并入电网规模的提升, 采用直流汇集, 直流送出的方式凭借其在经济性、稳定性上的优势, 具有更好的应用前景。典型的海上风电场直流汇集系统如图 1 所示, 风机通过中压 DCT 升压至中压直流, 在中压直流母线处汇集, 经高压 DCT 升压至 HVDC, 最后通过直流海底电缆送出。在新能源直流汇集中, 新能源场站向电网单向输送电能, 可以采用单向 DCT 来节省成本。另外, 若使用高压 DCT 连接来自不同地区的新能源场站, 协调调度电力, 可以显著降低发电量波动对电力系统带来的负面影响。直流汇集的优势主要包括: 1) DCT 通过级联电力电子变流电路与中频隔离变压器替代传统的工频交流变压器, 减轻了海上平台的体积和重量; 2) 电能变换级数减少, 系统稳定性强; 3) 直流海底电缆制造成本低、结构简单、损耗小。

1.2 不同电压等级/类型直流系统互联

近年来, 我国投运的 HVDC 输电工程持续增加, 未来可以将这些 HVDC 输电工程连接进行能量交换, 形成直流超级电网, 为电力系统提供更多的灵活性^[5]。由于相关技术标准的缺乏以及规划建设时间的不同, 造成不同的 HVDC 输电工程不可避免

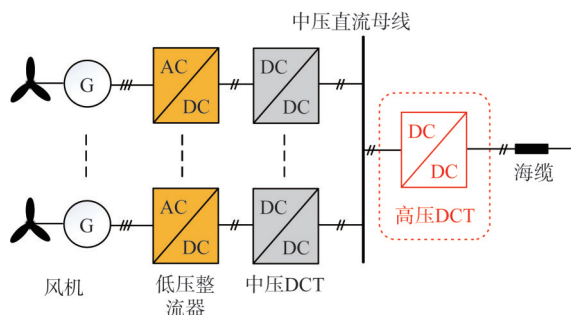


图1 海上风电场直流汇集

Fig. 1 Offshore windfarm DC collection schemes

的出现了电压等级和类型(电网换相换流器型和电压源换流器型)等特性的差异。正如不同电压等级的交流系统相连接时需要交流变压器,直流电网也需要高压大功率的DCT对直流系统进行互联,如图2所示。此类场景中,DCT的特点主要包括:1)电压变比通常不高;2)功率双向流动,灵活的潮流控制能力;3)直流故障隔离能力从而节省直流断路器费用。与交流断路器相比,直流断路器需要在没有电流过零点的情况下切断故障电流,因此直流断路器制造困难,成本高昂,并且直流断路器还会增加整个系统的体积。另外,若某一HVDC输电系统退出运行,将对电网的正常运行带来极大的影响,因此高压DCT具备直流故障隔离能力至关重要。

2 MMDCT的典型拓扑

MMDCT的拓扑分为系统级拓扑和子模块拓扑,系统级拓扑又可以分为隔离型和非隔离型两类。在直流电网中,DCT通常需要具备电气隔离能力,非隔离型DCT在实际工程中应用较少,因此本文主要讨论隔离型MMDCT。对于MMDCT的子模块拓扑,文献[6]中已经进行了详细的归纳整理,根据是否具有SSA,本文将MMDCT系统级拓扑分为3类:MMC型、串联混合型和并联混合型。

2.1 MMC型MMDCT

为了避免SSA的动静态均压均流和模块内变压器绝缘等级高等技术难题,S. Kenzelmann等人提出了采用单一集中式的中频变压器连接两个MMC的MMDCT^[17],采用了与图2中“背靠背”连接相反的DC/AC/DC连接方式,被称为“面对面”连接,如图3所示。由于MMDCT提升了频率,中频变压器和MMC中的桥臂电感、电容等无源器件的体积和重量大大减轻。两端口MMDCT中同时闭锁两侧的

MMC便可以隔离直流故障;多端口MMDCT中,某一端口故障时需要闭锁所有端口,为了不影响非故障端口的功率交换,应采用具有故障阻断能力的SM^[18]。

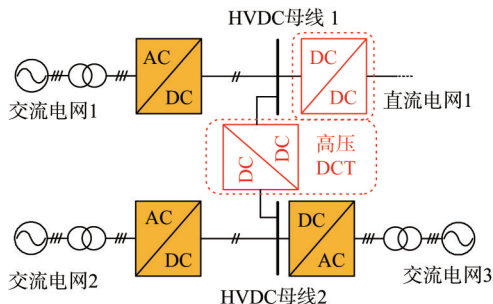


图2 未来直流电网中直流系统互联

Fig. 2 DC system interconnection in the future DC grid

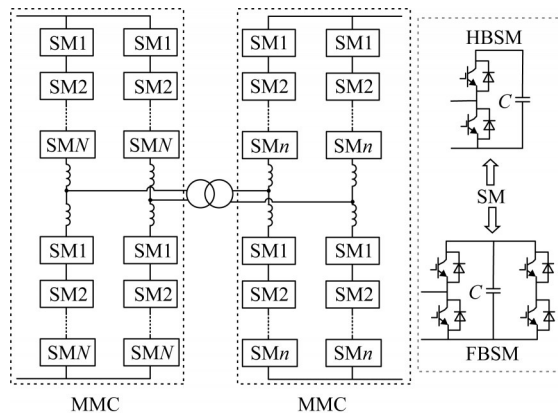


图3 MMC型MMDCT

Fig. 3 MMC-based MMDCT

MMDCT的工作原理与双有源桥式(dual active bridge, DAB)变换器类似,功率从电压相角超前中频隔离变压器漏感的一侧流向滞后一侧,调节漏感两端电压的相角差和幅值便可以控制功率的大小和流向,融合了DAB变换器简单高效的功率控制能力。MMC通过切换投入和切除的SM数量来调整交流电压波形,SM通常为半桥子模块(half bridge SM, HBSM)或全桥子模块(full bridge SM, FBSM),HBSM可以输出零电压和正电压,FBSM还可以输出负电压。不同于MMC,MMDCT中的交流电压为中间环节,不必为正弦波,也可以是准两电平波或三角波等^[20-21]。

在极端天气下,HVDC输电系统通常会降压运行,这对直流变压器的宽电压范围运行提出了要求。电流源型DAB变换器比电压源型DAB变换器

具有更宽的输入电压范围, 同样地, 文献[22-23]将MMDCT桥臂中的独立电感修改为耦合电感进行储能, 上下桥臂采用非互补调制, 为电流源型变换器, 在直流母线电压发生变化时桥臂电压保持不变, 保证了电压变比始终处于匹配状态, 提高了MMDCT的运行效率。然而, 其功率双向调整能力弱于基于电压源型变换器的MMDCT。

MMC型MMDCT采用了两个大容量的MMC, SM利用率仅50%, 体积和重量非常大, 限制了其在对体积要求敏感的海上平台等领域的应用。

2.2 串联混合型MMDCT

基于优化体积和重量的目的, 一些学者研究了串联混合型MMDCT, 保留了串联的SM并引入了SSA, 降低了开关器件和电容的数量。文献[24]提出了基于桥臂交替导通型换流器(alternate arm converter, AAC)的MMDCT, 每个桥臂由FBSM和SSA串联组成, 串联的FBSM为整形电路, 如图4所示。AAC型MMDCT每相上下桥臂各互补地工作半个周期, 消除了MMC中的环流问题, 有效降低了开关器件的额定容量, 避免了额外的损耗; 调节整形电路可以实现SSA零电压开通关断, 简化了动态均压问题^[25]。AAC采用了具有直流故障隔离能力的FBSM, 但是所需开关器件是HBSM的两倍, 不利于MMDCT功率密度的提高。

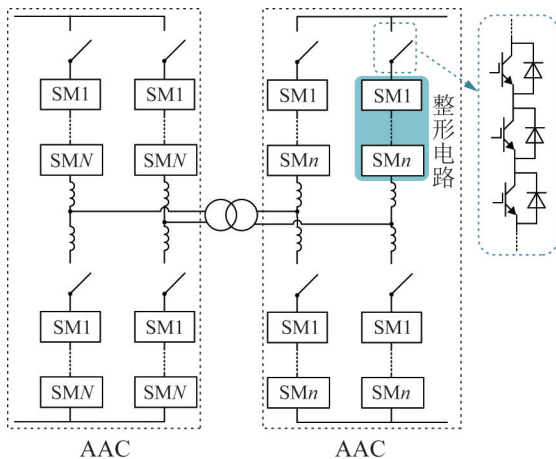


图4 AAC型MMDCT

Fig. 4 Alternate arm converter based MMDCT

文献[26]提出了基于过渡桥臂多电平型换流器(transition arm multilevel converter, TAMC)的MMDCT, 桥臂由串联的SM或者SSA组成, SSA可以同时位于上桥臂或下桥臂, 串联的SM为整形

电路, 如图5所示。TAMC比MMC节省了约12%的开关器件, 中高压情况下SM杂散电感就可以满足桥臂限流电感需求, 由于引入了SSA, 桥臂SM电容数量减少一半并且在容值降低的情况下纹波电压更小。然而, TAMC的SSA软开通硬关断, 需考虑动态均压问题。

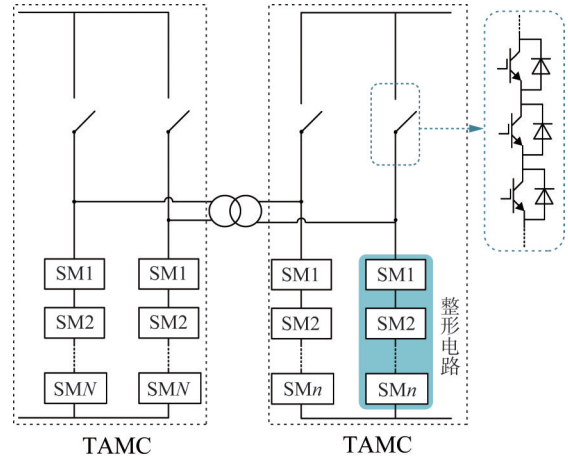


图5 TAMC型MMDCT

Fig. 5 Transition arm multilevel converter based MMDCT

相较于MMC型MMDCT, 基于AAC和TAMC的MMDCT开关器件和电容的数量有所降低, 但是成本和体积仍然较高。

2.3 并联混合型MMDCT

在单相H桥变换器中, 直流母线的纹波电压会直接传输到交流侧, 在直流侧并联电容降低纹波电压可以减缓这种耦合效应, 但是如果在直流侧用正弦波生成电路代替电容器, 则可以在交流侧得到理想的正弦波, 借鉴这一思想, 文献[27]提出了一种并联混合型MMDCT, 每相由串联的SM和SSA构成的H桥并联组成, 串联的SM为整形电路, 工作时相位互差120°, 如图6所示。并联混合型MMDCT的开关器件数量和储能电容容量显著降低, 进一步减少了投资成本。

隔离型MMDCT具有电气隔离环节, 但存在DC/AC和AC/DC两级电能变换, 中间交流级需要中频隔离变压器。MMDCT中, 电容占据系统体积的主导地位^[28], 混合型MMDCT由于降低了电容数量, 具有较高的功率密度和较低的成本, 但与工频交流变压器相比仍不具有明显优势。此外, 大容量中频变压器设计难度大, 在磁芯材料、绝缘和散热等方面存在许多技术难题, 限制了MMDCT的大

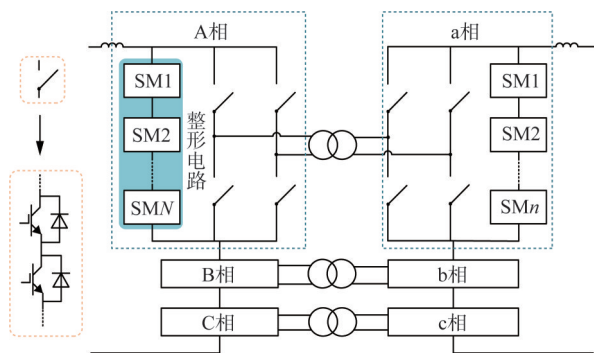


图6 并联混合型MMDCT

Fig. 6 Parallel hybrid MMDCT

范围应用。

3 MMDCT的运行控制

MMDCT的运行控制策略主要包括：调制策略、电容电压均衡控制方法、环流抑制策略和功率/电压控制方案。

3.1 调制策略

MMDCT的调制是指如何投切SM来逼近中间交流波形，目前MMC中应用较多的调制方式可分为脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)和阶梯波调制两种。PWM调制主要包括载波移相PWM调制(carrier phase shifted PWM, CPS-PWM)和载波层叠PWM调制(phase disposition PWM, PDPWM)等；阶梯波调制主要是指最近电平逼近调制(nearest level modulation, NLM)。PWM的开关频率远高于交流电压频率，但是具有良好的谐波特性^[30]。NLM在SM较多时谐波特性良好，控制简单，但是排序法电容电压均衡环节导致开关频率不固定，最高可达SM数量乘以交流电压频率^[31]。在MMDCT中，交流电压的频率为500 Hz~1 kHz，若延续MMC中的调制方式，开关频率将非常高，带来的开关损耗将会严重损害MMDCT的运行效率。

为了降低MMDCT运行时的开关频率，一些学者研究了基频调制方法，开关频率等于交流波形频率^[17, 21, 32-36]，主要包括三角波调制、正弦波调制和准两电平调制等，如图7所示。图7中 $g_1 \sim g_N$ 为相应调制策略生成的驱动信号。

保持MMDCT同一桥臂中每个SM驱动信号的占空比为50%，移相角为 π/N (N 为每个桥臂中SM的数量)，在SM数量足够多的情况下，生成的波形近似为三角波^[21]，桥臂等占空比驱动信号的实现过

程如图7(d)所示。三角波调制算法简单，不需要计算不同SM的移相角，但三角波调制下桥臂电流有效值较大，导致导通损耗过高。同样的，保持同一桥臂中每个SM驱动信号的占空比为50%，通过一定算法计算每个SM的移相角，合成的波形可以逼近正弦波^[33-34]，这种调制方法改进了传统NLM中逼近正弦波的方法，开关频率降低为基频。正弦波

调制谐波特性良好，但是功率传输能力较差、储能电容容量较大。此外，三角波调制和正弦波调制下SM的软开关较难实现。

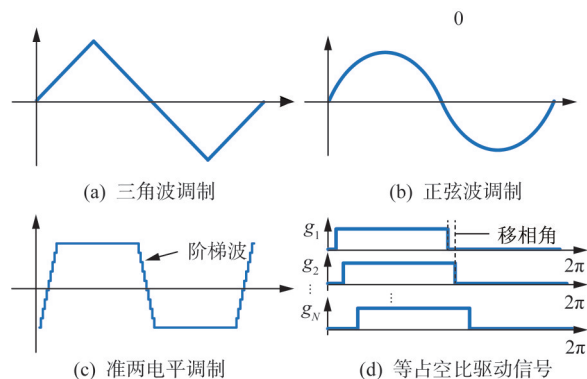


图7 MMDCT的调制波形

Fig. 7 Modulated waveform of MMDCT

借鉴DAB变换器中两电平调制的思想，控制MMC交流侧输出正电压时每个桥臂投入的SM数量不变，负电压时亦如此，在交流侧可以生成两电平波形^[17]，然而，两电平调制陡峭的上升沿和下降沿带有高 dv/dt ，给中频隔离变压器的绝缘带来了破坏性的伤害和不可忽视的电磁干扰，难以应用在实际工程中。准两电平调制将两电平调制陡峭的上升沿和下降沿调整为可控斜率的阶梯波，有效地减缓了两电平调制的高 dv/dt ^[20]。准两电平调制有许多优点：1)功率传输能力强；2)仅在生成阶梯波时上下桥臂同时有SM投入，因此环流大大减小，进而使桥臂电感和SM电容容量降低；3)SM的软开关易于实现。然而，直流母线会出现三次谐波电压，导致直流母线出现纹波电流，需要装设直流滤波器，直流母线电流控制能力较差；准两电平波中的高次谐波加剧了中频变压器的设计制造难度。降低阶梯的斜率，进而降低准两电平调制中稳态时间的占比，可以减轻直流母线的滤波要求^[37]。根据面积等效原理，改变准两电平调制的幅值和零电平占空比，在一定程度上可以优化准两电平调制的谐波特

性^[38], 但是直流电压利用率有所降低。为了提升准两电平调制直流母线电流控制能力, 文献[32]提出了一种方波移相调制方法, 保留准两电平调制优点的同时改善了直流母线电流控制能力, 然而, 其开关频率略大于交流波形频率, 开关损耗有所增加, 软开关也因此难以实现。此外, 也有学者提出了变占空比的基频调制方法, 但是每个 SM 的平均占空比为 50 %^[20, 39]。准两电平调制凭借在功率传输能力、软开关特性和所需电容容量等方面具有显著优势, 受到学术界和工业界的广泛关注^[23, 35-39]。

根据上述分析, 表 1 总结了 MMDCT 中基频调制方法详细的性能比较。

表 1 MMDCT 中调制方法性能比较

Tab. 1 Performance comparison of modulation methods for

MMDCT

类型	三角波调制	正弦波调制	准两电平调制
功率传输能力	弱	强	最强
回流功率	低	最低	高
直流电压利用率	低	高	最高
调制算法复杂度	低	高	低
隔离变压器损耗	低	最低	高
开关电流应力	大	小	最小
软开关实现	难	难	容易
SM 电容容量	高	高	低

3.2 电容电压均衡控制

在 MMDCT 的每个运行周期中, SM 驱动信号的差异导致 SM 电容充放电特性不一致, 进而造成了 SM 电容电压的不均衡, 存在系统无法正常运行的风险。

MMDCT 中均衡电容电压主要有两种方案: 拓扑均压; 控制算法均压。拓扑均压在子模块间增加辅助电路便可以实现^[40], 降低了控制复杂度, 但是辅助电路增加了整个系统的功耗和体积。根据 3.1 节的分析, 基频调制方法更适用于 MMDCT, 故本文主要调研基频调制方法下的控制算法均压。

文献[17, 41]指出在 MMDCT 中将 SM 按照一定顺序轮换投切, 便可以实现 SM 的电容电压均衡。这种方法为开环控制, 算法复杂度低, 易于实现, 但考虑 SM 参数差异、驱动信号延迟时, SM 电容电压难以实现均衡。

基频调制方法下 MMDCT 的驱动信号中桥臂电流的方向会发生变化, 一部分时间给电容充电, 一

部分时间给电容放电, 如图 8 所示。因此, MMC 中基于桥臂电流方向的电容电压均衡控制方法不适用于基频调制的 MMDCT。由于同一桥臂的 N 个驱动信号在 SM 电容上产生的电荷变化量之和为 0, 因此如果每个 SM 在 N 个运行周期都可以接收到全部的 N 个驱动信号便可以均衡电容电压^[42]。文献[21]根据上述思想, 将桥臂内上一个运行周期的最后一个驱动信号分配给第一个 SM, 其他驱动信号按顺序分配给第 2— N 个 SM, 有效均衡了电容电压, 然而这种方法每次交替一个驱动信号, SM 电容先充电后放电, 导致纹波电压较大。每次交替多个驱动信号^[39]或者对驱动信号在 SM 电容上产生的电荷变化量进行排序^[42], 可以有效降低 SM 电容纹波电压。对每个驱动信号在 SM 电容上产生的电压变化量和 SM 电容电压分别进行排序, 然后重新分配驱动信号, 可以进一步降低 SM 电容纹波电压^[33-35], 这种方法被称为双排序法, 控制框图如图 9 所示。图 9 中: $V_{cl}-V_{cn}$ 为 SM 电容电压; V_{c0} 为上一周期 SM 电容电压; ΔV_{cl} 为 SM 电容电压变化量; $g'_1-g'_N$ 为经过双排序法重新分配的驱动信号。

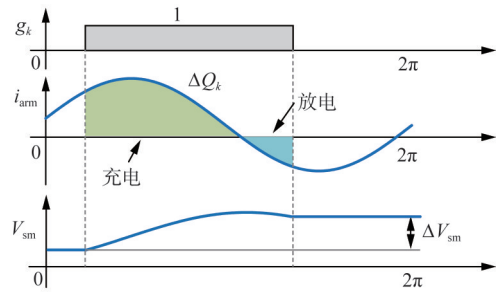


图 8 一个具有正电压变化量的驱动信号

Fig. 8 A drive signal with positive voltage difference

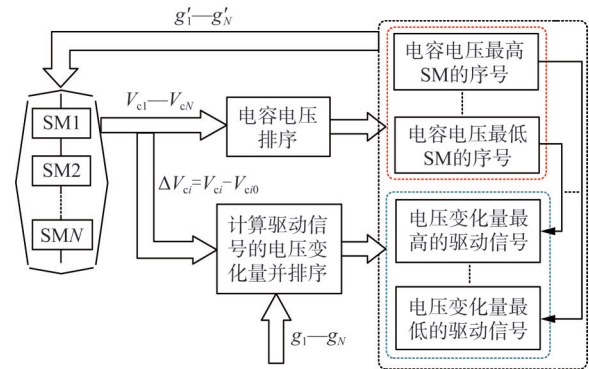


图 9 双排序法电容电压均衡策略的框图

Fig. 9 Block diagram of double-sorting capacitor voltage balance strategy

文献[39, 43]指出基频调制方法下驱动信号在 SM 电容上产生的电荷变化量随着移相角的增大而降低, 因此仅对 SM 电容电压排序也可以到与双排序法同样的效果, 但是文献[44]指出当 $V_1/(nV_2)$ (V_1 为原边直流母线电压, n 为变压器匝数比, V_2 为副边直流母线电压) 大于 1.1 时, 这种情况不再成立, 需要重新排序驱动信号在 SM 电容电压上产生的电荷变化量, 工作模式不改变时电荷变化量也不改变, 仅需进行一次排序。

以上控制算法均是基于连续控制, 文献[45]提出了考虑数字控制延迟的双排序电容电压均衡策略。为了更直观地展示基频调制下电容电压均衡策略的特点, 表 2 对其进行了汇总, 表中的 T_s 为开关周期。

表 2 基频调制下电容电压均衡策略特点

Tab. 2 Characteristics of capacitor voltage balance strategy with fundamental frequency modulation

方法	算法复杂度	纹波大小	均衡周期	参考文献
轮换均衡	低-	大++	约 NT_s	[17, 41]
单信号交替	低	大+	NT_s	[21]
多信号交替	低	大	NT_s	[39]
驱动信号排序	高	小	NT_s	[42]
电容电压排序	高	小-	约 T_s	[39, 43]
双排序	高++	小-	约 T_s	[33-34]
改进双排序	高+	小-	约 T_s	[44]

3.3 环流抑制

MMDCT 中, 每个运行周期中均会出现上下桥臂同时有 SM 投入的时刻, 这时, MMDCT 中会出现桥臂环流。环流增加了 MMDCT 开关器件的损耗、额定容量和电流应力。

目前 MMDCT 的环流抑制策略可分为两类: 硬件法; 软件法。硬件法主要包括增大桥臂电感值或在桥臂上增设滤波器, 然而这会增加整个系统的体积和成本。软件法主要是指通过控制算法抑制环流。

正弦波调制下, 将原先桥臂的参考电压减去环流在桥臂上引起的不平衡压降得到新的参考电压便可以抑制环流。具体的闭环控制方法通常包括二倍频负序 dq 坐标系下的比例积分控制和 abc 坐标系下的比例谐振控制等^[46]。

准两电平调制下, 稳态时 MMDCT 每相一个桥臂的 SM 全部投入, 一个桥臂的 SM 全部切除, 电

流仅在 SM 全部切除的桥臂流动, 此时环流没有流通过径^[17]; 生成阶梯波时每相上下桥臂均有 SM 投入, 此时环流存在流通过径, 但生成阶梯波的时间在每个运行周期中占比很低。在三角波和正弦波调制中, 绝大部分时间每相上下桥臂都有 SM 投入, 环流在这些时间内流通。因此, 准两电平调制下的环流比三角波和正弦波调制低得多。

对于准两电平和三角波调制方法下 MMDCT 的环流抑制目前少有研究。基于电流源型变换器的 MMDCT 通过调节占空比可以直接控制直流母线电流, 有利于抑制桥臂环流^[22, 43]。

3.4 功率/电压控制

目前 MMDCT 的功率/电压控制策略主要有两种。

1) 直流变压控制: 一次侧变换器将直流电逆变成交流, 经交流变压器变换电压, 二次侧变换器再将交流电整流为直流电。通常一次侧变换器采用定交流电压幅值控制或开环控制, 二次侧变换器采用与 MMC 整流器相同的双闭环控制^[47], 典型的直流变压控制框图如图 10 所示。图 10 中: V_{ac1max}^* 、 V_{ac1max} 分别为一次侧相电压峰值的参考参考值与实际测量值; m 为一次侧调制度; P^* 、 Q^* 、 V_{dc2}^* 和 P 、 Q 、 V_{dc2} 分别为有功功率、无功功率和直流侧电压参考值与实际测量值; V_{d2}^* 、 i_{q2}^* 和 i_{d2} 、 i_{q2} 分别为二次侧 d 、 q 轴电流的参考值和实际测量值; V_{d2} 、 V_{q2} 分别为 d 、 q 轴电压; θ 为相位; V_{adc2}^* 为二次侧调制波。

2) 移相控制: 通过调整 MMDCT 中频变压器漏感两端交流电压之间的相角差便可以控制功率流动的大小和方向。移相控制无需坐标变换和锁相, 响应速度快, 得到较多使用。

原副边交流电压具有一个外移相角的单移相控制易于实现, 是目前 MMDCT 中广泛采用的功率控制策略^[17-21, 32-34], 文献[48]基于基波周期平均法研究了单移相控制下 MMDCT 的数学模型, 对调节器的设计给予了指导准则。基于单移相控制的典型功率/电压控制框图如图 11 所示, 原副边移相比和交流电压的幅值是调节 MMDCT 功率的两个自由度, 为了最大化直流电压利用率, 交流电压的幅值通常设置为理论最大值^[49], 因此移相比成为唯一的自由度。图 11 中: D 为移相比; V_p^* 和 V_s^* 分别为原、副边的交流电压幅值参考值。

单移相控制简单易行, 但轻载和电压变比不匹

序号	文献	年份	拓扑类型	交流频率	电压等级	传输功率	研究机构	应用场景
1	[48]	2017	MMC型	1 kHz	200 V/100 V	250 W	华中科技大学	舰船中压直流系统
2	[23]	2018	MMC型	40 kHz	375 V/250 V	3 kW	ABB	新能源直流汇集、储能
3	[28]	2023	MMC型	5 kHz~50 kHz	200 V/400 V	2.67 kW	上海交通大学	直流系统互连
4	[55]	2024	MMC型	4 kHz	300 V/450 V	2 kW	佐治亚理工学院	直流系统互联、电压变换
5	[26]	2018	TAMC型	250 Hz	300 V	1 kW	格拉斯哥卡利多尼亚大学	直流系统互连、电压变换
6	[27]	2023	并联混合型	50 Hz	200 V/260 V	450 kW	印度理工学院	直流系统互连、新能源直流汇集

1) 拓扑方面, 目前通过 SM 和 SSA 组成的混合型 MMDCT, 具有较高的功率密度和较低的成本, 但与工频变压器相比仍不具有明显优势。有必要从拓扑结构、参数设计、控制策略等方面进行优化, 使 MMDCT 轻型化。

2) 调制策略方面, 准两电平调制具有功率传输能力强、储能电容容量小、软开关特性好等诸多优势, 受到学者广泛关注, 但是其谐波特性较差, 直流母线具有纹波电流。目前对准两电平调制的优化方法均是在牺牲其某些特性的基础上实现的, 鲜有多目标优化的研究。

3) 环流抑制策略方面, 准两电平调制下 MMDCT 环流比正弦波和三角波调制低得多, 但是仍在一定程度上增加了开关损耗, 缩短了开关器件的寿命, 目前鲜有文献报道准两电平调制下 MMDCT 的环流抑制策略。

4) 故障隔离方面, 采用具有故障电流阻断能力的 SM, 可以有效避免多端口 MMDCT 某一端口故障时系统大范围停机, 常用的 FBSM 大大增加了 MMDCT 的投资成本, 因此, 研究低成本的新型 SM 对 MMDCT 的应用具有积极意义。MMDCT 发生故障时的运行控制, 是未来的重要研究方向之一。

5) 高压大容量中频变压器设计方面, 绝缘承受热、电压、机械应力复杂, 磁芯材料、结构、散热要求严苛, 设计时需要统筹兼顾, 目前尚未有统一的设计方法。此外, 准两电平调制中的高次谐波进一步加剧了高效高可靠性中频变压器的设计难度。

参考文献

- [1] 罗琴, 李丹, 潘广泽, 等. 中国柔性直流输电系统可靠性标准需求研究[J]. 南方电网技术, 2022, 16(2): 121 - 129.
LUO Qin, LI Dan, PAN Guangze, et al. Requirements analysis on reliability standards for flexible DC transmission system in China [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(2): 121 - 129.
- [2] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8 - 17, 24.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8 - 17, 24.
- [3] 熊雄, 季宇, 李蕊, 等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6802 - 6813, 7115.
XIONG Xiong, JI Yu, LI Rui, et al. An overview of key technology and demonstration application of DC distribution and consumption system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6802 - 6813, 7115.
- [4] 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 flexible HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3 - 14.
- [5] 林少伯, 李新年, 雷霄, 等. 张北柔性直流电网运行方式转换风险分析及预防措施[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4017 - 4025.
LIN Shaobo, LI Xinnian, LEI Xiao, et al. Risk analysis and prevention measures of operation mode transformation for Zhangbei VSC-based DC grid [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4017 - 4025.
- [6] 郑通, 王奎, 郑泽东, 等. 基于 MMC 拓扑的电力电子变压器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5630 - 5649.
ZHENG Tong, WANG Kui, ZHENG Zedong, et al. Review of power electronic transformers based on modular multilevel converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5630 - 5649.
- [7] 姜崇学, 马秀达, 邹强, 等. 柔性直流输电系统的高频谐波保护方法与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(3): 150 - 158.
JIANG Chongxue, MA Xiuda, ZOU Qiang, et al. High-frequency harmonic protection methods and engineering practice for flexible DC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(3): 150 - 158.
- [8] 邵帅, 汪欣, 张建佳, 等. 基于有源箝位的功率器件串联均压技术[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(5): 164 - 170.
SHAO Shuai, WANG Xin, ZHANG Jianjia, et al. Voltage balancing method for series-connected power devices based on active clamping [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 164 - 170.
- [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 DC Transformer based on dual-active-bridge [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 288 - 298, 418.
- [10] ORTIZ G, BIELA J, BORTIS D, et al. 1 Megawatt, 20 kHz, isolated, bidirectional 12 kV to 1.2 kV DC-DC converter for renewable energy applications [C]//The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA, June 21 - 24, 2010, Sapporo, Japan. New York: IEEE, 2010: 3212 - 3219.
- [11] JOVICIC D. Step-up DC-DC converter for megawatt size applications [J]. IET Power Electronics, 2009, 2(6): 675 - 685.
- [12] PARASTAR A, KANG Y C, SEOK J K. Multilevel modular DC/DC power converter for high-voltage DC-connected offshore wind energy applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2879 - 2890.
- [13] 陈新岗, 张金京, 马志鹏, 等. 基于 MMC 的光伏直流升压并网系统故障分析及限流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 145 - 154.
CHEN Xingang, ZHANG Jinjing, MA Zhipeng, et al. MMC-based fault analysis and current-limiting control strategy for a photovoltaic DC boost grid-connected system [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 145 - 154.
- [14] 徐政. 海上风电送出主要方案及其关键技术问题[J]. 电力系

- 统自动化, 2022, 46(21): 1-10.
- XU Zheng. Main schemes and key technical problems for grid integration of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 1-10.
- [15] 程启明, 孙英豪, 程尹曼. 非理想条件下 MMC-PET 非线性复合控制策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 1-12.
- CHENG Qiming, SUN Yinghao, CHENG Yinman. Nonlinear composite control strategy of MMC-PET under non-ideal conditions[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 1-12.
- [16] 程启明, 陈颖, 孙英豪, 等. 电网电压不平衡下 MMC-SST 反馈线性化滑模控制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 129-137.
- CHENG Qiming, CHEN Ying, SUN Yinghao, et al. Feedback linearization sliding-mode control strategy for MMC-SST under unbalanced power grid voltage[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 129-137.
- [17] KENZELMANN S, RUFER A, DUJIC D, et al. Isolated DC/DC structure based on modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 89-98.
- [18] 索之闻, 李庚银, 迟永宁, 等. 一种基于子模块混合型模块化多电平换流器的高压大功率 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3577-3585.
- SUO Zhiwen, LI Gengyin, CHI Yongning, et al. A cell-hybrid modular multilevel converter based high-voltage high-power DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3577-3585.
- [19] 杨浩, 周建萍, 黄烈钢, 等. 非理想条件下基于 SAADR-PI 的 MMC 型电力电子变压器 CCS-MPC 控制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(9): 11-22.
- YANG Hao, ZHOU Jianping, HUANG Liegang, et al. CCS-MPC control strategy for MMC power electronic transformers based on SAADR-PI under non-ideal conditions[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(9): 11-22.
- [20] 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[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 108-123.
- [21] ZHAO B, SONG Q, LI J, et al. Modular multilevel high-frequency-link DC transformer based on dual active phase-shift principle for medium-voltage DC power distribution application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1779-1791.
- [22] 孙长江, 张建文, 蔡旭, 等. 隔离型 MMC 直流变压器的电流源运行[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1977-1986.
- SUN Changjiang, ZHANG Jianwen, CAI Xu, et al. Current-fed operation of isolated MMC-based DC transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1977-1986.
- [23] SHI Y, LI H. Isolated modular multilevel DC-DC converter With DC Fault current control capability based on current-fed dual active bridge for MVDC application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2145-2161.
- [24] LÜTH T, MERLIN M M C, GREEN T C, et al. High-frequency operation of a DC/AC/DC system for HVDC applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4107-4115.
- [25] DAVIDSON C C, TRAINER D R. Innovative concepts for hybrid multi-level converters for HVDC power transmission [C]//9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2010), October 19-21, 2010, London. UK: IET, 2010: 1-5.
- [26] GOWAID I A, ADAM G P, MASSOUD A M, et al. Hybrid and modular multilevel converter designs for isolated HVDC-DC converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(1): 188-202.
- [27] ANSARI M S, RATH I C, PATRO S K, et al. High power parallel hybrid DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(1): 1077-1089.
- [28] ZHANG L, QIN J, QIU Y, et al. Analysis and evaluation of modular multilevel converters for DC-DC solid-state transformer based on different operating conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(12): 14898-14917.
- [29] 王新颖, 汤广福, 魏晓光, 等. MMC-HVDC 输电网用高压 DC/DC 变换器隔离需求探讨[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 172-178.
- WANG Xinying, TANG Guangfu, WEI Xiaoguang, et al. Discussion on isolation requirements of high voltage DC/DC converters for MMC-HVDC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 172-178.
- [30] 王琛, 许同, 王毅, 等. 一种适用于少子模块 MMC 的等效电平调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4954-4964.
- WANG Chen, XU Tong, WANG Yi, et al. An equivalent level modulation strategy for MMC with small quantities of submodules[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4954-4964.
- [31] 武鸿, 王跃, 薛英林, 等. 适用多功率的最近电平调制下 MMC 子模块开路故障诊断策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 233-245, 302.
- WU Hong, WANG Yue, XUE Yinglin, et al. A diagnosis strategy for open-circuit submodule faults in MMCs under nearest level modulation suitable for different powers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 233-245, 302.
- [32] MO R, LI H, SHI Y. A phase-shifted square wave modulation (PS-SWM) for modular multilevel converter (MMC) and DC transformer for medium voltage applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6004-6008.
- [33] CHEN Y, CUI Y, WANG X, et al. Design and implementation of the low computational burden phase-shifted modulation for DC-DC modular multilevel converter[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(2): 256-269.
- [34] 王新颖, 汤广福, 陈宇, 等. 一种模块化多电平 DC/DC 变换器的基频调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1987-1998.
- WANG Xinying, TANG Guangfu, CHEN Yu, et al. A fundamental frequency modulation for modular multilevel DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1987-1998.
- [35] JIN H, CHEN W, HOU K, et al. A sharing-branch modular multilevel DC transformer with wide voltage range regulation for DC distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5714-5730.
- [36] 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.
- [37] ANSARI M S, SHUKLA A, BAHIRAT H J. Analysis and design of MMC-based high-power DC-DC converter with trapezoidal modulation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(6): 7256 – 7270.
- [38] 孔祥平, 宾子君, 邓富金, 等. 基于隔离型模块化多电平直流/直流变换器的总谐波畸变率优化调制控制策略[J]. 现代电力, 2025, 42(2): 377 – 384.
- KONG Xiangping, BIN Zijun, DENG Fujin, et al. Optimal modulation control strategy for total harmonic distortion rate based on isolated modular multilevel DC/DC converter [J]. Modern Electric Power, 2025, 42(2): 377 – 384.
- [39] ZHANG L, QIN J, ZOU Y, et al. Analysis of capacitor charging characteristics and low-frequency ripple mitigation by Two new voltage-balancing strategies for MMC-based solid-state transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 1004 – 1017.
- [40] ZHENG T, GAO C, LIU X, et al. A novel high-voltage DC transformer based on diode-clamped modular multilevel converters with voltage self-balancing capability [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12): 10304 – 10314.
- [41] 孙谦浩, 李亚楼, 孟经伟, 等. 基于移相控制的高频链模块化多电平直流变压器分布式控制管理策略及轮换电容电压均衡方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1310 – 1318.
- SUN Qianhao, LI Yalou, MENG Jingwei, et al. Distributed control strategy and alternate modulation balance algorithm of high-frequency-link modular multilevel DC transformer based on phase-shifting principle [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1310 – 1318.
- [42] LI R, CHEN W, SHAO S, et al. A novel hybrid DC transformer combining modular multilevel converter structure and series-connected semiconductor switches [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5699 – 5713.
- [43] SUN C, ZHANG J, CAI X, et al. Analysis and arm voltage control of isolated modular multilevel DC-DC converter with asymmetric Branch Impedance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(8): 5978 – 5990.
- [44] SHAO S, JIANG M, ZHANG J, et al. A capacitor voltage balancing method for a modular multilevel DC Transformer for DC distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 3002 – 3011.
- [45] 盛景, 陈聪, 向鑫, 等. 模块化多电平谐振变换器多自由度调压控制及子模块电容均压方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6216 – 6229.
- SHENG Jing, CHEN Cong, XIANG Xin, et al. Multiple-degree-of-freedom control and capacitor voltage balancing method of modular multilevel resonant converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24): 6216 – 6229.
- [46] 郑征, 李佩柯, 李绍令, 等. 模块化多电平变换器分数阶PI- λ 环流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 113 – 121.
- ZHENG Zheng, LI Peike, LI Shaoling, et al. Fractional order PI λ circulating current suppressing strategy for modular multilevel converter [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 113 – 121.
- [47] 赵珊珊. 模块化多电平直流固态变压器建模与控制方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [48] CHEN Y, ZHAO S, LI Z, et al. Modeling and control of the isolated DC-DC modular multilevel converter for electric ship medium Voltage direct current power system [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 124 – 139.
- [49] YE Y, ZHANG X, GAO C, et al. Analysis and comparison of isolated high-gain high-voltage DC/DC converters for offshore wind farm collection and integration [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(7): 8757 – 8769.
- [50] 管州, 梅军, 丁然, 等. 基于拓展移相控制的直流配电网模块化多电平直流变压器 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(13): 2770 – 2781.
- GUAN Zhou, MEI Jun, DING Ran, et al. Modular multilevel DC transformer for DC distribution application based on extended phase-shift control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(13): 2770 – 2781.
- [51] 孙冠群, 尹项根, 赖锦木, 等. 模块化多电平直流变压器容错控制策略 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(S1): 246 – 256, 287.
- SUN Guanqun, YIN Xianggen, LAI Jinmu, et al. Fault tolerant control strategy for modular multilevel DC transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 246 – 256, 287.
- [52] 王朝辉, 王天威, 张军明. 模块化多电平直流变压器研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 31 – 39.
- WANG Zhaohui, WANG Tianwei, ZHANG Junming. Research on modular multilevel DC Transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 31 – 39.
- [53] WANG Y, SONG Q, ZHAO B, et al. Quasi-square-wave modulation of modular multilevel high-frequency DC converter for medium-voltage DC distribution application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7480 – 7495.
- [54] QIAO Y, ZHANG X, XIANG X, et al. Trapezoidal current modulation for bidirectional high-step-ratio modular DC-DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3402 – 3415.
- [55] YIN S, ZENG Z, DEBNATH S, et al. Modeling and ZVS operation of the isolated modular multilevel DC-DC converter with a unified trapezoidal wave modulation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(7): 8306 – 8322.

收稿日期: 2024-05-17; 网络首发日期: 2024-10-17

作者简介:

王学成(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为中高压直流变压器拓扑及其控制技术, 13093992319@163.com;

段天元(1989), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为柔性直流输电运维检修技术、高压直流断路器运维检修技术, duan1018jie@163.com;

田艳军(1986), 男, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为新能源发电、电力电子变流器串并联控制、级联变流器, yti@ncepu.edu.cn。